

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
INSTITUTO DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

SISTEMA DE MONITORAÇÃO E ESTIMATIVA DE PRODUÇÃO DE ENERGIA
ELÉTRICA DE SISTEMAS FOTOVOLTAICOS CONECTADOS À REDE NA
EDIFICAÇÃO DO GEDAE/UFPA

YAN DOS SANTOS SILVA

DM 27/2023

UFPA / ITEC / PPGEE
Campus Universitário do Guamá
Belém-Pará-Brasil
2023

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
INSTITUTO DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

YAN DOS SANTOS SILVA

SISTEMA DE MONITORAÇÃO E ESTIMATIVA DE PRODUÇÃO DE ENERGIA
ELÉTRICA DE SISTEMAS FOTOVOLTAICOS CONECTADOS À REDE NA
EDIFICAÇÃO DO GEDAE/UFPA

Dissertação submetida à Banca Examinadora do Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica da UFPA para a obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Elétrica na área de Sistemas de Energia Elétrica.

UFPA / ITEC / PPGEE
Campus Universitário do Guamá
Belém-Pará-Brasil

2023

**Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP) de acordo com ISBD
Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal do Pará
Gerada automaticamente pelo módulo Ficat, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)**

S586s Silva, Yan dos Santos.
Sistema de monitoração e estimativa de produção de energia elétrica de sistemas fotovoltaicos conectados à rede na edificação do GEDAE/UFPA / Yan dos Santos Silva. — 2023.
xvi, 149 f. : il. color.

Orientador(a): Prof. Dr. Marcos André Barros Galhardo
Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Pará,
Instituto de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Elétrica, Belém, 2023.

1. Sistemas Fotovoltaicos Conectados à Rede. 2.
Monitoração de SFCR. 3. Acesso Remoto. 4. Contribuição
Energética de SFCR. 5. Desempenho de SFCR. I. Título.

CDD 621.31244

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
INSTITUTO DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

“SISTEMA DE MONITORAÇÃO E ESTIMATIVA DA PRODUÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA DE SISTEMAS FOTOVOLTAICOS CONECTADOS À REDE NA EDIFICAÇÃO DO GEDAE/UFPA”

AUTOR: **YAN DOS SANTOS SILVA**

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO SUBMETIDA À BANCA EXAMINADORA APROVADA PELO COLEGIADO DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA, SENDO JULGADA ADEQUADA PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM ENGENHARIA ELÉTRICA NA ÁREA DE SISTEMAS DE ENERGIA ELÉTRICA.

APROVADA EM: 22/08/2023

BANCA EXAMINADORA:



Documento assinado digitalmente
MARCOS ANDRE BARROS GALHARDO
Data: 28/08/2023 18:53:46-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Marcos André Barros Galhardo
(Orientador – PPGEE/UFPA)



Documento assinado digitalmente
WILSON NEGRAO MACEDO
Data: 29/08/2023 10:07:31-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Wilson Negrão Macedo
(Avaliador Interno – PPGEE/UFPA)



Documento assinado digitalmente
EDINALDO JOSE DA SILVA PEREIRA
Data: 29/08/2023 09:42:12-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Edinaldo José da Silva Pereira
(Avaliador Externo ao Programa – FEEB/UFPA)



Documento assinado digitalmente
ALAAAN UBAIARA BRITO
Data: 28/08/2023 22:28:48-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Alaán Ubaiara Brito
(Avaliador Externo – UNIFAP)

VISTO:

Prof. Dr. Diego Lisboa Cardoso
(Coordenador do PPGEE/ITEC/UFPA)

AGRADECIMENTOS

Agradeço, em primeiro lugar, a Deus, por Sua orientação e força ao longo desta jornada.

À minha família, em especial aos meus pais, Socorro de Nazaré dos Santos Silva e Raimundo Sergio de Almeida Silva, e a todos os familiares, pelo constante apoio e incentivo que me proporcionaram.

Aos colegas de laboratório, cujo convívio e colaboração foram essenciais para esta jornada: Lucas Bulhosa, Luana Albuquerque, Gabriel Bastos e Victor Alves.

Minha gratidão se estende aos colegas e colaboradores que se uniram a mim nas atividades de campo, durante a execução desta pesquisa: Orlando Lemos, Felipe Cabral, Arthur Fonseca e Wesley Monteiro.

Aos professores Marcos Galhardo e Wilson Macêdo, expresso minha sincera apreciação pela paciência demonstrada, por compartilharem seus valiosos conhecimentos e por oferecerem orientação fundamental na elaboração deste estudo.

Ao Grupo de Estudos e Desenvolvimento de Alternativas Energéticas, agradeço pela acolhida e pelo fornecimento de um ambiente propício para a realização deste trabalho.

À generosidade do CNPq (Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico), que por meio da concessão de uma bolsa de estudos, proporcionou o suporte financeiro necessário durante todo o período de pesquisa no programa de pós-graduação.

Por fim, expresso minha gratidão a todos aqueles que, direta ou indiretamente, contribuíram para a realização deste estudo, e cujo apoio foi fundamental em cada etapa deste percurso acadêmico.

SUMÁRIO

SUMÁRIO.....	VI
LISTA DE ILUSTRAÇÕES	IX
LISTA DE TABELAS	XII
LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS	XIV
RESUMO	XV
ABSTRACT	XVI
INTRODUÇÃO.....	1
Objetivo Geral do Trabalho.....	2
Apresentação da Estrutura do Trabalho.....	3
CAPÍTULO 1 - GERAÇÃO FOTOVOLTAICA CONECTADA À REDE E CONSUMO DE ENERGIA ELÉTRICA NO GEDAE/UFPA.....	4
1.1 Caracterização da edificação do GEDAE.....	4
1.1.1 Fachada principal do prédio	5
1.2 Carga instalada	6
1.2.1 Demanda e consumo de energia elétrica na edificação o GEDAE	7
1.3 Medidas de Conservação de Energia (MCE) adotadas para redução do consumo energético	9
1.4 Sistemas fotovoltaicos conectados à rede instalados.....	11
1.4.1 Caracterização dos SFCR.....	12
1.4.2 Características dos Módulos Fotovoltaicos.....	13
1.4.3 Características dos Inversores	16
1.4.4 Diagrama de conexões dos SFCR	17
1.5 Trabalhos anteriores sobre monitoração dos SFCR no GEDAE	18
1.5.1 Monitoramento do sistema S8 (inversor Xantrex)	18
1.5.2 Monitoramento das grandezas elétricas do prédio do GEDAE.....	19
1.5.3 Monitoramento do sistema M1 (microinversor Enphase).....	22
1.5.4 Monitoramento do sistema S2 (inversor SMA)	23
1.5.5 Monitoramento dos sistemas S1, S2, S3, S4, S5, S6, S7, S8, M1, M2 e C1	25
1.5.6 Monitoramento do sistema S1 (inversor PHB)	25
1.5.7 Monitoramento dos sistemas M2 e S5 (microinversor Enphase e inversor SMA) ..	26
1.5.8 Informações adicionais.....	27
CAPÍTULO 2 – MEDIÇÃO E AQUISIÇÃO DE DADOS: FERRAMENTAS E METODOLOGIA PARA ESTIMATIVA DA PRODUÇÃO DE ENERGIA.....	31
2.1 Dispositivos de medição.....	31

2.1.1 Medidores Eletrônicos de Energia	31
2.1.2 Visor dos Inversores.....	32
2.1.3 <i>Datalogger/Online</i>	33
2.1.4 Medidores de Multigrandezas Elétricas	33
2.2 Dispositivos de aquisição de dados	36
2.2.1 Estação Meteorológica do GEDAE.....	36
2.2.2 Registrador de dados – <i>FieldLogger</i>	38
2.2.3 Dados da NASA	40
2.3 Metodologia	41
2.3.1 <i>Softwares</i> de aquisição de dados e simulação	42
2.3.2 Modelos matemáticos.....	44
2.3.3 Procedimentos para obtenção dos dados de temperatura ambiente e irradiância	49
2.3.4 Procedimentos para coleta e aferição dos dados de produção de energia elétrica dos SFCR.....	50
2.3.5 Procedimentos para tratamento dos dados de temperatura ambiente e irradiância..	51
2.3.6 Ferramentas computacionais para estimativa de produção de energia elétrica pelos SFCR.....	51
CAPÍTULO 3 – DESENVOLVIMENTO DO SISTEMA DE MONITORAÇÃO PARA OS SFCR	63
3.1 Projeto dos quadros dos SFCR.....	63
3.2 Calibração dos dispositivos de medição.....	68
3.3 Alterações no programa de aquisição e exibição dos dados.....	71
CAPÍTULO 4 – AVALIAÇÃO DOS RESULTADOS E DISCUSSÕES	78
4.1 Considerações preliminares acerca das condições atuais dos SFCR	78
4.2 Apresentação dos dados de geração obtidos pelos medidores de multigrandezas do sistema de monitoração	79
4.2.1 Validação dos dados de geração obtidos pelos medidores de multigrandezas do sistema de monitoração.....	86
4.3 Comparação dos resultados de simulação com os dados obtidos por meio de medição	88
4.3.1 Ponderações a respeito da geração e simulação após à implementação do quadro elétrico dos SFCR.....	92
4.3.2 Ponderações a respeito da geração e simulação nos anos anteriores à implementação do quadro elétrico dos SFCR	95
4.4 Avaliação do desempenho dos SFCR	103
4.4.1 Produtividade final (Y_F) dos SFCR	103
4.4.2 Rendimento global (PR) dos SFCR	112

4.5 Balanço Energético e Análise Econômica	120
4.5.1 Economia anual	124
CONCLUSÕES	131
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	134
APÊNDICE A – Lista completa dos módulos fotovoltaicos, inversores e microinversores registrados como parâmetros no Google Planilhas.....	139
APÊNDICE B – Lista de materiais e orçamento para a confecção dos quadros para os SFCR	141
APÊNDICE C – Comparação entre as medições dos SFCR em conjunto com os dados de simulação e as simulações da produção de energia elétrica dos SFCR desde suas respectivas datas de implementações	143

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1.1 – Área construída da edificação do GEDAE.	5
Figura 1.2 – Orientação do edifício do GEDAE (planta).	6
Figura 1.3 – Fachada norte da edificação.	6
Figura 1.4 – Curva de demanda, demanda média e energia em um dia típico no período de 2011 a 2022: (a) Iluminação, (b) Tomadas e (c) Climatização (d) Total.	7
Figura 1.5 – Janelas típicas da edificação.	10
Figura 1.6 – Cobertura da edificação com detalhes da iluminação zenital em destaque.	10
Figura 1.7 – Composição da cobertura.	10
Figura 1.8 – Distribuição dos SFCR ao longo da área externa do GEDAE.	12
Figura 1.9 – Módulos Fotovoltaicos instalados em cada SFCR: (a) C1, (b) M1, (c) M2, (d) S1, (e) S2, (f) S3, (g) S4, (h) S5, (i) S6 e S7 e (j) S8.	14
Figura 1.10 – Inversores e microinversores de cada SFCR: (a) C1, (b) M1 e M2, (c) S1, (d) S2, S3, S5, S6 e S7, (e) S4, (f) S8.	16
Figura 1.11 – Diagrama de conexões dos sistemas FV com os quadros parciais e quadro geral da edificação.	17
Figura 1.12 – Tela principal do software de aquisição de dados do SFCR.	18
Figura 1.13 – Esquema da rede em barramento instalada no GEDAE.	20
Figura 1.14 – Interface dos graficos exibidos para (a) demanda ativa, (b) consumo acumulado e (c) estimativa de geração dos SFCR no dia 20/04/2012.	21
Figura 1.15 – Painel demonstrativo de operação do sistema M1 (ver também Figura 1.9(b)).	22
Figura 1.16 – Painel demonstrativo de operação do sistema instalado na estrutura do gerador.	24
Figura 1.17 – Mostrador instalado no sistema S1.	26
Figura 1.18 – Software supervisorio em operação.	27
Figura 1.19 – Gerador fotovoltaico do primeiro SFCR em uma edificação na região Amazônica.	28
Figura 2.1 – Medidores eletrônicos SMT 1510.	32
Figura 2.2 – Datalogger SEgateway.	33
Figura 2.3 – Medidor de multigrandezas Mult-K 05.	34
Figura 2.4 – Medidor de multigrandezas Konect.	35
Figura 2.5 – Transformador de corrente KR 127.	36
Figura 2.6 – Estação meteorológica próxima à edificação.	37
Figura 2.7 – FieldLogger do Novus.	38
Figura 2.8 – Sensor de irradiância.	39
Figura 2.9 – Sensor de temperatura ambiente.	40
Figura 2.10 – Configuração para extração dos dados na API da NASA.	41
Figura 2.11 – Fluxograma dos processos para a obtenção da estimativa da produção de energia dos SFCR.	42
Figura 2.12 – Fluxograma dos processos após a aquisição dos dados de medição.	43
Figura 2.13 – Página da aplicação para estimativa de produção de energia.	57
Figura 2.14 – Seleção dos componentes do SFCR.	57
Figura 2.15 – Resultados da simulação.	58
Figura 2.16 – Tabela e total de energia produzida.	59
Figura 2.17 – Tabela de resultados considerando a degradação nos módulos fotovoltaicos.	60

Figura 2.18 – Produção de energia elétrica pelos SFCR com e sem a degradação nos módulos fotovoltaicos.	60
Figura 2.19 – Figuras de mérito nos resultados da simulação.....	61
Figura 2.20 – Salvar os resultados da simulação.....	61
Figura 3.1 – Quadros elétrico para conexões dos SFCR: (a) Quadro Parcial Fotovoltaico 1, (b) Quadro Parcial Fotovoltaico 2 e (c) Quadro Geral Fotovoltaico.....	64
Figura 3.2 – Quadro Geral para conexões dos SFCR: (a) visualização em 3D e (b) quadro geral dos SFCR instalado e (c) ponto de conexão com o quadro geral do prédio.....	65
Figura 3.3 – Diagramas unifilares dos Quadros de Parciais e Quadro Geral para conexões dos SFCR.	66
Figura 3.4 – Localização da instalação do QGFV e o local pretendido para instalação dos QPFV 1 e 2.	67
Figura 3.5 – Cargas utilizadas para calibração.....	68
Figura 3.6 – Analisador trifásico de qualidade de energia PowerPad 3945-B.....	68
Figura 3.7 – Esquemático de conexões para realização dos testes.....	69
Figura 3.8 – Configuração dos TC via programa Rede MB.....	70
Figura 3.9 – Substituições dos parâmetros de (a) potências trifásicas para (b) potências por fase.....	72
Figura 3.10 – Modificações nas abas do sistema: (a) potência e energia na versão original e (b) potência após a adição da nova aba e (c) energia após a adição da nova aba.....	73
Figura 3.11 – Página web para visualização remota dos parâmetros elétricos monitorados do prédio e dos SFCR: (a) seleção da data e dos parâmetros elétricos; (b) exibição dos gráficos dos parâmetros escolhidos no período selecionado; (c) exibição simultânea de todos os parâmetros; (d) visualização de pontos do gráfico ao passar o ponteiro do mouse; (e) possibilidade de ampliar uma faixa específica nos eixos do gráfico; e (f) possibilidade de ressaltar um ou mais parâmetro(s) de interesse no gráfico.....	75
Figura 4.1 – Comparação dos resultados da geração no Quadro Parcial Fotovoltaico 1: (a) visão geral; e linhas de tendência considerando os dados lidos pelo (b) inversor e (c) medidor eletrônico.	79
Figura 4.2 – Comparação dos resultados da geração no Quadro Parcial Fotovoltaico 2: (a) visão geral; e (b) linha de tendência considerando os dados lidos pelo medidor eletrônico....	80
Figura 4.3 – Comparação dos resultados da geração no Quadro Parcial Fotovoltaico 1 após filtragem dos dias com problemas de medição: (a) visão geral e (b) linha de tendência considerando os dados lidos pelo medidor eletrônico.	81
Figura 4.4 – Comparação dos resultados da geração no Quadro Parcial Fotovoltaico 1 após filtragem dos dias com problemas de medição: (a) visão geral e (b) linha de tendência considerando os dados lidos pelo visor do inversor.	82
Figura 4.5 – Comparação dos resultados da geração no Quadro Parcial Fotovoltaico 2 após filtragem dos dias com problemas de medição: (a) visão geral e (b) linha de tendência considerando os dados lidos pelo medidor eletrônico.	83
Figura 4.6 – Comparação dos resultados da geração no Quadro Geral Fotovoltaico: (a) visão geral e (b) linha de tendência considerando os dados lidos pelos medidores de multigrandezas nos QPFV 1 e 2.....	85
Figura 4.7 – Resultado da simulação do SFCR conectado ao QPFV 2 e os dados no medidor de multigrandezas: (a) potência no período completo (b) energia no período completo e (c) ampliação da informação no período de 07/02/2023 a 10/02/2023.....	88

Figura 4.8 – Resultado da simulação do SFCR conectado ao QPFV 1 e os dados no medidor de multigrandezas: (a) período completo (b) energia no período completo e (c) ampliação da informação no período de 14/02/2023 a 17/02/2023.....	89
Figura 4.9 – Representação gráfica da irradiação média para cada mês ao longo dos anos de 2011 a 2019 referentes à Estação Meteorológica do GEDAE e à NASA.	98
Figura 4.10 – Produtividade dos SFCR ao longo dos anos: (a) 2011, (b) 2012, (c) 2013, (d) 2014, (e) 2015, (f) 2016, (g) 2017, (h) 2018, (i) 2019, (j) 2020, (k) 2021, (l) 2022 e (m) 2023.	105
Figura 4.11 – Produtividade dos SFCR ao longo dos anos: (a) 2011, (b) 2012, (c) 2013, (d) 2014, (e) 2015, (f) 2016, (g) 2017, (h) 2018, (i) 2019, (j) 2020, (k) 2021, (l) 2022 e (m) 2023.	113
Figura 4.12 – Dinâmica do consumo de energia elétrica para cada mês no período de 2011 a 2023.	122
Figura 4.13 – Dinâmica do consumo de energia elétrica preenchido com os dados de dia típico para cada mês no período de 2011 a 2023.	123
Figura 4.14 – Balanço energético considerando as médias de cada mês durante o período de 2011 a 2023.	124
Figura 4.15 – Economia anual da energia medida complementada com a energia da simulação dos SFCR.	128
Figura C.1 – Comparação entre medição e simulação para o sistema S1 ao longo dos anos de 2011 a 2023.	144
Figura C.2 – Comparação entre medição e simulação para o sistema S2 ao longo dos anos de 2011 a 2023.	144
Figura C.3 – Comparação entre medição e simulação para o sistema S3 ao longo dos anos de 2011 a 2023.	145
Figura C.4 – Comparação entre medição e simulação para o sistema S4 ao longo dos anos de 2011 a 2023.	145
Figura C.5 – Comparação entre medição e simulação para o sistema S5 ao longo dos anos de 2011 a 2023.	146
Figura C.6 – Comparação entre medição e simulação para o sistema S6 ao longo dos anos de 2011 a 2023.	146
Figura C.7 – Comparação entre medição e simulação para o sistema S7 ao longo dos anos de 2011 a 2023.	147
Figura C.8 – Comparação entre medição e simulação para o sistema S8 ao longo dos anos de 2011 a 2023.	147
Figura C.9 – Comparação entre medição e simulação para o sistema M1 ao longo dos anos de 2011 a 2023.	148
Figura C.10 – Comparação entre medição e simulação para o sistema M2 ao longo dos anos de 2011 a 2023.	148
Figura C.11 – Comparação entre medição e simulação para o sistema C1 ao longo dos anos de 2011 a 2023.	149

LISTA DE TABELAS

Tabela 1.1 – Carga projetada para o prédio do GEDAE.	6
Tabela 1.2 – Resumo descritivo dos SFCR.	12
Tabela 1.3 – Descrição da quantidade, associação do arranjo, tensão de circuito aberto, corrente de curto-circuito e orientação dos módulos fotovoltaicos que compõem cada sistema.	13
Tabela 1.4 – Descrição dos módulos fotovoltaicos que compõem cada sistema.	15
Tabela 1.5 – Descrição dos inversores e microinversores que compõem cada sistema.	17
Tabela 2.1 – Especificações do medidor de multigrandezas Mult-K 05.	34
Tabela 2.2 – Especificações do medidor de multigrandezas Konect.	35
Tabela 2.3 – Especificações do transformador de corrente KR 127.	36
Tabela 2.4 – Especificações do piranômetro.	37
Tabela 2.5 – Especificações do sensor de temperatura.	38
Tabela 2.6 – Especificações do FieldLogger da Novus.	39
Tabela 2.7 – Especificações do sensor de irradiância.	39
Tabela 2.8 – Estrutura para criação do arquivo de texto separado por tabulação.	52
Tabela 2.9 – Estrutura dos dados para a inserção dos parâmetros dos inversores na planilha.	54
Tabela 2.10 – Estrutura dos dados para a inserção dos parâmetros dos módulos fotovoltaicos na planilha.	54
Tabela 2.11 – Estrutura dos dados para os parâmetros meteorológicos.	55
Tabela 3.1 – Descrição do carregamento para cada teste.	69
Tabela 3.2 – Resultados obtidos pelo PowerPad (_ref) e pelo medidor de multigrandezas (_med) referentes à tensão, corrente, THD e seus respectivos desvios para cada teste.	70
Tabela 4.1 – Resumo do status atual dos SFCR e de seus respectivos equipamentos de medição.	78
Tabela 4.2 – Validação dos dados do medidor eletrônico do sistema M2 com os dados do QPFV 2.	87
Tabela 4.3 – Validação dos dados dos sistemas S8 e S2 (medidor eletrônico) com os dados do QPFV 1.	87
Tabela 4.4 – Validação dos dados dos sistemas S8 e S2 (inversor) com os dados do QPFV 1.	87
Tabela 4.5 – Validação dos dados dos QPFV 1 e 2 com os dados do QGFV.	87
Tabela 4.6 – Validação dos dados de medição no QPFV 1 com os dados da simulação dos SFCR (S2 e S8).	91
Tabela 4.7 – Validação dos dados de medição no QPFV 2 com os dados da simulação do SFCR (M2).	91
Tabela 4.8 – Contribuição energética dos SFCR durante o período monitorado em 2023.	92
Tabela 4.9 – Dados de irradiação média ao longo dos meses nos anos de 2022 a 2023 do registrador local e da NASA.	93
Tabela 4.10 – Total de dias com dados de irradiação obtidos por meio do registrador local.	94
Tabela 4.11 – Desvios obtidos para os dias com dados válidos de radiação solar.	94
Tabela 4.12 – Contribuição energética dos SFCR durante o período monitorado em 2023 completada com os resultados simulados da geração.	95
Tabela 4.13 – Evolução da contribuição energética durante o período monitorado.	95

Tabela 4.14 – Dados de radiação solar média para cada mês ao longo dos anos de 2011 a 2019 da Estação Meteorológica do GEDAE (EMG) e da NASA.	97
Tabela 4.15 – Total de dias com dados de irradiação medida pela Estação Meteorológica do GEDAE.	99
Tabela 4.16 – Desvios dos dados de irradiação média da Estação Meteorológica do GEDAE e da NASA para cada ano, durante o período de 2011 a 2019.	100
Tabela 4.17 – Evolução da contribuição energética medida antes da implementação do quadro elétrico dos SFCR e complementada com os resultados da simulação.	101
Tabela 4.18 – Potencial de geração dos SFCR ao longo dos anos de 2011 a 2023 obtidos por meio de simulação.	102
Tabela 4.19 – Potencial de geração dos SFCR ao longo dos anos de 2011 a 2023 obtidos por meio de simulação considerando a degradação dos módulos fotovoltaicos.	102
Tabela 4.20 – Consumo de energia elétrica coletado pelo sistema de monitoração no período de 2011 a 2023.	121
Tabela 4.21 – Consumo de energia elétrica preenchido com os dados de dia típico no período de 2011 a 2023.	121
Tabela 4.22 – Tarifas de aplicação para consumo fora ponta.	125
Tabela 4.23 – Impostos aplicados.	125
Tabela 4.24 – Bandeiras tarifárias aplicadas ao longo dos meses no período de 2011 a 2023.	126
Tabela 4.25 – Economia da energia medida e complementada com a energia estimada por meio de simulação ao longo dos anos monitorados.	127
Tabela 4.26 – Economia da energia estimada por meio de simulação ao longo dos anos monitorados.	128
Tabela A.1 – Inversores e microinversores registrados como parâmetros no Google Planilhas.	140
Tabela A.2 – Módulos fotovoltaicos registrados como parâmetros no Google Planilhas.	140
Tabela B.1 – Orçamento dos materiais para confecção dos quadros elétricos.	142

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
API	<i>Application Programming Interface</i> (Interface de Programação de Aplicação)
BAPV	<i>Building Applied Photovoltaics</i> (Módulos Fotovoltaicos Adaptados à Edificação)
BIPV	<i>Building Integrated Photovoltaics</i> (Módulos Fotovoltaicos Integrados à Edificação)
c.a.	Corrente alternada
c.c.	Corrente contínua
GEDAE	Grupo de Estudos e Desenvolvimento de Alternativas Energéticas
LabVIEW	<i>Laboratory Virtual Instrumentation Engineering Workbench</i>
MAE	<i>Mean Absolute Error</i> (Erro Médio Absoluto)
MATLAB	<i>MATrix LABoratory</i>
MCE	Medidas de Conservação de Energia
NASA	<i>National Aeronautics and Space Administration</i>
NBR	Norma Brasileira
OPzS	Ortsfest PanZerplatte Spezial
PR	<i>Performace Ratio</i> (Rendimento Global)
QGBT	Quadro Geral de Baixa Tensão
QGFV	Quadro Geral Fotovoltaico
QPFV	Quadro Parcial Fotovoltaico
RMSE	<i>Root-Mean-Square Error</i> (Raiz do Erro Médio Quadrático)
SFCR	Sistemas Fotovoltaicos Conectados à Rede
Si-a	Silício amorfo
SIGFI	Sistemas Individuais de Geração de Energia Elétrica com Fontes Intermitentes
Si-m	Silício monocristalino
Si-p	Silício policristalino
Si- μ c	Silício microcristalino
TC	Transformador de Corrente
TCC	Trabalho de Conclusão de Curso
TE	Tarifa de Energia
THD	<i>Total Harmonic Distortion</i> (Distorção Harmônica Total)
THDI	Distorção Harmônica Total de corrente
THDV	Distorção Harmônica Total de tensão
TUSD	Tarifa de Uso do Sistema de Distribuição
UFPA	Universidade Federal do Pará
Y _F	Produtividade Final

RESUMO

Este trabalho apresenta o desenvolvimento de mecanismos de monitoramento e estimativa de produção de energia elétrica por Sistemas Fotovoltaicos Conectados à Rede (SFCR) instalados na edificação do Grupo de Estudos e Desenvolvimento de Alternativas Energéticas da Universidade Federal do Pará (GEDAE/UFPA). A pesquisa envolve a avaliação operacional no lado c.a. dos SFCR conectados em quadros parciais e geral, os quais são utilizados para agregar um conjunto de SFCR e para a obtenção de registros de medidores de multigrandezas elétricas por meio de uma ferramenta de monitoramento local; bem como abrange a criação de um sistema de monitoramento remoto por aplicação *web*, para o acompanhamento operacional e a realização de simulações voltadas para estimativas de produção de energia elétrica dos SFCR. Estas estimativas são procedidas a partir do uso de modelos matemáticos e dados meteorológicos coletados via estação meteorológica instalada no GEDAE/UFPA; de um registrador de dados no local (como alternativa de obtenção de dados de irradiância e temperatura); e dados fornecidos pela plataforma da Agência Aeroespacial dos Estados Unidos (NASA), para o preenchimento de eventuais lacunas provocadas por falhas na monitoração do sistema. Os resultados indicam a confiabilidade das medições dos SFCR nos quadros parciais, mas também ressaltam a necessidade de reativar sistemas inoperantes e implementar novos sistemas para aumentar a exatidão das medições no quadro geral. Além disso, os SFCR contribuem em média com cerca de 25% no suprimento do consumo de energia elétrica na edificação do GEDAE/UFPA, resultando em uma economia importante nos gastos com energia elétrica ao longo dos anos de 2011 a 2023. No entanto, a economia poderia ser ainda maior com a restauração de alguns sistemas, enfatizando-se a importância das medidas de restauração e monitoração contínua de desempenho dos sistemas, a fim de aumentar a contribuição energética e benefícios econômicos da utilização dos SFCR.

Palavras-chave: Sistemas Fotovoltaicos Conectados à Rede, Monitoração de SFCR. Acesso Remoto. Contribuição Energética de SFCR. Desempenho de SFCR.

ABSTRACT

This master's thesis presents the development of mechanisms for monitoring and estimating the electricity production by Grid-Connected Photovoltaic Systems (GCPVS) installed in the building of the Grupo de Estudos e Desenvolvimento de Alternativas Energéticas at the Universidade Federal do Pará (GEDAE/UFPA). The research involves the operational evaluation of the AC side of the GCPVS connected to partial and general electric panels, which are used to aggregate a set of GCPVS and to obtain records from the electrical multi-measurement meters via a local monitoring tool. Additionally, the research involves the development of a web-based remote monitoring system for operational monitoring and simulations aimed at estimating the electricity production of the GCPVS. This is achieved by using mathematical models and meteorological data collected through a weather station installed at GEDAE/UFPA, on-site data loggers (as an alternative means of obtaining irradiance and temperature data), and data provided by the National Aeronautics and Space Administration (NASA) platform to fulfill in any gaps caused by system monitoring failures. The results indicate the reliability of the GCPVS measurements in partial panels but also highlight the need to reactivate inoperative systems and implement new systems to improve measurement accuracy in the overall panel. Furthermore, on average, the GCPVS contribute to about 25% of the electricity consumption in the GEDAE/UFPA building, resulting in significant energy cost savings from 2011 to 2023. However, greater savings could be achieved through the restoration of some systems, emphasizing the importance of restoration measures and continuous monitoring of systems performance to increase energy contribution and economic benefits from the use of GCPVS.

Keywords: Grid-Connected Photovoltaic Systems, GCPVS Monitoring. Remote Access. GCPVS Energy Contribution. GCPVS Performance.

INTRODUÇÃO

Atualmente, observa-se no Brasil e no mundo um aumento no uso de sistemas de micro e minigeração distribuída baseados em fontes renováveis de energia. Nesse cenário, os sistemas fotovoltaicos têm se destacado como uma das principais soluções para suprir a demanda energética, além de reduzir a fatura de energia elétrica e impactos ambientais relacionados à produção de eletricidade.

Alguns estudos têm sido realizados em diferentes regiões do Brasil para avaliar o desempenho e a contribuição energética proporcionados por Sistemas Fotovoltaicos Conectados à Rede (SFCR). Por exemplo, Silva (2022) dirigiu uma análise comparativa SFCR instalados na cidade de Curitiba, em locais distintos, com diferentes topologias, com inversores e módulos de diferentes características, com orientações e inclinações diversas, de acordo com a disponibilidade de áreas de telhados em cada local; assim como Teles (2017), que também conduziu um estudo para avaliar a operação e desempenho de diferentes topologias de SFCR instalados no Grupo de Estudos e Desenvolvimento de Alternativas Energéticas da Universidade Federal do Pará (GEDAE/UFPA).

A fim de avaliar a operação e o impacto da energia elétrica produzida pelos Sistemas Fotovoltaicos Conectados à Rede (SFCR) e orientar em tomadas de decisão para manutenção e otimização dos sistemas (ZOU *et al.*, 2012), é essencial realizar uma monitoração criteriosa dos SFCR e compará-la com modelos matemáticos estabelecidos na literatura (MARES, 2019). Para essa finalidade, são implantados sistemas de monitoramento de parâmetros elétricos e meteorológicos, como corrente, tensão, potência ativa, energia ativa, irradiância e temperatura ambiente.

Em dezembro de 2007, o GEDAE/UFPA concluiu a instalação do primeiro SFCR integrado à edificação na Região Amazônica (ZILLES *et al.*, 2012). Desde então, o laboratório tem continuado a instalar e estudar outros sistemas, abrangendo diferentes tecnologias de módulos fotovoltaicos, como Si-m, Si-p, Si-a, entre outros, e inversores, incluindo inversores *strings*, microinversores, bidirecionais, entre outros, com o objetivo de realizar diversos estudos nessa área de pesquisa e o desenvolvimento de projetos relacionados às fontes renováveis com sistemas interligados à rede elétrica.

Desta forma, a infraestrutura e os SFCR previamente instalados na área externa da edificação do GEDAE/UFPA desempenham um papel fundamental no desenvolvimento do presente trabalho, visto que há uma variedade de configurações de inversores e módulos

fotovoltaicos, permitindo a avaliação experimental de desempenho energético desses sistemas, bem como torna-se importante a implantação de um sistema de monitoramento para a aquisição de parâmetros elétricos no lado c.a. dos SFCR, integrados com a monitoração dos parâmetros elétricos da própria edificação.

Até o presente momento, utiliza-se o *software* LabVIEW como interface usuário-máquina para monitoração dos parâmetros elétricos da edificação do GEDAE/UFPA. Para o desenvolvimento deste trabalho é crucial a integração dos dispositivos de medição associados aos SFCR com o *software* de monitoração, a fim de que sejam registrados os parâmetros elétricos dos SFCR para futuras análises acerca do desempenho e operação destes sistemas.

Desta forma, com base na integração dos sistemas de monitoramento e na análise dos dados operacionais obtidos, torna-se possível o aprimoramento de modelos matemáticos para estimativas de desempenho de cada um dos SFCR, os quais empregam como parâmetro de entrada os dados meteorológicos pertinentes monitorados.

Assim, também é possível diagnosticar eventuais perdas de desempenho e desconexões dos sistemas e avaliar, principalmente, as contribuições energéticas dos SFCR para a edificação em estudo e dos custos evitados na fatura de energia elétrica do campus universitário, local onde os SFCR estão implantados.

Objetivo Geral do Trabalho

Este trabalho tem como objetivo o desenvolvimento de mecanismos para monitoração, avaliação operacional e estimativas de produção de energia elétrica por SFCR implantados no GEDAE/UFPA.

Objetivos Específicos do Trabalho

- Prover a inserção de quadros elétricos para a criação de circuitos parciais e geral dos SFCR.
- Implementar um sistema de aquisição de parâmetros elétricos para o conjunto de SFCR.
- Integrar o novo sistema de aquisição ao programa em LabVIEW operante no GEDAE/UFPA.
- Desenvolver uma plataforma para acesso remoto para visualização dos dados monitorados e estimativas de produção de energia elétrica dos SFCR.
- Realizar simulações da produção de energia elétrica dos SFCR para o preenchimento dos dias com ausência de dados nos registros de medição.

- Empregar, como parâmetros de entrada de simulação, dados meteorológicos medidos no local e fornecidos pela plataforma da Agência Aeroespacial dos Estados Unidos (NASA).
- Validar e avaliar os resultados obtidos por meio de equipamentos de medição adicionados.
- Realizar a avaliação operacional dos SFCR na edificação, analisando as contribuições energéticas e redução de gastos com energia elétrica.
- Avaliar a contribuição energética e a redução de gastos com energia elétrica da edificação ao longo dos vários anos dos SFCR em operação.

Apresentação da Estrutura do Trabalho

O presente trabalho está organizado em quatro capítulos em sua estrutura.

O Capítulo 1 aborda os Sistemas Fotovoltaicos Conectados à Rede (SFCR) de baixa tensão instalados na área externa da edificação do Grupo de Estudo e Desenvolvimento de Alternativas Energéticas (GEDAE). Apresentam-se as principais características da edificação, a carga instalada, as Medidas de Conservação de Energia (MCE) implementadas e os trabalhos desenvolvidos ao longo dos anos relacionados às instalações, monitoramento e aquisição de dados dos SFCR que são objetos desta pesquisa.

O Capítulo 2 aborda os equipamentos utilizados para coletar os dados meteorológicos e de produção de energia elétrica dos sistemas fotovoltaicos conectados à rede no prédio do GEDAE. Também são descritas as metodologias utilizadas para tratar estes dados e avaliar a contribuição real e estimada dos sistemas fotovoltaicos descritos anteriormente.

O Capítulo 3 aborda as características do projeto dos quadros dos SFCR, o método de calibração e configuração dos dispositivos de medição, bem como as principais alterações nos programas de aquisição e exibição de dados dos SFCR usando o *software* LabVIEW e a aplicação *web* Streamlit.

O Capítulo 4 apresenta os dados de consumo e geração obtidos pelos medidores de multigrandezas do sistema de monitoramento do prédio. Comparam-se os resultados simulados dos geradores fotovoltaicos e os dados obtidos pelos medidores nos quadros dos SFCR, visores dos inversores e medidores eletrônicos próximos aos SFCR. Além disso, são apresentadas as avaliações de desempenho energético dos SFCR e uma breve avaliação econômica com a contribuição já proporcionada por estes sistemas implantados na edificação.

Por fim, são apresentadas as conclusões acerca do trabalho desenvolvido, avaliando os resultados alcançados, as dificuldades que se fizeram presente ao longo do projeto e apresentam-se propostas futuras de aprimoramento e continuidade do trabalho.

CAPÍTULO 1 - GERAÇÃO FOTOVOLTAICA CONECTADA À REDE E CONSUMO DE ENERGIA ELÉTRICA NO GEDAE/UFPA

Neste capítulo são descritos os Sistemas Fotovoltaicos Conectados à Rede (SFCR) de baixa tensão instalados na área externa da edificação do Grupo de Estudo e Desenvolvimento de Alternativas Energéticas (GEDAE), localizada no campus Guamá da Universidade Federal do Pará (UFPA), cidade de Belém-PA, bem como as principais características da edificação do grupo de pesquisa. Apresenta-se ainda a carga instalada na edificação e as Medidas de Conservação de Energia (MCE) adotadas para redução do consumo energético no local e, por fim, apresentam-se as contribuições dos trabalhos desenvolvidos ao longo dos anos relacionados às instalações, monitoração e aquisição de dados dos SFCR que são objetos de estudo da presente pesquisa.

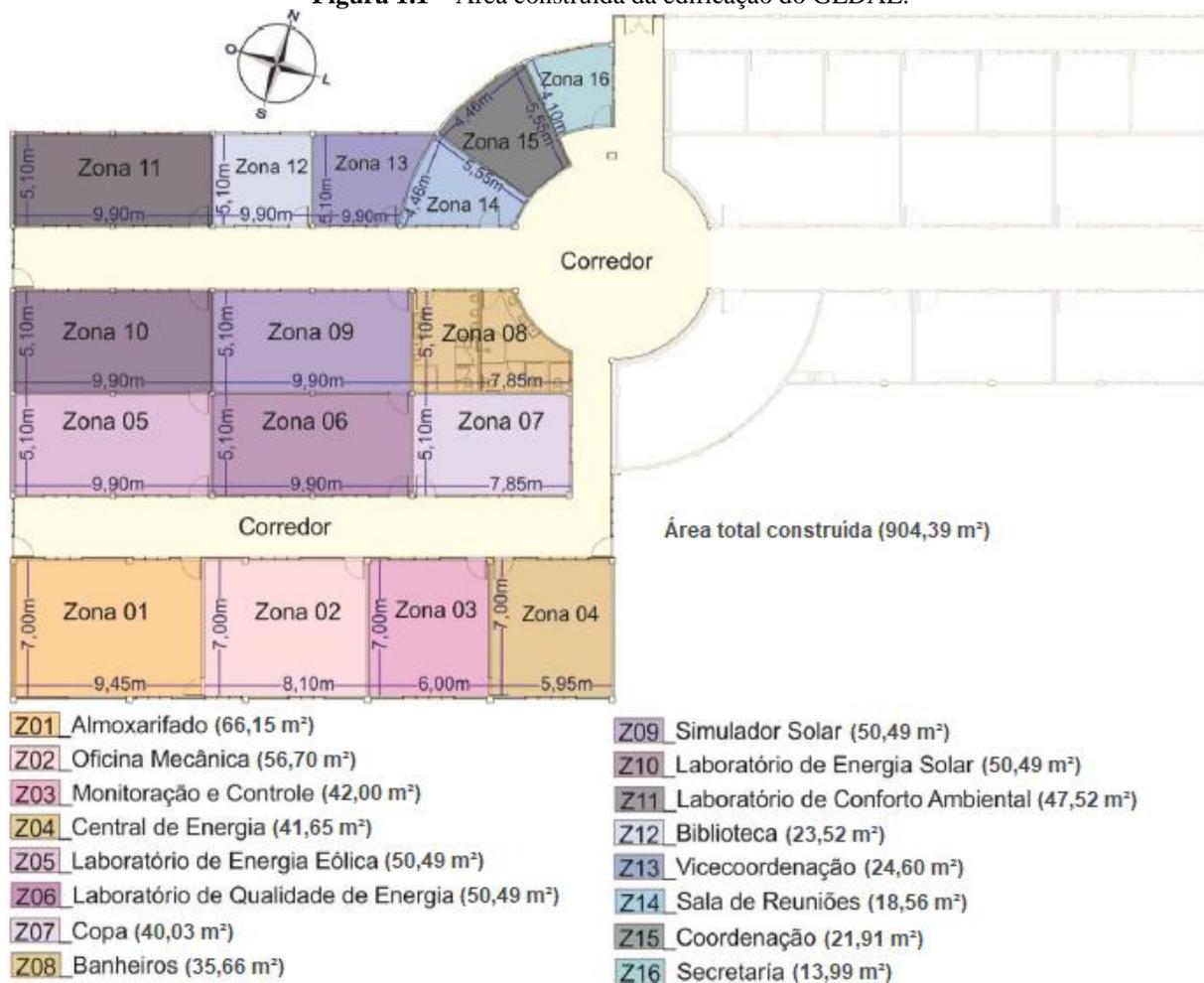
1.1 Caracterização da edificação do GEDAE

O GEDAE dispõe de um edifício institucional de caráter acadêmico e científico cujas funções são de servir como laboratório para estudos e práticas sobre desenvolvimento de alternativas energéticas, geração de energia a partir de fontes renováveis, atividades de pesquisa e extensão para estudantes, professores, profissionais e empresas da Região (GEDAE, 2023).

O prédio contém ambientes anexos a um corredor como eixo principal de circulação e iluminação, tais como: secretaria; salas de coordenação, vice-coordenação e reuniões; laboratórios; banheiros masculino e feminino; almoxarifado; oficina mecânica; sala de monitoração e controle; central de energia; áreas internas de circulação e convivência, conforme ilustrado na Figura 1.1 Cada ambiente possui um sistema de condicionamento de ar para uso durante o período de atividades na edificação, com exceção dos banheiros e almoxarifado.

A fim de se obter uma edificação energeticamente autônoma e eficiente, o prédio do GEDAE foi construído aplicando-se técnicas bioclimáticas para o aproveitamento máximo da iluminação e ventilação naturais, apoiadas por materiais de construção adequados, além disso, são utilizados sistemas de energia solar passiva para contribuir com a redução do consumo e, conseqüentemente, custo de energia na edificação (AGUILAR, 2004).

Figura 1.1 – Área construída da edificação do GEDAE.



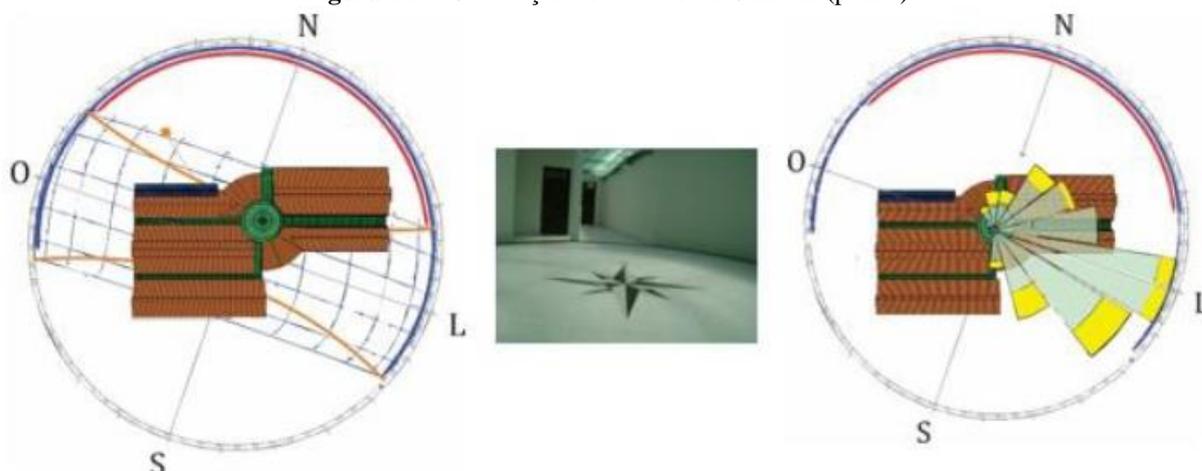
Fonte: Adaptado de Aguilar (2018).

A área externa no entorno da edificação é utilizada para testes e implantações de sistemas fotovoltaicos isolados e conectados à rede, os quais auxiliam no suprimento de energia elétrica para o prédio. No tópico 1.4 são apresentados os SFCR instalados na área externa do prédio do GEDAE e considerados para a análise de contribuição na geração de energia elétrica, bem como as suas alocações nas proximidades da edificação.

1.1.1 Fachada principal do prédio

A fachada principal da edificação está orientada a -19° com relação ao norte geográfico ou 19° noroeste, alinhada à via de acesso principal. Na Figura 1.2 mostra-se o percurso solar com relação à edificação, assim como a orientação de 19° com relação ao norte geográfico. Na Figura 1.3 mostra-se a fotografia da fachada norte (principal) da edificação.

Figura 1.2 – Orientação do edifício do GEDAE (planta).



Fonte: Aguilar (2018).

Figura 1.3 – Fachada norte da edificação.



Fonte: Aguilar (2018).

1.2 Carga instalada

No laboratório do GEDAE, os circuitos que alimentam as cargas da edificação são divididos pelo seu tipo de uso final, implementados por meio de circuitos de iluminação, climatização e tomadas, os quais estão descritos no quadro de carga da Tabela 1.1, em termos de potência ativa e potência aparente total de projeto para a área construída da edificação.

Tabela 1.1 – Carga projetada para o prédio do GEDAE.

Descrição	Potência Ativa (kW)	Potência Aparente (kVA)
Tomadas	100	107
Ar-Condicionado	66	82
Iluminação	5	8
Barramento Central	171	197

Fonte: Adaptado de GEDAE (2009).

Cada circuito possui seu próprio medidor multigrandezas elétricas para aquisição de dados instalado no quadro geral de distribuição na edificação. As dinâmicas de utilização destas cargas estão descritas no subtópico seguinte, onde estão apresentadas a demanda e o consumo

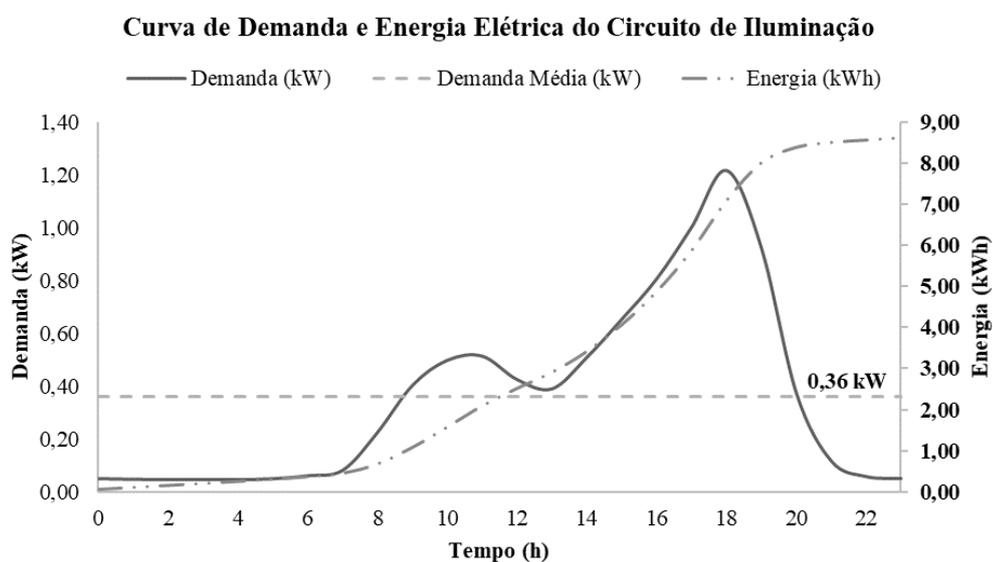
de energia elétrica por parte dos usuários/membros no prédio do GEDAE, considerando-se um dia típico de consumo nesta edificação.

1.2.1 Demanda e consumo de energia elétrica na edificação o GEDAE

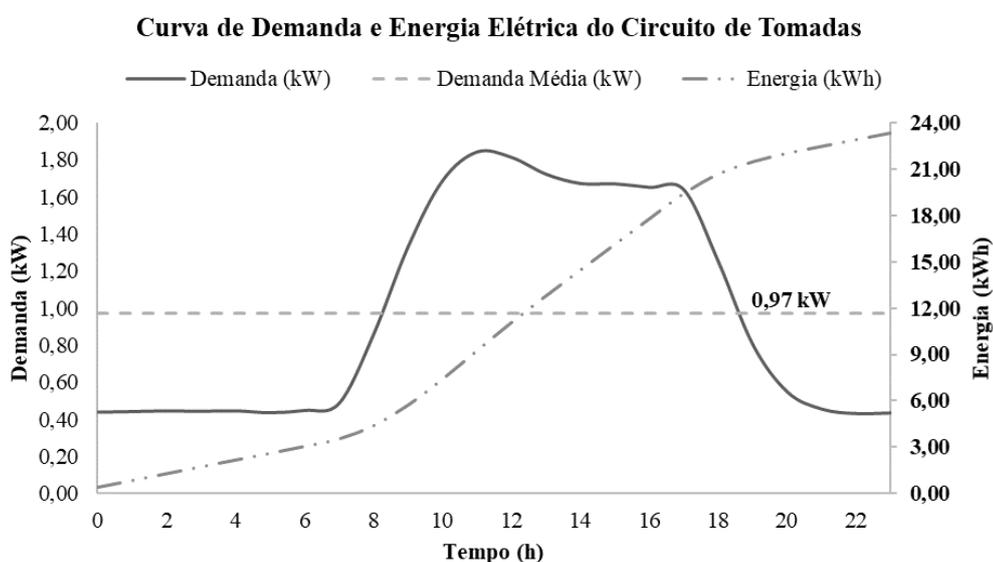
O GEDAE utiliza um sistema de monitoração de parâmetros elétricos da edificação, ativo desde 2011, obtendo-se o registro de dados referentes aos circuitos de uso final: iluminação, climatização e tomadas (MANITO, 2012). Por meio destes, torna-se possível calcular a curva de demanda de potência ativa em um dia típico da edificação para cada um dos tipos de cargas mencionados, conforme ilustrado na Figura 1.4.

Figura 1.4 – Curva de demanda, demanda média e energia em um dia típico no período de 2011 a 2022: (a) Iluminação, (b) Tomadas e (c) Climatização (d) Total.

(Continua)

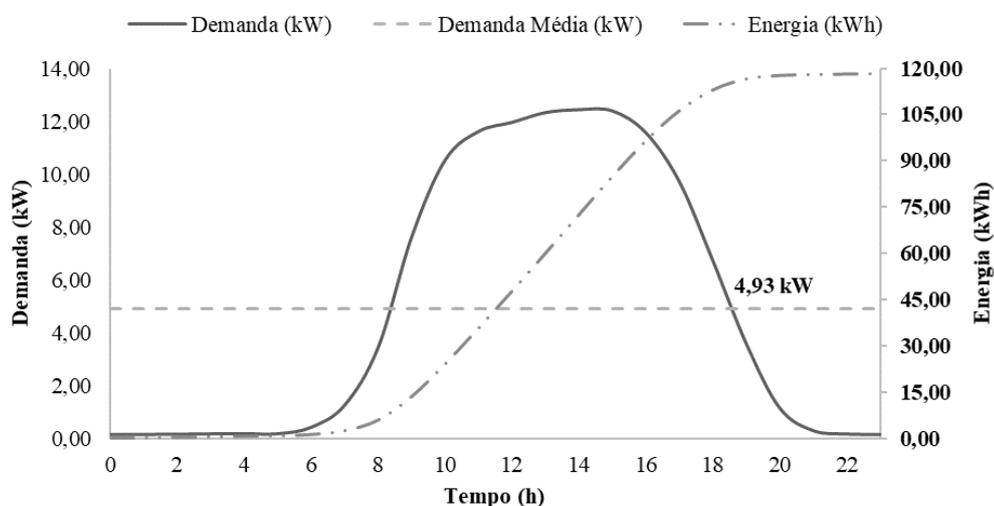


(a)



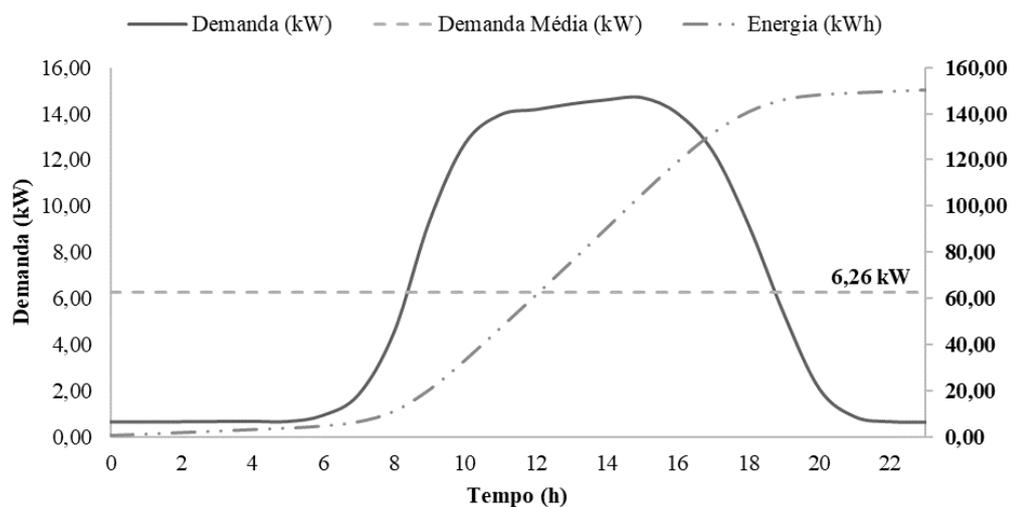
(b)

Curva de Demanda e Energia Elétrica do Circuito de Climatização



(c)

Curva de Demanda e Energia Elétrica Total



Fonte: Elaborado pelo autor.

Salienta-se que a demanda de potência ativa do prédio está vinculada ao funcionamento de uma instituição de ensino e pesquisa, isto é, a maior parte do consumo elétrico ocorre nos dias úteis, de segunda a sexta-feira, entre 07h00 e 20h00 e todos os feriados considerados para esta análise estão baseados no calendário de feriados local.

Com base nos gráficos da Figura 1.4, nota-se que a demanda dos circuitos de tomadas e climatização se mantém praticamente constantes durante todo o período de ocupação na edificação. Quanto ao circuito de iluminação, verifica-se uma maior demanda de potência durante o final da tarde, próximo ao anoitecer (período de indisponibilidade solar). Além disto, diferentemente do que ocorre nos circuitos de tomadas e iluminação, fora do período de

atividades na edificação, a demanda do circuito de climatização é nula, indicando o desligamento total dos aparelhos de climatização, enquanto algumas lâmpadas permanecem ligadas por motivo de segurança e algumas cargas, como por exemplo, geladeira, sistemas de segurança e de aquisição de dados permanecerem ligadas.

A baixa demanda do circuito de iluminação em relação aos demais circuitos é justificada pela escolha de projeto e construção da edificação, por meio de diretrizes e estratégias bioclimáticas, as quais estão descritas brevemente no tópico seguinte, quando apresentadas as Medidas de Conservação de Energia (MCE) adotadas no prédio do GEDAE, cujo principal objetivo é minimizar o consumo de energia elétrica da edificação.

1.3 Medidas de Conservação de Energia (MCE) adotadas para redução do consumo energético

A adoção de uma série de Medidas de Conservação de Energia (MCE) auxilia na redução do consumo energético da edificação do GEDAE. Neste sentido, pode-se ressaltar o próprio posicionamento da edificação, orientada em 19° noroeste para a fachada principal, restringindo a área de exposição das fachadas que recebem sol de ângulo baixo (nascente e poente) e permite o sombreamento da fachada que mais recebe sol de ângulo alto (norte), beneficiando-se ainda de iluminação natural.

Os materiais utilizados na construção do prédio permitem aumentar a disponibilidade de iluminação natural e reduzir o consumo de energia elétrica com iluminação artificial, diminuir os valores de transmitância térmica da envoltória e a absorvância das superfícies e, conseqüentemente, reduzir o consumo de energia elétrica para resfriamento. Além disso, também são aplicadas medidas que contribuem para a produção de energia elétrica no local, para atender parte da demanda, especificamente com sistemas fotovoltaicos para geração de energia (AGUILAR, 2018).

A iluminação natural só proporciona economia energética quando é capaz de substituir, ainda que em parte a iluminação artificial. Para a distribuição uniforme da iluminação natural no interior da edificação, utilizam-se janelas com grandes dimensões à altura do plano de trabalho; cobertura com lanternim; e balancins altos sobre as janelas e portas internas e externas. Na Figura 1.5 mostram-se algumas janelas da edificação.

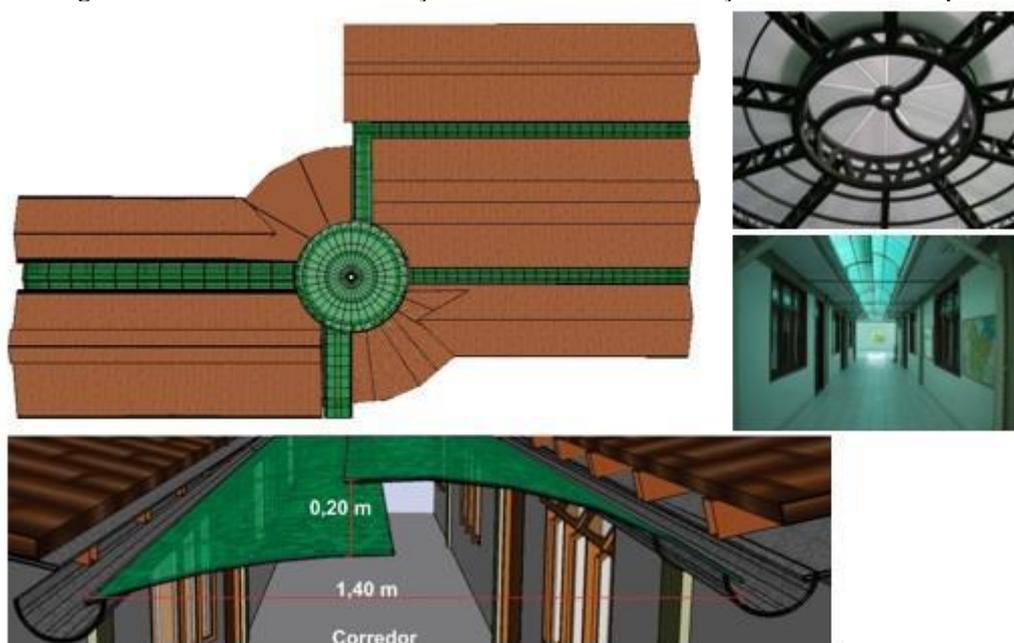
Figura 1.5 – Janelas típicas da edificação.



Fonte: Aguilar (2018).

Nos espaços de circulação interna, conforme ilustrado na Figura 1.6, por serem espaços de permanência transitória (de ocupação não constante), optou-se pela iluminação zenital, tendo como objetivo melhorar ou otimizar a quantidade e a distribuição de luz natural na circulação e, conseqüentemente, nas salas anexas.

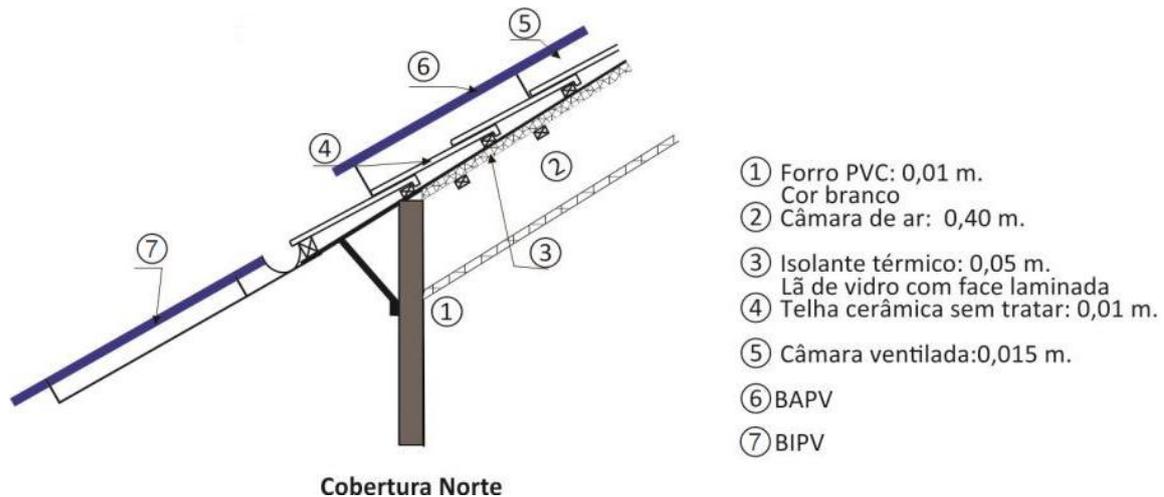
Figura 1.6 – Cobertura da edificação com detalhes da iluminação zenital em destaque.



Fonte: Aguilar (2018).

Com relação à MCE adotada para minimizar ainda mais o consumo de energia elétrica da edificação, o GEDAE implantou, na cobertura da fachada principal do prédio, um Sistema Fotovoltaico Aplicado (BAPV – *Building Applied Photovoltaics*), e um Sistema Fotovoltaico Integrado (BIPV – *Building Integrated Photovoltaics*), conforme ilustrados na Figura 1.7.

Figura 1.7 – Composição da cobertura.



Fonte: Adaptado de Aguilar (2018).

No sistema implantado como BAPV, os módulos fotovoltaicos estão instalados sobre a cobertura da edificação, porém não substituem o telhado. Estes módulos têm por finalidade a produção de energia elétrica, além da redução da carga térmica do ambiente interno com este tipo de cobertura, conforme comprovado por Aguilar (2018). Ao passo que no sistema implantado em BIPV, os módulos fotovoltaicos estão instalados no beiral da fachada da edificação e oferecem um prolongamento da cobertura da edificação, ou seja, além da finalidade de produção de energia por meio do sistema fotovoltaico, o sistema em BIPV substitui o uso de telhas adicionais para efetivar o prolongamento da cobertura da fachada principal do prédio, funcionando como brise.

Além destes, outros sistemas fotovoltaicos foram implantados no entorno da edificação do grupo e contribuem para a redução do consumo de energia elétrica do prédio, quando visto pela rede de distribuição local, ao produzirem a energia elétrica no local, conforme descrito a seguir.

1.4 Sistemas fotovoltaicos conectados à rede instalados

Neste tópico são apresentadas as informações mais importantes dos sistemas fotovoltaicos conectados à rede presentes nas instalações da edificação do GEDAE e utilizadas para fins de simulação no presente trabalho.

A edificação conta atualmente com um conjunto de dezoito sistemas fotovoltaicos *on-grid* contribuindo com o suprimento de parte da demanda da edificação do GEDAE, sendo que apenas onze dos dezoito sistemas fotovoltaicos *on-grid* estão diretamente conectados à rede de distribuição da UFPA.

Apesar de não ser o foco deste trabalho, é válido ressaltar que os demais sistemas fotovoltaicos *on-grid* são utilizados em aplicações para suprimento de uma microrrede c.a. e

uma nanorrede c.c. implantadas na área externa do GEDAE, possuindo sistema de armazenamento em banco de baterias. Além disso, existem outros sistemas fotovoltaicos utilizados para estudos de sistemas *off-grid* do tipo SIGFI45 e SIGFI13, porém estão inoperantes atualmente devido ao da vida útil do banco de baterias.

A localização de cada SFCR pode ser vista conforme a distribuição ilustrada na Figura 1.8. Os SFCR monitorados são identificados pelas tecnologias empregadas, por exemplo, “C” (conversor c.c.-c.c.), “M” (microinversor) e “S” (inversor-*string*). Apresenta-se, a seguir, a descrição de cada sistema, identificado por sua respectiva sigla na Figura 1.8.

Figura 1.8 – Distribuição dos SFCR ao longo da área externa do GEDAE.



Fonte: Adaptado de *Google Maps*.

1.4.1 Caracterização dos SFCR

Um resumo descritivo de cada SFCR no GEDAE está apresentado na Tabela 1.2. O quantitativo de módulos fotovoltaicos, a configuração dos arranjos e orientação de cada SFCR são descritos na Tabela 1.3.

Tabela 1.2 – Resumo descritivo dos SFCR.

Sistema	Módulo	Inversor/ Microinversor	Capacidade instalada (kWp)	Potência c.a (kW)	FDI	Período de instalação
C1	JA SOLAR / JAP6-60-265/3BB	SolarEdge / SE2200	3,180	2,200	0,692	08/2015
M1	Aleo Solar / ALEO S19G245	Enphase / M215-60-2LL- S22-IG	0,245	0,215	0,878	09/2013
M2	KYOCERA / KD250GH-4FB2	Enphase / M215-60-2LL- S22-IG	1,000	0,860	0,860	12/2015

(Continua)

(Conclusão)

Sistema	Módulo	Inversor/Microinversor	Capacidade instalada (kWp)	Potência c.a (kW)	FDI	Período de instalação
S1	SolarWorld / SW245	PHB / PHB-3000-SS	2,450	3,000	1,224	05/2015
S2	YINGLI SOLAR / YL245P-29b	SMA / Sunny Boy 1200U	1,470	1,200	0,816	12/2013
S3	DuPont Apollo / DA121-C1	SMA / Sunny Boy 1200U	1,210	1,200	0,992	07/2012
S4	YINGLI SOLAR / YL245P-29b e Aleo Solar / ALEO S19-240	Fronius / FRONIUS GALVO 1.5-1	1,925	1,500	0,779	11/2014
S5	SunLab Power / ASI100	SMA / Sunny Boy 1200U	1,000	1,200	1,200	12/2015
S6	KYOCERA / KD250GH-4FB2	SMA / Sunny Boy 1200U	1,500	1,200	0,800	05/2017
S7	KYOCERA / KD250GH-4FB2	SMA / Sunny Boy 1200U	1,500	1,200	0,800	05/2017
S8	KYOCERA / KC120-1 e AstroPower / AP120	Xantrex / GT2.8-NA-240/208 UL-05	1,680	2,800	1,667	11/2011
TOTAL	-	-	17,160	-	-	-

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 1.3 – Descrição da quantidade, associação do arranjo, tensão de circuito aberto, corrente de curto-circuito e orientação dos módulos fotovoltaicos que compõem cada sistema.

Sistema	Quantidade de módulos	Associação do arranjo FV	V _{oc} (V)	I _{sc} (A)	Orientação	
					Azimutal	Inclinação
C1	12	Série	457,68	9,1	0° (N)	10°
M1	1	-	37,4	8,6	0° (N)	12°
M2*	4	-	36,9	9,09	19° (NO)	10°
S1	10	Série	375	8,49	19° (NO)	10°
S2	6	Série	226,8	8,63	0° (N)	14°
S3	10	5 strings com 2 módulos em série	293,2	6	0° (N)	14°
S4	8	Série	296,1	8,47	19° (NO)	10°
S5	10	Série	238	6,79	19° (NO)	10°
S6	6	Série	221,4	9,09	0° (N)	14°
S7	6	Série	221,4	9,09	0° (N)	14°
S8**	14	Série	294	7,45	19° (NO)	14°
TOTAL	87	-	-	-	-	-

* O sistema M2 possui 4 subgeradores com um módulo para cada microinversor, as saídas dos microinversores estão conectadas em paralelo.

** Inicialmente, o sistema S8 continha duas strings com 14 módulos em série, totalizando 3,36 kWp instalado.

Fonte: Elaborado pelo autor.

1.4.2 Características dos Módulos Fotovoltaicos

A ilustração e descrição dos módulos fotovoltaicos instalados de cada SFCR estão apresentadas na Figura 1.9 e Tabela 1.4, respectivamente.

Figura 1.9 – Módulos Fotovoltaicos instalados em cada SFCCR: (a) C1, (b) M1, (c) M2, (d) S1, (e) S2, (f) S3, (g) S4, (h) S5, (i) S6 e S7 e (j) S8.

(Continua)



(a)



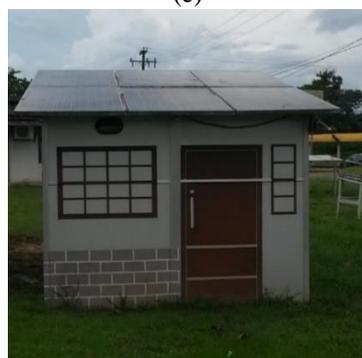
(b)



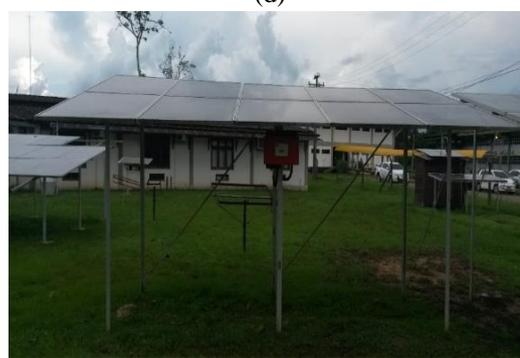
(c)



(d)



(e)



(f)



(g)



(h)

(Conclusão)



(i)



(j)

Fonte: Teles (2017), Teixeira Junior (2017), Rodrigues (2017) e Cavalcante (2011).

Tabela 1.4 – Descrição dos módulos fotovoltaicos que compõem cada sistema.

Sistema (s)	Equipamento	Marca / Modelo	Características			
			P_{mp} (W)	V_{mp} (V)	I_{mp} (A)	η (%)
C1	Módulo Fotovoltaico Si-p	JA SOLAR / JAP6-60-265/3BB	265	30,96	8,56	16,21
M1	Módulo Fotovoltaico Si-m	Aleo Solar / ALEO S19G245	245	30,1	8,13	14,9
M2, S6 e S7	Módulo Fotovoltaico Si-p	KYOCERA / KD250GH-4FB2	250	29,8	8,39	15,1
S1	Módulo Fotovoltaico Si-p	SolarWorld / SW245	245	30,8	7,96	14,6
S2 e S4*	Módulo Fotovoltaico Si-p	YINGLI SOLAR / YL245P-29b	245	30,2	8,11	15
S3	Módulo Fotovoltaico multijunção Si-a/Si- μ c	DuPont Apollo / DA121-C1	121	120,6	0,99	7,7
S4*	Módulo Fotovoltaico Si-m	Aleo Solar / ALEO S19-240	240	30,8	7,8	14,6
S5	Módulo Fotovoltaico Si-a	SunLab Power / ASI100	100	17,5	5,71	7
S8	Módulo Fotovoltaico Si-p	KYOCERA / KC120-1	120	16,9	7,1	>14
	Módulo Fotovoltaico Si-m	AstroPower / AP120	120	16,9	7,1	-

*O sistema S4 é composto por oito módulos fotovoltaicos, sendo que um deles pertencendo ao fabricante YINGLI SOLAR e os demais sendo do modelo ALEO S19-240.

Fonte: Adaptados de Teles (2017); Teixeira Junior (2017) e dos manuais dos fabricantes: JA SOLAR (2015); Aleo Solar (2012); KYOCERA (2013); SolarWorld (2012); YINGLI SOLAR (2012); KYOCERA (2011); AstroPower (2011).

1.4.3 Características dos Inversores

A ilustração e a descrição dos inversores e microinversores instalados de cada SFCR estão apresentadas na Figura 1.10 e Tabela 1.5, respectivamente. Ressalta-se que estes são os mesmos equipamentos utilizados desde o período de instalação dos SFCR.

Figura 1.10 – Inversores e microinversores de cada SFCR: (a) C1, (b) M1 e M2, (c) S1, (d) S2, S3, S5, S6 e S7, (e) S4, (f) S8.



(a)



(b)



(c)



(d)



(e)



(f)

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 1.5 – Descrição dos inversores e microinversores que compõem cada sistema.

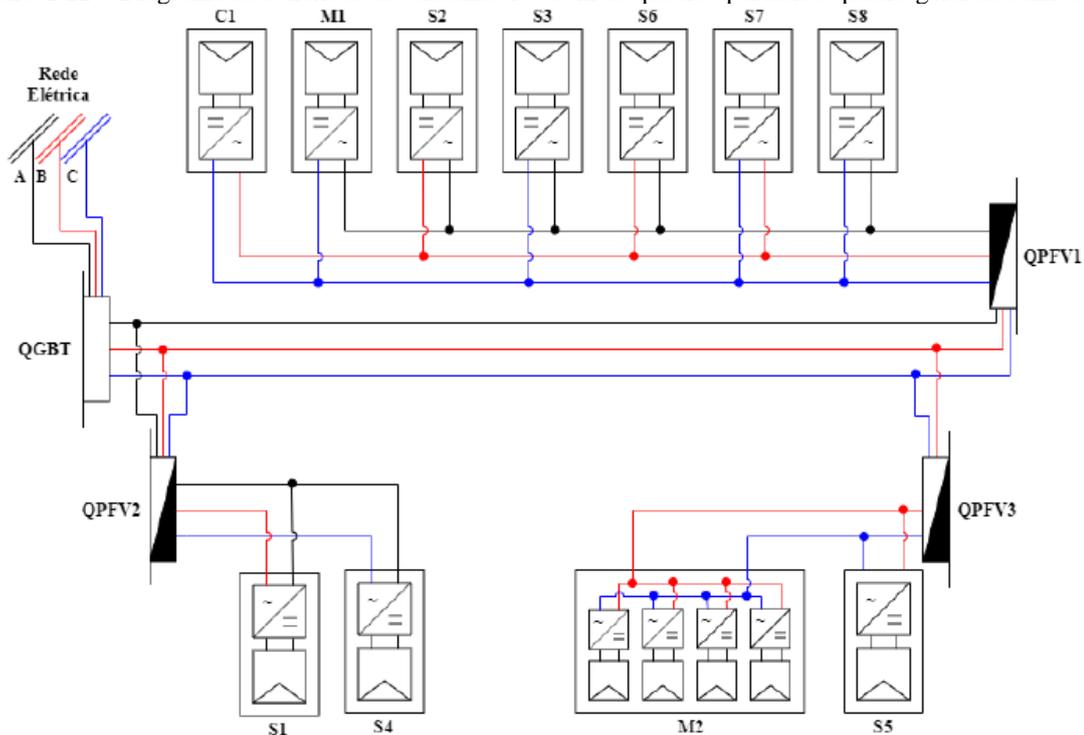
Sistema (s)	Equipamento	Marca / Modelo	Características							
			P _{c.c.} , máx (W)	V _{MPPT} (V)	I _{c.c.} , máx (A)	P _{c.a.} , nom (W)	V _{c.a.} , nom (V)	Faixa de tensão c.a (V)	I _{nom} (A)	η _{MPPT} (%)
C1	Inversor	SolarEdge / SE2200	2.750	270-500	8,5	2.200	220	184-264,5	12	97,6
M1 e M2	Microinversor	Enphase / M215-60-2LL-S22-IG	270	22-36	10,2	215	240	211-264	0,9	99,4
S1	Inversor	PHB / PHB-3000-SS	3.200	125-450	18	3.000	220	176-242	15	99,5
S2, S3, S5, S6 e S7	Inversor	SMA / Sunny Boy 1200U	1.320	100-320	12,6	1.200	220	180-265	5,2	90,9
S4	Inversor	Fronius / FRONIUS GALVO 1.5-1	3.000	120-335	13,3	1.500	230	184-269	6,5	99,9
S8	Inversor	Xantrex / GT2.8-NA-240/208 UL-05	3.700	195-550	15,4	2.800	240	212-263	11,7	95

Fonte: Adaptado dos manuais dos fabricantes: SolarEdge (2013); Enphase Energy (2016); PHB Solar (2015); SMA America (2011); Fronius (2016); Xantrex (2011).

1.4.4 Diagrama de conexões dos SFCR

As conexões de todos os SFCR, apresentados anteriormente, com os quadros parciais e quadro geral de distribuição do prédio do GEDAE estão ilustradas no diagrama da Figura 1.11.

Figura 1.11 – Diagrama de conexões dos sistemas FV com os quadros parciais e quadro geral da edificação.



Fonte: Elaborado pelo autor.

1.5 Trabalhos anteriores sobre monitoração dos SFCR no GEDAE

Neste tópico são descritos alguns dos trabalhos precedentes desenvolvidos no GEDAE no âmbito de monitoração dos SFCR avaliados na presente dissertação e uma breve descrição de outros projetos relevantes envolvendo SFCR para o histórico de pesquisa do grupo e contribuição energética para a edificação.

1.5.1 Monitoramento do sistema S8 (inversor Xantrex)

O estudo realizado por Cavalcante (2011) no âmbito de um Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) engloba a implementação do sistema S8, mostrando cada etapa deste processo desde a estrutura de fixação dos módulos até aos quadros de conexão tanto c.c. quanto c.a. e o sistema de aterramento para os geradores instalados. Por meio deste estudo, Cavalcante (2011) analisou o desempenho do sistema S8, além da contribuição deste SFCR para a redução do consumo de energia elétrica da edificação.

Atualmente, os equipamentos que foram utilizados no estudo de Cavalcante (2011) para a monitoração do sistema S8 encontram-se inoperantes, devido a problemas com o microcomputador dedicado à coleta dos dados via *software* do fabricante do inversor e à indisponibilidade de outro microcomputador para realizar a sua substituição, inviabilizando a continuidade deste método de aquisição. No entanto, enquanto o sistema de monitoração ainda estava operacional, a etapa de aquisição e visualização das grandezas elétricas tanto do lado c.c. quanto do lado c.a. era realizada por meio do microcomputador dedicado contendo o *software* do fabricante do inversor, GT View 1.7, o qual recebia os dados diretamente do inversor Xantrex, a cada 2 segundos, via cabo serial RS232 e os armazenava em um arquivo no formato Excel. Os exemplos dos parâmetros exibidos na tela do programa estão contidos na Figura 1.12.

Figura 1.12 – Tela principal do *software* de aquisição de dados do SFCR.



Fonte: Cavalcante (2011).

Conforme visto na Figura 1.12, por meio do *software* para aquisição de dados é possível visualizar os dados de potência ativa c.a., tensão c.c. e c.a., corrente c.c, frequência de operação,

temperatura do dissipador de calor, tensão no ponto de máxima potência, pico de geração c.a., tempo de operação do sistema, eficiência de conversão, produção de energia elétrica diária e total do sistema. Estes dados também podem ser exportados para um arquivo Excel, a fim de manter o registro para eventuais análises quanto ao funcionamento do inversor.

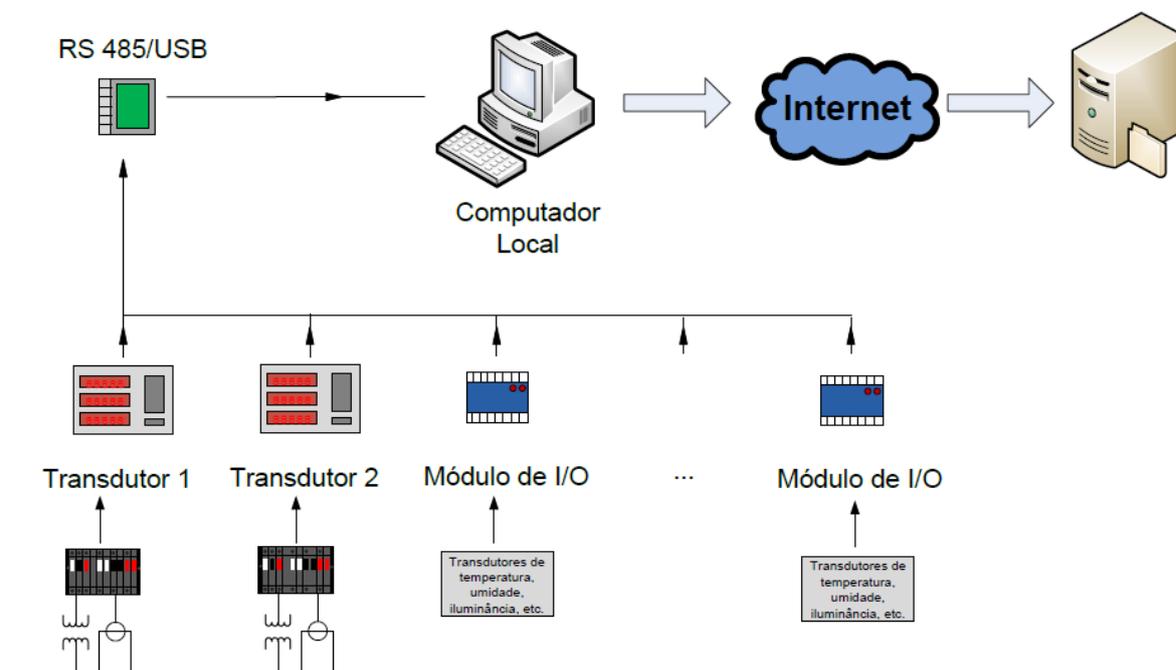
1.5.2 Monitoramento das grandezas elétricas do prédio do GEDAE

O sistema de monitoramento elaborado por Manito (2012) teve por objetivo coletar dados referentes às variáveis ambientais e as variáveis de geração, bem como o consumo de energia elétrica da edificação, por meio de um programa desenvolvido em LabVIEW, que permite a criação de uma base de dados unificada, sincronizada e de fácil acesso aos membros do grupo.

O programa original de monitoramento das grandezas elétricas desenvolvido por Manito (2012) possibilita ao usuário a personalização de ferramentas para análise dos dados coletados, além de oferecer a possibilidade de expansão para inserção de novas grandezas de interesse. Desta forma, facilitam-se estudos a respeito do desempenho energético da edificação, como seu consumo de energia elétrica, seus sistemas de geração e condições de conforto ambiental no interior da edificação, além de permitir verificar as MCE adotadas na edificação.

A comunicação dos medidores de multigrandezas elétricas deste sistema ocorre por meio do protocolo Modbus e a transmissão dos dados dos medidores se dá via interface RS-485 para um computador dedicado, a fim de unificar os dados coletados, viabilizando em intervalos de tempos distintos a recepção de informações por todos os elementos da rede e também a transmissão periódica para um servidor remoto. Como exemplo desta comunicação, apresenta-se na Figura 1.13 um esquema da rede de transferência de dados instalada na edificação durante o período do desenvolvimento deste sistema de monitoração.

Figura 1.13 – Esquema da rede em barramento instalada no GEDAE.

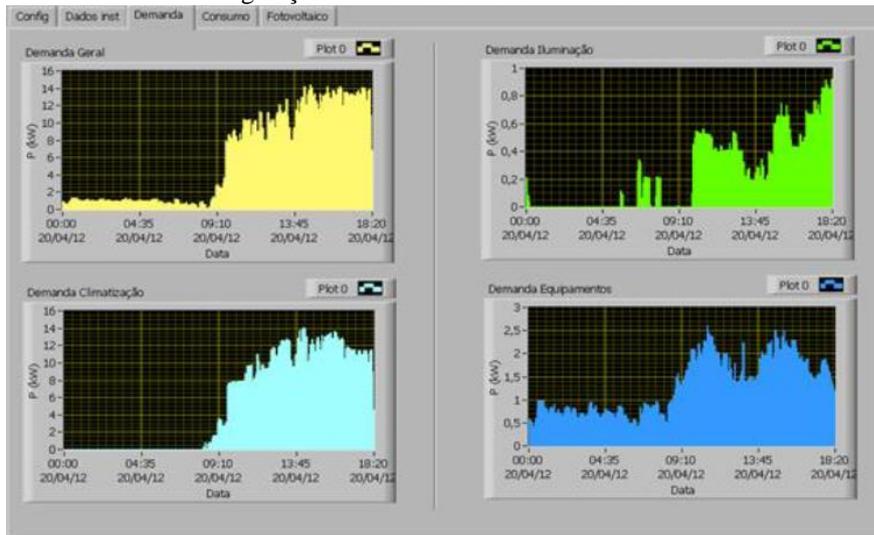


Fonte: Manito (2012).

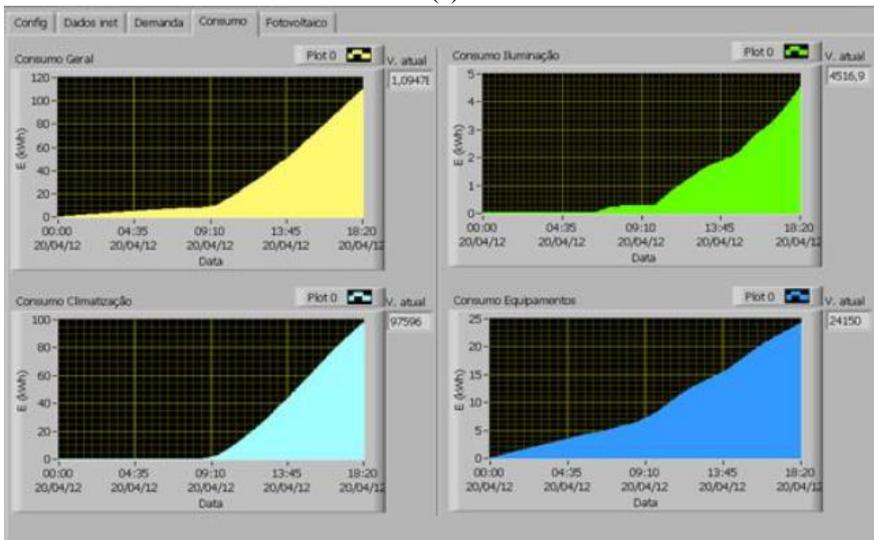
Observando-se o esquema da Figura 1.13, o sistema de aquisição de dados implantado possui um Computador Local funcionando como um gerenciador de rede, cuja função é de ordenar o momento de utilização do barramento de dados e o tempo necessário para cada equipamento realizar suas respectivas comunicações e, em seguida, disponibilizar os dados coletados e organizados na internet para acessos remotos.

Para exemplificar a visualização dos dados via interface gráfica do programa desenvolvido, ilustram-se, na Figura 1.14, as formas de exibição dos gráficos para a demanda, o consumo acumulado de energia elétrica da edificação ao longo do dia para cada circuito do prédio (iluminação, tomadas, climatização e geral), além da estimativa de geração dos SFCR instalados até o período de elaboração da escrita da dissertação de Manito (2012).

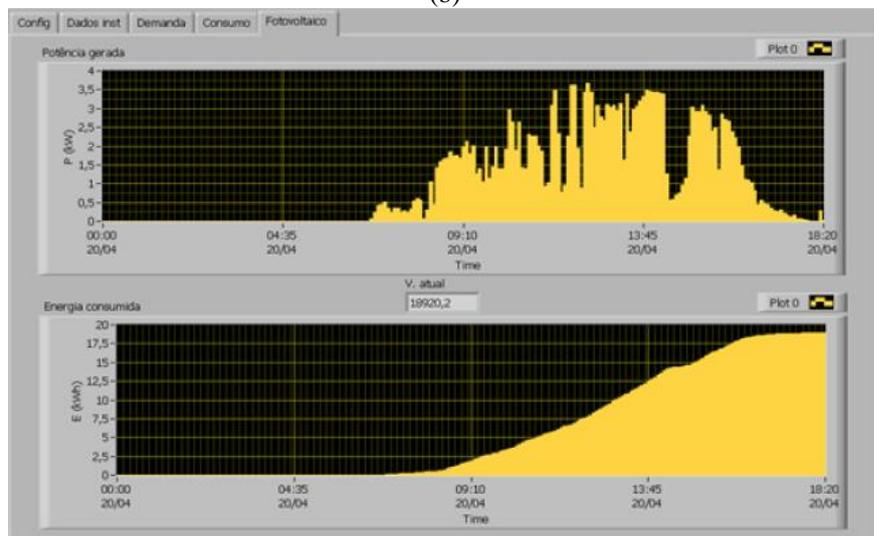
Figura 1.14 – Interface dos graficos exibidos para (a) demanda ativa, (b) consumo acumulado e (c) estimativa de geração dos SFCR no dia 20/04/2012.



(a)



(b)



(c)

Fonte: Manito (2012).

Posteriormente, Andrade (2022) desenvolveu uma interface *web* para gerenciamento e acompanhamento remoto dos dados obtidos pelo sistema de monitoração de Manito (2012), contendo gráficos, tabelas e blocos informativos, a fim de facilitar o entendimento dos dados de medição aos usuários cadastrados na plataforma *online*.

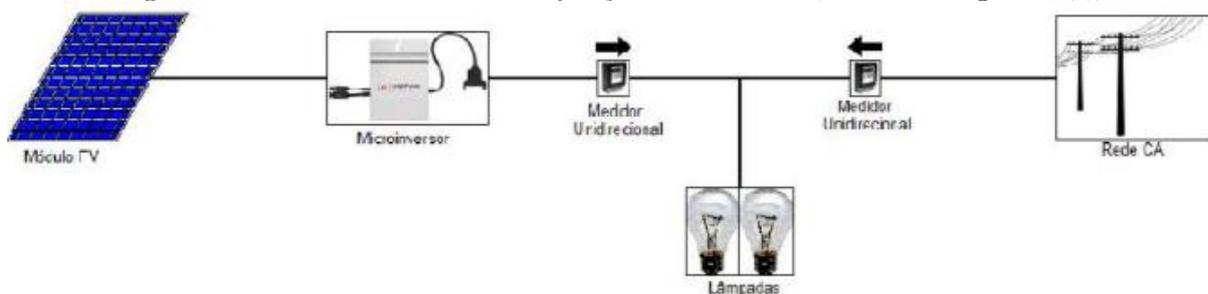
É válido ressaltar que, nos estudos de Manito (2012) e Andrade (2022), o processo para obtenção dos resultados para a geração fotovoltaica não ocorre por meio de medição direta dos SFCR, mas por meio de cálculos da diferença entre os registros de potência ativa do medidor do circuito geral e os registros dos medidores dos circuitos de iluminação, tomadas e climatização.

1.5.3 Monitoramento do sistema M1 (microinversor Enphase)

O estudo realizado por Torres *et al.* (2014) consistiu na montagem e monitoração do sistema com microinversor para analisar a eficiência do gerador fotovoltaico e do microinversor, além de dados de produção de energia elétrica sob diferentes perfis diários de irradiância.

A aquisição de dados de energia elétrica ocorre, conforme ilustrado na Figura 1.15, por meio de dois medidores eletrônicos unidirecionais, modelo Mecaf SMT 1510, para medir diariamente tanto a energia produzida pelo microinversor quanto a energia consumida da rede elétrica local durante o período em que as cargas estão acionadas.

Figura 1.15 – Painel demonstrativo de operação do sistema M1 (ver também Figura 1.9(b)).



Fonte: Torres *et al.* (2014).

Devido aos medidores eletrônicos instalados registrarem somente os dados de energia acumulada, tornou-se necessária a inserção de outros componentes para fins de registro de dados de tensão, corrente e potência, tanto c.c. quanto c.a., com o intuito de análise da eficiência do gerador fotovoltaico e do microinversor.

Para aquisição destes dados, utilizaram-se os transdutores de tensão, dos modelos 50V010VDC-127VAC e 250V010VLF-127VAC do fabricante SECON, para medir, respectivamente, as tensões c.c. e c.a.; e transdutores de corrente, modelo DHR100C10 do fabricante LEM, para medir as correntes c.c. e c.a.

Além disso, para coleta de dados de irradiância, utilizou-se uma célula de referência de silício monocristalino modelo Spektron 210 do fabricante Tritec compatível com o *datalogger*, modelo DT85 Series 2 do fabricante DataTaker, o qual mede sinais de tensão, resistência e frequência e se comunica com um computador via cabo USB. Desta forma, se estabelece acesso ao *software* interno do *datalogger*, dEX, cuja função é de exibir uma interface *web* gráfica, na qual é permitida a inserção das equações obtidas pela calibragem dos transdutores, além de possibilitar a visualização em tempo real dos dados em um computador, por meio de gráficos, tabelas e mostradores virtuais.

É válido ressaltar que a monitoração via *datalogger* foi utilizada somente durante a realização do estudo de Torres *et al.* (2014), sendo descontinuada devido à necessidade de utilização do *datalogger* em outros estudos.

1.5.4 Monitoramento do sistema S2 (inversor SMA)

O estudo realizado por Amorim (2015) consistiu na elaboração e montagem de uma bancada para a demonstração de um SFCR de baixa tensão, atendendo aos requisitos da Resolução Normativa 482/2012 da ANEEL e da Norma Técnica da concessionária de energia local vigentes no período desta pesquisa, além de analisar o desempenho do sistema.

Para este estudo, a etapa de aquisição dos dados é realizada por meio de dois medidores eletrônicos unidirecionais dedicados ao SFCR, da série SMT 1510 do fabricante MECAF/Diebold Procomp, o qual possibilita visualizar, por meio de um dos medidores, a quantidade de energia gerada e com o outro, a energia consumida da distribuidora, conforme ilustrado na Figura 1.16.

Figura 1.16 – Painel demonstrativo de operação do sistema instalado na estrutura do gerador.



1 Quadro de conexões entre gerador e inversor.
2 Quadro de conexões entre o inversor e a rede.
3 Quadro geral.
4 Medidor.

5 Inversor.
6 DSV.
7 Caixas de passagem.
8 Disjuntor geral do painel.

Fonte: Amorim (2015).

Os registros dos dados contendo as grandezas elétricas são realizados de forma manual, por meio do visor do medidor, os quais são apresentados, automaticamente, a cada 6 segundos de forma cíclica ou por acionamento dos botões no painel frontal do medidor. Além disso, registram-se os dados de geração do SFCR por meio do visor do inversor.

Outros estudos foram desenvolvidos para aquisição automática de dados deste sistema, tais como os projetos desenvolvidos por Carvalho (2015), o qual visava avaliar o desempenho operacional do SFCR por meio de um sistema de monitoração, cuja função era de coletar dados de temperatura na parte posterior do módulo fotovoltaico, irradiância, corrente e tensão tanto c.c. quanto c.a. via sensores, transdutores e circuitos de condicionamento de sinais conectados a um Arduino Mega 2560.

Os dados coletados eram exibidos a cada 6 segundos em valores RMS, médios, máximos e mínimos por meio de visores LCD conectados ao mesmo Arduino. Além disso, os dados também eram integralizados a cada 5 minutos e armazenados em um cartão de memória SD em formato de arquivo csv. Atualizações para a monitoração do sistema S2 também foram desenvolvidas e testadas por Monteiro (2019) e Rodrigues-Neto *et al.* (2020).

1.5.5 Monitoramento dos sistemas S1, S2, S3, S4, S5, S6, S7, S8, M1, M2 e C1

O estudo realizado por Teles (2017) teve por objetivo avaliar o desempenho dos SFCR (S1, S2, S3, S4, M1, M2 e C1) a partir do emprego de variadas tecnologias, tais como *string*, microinversores e conversor c.c.-c.c. A aquisição dos dados ocorreu diariamente (com exceção de finais de semana e feriados), sendo realizada a leitura manual, ao final do dia, dos dados exibidos nas telas dos inversores e dos medidores eletrônicos da série SMT 1510 do fabricante MECAF/Diebold Procomp, em todos os SFCR monitorados, à exceção do sistema C1, no qual se utilizava o *SEgateway*, um *datalogger* próprio do fabricante do inversor SolarEdge, cuja função é de armazenar dados de parâmetros elétricos e ambientais e disponibilizá-los em um servidor *online* do fabricante, além de permitir configurar remotamente alguns dos parâmetros do inversor.

Devido à maioria dos equipamentos de medição manterem somente os valores de energia acumulada ao longo do dia, o estudo realizado por Teles (2017) teve foco na operação diária para as diferentes arquiteturas de interligação de SFCR instaladas na área externa da edificação do GEDAE.

Posteriormente, o estudo realizado por Teles (2017) teve continuidade por Silva (2019) com a inclusão dos sistemas S5, S6, S7 e S8 para avaliação da contribuição energética dos SFCR na edificação do GEDAE/UFPA ao longo dos anos de funcionamento de cada SFCR. Para estes novos sistemas foram realizadas leituras manuais, ao final do dia, dos dados exibidos somente nas telas dos inversores.

1.5.6 Monitoramento do sistema S1 (inversor PHB)

O estudo realizado por Sá (2015) teve como objetivo o desenvolvimento de um mostrador para visualização, em tempo real, dos valores de potência gerada (kVA), energia diária (kVAh) e irradiância (W/m^2) incidente no plano deste SFCR, conforme ilustrado na Figura 1.17.

Figura 1.17 – Mostrador instalado no sistema S1.



Fonte: Sá (2015).

Outro estudo relacionado ao monitoramento do sistema S1 foi realizado por Rodrigues-Neto (2017), tendo por objetivo avaliar os valores de potência c.a. injetada na rede elétrica por meio de um SFCR, utilizando os dados coletados por um *datalogger* do mesmo fabricante do inversor e por um *datalogger* desenvolvido pelo autor da pesquisa, por meio do uso de sensores de irradiância e sensor de temperatura na parte posterior do módulo fotovoltaico, sendo conectados a um microcontrolador na plataforma Arduino, para fins de comparação entre um modelo matemático teórico para o SFCR em questão e os dados coletados pelo *datalogger* do inversor.

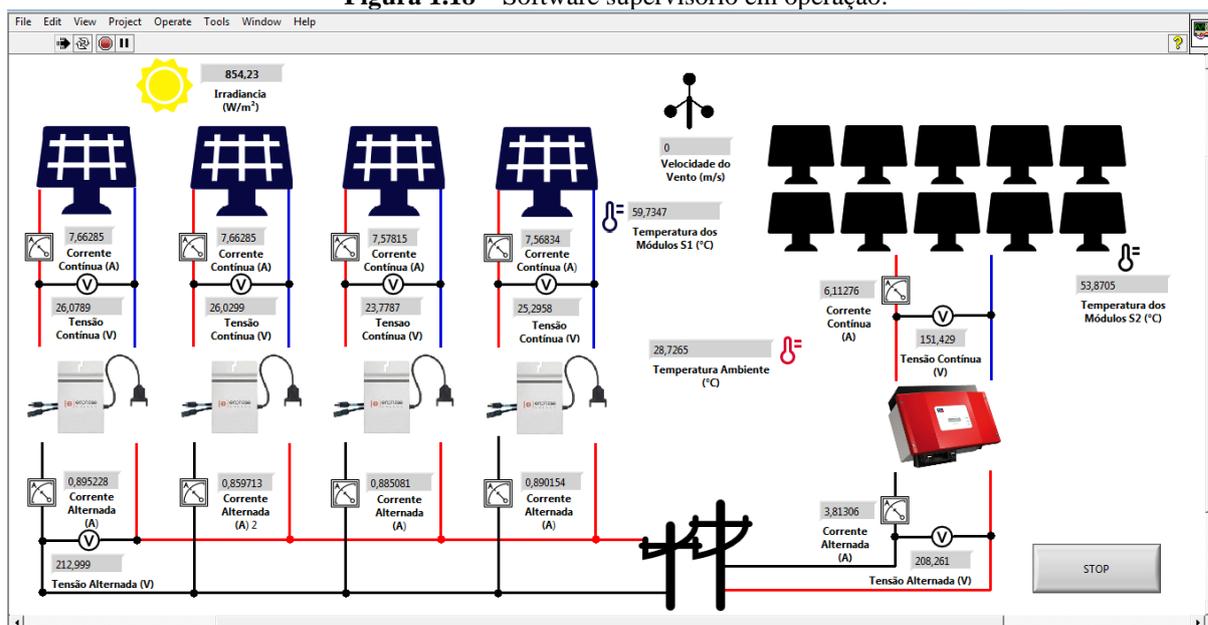
1.5.7 Monitoramento dos sistemas M2 e S5 (microinversor Enphase e inversor SMA)

O estudo realizado por Teixeira Junior (2017) teve por objetivo desenvolver um sistema para monitoramento dos SFCR M2 e S5, a fim de possibilitar a realização de uma análise mais detalhada acerca do desempenho destes SFCR. Para isto foram monitoradas as tensões e correntes tanto c.c. quanto c.a., velocidade do vento, irradiância incidente no plano dos módulos fotovoltaicos, temperatura ambiente e temperatura na parte posterior do módulo fotovoltaico.

É válido ressaltar que o sensor de irradiância foi instalado no mesmo plano dos módulos fotovoltaicos dos sistemas monitorados e o anemômetro foi fixado à mesma estrutura dos módulos fotovoltaicos dos SFCR, portanto, na mesma altura desses.

Os sensores e transdutores foram conectados a uma placa de aquisição de dados, PCI-9111/HR da ADLINK, a qual se comunicava com o *software* LabVIEW para organização e exibição dos dados coletados, em tempo real, por ambos SFCR, além de permitir a exportação dos dados integralizados a cada 5 minutos em um arquivo no formato csv. Para ilustração da interface do programa desenvolvido, na Figura 1.18 é exibida a tela para monitoramento dos dois sistemas por meio do *software* supervisor.

Figura 1.18 – Software supervisor em operação.



Fonte: Teixeira Junior (2017).

Outro projeto similar foi desenvolvido por Pires (2021), porém voltado à monitoração exclusiva do sistema com microinversor (M2). Apesar de não monitorar dados de velocidade do vento e limitar-se ao monitoramento de apenas dois dos quatro microinversores do sistema M2, o projeto apresentou como diferencial a utilização dos microcontroladores Arduino Mega, para coleta e cálculos dos dados, e ESP32 para disponibilizar estes dados em um servidor local e também encaminhá-los ao serviço de armazenamento em nuvem do Google Drive.

1.5.8 Informações adicionais

É válido comentar que o GEDAE possui outros estudos e atividades na área de energias renováveis, destacando-se na aplicação de sistemas fotovoltaicos, sendo pioneiro na instalação de um SFCR integrado à edificação na região Amazônica (ZILLES *et al.*, 2012).

O primeiro SFCR em uma edificação na região Amazônica foi implantado em dezembro de 2007, sendo composto por um inversor da Enertron, modelo Solete 2500 com potência nominal de 2,5 kW e um gerador fotovoltaico de 1,575 kWp, constituído de 21 módulos fotovoltaicos de silício cristalino da Siemens, modelo SP75, cada um com potência nominal de

75 Wp, todos conectados em série, orientados a 19° noroeste e inclinados de 14° com relação à horizontal (FIGUEIREDO; VASCONCELOS, 2010). Na Figura 1.19 apresenta-se uma fotografia dos módulos fotovoltaicos deste SFCR instalados em telhado.

Figura 1.19 – Gerador fotovoltaico do primeiro SFCR em uma edificação na região Amazônica.



Fonte: (FIGUEIREDO; VASCONCELOS, 2010).

O estudo de Figueiredo e Vasconcelos (2010) teve o intuito de realizar a análise de desempenho do primeiro SFCR integrado à edificação do GEDAE e a modelagem tanto dos módulos fotovoltaicos, assim como do SFCR, a fim de estimar a energia produzida, facilitando dimensionamentos futuros. Embora, atualmente, este SFCR se encontre inativo, ao longo dos anos, outros sistemas, constituídos de variadas tecnologias de módulos (Si-m, Si-p, Si-a, entre outros) e tipos de inversores para conexão à rede (*strings*, microinversores, bidirecionais etc.) foram implantados na área de testes e no telhado do laboratório para estudos diversos.

Além dos SFCR apresentados no Tópico 1.4, é válido ressaltar que, apesar de não serem o foco deste trabalho, ainda existem outros sistemas fotovoltaicos que contribuem para o atendimento de parte da demanda da edificação em momentos de indisponibilidade do fornecimento de eletricidade pela rede de distribuição de energia elétrica local.

Pode-se citar os estudos de Corrêa (2017), que menciona os sistemas fotovoltaicos descritos resumidamente na Tabela 1.6 e ilustrados na Figura 1.20, que fazem parte do Laboratório de Sistemas Híbridos e Microrredes (LSHM), cuja principal finalidade é simular um sistema elétrico autossuficiente de fornecimento de energia, com enfoque em recursos renováveis e utilização de banco de baterias para armazenamento de energia.

Tabela 1.6 – Descrição dos sistemas fotovoltaicos que compõem o LSHM.

Sistema	Quantidade de módulos	Associação do arranjo FV	Capacidade instalada (Wp)	Módulo Fotovoltaico		Inversor	
				Marca / Modelo	Pmp (W)	Marca / Modelo	Potência c.a. (W)
GFV-01	5	Série	925	YINGLI SOLAR / YL185P-23b	185	SMA / Sunny Boy 700U	700
GFV-02	5	Série	1.100	SunPower / SPR-220-BLK- U	220	SMA / Sunny Boy 700U	700
GFV-03	5	Série	1.100	SunPower / SPR-220-BLK- U	250	SMA / Sunny Boy 700U	700
GFV-04	12	3 fileiras com 4 módulos em série	3.000	KYOCERA / KD250GH- 4FB2	250	*	**
GFV-05	12	3 fileiras com 4 módulos em série	3.000	KYOCERA / KD250GH- 4FB2	250	*	**
GFV-06	8	2 fileiras com 4 módulos em série	2.000	KYOCERA / KD250GH- 4FB2	250	SMA / Sunny Boy 700HF	2.000
GFV-07	8	2 fileiras com 4 módulos em série	2.000	KYOCERA / KD250GH- 4FB2	250	SMA / Sunny Boy 2000HF	2.000
TOTAL	30	-	7.025	-	-		

* Sistema conectado diretamente no barramento c.c. por meio de um controlador de carga da marca FlexMax 60, modelo FM60-150VCC.

** Potência c.c. de 3000 W para sistemas de 48 Vc.c.

Fonte: Adaptado de Corrêa (2017) e dos manuais dos fabricantes: YINGLI (2009); SunPower (2008); KYOCERA (2013); SMA America (2003); OutBack Power (2013); SMA America (2011).

Figura 1.20 – Sistemas FV implantados no âmbito do LSHM: (a) GFV-01, (b) GFV-02 e GFV-03, (c) GFV-04 e GFV-05 e (e) GFV-06 e GFV-07.



Fonte: Corrêa (2017).

O sistema de armazenamento de energia é composto por dois bancos de baterias idênticos do tipo OPzS¹, do fabricante Fulguris, cada banco formado por 24 baterias de 2 V e 1.000 Ah conectadas em série. A capacidade individual de cada banco é de 48 kWh e com o auxílio de chaves de proteção/manobras é possível conectar os dois bancos em paralelo, resultando em um sistema de 96 kWh. Estes bancos de baterias auxiliam no fornecimento de energia elétrica quando ocorrem eventuais falhas ou indisponibilidade no suprimento de eletricidade pela rede distribuição elétrica local.

Ressalta-se que atualmente os bancos de baterias encontram-se inoperantes devido à queima de componentes responsáveis pela comutação entre o uso da rede elétrica e do suprimento pelo LSHM, além de algumas das baterias que compõem o sistema de armazenamento de energia estarem deterioradas devido ao fim da vida útil.

No próximo capítulo são apresentados os equipamentos e *softwares* para aquisição de dados empregados atualmente, além das ferramentas matemáticas e metodologia utilizadas para coleta e tratamentos dos dados de produção de energia dos SFCR implantados no GEDAE e apresentados no Tópico 1.4.

¹ A sigla refere-se a um tipo inundado de baterias de chumbo-ácido de ciclo profundo com placas positivas tubulares. Essas baterias geralmente têm uma tensão de célula de 2 V e são conectadas em série para produzir tensões mais altas (SUZHOU FOBERRIA NEW ENERGY TECHNOLOGY CO. LTD., 2023).

CAPÍTULO 2 – MEDIÇÃO E AQUISIÇÃO DE DADOS: FERRAMENTAS E METODOLOGIA PARA ESTIMATIVA DA PRODUÇÃO DE ENERGIA

Neste capítulo são apresentados os principais equipamentos envolvidos na aquisição dos dados meteorológicos e dos dados de produção de energia elétrica pelos sistemas fotovoltaicos conectados à rede de distribuição de energia elétrica que atendem parte do consumo do prédio do GEDAE. Assim também, apresenta-se a metodologia empregada para o tratamento destes dados e para a avaliação da contribuição real e estimada dos sistemas fotovoltaicos considerados.

2.1 Dispositivos de medição

Neste tópico são expostas as ferramentas que foram utilizadas para coletar os dados de produção de energia elétrica oriunda dos SFCR, de forma conjunta (medição de um grupo de SFCR alocados em um ponto de medição em comum) e individual (medição direta na saída do inversor de cada SFCR).

A monitoração da contribuição dos SFCR é realizada utilizando quatro tipos de ferramentas para medição: medidores eletrônicos de energia, visor do inversor, *datalogger* e medidores de multigrandezas elétricas. Cada uma dessas ferramentas está descrita nos subtópicos seguintes.

2.1.1 Medidores Eletrônicos de Energia

Como já mencionado no Subtópico 1.5.5, os medidores eletrônicos utilizados são do modelo SMT 1510, do fabricante MECAF/Diebold, conforme ilustrado na Figura 2.1. Todos os sistemas apresentados no Tópico 1.4, exceto os sistemas S5, S6, S7, S8 e o C1, estão equipados com um medidor eletrônico SMT 1510. Conforme testes realizados por Teles (2017), este medidor possui uma boa exatidão devido à diferença entre os valores instantâneos de tensão e corrente obtidos por este medidor eletrônico e pelo osciloscópio portátil digital² utilizado como referência, sendo inferior a 0,8 % e 1,8 %, respectivamente.

² De acordo com Teles (2017), o osciloscópio portátil digital é do fabricante Fluke, modelo ScopeMeter 199c, com exatidão de $\pm 1,5$ % para tensão (c.c. e c.a.) e 2,5 % para corrente (c.c. e c.a.).

Figura 2.1 – Medidores eletrônicos SMT 1510.



Fonte: Amorim (2015).

Para estes modelos de medidores eletrônicos, as informações (funções e grandezas elétricas) são apresentadas no visor de forma cíclica, isto é, com rolagem automática e seis segundos de exibição para cada valor, ou por acionamento dos botões do painel frontal: *Seleciona* (botão preto) e *Confirma* (botão vermelho).

2.1.2 Visor dos Inversores

No inversor existe, internamente, um sistema de monitoramento de grandezas elétricas que são apresentadas em seu visor de forma cíclica, tais como produção diária de energia ativa no lado c.a., potência ativa no lado c.c., potência ativa no lado c.a., tensão do gerador fotovoltaico, energia total entregue no lado c.a. desde a instalação do inversor.

Este meio de coleta de dados é realizado para anotação do valor de energia ativa exibida em cada visor dos inversores, principalmente nos sistemas S8 (inversor Xantrex) e S5, S6 e S7 (inversor SMA), já os demais sistemas, apresentados no Tópico 1.4, são monitorados pela anotação do valor de energia ativa apresentada pelo medidor eletrônico conectado à saída de cada inversor ou pela obtenção do registro *online* transmitido via *datalogger*.

Para os inversores SMA, os dados de grandezas elétricas são atualizados no visor do inversor a cada cinco segundos, sendo mostrados de forma cíclica ou quando se aciona o visor ao tocá-lo uma vez. Enquanto, para o inversor Xantrex, estes dados são exibidos no visor somente quando este é ativado ao tocá-lo uma vez.

2.1.3 Datalogger/Online

Dentre os SFCR abordados no Tópico 1.4, apenas os sistemas S1 e C1 estão conectados à *internet* via *datalogger*. No entanto, a aquisição dos dados de energia ativa produzida é extraída, via *datalogger*, somente no sistema C1. Apesar do sistema S1 possuir conexão via *datalogger*, os registros da leitura dos dados de energia ativa produzida ocorrem via medidor eletrônico apresentado no Subtópico 2.1.1.

A monitoração do sistema C1 é realizada por meio de um equipamento do fabricante SolarEdge, denominado de *SEgateway*, instalado na sala Biblioteca do prédio do GEDAE, conforme ilustrado na Figura 2.2. Este equipamento serve para controlar remotamente alguns parâmetros do inversor, além de armazenar os parâmetros elétricos e ambientais do sistema em um servidor *online* do próprio fabricante.

Figura 2.2 – Datalogger *SEgateway*.



Fonte: Teles (2017).

2.1.4 Medidores de Multigrandezas Elétricas

A instalação de quadros elétricos para a criação de circuitos parciais e geral dos SFCR favoreceu a implementação de um sistema próprio para monitoração dos SFCR instalados na área externa do GEDAE.

A utilização de quadros elétricos serviu também para separar alguns SFCR que estavam conectados no circuito de tomadas do prédio do GEDAE, dificultando na monitoração de consumo de energia elétrica nas tomadas e equipamentos da edificação, pois além de coletar os dados do circuito de tomadas, havia a influência dos SFCR no cálculo do consumo deste circuito.

Desta forma, para a aquisição de dados dos parâmetros elétricos c.a. dos SFCR, instalou-se um medidor de multigrandezas em cada quadro elétrico, juntamente com um transformador de corrente (TC) para cada fase da rede elétrica.

Os medidores de multigrandezas empregados são do fabricante Kron, modelo MULT-K 05 (Figura 2.3 e Tabela 2.1) e modelo KONECT (Figura 2.4 e Tabela 2.2), sendo utilizados nos quadros de medição parciais e geral dos SFCR, respectivamente.

Figura 2.3 – Medidor de multigrandezas Mult-K 05.



Fonte: Kron (2021).

Tabela 2.1 – Especificações do medidor de multigrandezas Mult-K 05.

Alimentação auxiliar	Padrão: 120-220 Vc.a.
Consumo interno	< 10 VA.
Faixa de trabalho (entrada de tensão)	20 a 500 Vc.a. (F-F).
Frequência	44 a 72 Hz.
Entrada de corrente nominal	1 Ac.a. ou 5 Ac.a.
Indicação mínima	20 mA.
Temperatura de operação	0 a 60 °C.
Interface de comunicação (serial)	Tipo: RS-485, protocolo MODBUS-RTU (padrão) ou Metasys N2 (opcional).
	Velocidade (MODBUS-RTU): 9600, 19200, 38400 ou 57600 (configurável).
	Formato de dados: 8N1, 8N2, 8E1, 8O1 (configurável).
	Endereço: 1 a 247 (configurável).
	Mapeamento: FLEXDATA, com ponto flutuante configurável IEEE 754 (32 bits).
Precisão	Cabo (para RS-485): Par trançado, blindado, seção mínima de 0,25 mm ² (2 x 24 AWG ou 3 x 24 AWG).
	Tensão, corrente e potência: 0,2%.
	Frequência: 0,1 Hz.
	Fator de Potência: 0,5%.
	Energia: 0,5%.
	THD: < 3%.

Fonte: Kron (2021).

Figura 2.4 – Medidor de multigrandezas Konect.



Fonte: Kron (2021).

Tabela 2.2 – Especificações do medidor de multigrandezas Konect.

Alimentação auxiliar	Padrão: 110-220 Vc.a.	
Consumo interno	< 10 VA.	
Faixa de trabalho (entrada de tensão)	20 a 500 Vc.a. (F-F).	
Frequência	50 Hz (42,5 a 57,5 Hz) 60 Hz (51 a 69 Hz)	
Entrada de corrente nominal	63 Ac.a.(padrão), 5 Ac.a.	
Indicação mínima	200 mA.	
Temperatura de operação	0 a 60 °C.	
Interface de comunicação (serial)	Tipo: RS-485 e Bluetooth, protocolo MODBUS-RTU. Velocidade (MODBUS-RTU): 9600, 19200, 38400 ou 57600 (configurável). Ethernet e Wi-Fi, protocolo MODBUS TCP/IP, MQTT. Formato de dados: 8N1, 8N2, 8E1, 8O1 (configurável). Endereço: 1 a 247 (configurável). Mapeamento: <i>FLEXDATA</i> , com ponto flutuante configurável IEEE 754 (32 bits). Cabo (para RS-485): Par trançado, blindado, seção mínima de 0,25 mm ² (2 x 24 AWG ou 3 x 24 AWG). Tensão, corrente, potência ativa, reativa e aparente, fatores de potência: 0,5%.	
	Precisão	Frequência: 0,1 Hz. Energia: 1,0%. THD: ± 5%.

Fonte: Kron (2021).

Dentre os parâmetros coletados por fase pelos medidores estão: Tensão, Corrente, Frequência, Potência Ativa, Potência Reativa, THD de Tensão e THD de Corrente.

Os TC utilizados são do fabricante Kron, modelo KR 127, instalados nos quadros parciais e geral. O modelo do TC está ilustrado na Figura 2.5 e descrito na Tabela 2.3.

Figura 2.5 – Transformador de corrente KR 127.



Fonte: Kron (2022).

Tabela 2.3 – Especificações do transformador de corrente KR 127.

Normas	ABNT NBR-6856.
Corrente no primário	150 A.
Corrente no secundário	5 A.
Classe	0,6.
Carga	2,5 VA.
Frequência	60 Hz.
Fator Térmico	1,2 x In.

Fonte: Kron (2022).

2.2 Dispositivos de aquisição de dados

Neste tópico são expostas as ferramentas que foram utilizadas para a coleta dos dados meteorológicos que servem de base para a estimativa da produção de energia elétrica dos SFCR. Para isto, fazem-se necessárias as informações de alguns parâmetros meteorológicos, dentre eles: irradiância no plano do gerador fotovoltaico, temperatura na parte posterior do módulo fotovoltaico, velocidade do vento na superfície do módulo. No entanto, o presente trabalho ateu-se aos dados de irradiância global e temperatura ambiente obtidos por meio das seguintes fontes de dados: uma estação meteorológica no GEDAE; de um registrador de dados (denominado de *FieldLogger*) no GEDAE e estimativa de dados meteorológicos pela NASA (agência aeroespacial dos Estados Unidos) para o local. Cada uma das fontes de dados está descrita a seguir.

2.2.1 Estação Meteorológica do GEDAE

A Figura 2.6 ilustra a estação meteorológica utilizada para obtenção dos dados ambientais, cuja fabricante é a ONSET, modelo HOBO U30. Encontra-se a uma distância de 5 metros da edificação do GEDAE, instalada a 5 metros de altura e está configurada para uma frequência de registro de dados em intervalos de 5 minutos.

Essa estação está equipada com sensores que compõem o sistema de aquisição de dados de irradiância global no plano horizontal, temperatura ambiente, temperatura do solo, pressão, umidade, direção do vento, velocidade do vento, índice pluviométrico, entre outros parâmetros. Os dados de interesse extraídos da estação são os de irradiância global no plano horizontal e os de temperatura ambiente.

Figura 2.6 – Estação meteorológica próxima à edificação.



Fonte: Aguilar (2018).

2.2.1.1 Sensor de irradiância da estação meteorológica

O piranômetro de silício, modelo S-LIB-M003, fabricado pela ONSET, está designado a operar em conjunto com a estação meteorológica HOBO U30. Todos os parâmetros de calibração estão armazenados neste pequeno dispositivo, o qual se comunica automaticamente com a estação por meio de um conector modular que transmite as informações coletadas de irradiância sem a necessidade de qualquer tipo de programa ou configurações adicionais. Na Tabela 2.4 são mostradas as especificações fornecidas pelo fabricante a respeito deste piranômetro.

Tabela 2.4 – Especificações do piranômetro.

Especificações	Piranômetro (S-LIB-M003).
Faixa de medição	0 a 1280 W/m ² .
Faixa espectral	300 a 1100 nm.
Acurácia	±5%, para valores maiores de irradiância; ±0,38 W/m ² /°C, temperaturas superiores a 25°C.
Resolução	1,25 W/m ² .

Fonte: ONSET (2010).

2.2.1.2 Sensor de temperatura da estação meteorológica

O sensor de temperatura 12-Bit, modelo S-TMB-M002, fabricado pela ONSET, está designado a operar em conjunto com a estação meteorológica HOBO U30. Todos os parâmetros

de calibração estão armazenados neste sensor e automaticamente realiza a comunicação com a estação acerca das informações coletadas de temperatura sem a necessidade de qualquer programação ou configurações extensivas. Na Tabela 2.5 são mostradas as especificações fornecidas pelo fabricante a respeito deste sensor de temperatura.

Tabela 2.5 – Especificações do sensor de temperatura.

Especificações	Sensor de temperatura 12-Bit (S-TMB-M002).
Faixa de medição	-40° a +100°C.
Acurácia	±0,2°C (na faixa entre 0° a +50°C).
Resolução	0,03°C (na faixa entre 0° a +50°C).

Fonte: ONSET (2008).

Devido ao estado descalibrado atual da estação meteorológica HOBO U30, optou-se também por outras fontes de dados para irradiância e temperatura ambiente, tais como os dados coletados por meio do registrador de dados *FieldLogger*, do fabricante Novus e dos dados disponíveis no *site* da NASA.

2.2.2 Registrador de dados – *FieldLogger*

A fim de se obter dados de irradiância e temperatura que complementem o período em que se deixou de coletar os dados da estação meteorológica do GEDAE, uma das alternativas utilizadas foi a instalação de sensores de irradiância e temperatura, sendo a coleta destes dados por meio de um registrador de dados, modelo *FieldLogger*, o qual é um equipamento de aquisição e registro de dados analógicos e digitais do fabricante Novus, conforme ilustrado na Figura 2.7 e descrito na Tabela 2.6.

Figura 2.7 – *FieldLogger* do Novus.



Fonte: Novus (2021).

Tabela 2.6 – Especificações do *FieldLogger* da Novus.

Alimentação	100-240 Vc.a \pm 10%.
Consumo máximo	20 VA.
Temperatura de operação	0 a 50 °C.
Frequência	50/60 Hz.
Umidade relativa	80% até 30 °C (Acima de 30 °C, -3% por °C).
Bateria do relógio	Bateria de lítio de 3 V (CR 2032). Canais: até 1000 canais por segundo*.
Registro	Armazenamento: memória interna (2162688 bytes \rightarrow aproximadamente 512k registros) ou cartão SD**. Sistemas de arquivos suportados: FAT32 e FAT16 (para cartão SD e <i>pendrive</i>).

* Limitação: 1 canal a 1000 registros por segundo ou 100 canais a 10 registros por segundo.

** A taxa efetiva do registro depende muito da qualidade e velocidade do cartão SD utilizado. Se a taxa de registros desejada for alta, optar por cartões de Classe IV ou superior. No máximo 100 canais podem ser registrados no cartão SD.

Fonte: Novus (2021).

2.2.2.1 Sensor de irradiância utilizado com o *FieldLogger*

Para obtenção de dados de irradiância global, empregou-se o sensor de irradiância Spektron 210 do fabricante Tritec, conforme observado na Figura 2.8 e descrito na Tabela 2.7. Ressalta-se que o sensor de irradiância foi instalado no GEDAE/UFGA no plano de um gerador fotovoltaico, que não está na lista dos SFCR monitorados, com inclinação de 10° e orientação azimutal de 19° Noroeste (NO).

Figura 2.8 – Sensor de irradiância.



Fonte: Tritec (2022).

Tabela 2.7 – Especificações do sensor de irradiância.

Modelo	Spektron 210.
Tipo do sensor	Célula de silício monocristalino.
Faixa de medição	0 a 1.500 W/m ² .
Acurácia	\pm 5% (média anual).
Saída	75 mV em 1.000 W/m ² .

Fonte: Tritec (2022).

Os parâmetros de saída foram calibrados³ utilizando o simulador solar disponível no GEDAE, modelo *HighLight 3c* do fabricante *Pasan Measurement Systems*, classe A+A+A+. A partir dos ensaios obteve-se um valor de referência de 74,145 mV em condições de 1.000 W/m².

Como a saída do sensor de irradiância é um sinal de tensão, utiliza-se a Equação (2.1) no registrador de dados para a obtenção da irradiância global. Ressalta-se que esta equação foi formulada considerando unicamente a calibração da célula de referência, sem incluir a exatidão do registrador de dados.

$$G = \frac{1.000 \cdot V_{out}}{0,074145} \quad (2.1)$$

Sendo G a irradiância em W/m² e V_{out} a tensão de saída do sensor de irradiância em V.

2.2.2.2 Sensor de temperatura utilizado com o *FieldLogger*

Para medição de temperatura ambiente, utiliza-se um sensor termopar da fabricante LABFACILITY tipo K. O termopar possui faixa de operação de -50 a 350 °C com cabo de 2 metros de comprimento, conforme ilustra-se na Figura 2.9 (FONSECA, 2023).

Figura 2.9 – Sensor de temperatura ambiente.



Fonte: Fonseca (2023).

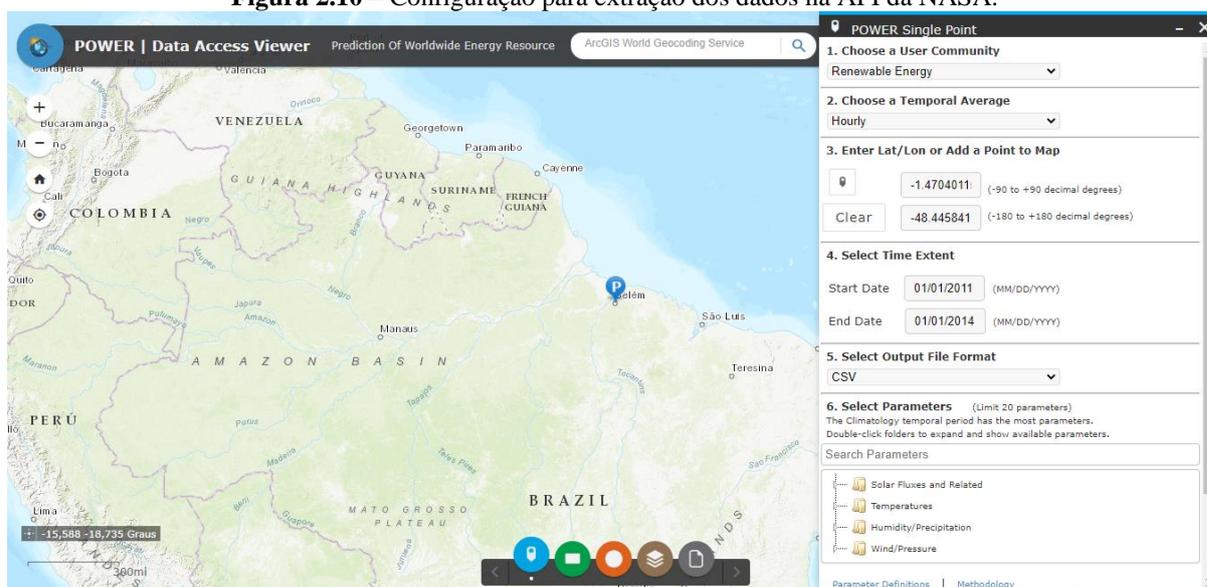
2.2.3 Dados da NASA

Devido ao estado descalibrado atual da estação meteorológica HOBO U30, optou-se também pelo uso de outras fontes de dados para irradiância e temperatura ambiente, tais como os dados disponíveis pelo projeto *Prediction of Worldwide Energy Resources* (POWER), que foi desenvolvido com o propósito de contribuir com o atual conjunto ou base de dados acerca do recurso de energia renovável, por meio da criação de novos conjuntos de dados a partir de novos sistemas de satélite.

³ O sensor de irradiância, Spektron 210, foi calibrado por Torres (2019), empregando-se os procedimentos de calibração descritos por Brito (2018).

Os dados são acessados por meio de uma interface de programação de aplicações (API) da NASA, o *Data Access Viewer*, possibilitando escolher a integralização dos dados (horária, mensal ou anual); a geolocalização do ambiente que se deseja obter os parâmetros meteorológicos; período dos dados (data inicial e final); o formato de saída do arquivo; e os parâmetros que se deseja obter (irradiância, temperatura, umidade/precipitação e vento/pressão), conforme observa-se na Figura 2.10. Ressalta-se que os dados de irradiância global são obtidos no plano horizontal.

Figura 2.10 – Configuração para extração dos dados na API da NASA.



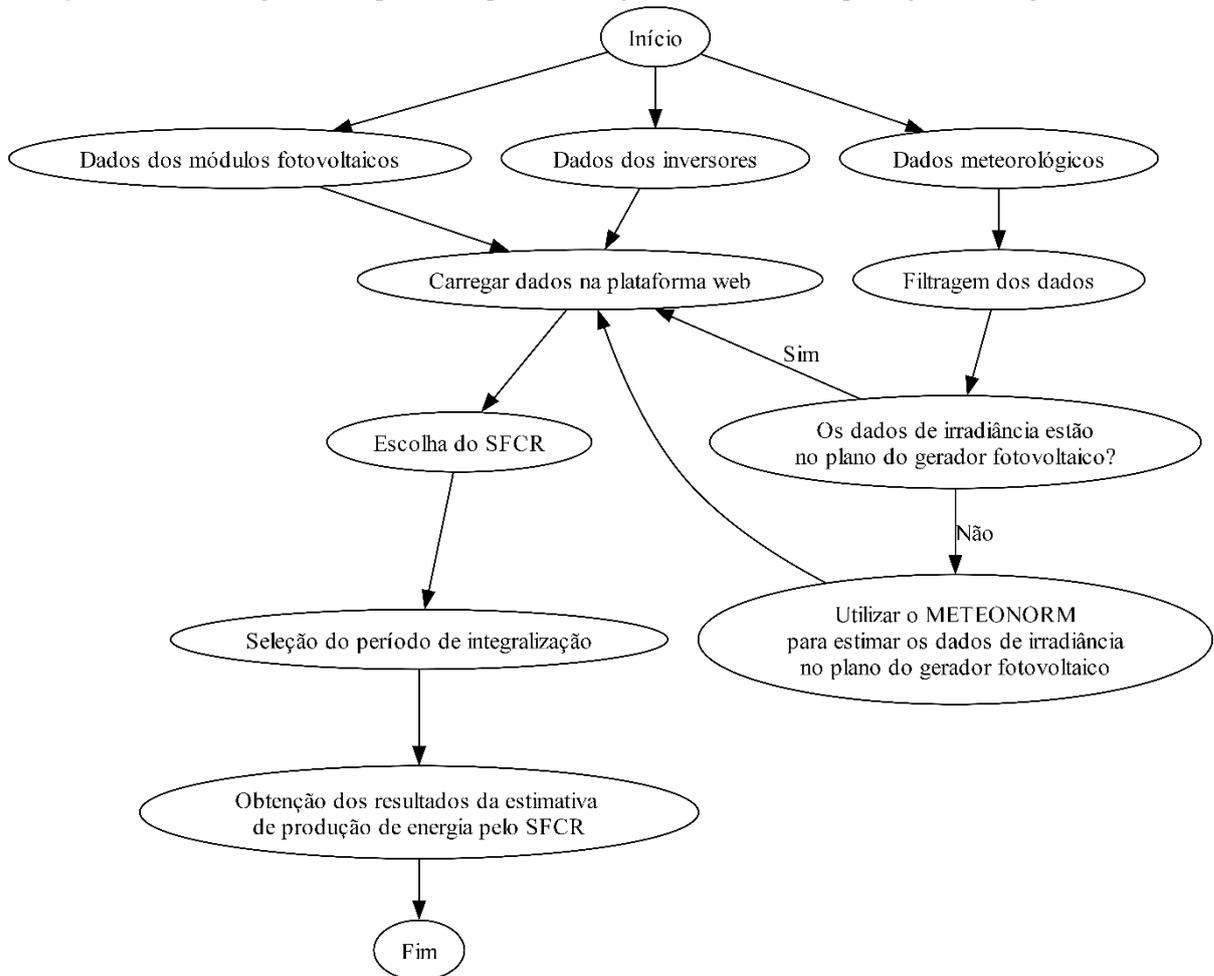
Fonte: NASA (2023).

2.3 Metodologia

Neste tópico são assinalados os métodos adotados para coleta e aferição dos dados de produção de energia elétrica proveniente dos SFCR. Ademais, também se descrevem os procedimentos para obtenção e tratamento dos dados da estação meteorológica, bem como as ferramentas computacionais empregadas para estimativa de produção de energia elétrica destes sistemas conectados à rede.

Para uma visão macro do que se almeja apresentar neste tópico, na Figura 2.11 são ilustrados, de forma sintetizada, os processos para realização da simulação para estimativa de produção de energia elétrica dos SFCR utilizados neste trabalho. Os detalhes para cada etapa são apresentados nos subtópicos seguintes.

Figura 2.11 – Fluxograma dos processos para a obtenção da estimativa da produção de energia dos SFCR.



Fonte: Elaborado pelo autor.

2.3.1 Softwares de aquisição de dados e simulação

Para aquisição de dados pertinentes aos parâmetros elétricos do prédio do GEDAE e dos SFCR, fez-se uma adaptação realizada no programa computacional desenvolvido por Manito (2012) com base em LabVIEW. A adaptação consistiu em ajustes e introdução de módulos criados para viabilizar a comunicação do programa com os novos medidores cadastrados, haja vista que a versão original do programa permitia o cadastro de novos medidores sem a necessidade de alterar o código fonte, porém esta versão não estava mais disponível no laboratório.

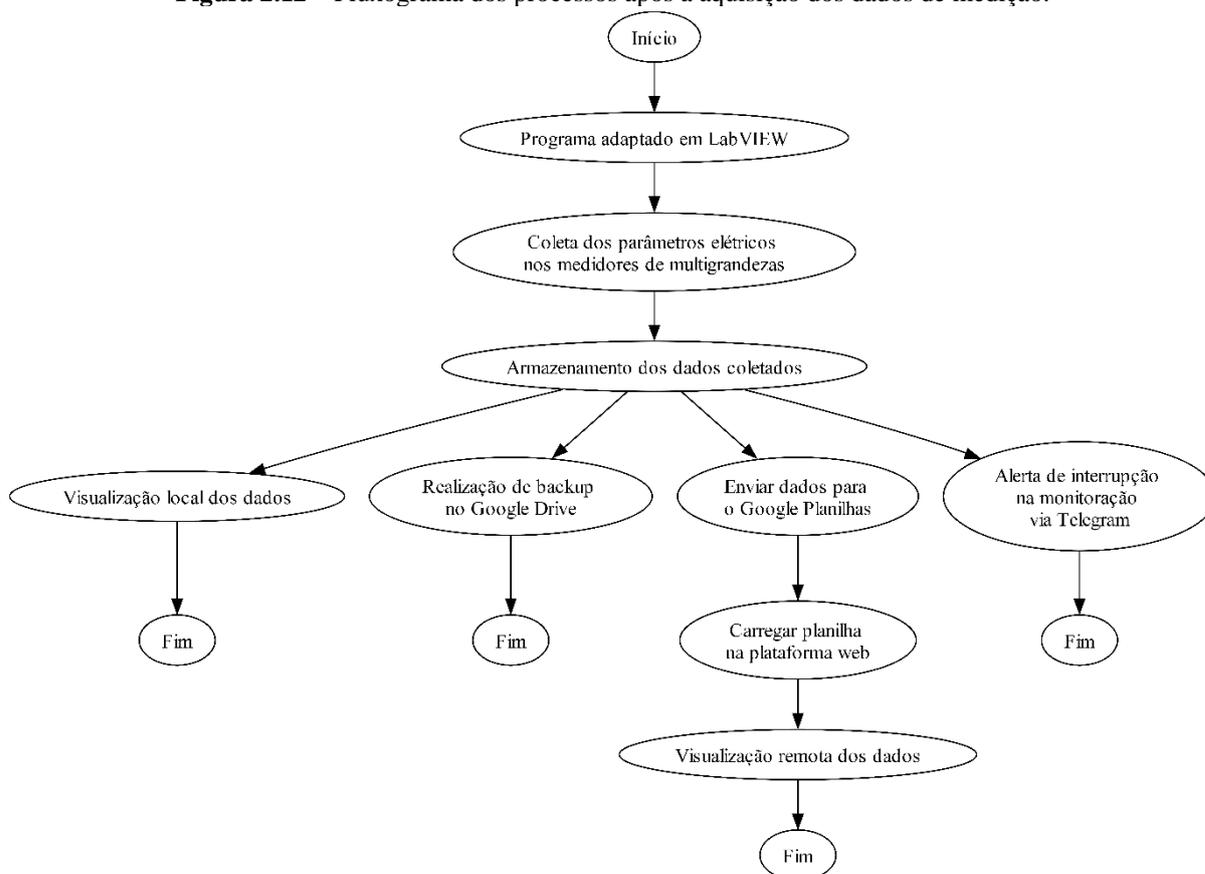
Criaram-se ainda três rotinas adicionais utilizando a linguagem Python. A primeira fica responsável por executar o *backup* dos dados em uma plataforma de armazenamento em nuvem (Google Drive), mantendo a formatação original dos arquivos gerados pelo programa em LabVIEW. A segunda rotina é responsável pela criação de planilhas no formato Google Planilhas, a fim de organizar todos os dados medidos para serem acessados via página *web* por

meio do *framework* Streamlit, o qual possibilita a criação de aplicativos que podem ser enviados ao seu próprio servidor *online* e acessá-los remotamente de forma gratuita, pelo menos até a data de elaboração deste projeto. A terceira rotina informa, via serviço de mensagens instantâneas de um aplicativo (Telegram), ao usuário responsável pelo gerenciamento do sistema de monitoração de dados de parâmetros elétricos do prédio e dos SFCR, se há alguma interferência ou desconexão (como interrupção na conexão com a *internet*) no computador que executa o programa de aquisição de dados.

Para visualização dos parâmetros elétricos obtidos pelo sistema de aquisição de dados, desenvolveu-se uma aplicação em página *web*, onde é possível visualizá-los em formato de gráficos para cada circuito da edificação e dos grupos de SFCR monitorados, além de permitir a realização das simulações para estimativa de energia elétrica produzida pelos SFCR.

Os processos descritos anteriormente, os quais passaram a ser realizados após a adaptação do programa original em LabVIEW, estão apresentados no fluxograma ilustrado na Figura 2.12.

Figura 2.12 – Fluxograma dos processos após a aquisição dos dados de medição.



Fonte: Elaborado pelo autor.

A programação implementada para efetuar a estimativa da produção de energia elétrica pelos SFCR foram escritas na linguagem Python, adaptada a partir do código em MATLAB disponibilizado por Zilles *et al.* (2012), sendo que o arquivo relacionado ao código em MATLAB pode ser adquirido gratuitamente por meio da página na *web* da editora Oficina de Texto.

2.3.2 Modelos matemáticos

Neste subtópico são apresentadas as equações utilizadas na implementação da programação em linguagem Python para realizar a estimativa da produção de energia elétrica dos SFCR monitorados, bem como as figuras de mérito utilizadas para a avaliação de desempenho dos SFCR no presente trabalho.

2.3.2.1 Potência de saída dos inversores

Para o cálculo da potência de saída dos inversores foi utilizado o modelo de eficiência de conversão do inversor, conforme mostrado por Schmidt *et al.* (1992), em que é proposta a expressão indicada na Equação (2.2), considerando a dependência da eficiência com o autoconsumo e o carregamento do inversor.

$$\eta_{Inv} = \frac{P_{saída}}{P_{entrada}} = \frac{P_{saída}}{P_{saída} + P_{perdas}} = \frac{p_{saída}}{p_{saída} + k_0 + k_1 p_{saída} + k_1 p_{saída}^2} \quad (2.2)$$

Sendo, k_0 , k_1 e k_2 os coeficientes das perdas envolvidas no processo de conversão do inversor, relacionadas ao autoconsumo, queda de tensão e perdas ôhmicas, respectivamente; e $p_{saída} = \frac{P_{saída}}{P_{Inv}^0}$ é a potência de saída normalizada com relação à potência nominal do inversor.

Na prática, utilizam-se as Equações (2.3), (2.4) e (2.5) definidas por Martín (1998) para a determinação dos valores dos parâmetros característicos das perdas envolvidas na conversão do inversor.

$$k_0 = \frac{1}{9} \cdot \frac{1}{\eta_{100\%}} - \frac{1}{4} \cdot \frac{1}{\eta_{50\%}} + \frac{5}{36} \cdot \frac{1}{\eta_{10\%}} \quad (2.3)$$

$$k_1 = -\frac{4}{3} \cdot \frac{1}{\eta_{100\%}} + \frac{33}{12} \cdot \frac{1}{\eta_{50\%}} - \frac{5}{12} \cdot \frac{1}{\eta_{10\%}} - 1 \quad (2.4)$$

$$k_2 = \frac{20}{9} \cdot \frac{1}{\eta_{100\%}} - \frac{5}{2} \cdot \frac{1}{\eta_{50\%}} + \frac{5}{18} \cdot \frac{1}{\eta_{10\%}} \quad (2.5)$$

Sendo, $\eta_{100\%}$, $\eta_{50\%}$, $\eta_{10\%}$ os valores de eficiência⁴ instantânea correspondentes à operação do inversor quanto ao seu nível de carregamento e podem ser obtidos por meio da curva de eficiência do inversor.

Para obtenção da potência de saída do inversor, $P_{saída}$, calcula-se primeiramente a potência máxima de saída do gerador FV em função da irradiância incidente no plano do gerador e da temperatura de célula do módulo fotovoltaico, e em seguida verificam-se alguns critérios de limitação e de perdas na conversão por parte do inversor. Estes critérios estão expressos nas Equações (2.6), (2.7) e (2.8).

$$P_{saída} = P_{Inv}^{máx} \dots \dots \dots se P_{saída} \geq P_{Inv}^{máx} \quad (2.6)$$

$$P_{saída} = 0 \dots \dots \dots se P_{FV} \leq k_0 P_{Inv}^0 \quad (2.7)$$

$$P_{saída} = p_{saída} P_{Inv}^0 \dots \dots \dots se k_0 P_{Inv}^0 < P_{saída} < P_{Inv}^{máx} \quad (2.8)$$

Conforme observado na Equação (2.2), as perdas envolvidas na conversão do inversor podem ser mensuradas por meio da Equação (2.9).

$$P_{perdas} = P_{FV} - P_{saída} \quad (2.9)$$

Onde, P_{FV} e $P_{saída}$ são, respectivamente, os valores de saída de potência do gerador FV e do inversor.

Ao normalizar as perdas com relação à potência nominal do inversor (P_{Inv}^0), obtém-se a Equação (2.10).

$$p_{perdas} = p_{FV} - p_{saída} = k_0 + k_1 p_{saída} + k_2 p_{saída}^2 \quad (2.10)$$

A Equação (2.10) ainda pode ser reescrita de acordo com a Equação (2.11). Desta forma, obtém-se $p_{saída}$ como solução para a Equação (2.11) e, a partir disso, pode-se calcular o parâmetro $P_{saída}$ conforme a Equação (2.8).

⁴ Os dados de eficiência para os diferentes níveis de carregamentos utilizados no cálculo dos coeficientes de perdas foram extraídos da lista de dados técnicos de inversores criada pela *Go Solar California* (2018), cujo link do site encontra-se inativo atualmente. Enquanto para os sistemas S1 e C1, os inversores não estavam listados e os valores das eficiências foram coletados a partir de testes realizados durante o estudo de Teles (2017).

$$k_0 - p_{FV} + (1 + k_1)p_{saída} + k_2p_{saída}^2 = 0 \quad (2.11)$$

2.3.2.2 Temperatura de célula do módulo fotovoltaico

De acordo com a análise de Duffie e Beckman (2013), a determinação da temperatura de célula fotovoltaica é baseada em um balanço de energia na célula, cuja representação para uma unidade de área de célula ou módulo fotovoltaico pode ser vista na Equação (2.12).

$$(\tau\alpha)H_{t,\beta} = \eta_{FV}H_{t,\beta} + U_L(T_c - T_a) \quad (2.12)$$

Sendo τ a transmitância da cobertura que está sobre a célula, α é a fração da radiação incidente na superfície da célula que é absorvida, $H_{t,\beta}$ é irradiância global instantânea no plano da célula ou módulo, e η_{FV} é a eficiência da célula para a conversão da radiação incidente em energia elétrica. O coeficiente U_L inclui as perdas por convecção e radiação da parte superior e inferior da célula fotovoltaica e por condução através da estrutura que contém os módulos, considerando uma temperatura ambiente T_a .

Por convenção, a Temperatura TNOC é definida como a temperatura atingida, em °C, quando as células estão operando em um nível de irradiância incidente de 800 W/m², a uma velocidade de vento de 1 m/s, a uma temperatura ambiente de 20 °C e sem nenhuma carga em operação, ou seja, com $\eta_{FV} = 0$. Com base nesta definição para TNOC, a Equação (2.12) pode ser utilizada para determinar a razão $\tau\alpha / U_L$ como pode ser visto na Equação (2.13).

$$\frac{\tau\alpha}{U_L} = \frac{TNOC - 20}{800} \quad (2.13)$$

A temperatura em qualquer outra condição, considerando $\tau\alpha / U_L$ como sendo constante, pode ser calculada pela Equação (2.14).

$$T_c = T_a + \left(H_{t,\beta} \frac{\tau\alpha}{U_L}\right) \left(1 - \frac{\eta_{FV}}{\tau\alpha}\right) \quad (2.14)$$

De acordo ainda com Duffie e Beckman (1991), a razão $\eta_{FV} / \tau\alpha$, geralmente, é um valor muito menor do que a unidade, tal que se pode estimar que $\left(1 - \frac{\eta_{FV}}{\tau\alpha}\right) \cong 0,9$ para a Equação (2.14). Desta forma, de acordo com Macêdo (2006), no que diz respeito à determinação da temperatura das células, a Equação (2.15) proporciona um bom compromisso entre facilidade de utilização e exatidão.

$$T_c = T_a + H_{t,\beta} (W \cdot m^{-2}) \cdot \left[\frac{T_{NOC} (^\circ C) - 20 (^\circ C)}{800 (W \cdot m^{-2})} \right] \cdot 0,9 \quad (2.15)$$

Deste modo, a Equação (2.15) foi utilizada no código para cálculo da temperatura de célula.

2.3.2.3 Ponto de máxima potência

A potência produzida pelo gerador fotovoltaico e entregue à rede elétrica depende de muitos fatores, dentre eles estão a radiação solar incidente no plano do gerador, a temperatura de operação das células que constituem os módulos e o ponto da curva corrente-tensão (I-V) em que o gerador FV está operando. Macêdo (2006) aponta outros fatores adicionais associados às perdas na fiação e devido às diferenças entre as células individuais que constituem um gerador fotovoltaico.

Idealmente, o inversor deve sempre operar no ponto de máxima potência (PMP) do gerador FV, o qual varia ao longo do dia devido à influência dos fatores mencionados anteriormente, mas principalmente em função das condições ambientais como a radiação solar e a temperatura ambiente.

Conforme expresso por Martín (1998) e Gergaud (2002), pode-se calcular o ponto de máxima potência do gerador fotovoltaico a partir da Equação (2.16), uma vez que o parâmetro ou coeficiente (γ_{mp}), que relaciona a variação do ponto de máxima potência com a temperatura, seja conhecido.

$$P_{mp} = P_{FV}^0 \frac{H_{t,\beta}}{H_{ref}} [1 - \gamma_{mp}(T_c - T_{c,ref})] \quad (2.16)$$

Sendo, P_{mp} a potência máxima na condição de medida; $H_{t,\beta}$ a irradiância incidente no plano do gerador; T_c a temperatura equivalente de operação das células; e $T_{c,ref}$ a temperatura nas condições de referência, neste caso, as condições padrões de ensaio (1.000 W/m², 25 °C e AM = 1,5).

Ressalta-se que o modelo apresentado na Equação (2.16) é um modelo simplificado, que permite calcular a máxima potência fornecida pelo gerador FV com seguimento de ponto de máxima potência para um dado nível de irradiância e temperatura de módulo, considerando-se que este gerador FV seja ideal, ou seja, sem perdas no processo de rastreamento do ponto de máxima potência, sendo estas representadas por η_{SPMP} . Portanto, para uma determinação mais

realística da potência c.c. entregue ao inversor, se utiliza a Equação (2.17), apresentada em Macêdo (2006).

$$P_{mp} = P_{FV}^0 \frac{H_{t,\beta}}{H_{ref}} [1 - \gamma_{mp}(T_c - T_{c,ref})] \cdot \eta_{spmp} \quad (2.17)$$

No entanto, no código computacional utiliza-se a Equação (2.16), pois, conforme Macêdo (2006), os modelos propostos nas Equações (2.16) e (2.17) não apresentaram diferenças significativas em termos de energia produzida no ponto de máxima potência.

2.3.2.4 Figuras de mérito

Para a avaliação de desempenho dos SFCR, normalmente, utilizam-se figuras de mérito, pois são indicadores que fornecem informações quantitativas sobre a eficiência energética, capacidade de geração e rendimento dos sistemas fotovoltaico e permitem comparar diferentes sistemas fotovoltaicos, avaliar seu desempenho ao longo do tempo e identificar possíveis falhas ou problemas que afetem a eficiência do sistema. Logo, a utilização das figuras de mérito é importante para otimizar o projeto, operação e manutenção dos SFCR, além de validar e comparar resultados em estudos e pesquisas. Dentre as figuras de mérito existentes para avaliação de desempenho de sistemas fotovoltaicos, utiliza-se a produtividade final (Y_F) e o rendimento global (*Performace Ratio* – PR).

Produtividade final (Y_F) dos SFCR

A produtividade final de um SFCR para um determinado período é obtida pela relação entre a energia elétrica em corrente alternada injetada na rede ($E_{c.a.}$) e a potência nominal do gerador fotovoltaico ($P_{nom,FV}$) considerando as condições padrões de teste (STC), conforme a Equação (4.1) descrita por Ayompe *et al.* (2011).

$$Y_F = \frac{E_{c.a.}}{P_{nom,FV}} \quad (4.1)$$

A produtividade final pode ser também interpretada como o tempo de operação do SFCR caso fornecesse continuamente a potência nominal de modo a produzir a mesma quantidade de energia entregue à carga.

A utilização desta figura de mérito possibilita o acompanhamento do desempenho e comparação entre sistemas fotovoltaicos que possuem geradores de tamanhos iguais, assim

como também, tamanhos diferentes, desde que estejam instalados próximos uns dos outros, ou seja, em uma mesma localidade ou região.

Na ausência de equipamentos de medição (sensor de irradiância) ou armazenamento (*datalogger*) ou em caso de obtenção de dados incorretos pelo sensor de irradiância, Y_F pode ser o indicador mais adequado para se utilizar na avaliação de desempenho do SFCR.

Rendimento global (PR) dos SFCR

O rendimento global (PR) mostra o efeito total das perdas e falhas em um SFCR desde a captação da energia solar até a entrega à rede elétrica, seja no gerador, no condicionamento de potência ou em outros componentes do sistema, indicando o quanto a sua operação se aproxima da ideal, isto é, com PR igual ao valor unitário.

Este indicador é um parâmetro importante para avaliar o desempenho e o aproveitamento do sistema, identificando áreas de melhoria e comparando com outros sistemas fotovoltaicos, pois permite a comparação de sistemas fotovoltaicos independentemente da localização geográfica, posicionamento do gerador fotovoltaico e potência nominal, e é definido conforme a Equação (4.2) descrita por Macêdo (2006).

$$PR = \frac{Y_F}{\frac{H_{t,\beta}}{G_{ref}}} \quad (4.2)$$

Sendo, Y_F a produtividade final (apresentado anteriormente), $H_{t,\beta}$ a irradiação no plano do gerador fotovoltaico e G_{ref} a irradiância de referência.

2.3.3 Procedimentos para obtenção dos dados de temperatura ambiente e irradiância

No caso da estação meteorológica, a sua própria unidade de armazenamento dos dados permite programar o intervalo de tempo entre os registros dos parâmetros mensurados pelos sensores conectados ao HOBO U30. Sendo assim, um período de 5 minutos é selecionado para realização da integralização dos dados meteorológicos.

A extração dos dados da estação meteorológica é realizada mensalmente, com o auxílio de um *notebook* conectado ao sistema de armazenamento do HOBO U30 e por meio do programa computacional denominado de *HOBOWare* desenvolvido pelo mesmo fabricante desta estação. Este programa oferece algumas opções de formato de arquivo para extração dos dados. O formato escolhido para o tratamento de dados foi a extensão *.xls*, a fim de possibilitar a comunicação com as planilhas de dados.

No caso do *FieldLogger*, é possível configurar o período para a realização das amostras de dados, sendo este configurado para um período de amostragem de 1 segundo e a integralização destas amostras ocorrem a cada 1 minuto. A extração destes dados é realizada no formato *.csv*, por meio de um *notebook* conectado ao *FieldLogger*, utilizando um programa computacional desenvolvido pelo mesmo fabricante do *FieldLogger*.

No caso dos dados da NASA, até o momento de escrita deste trabalho, acessa-se a API desenvolvida pela agência espacial e informam-se a integralização dos dados na forma horária, as coordenadas do local, o período que se deseja os dados (limitados a um intervalo de 10 anos entre o primeiro dia e o último dia de dados), os parâmetros de irradiância e temperatura ambiente e o formato de saída do arquivo em *.csv*, com isso extraem-se os dados necessários para as simulações.

Posteriormente, realiza-se a organização da planilha para efetuar o tratamento dos dados, sendo necessário integralizar os dados coletados, no caso da estação meteorológica e do *FieldLogger*, para obter os valores horários dos parâmetros de interesse (irradiância e temperatura ambiente). No caso dos dados da NASA, as informações já são obtidas em valores horários.

2.3.4 Procedimentos para coleta e aferição dos dados de produção de energia elétrica dos SFCR

As medições de energia elétrica produzida pelos SFCR são realizadas diariamente às 18h00, horário em que já ocorre pouca disponibilidade de recurso solar, ou uma quantidade irrisória de irradiação dependendo do período do ano para a localidade em que se situa a edificação do GEDAE. Estas informações são registradas em uma planilha de dados para se obter o controle da quantidade real de energia elétrica que todos os SFCR contribuem para minimizar o consumo visto pela rede de distribuição que atende ao prédio do GEDAE.

Para os sistemas equipados com os medidores eletrônicos de energia, a leitura do acúmulo diário de energia é feita por meio da diferença entre o valor de energia, em kWh, mostrado no visor do medidor SMT 1510, obtido no dia atual e no dia anterior.

Para a medição de energia elétrica nos sistemas com a leitura no visor do inversor, o valor de energia ativa produzida mostrada no visor do inversor é resultado da integralização da energia ativa medida ao longo do dia, sendo atualizada a cada 5 segundos pelo próprio inversor.

Em dias sem leituras nos visores dos inversores e/ou medidores, como por exemplo, aos finais de semana e feriados, a estimativa da produção de energia é realizada utilizando-se as equações do Subtópico 2.3.2, via aplicação desenvolvida em página *web*, isto para os dias em que são conhecidos tanto os dados de irradiância global quanto de temperatura ambiente. Nos

dias em que são conhecidos somente os dados de irradiância ou irradiação global, a estimativa da produção de energia é realizada conforme Amorim (2015), buscando-se um perfil de tendência, correlacionando-se a energia total produzida pelo SFCR e a irradiação diária no local. Dispensando-se, portanto, a necessidade de se conhecer os dados de temperatura de célula.

Para o registro de energia elétrica medida via *datalogger* no sistema C1, os valores são registrados na plataforma *online* desenvolvida pela SolarEdge e a extração dos dados são realizadas em um arquivo no formato *.csv*, contendo dados de energia elétrica integralizados de hora em hora.

2.3.5 Procedimentos para tratamento dos dados de temperatura ambiente e irradiância

Para utilizar as informações de temperatura ambiente e irradiância global são necessários aplicar métodos para tratar os dados obtidos por meio das fontes de dados mencionadas anteriormente. Para facilitar a inspeção visual dos valores que contêm incoerência com a realidade, são criados dois gráficos de dispersão, um contendo todos os registros de irradiância global e o outro contendo os registros de temperatura ambiente, desta forma facilita-se a identificação e eliminação de dados contendo valores muito discrepantes da realidade.

Posteriormente, calculam-se os valores das médias horárias de temperatura ambiente e os valores horários de irradiação global a partir da integralização dos dados de irradiância global obtidos a cada 5 minutos e a cada 1 minuto, no caso da estação meteorológica e do *FieldLogger*, respectivamente.

2.3.6 Ferramentas computacionais para estimativa de produção de energia elétrica pelos SFCR

A estimativa da produção de energia elétrica é realizada com o auxílio de três ferramentas computacionais, METEONORM, Google Planilhas e aplicação *web* Streamlit. Os processos empregados estão descritos nos itens a seguir.

2.3.6.1 METEONORM

Para estimar o valor da irradiância global no plano inclinado, a partir dos dados de irradiância global no plano horizontal, utiliza-se o programa computacional METEONORM na versão 7.0. Sendo empregado principalmente nos dados obtidos pela estação meteorológica do GEDAE e pela API da NASA. Os dados de irradiância no registrador de dados local (*FieldLogger*) já são obtidos no plano inclinado, não sendo necessário estimá-lo por meio do METEONORM.

O método para a estimativa do valor de irradiância global no plano inclinado via METEONORM necessita da criação de arquivos no formato *.txt* (texto separado por tabulações), contendo os dados meteorológicos obtidos com irradiância global no plano horizontal, sendo um arquivo para cada ano, de 2011 a 2023, além da execução de alguns ajustes na configuração dos dados, conforme o padrão de leitura de dados pelo METEONORM.

Arquivo em Texto Separado por Tabulações

A estrutura para inserção dos parâmetros nestes arquivos consiste em duas linhas de cabeçalho e cinco colunas para listar os parâmetros a serem incluídos. As linhas seguintes são designadas para entrada dos dados da estação meteorológica, inserindo-se a quantidade de linhas de dados existentes.

Na primeira linha é escrito somente o texto “*mn7 import file*” (sem as aspas e sem itálico), na segunda linha, as abreviações dos parâmetros que serão inseridos, tais como: m (mês), dm (dia do mês), h (hora do dia), Gh (irradiância global no plano horizontal) e Ta (temperatura ambiente), e nas demais linhas inserem-se os dados referentes à cada um dos parâmetros citados na segunda linha. A Tabela 2.8 mostra uma exemplificação da estrutura para organização dos dados a serem inseridos como parâmetros meteorológicos no arquivo de texto separado por tabulação.

Tabela 2.8 – Estrutura para criação do arquivo de texto separado por tabulação.
(continua)

mn7 import file				
m	dm	h	Gh	Ta
7	1	1	0	23,6
7	1	2	0	23,1
7	1	3	0	23
7	1	4	0	22,7
7	1	5	0	22,7
7	1	6	19	23,2
7	1	7	85	25
7	1	8	351	26,4
7	1	9	443	27,8
7	1	10	666	28,6
7	1	11	420	28,6
7	1	12	421	29,1
7	1	13	365	28,6
7	1	14	507	30
7	1	15	247	30
7	1	16	53	28
7	1	17	24	24,7

(conclusão)

mn7 import file				
m	dm	h	Gh	Ta
7	1	18	2	24,3
7	1	19	0	24,2
7	1	20	0	24,3
7	1	21	0	24,4
7	1	22	0	24,7
7	1	23	0	24,4
7	1	24	0	24,4

Fonte: Elaborado pelo autor.

Ajustes nas Configurações dos Dados Padrões do METEONORM

Ajustam-se as coordenadas geográficas das localizações dos geradores fotovoltaicos em análise, em seguida configuram-se os valores do ângulo azimutal e a inclinação com relação ao plano horizontal dos geradores, conforme indicado na Tabela 1.3.

Posteriormente, realiza-se a importação do arquivo contendo os dados meteorológicos horários criados no formato de texto separado por tabulações. Por último, seleciona-se o formato de saída padrão do METEONORM e executa-se o programa para estimar a irradiância no plano inclinado do gerador fotovoltaico. A exemplificação para o formato da saída padrão do METEONORM é apresentada na Tabela 2.11, que trata a respeito da formatação das planilhas contendo os dados meteorológicos.

2.3.6.2 Google Planilhas

Com a finalidade de organizar os dados a serem utilizados como parâmetros para efetuar a estimativa da produção de energia elétrica, foram criadas três planilhas no aplicativo Google Planilhas. A estimativa emprega os modelos matemáticos apresentados no Subtópico 2.3.2, sendo necessários os dados fornecidos pelos fabricantes acerca dos módulos fotovoltaicos e inversores, descritos no Tópico 1.4, além dos dados meteorológicos coletados. Assim, cada planilha contém, separadamente, o registro destes dados recém citados. A organização de cada uma destas planilhas está descrita a seguir.

Planilha dos Inversores

Esta planilha contém 11 linhas para os parâmetros de cada inversor, sendo utilizadas 6 colunas para registrar os diferentes modelos de inversores. Cada linha recebe, em sequência, informações acerca dos nomes dos modelos dos inversores e dos dados fornecidos pelos fabricantes, tais como: Potência nominal (P_{nInv}); Eficiência para carregamento de 10% ($\eta_{10\%}$);

Eficiência para carregamento de 50% ($\eta_{50\%}$); Eficiência para carregamento de 100% ($\eta_{100\%}$); Potência máxima de saída ($P_{m\acute{a}x}$); Tensão de MPPT máxima ($V_{MPPTm\acute{a}x}$); Tensão de MPPT mínima ($V_{MPPTm\acute{i}n}$); Tensão máxima de entrada ($V_{m\acute{a}x}$); Corrente de saída nominal (I_{nom}); Corrente de saída máxima ($I_{m\acute{a}x}$). Na Tabela 2.9 exemplifica-se a estrutura para organização dos dados a serem inseridos na planilha com os parâmetros dos inversores.

Tabela 2.9 – Estrutura dos dados para a inserção dos parâmetros dos inversores na planilha.

Inversor	PHB 3000-SS	Sunny Boy 1200	Fronius Galvo 1.5-1
P_{nInv} (W)	3000	1200	1500
$\eta_{10\%}$ (%)	95,62	85	89,7
$\eta_{50\%}$ (%)	97,37	91,15	95,5
$\eta_{100\%}$ (%)	96,77	89,6	95,9
P_{max} (W)	3000	1200	1500
$V_{MPPTm\acute{a}x}$ (V)	450	320	335
$V_{MPPTm\acute{i}n}$ (V)	125	100	120
$V_{m\acute{a}x}$ (V)	500	400	420
I_{nom} (A)	18	12,6	13,3
$I_{m\acute{a}x}$ (A)	18	12,6	13,3

Fonte: Elaborado pelo autor.

Planilha dos Módulos Fotovoltaicos

Esta planilha contém 13 linhas para os parâmetros de cada módulo fotovoltaico, sendo utilizadas 11 colunas para registrar os diferentes modelos de módulos fotovoltaicos. Cada linha recebe, em sequência, informações acerca dos nomes dos modelos dos módulos e dos dados fornecidos pelos fabricantes, tais como: Potência máxima (P_{mp}); Tensão de máxima potência (V_{mp}); Corrente de máxima potência (I_{mp}); Tensão de circuito aberto (V_{oc}); Corrente de curto-circuito (I_{sc}); Temperatura de célula em Condições Normais de Operação (TNOC); Coeficientes de temperatura de V_{oc} (β), I_{sc} (α) e P_{mp} (γ) em termos percentuais; Quantidade de módulos em série; Quantidade de módulos em paralelo; e Número referente à coluna ao qual o inversor associado a este módulo foi registrado na planilha dos Inversores. Na Tabela 2.10 exemplifica-se a estrutura para organização dos dados a serem inseridos na planilha com os parâmetros dos módulos fotovoltaicos.

Tabela 2.10 – Estrutura dos dados para a inserção dos parâmetros dos módulos fotovoltaicos na planilha.

Módulo	(Continua)		
	SW245 (S1)	YL245P-29b (S2)	DA121-C1 (S3)
P_{mp} (W)	245	245	121
V_{mp} (V)	30,8	30,2	115,8
I_{mp} (A)	7,96	8,11	1,03
V_{oc} (V)	37,5	37,8	148,6
I_{sc} (A)	8,49	8,63	1,23
NOCT (°C)	46	46	45

(Conclusão)

Módulo	SW245 (S1)	YL245P-29b (S2)	DA121-C1 (S3)
β (%)	0,37	0,33	0,34
α (%)	0,081	0,06	0,08
γ (%)	0,45	0,45	0,34
Quantidade de módulos em série	10	6	2
Quantidade de módulos em paralelo	1	1	5
Número referente a coluna do inversor	1	2	2

Fonte: Elaborado pelo autor.

Planilhas dos Dados Meteorológicos

Esta planilha contém de 8761 a 8785 linhas para os anos de 365 e 366 dias, respectivamente, sendo a primeira linha designada aos títulos de cada parâmetro e as demais designadas para os parâmetros de irradiâncias e temperatura obtidos com o auxílio do programa computacional METEONORM, descrito anteriormente. Dessa forma, a planilha possui 10 colunas ordenadas nesta sequência: Mês (m), Dia (dm), Hora do dia (h), Hora do ano (hy), Irradiância global no plano horizontal (G_h), Irradiância difusa (D_h), Irradiância global no plano inclinado (G_k), Irradiância difusa no plano inclinado (D_k), Irradiância direta (B_n) e Temperatura Ambiente (T_a). Na Tabela 2.11 tem-se uma exemplificação da estrutura para organização dos dados meteorológicos obtidos com o auxílio do METEONORM.

Tabela 2.11 – Estrutura dos dados para os parâmetros meteorológicos.
(Continua)

m	dm	h	hy	Gh	Dh	Gk	Dk	Bn	Ta
1	1	1	1	0	0	0	0	0	24
1	1	2	2	0	0	0	0	0	24
1	1	3	3	0	0	0	0	0	24
1	1	4	4	0	0	0	0	0	24
1	1	5	5	0	0	0	0	0	25
1	1	6	6	30	30	30	30	0	24
1	1	7	7	137	120	123	113	57	25
1	1	8	8	311	246	282	231	125	26
1	1	9	9	339	312	322	299	38	27
1	1	10	10	369	335	353	323	41	28
1	1	11	11	762	445	715	428	348	30
1	1	12	12	849	345	800	334	543	30
1	1	13	13	103	103	101	101	0	26
1	1	14	14	82	82	81	81	0	26
1	1	15	15	188	186	184	182	3	26
1	1	16	16	109	109	107	107	0	28
1	1	17	17	26	26	26	26	0	25
1	1	18	18	12	12	12	12	0	23
1	1	19	19	0	0	0	0	0	23

(Conclusão)									
m	dm	h	hy	Gh	Dh	Gk	Dk	Bn	Ta
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
12	31	24	8760	0	0	0	0	0	26

Fonte: Adaptado de METEONORM (2014).

Observações acerca das Planilhas dos Módulos Fotovoltaicos e Inversores

- As informações completas contendo todos os módulos fotovoltaicos e inversores utilizados neste trabalho encontram-se no Apêndice A.
- As quantidades de colunas para registro dos parâmetros dos módulos fotovoltaicos e inversores não se restringem às quantidades apresentadas neste trabalho.
- Pode-se cadastrar uma única coluna contendo os dados do módulo fotovoltaico ou a quantidade de colunas que forem necessárias para realização das simulações. O mesmo é válido para o cadastro dos dados do inversor.

2.3.6.3 Aplicação Web Streamlit

Para realização da estimativa de produção energética pelos SFCR foi criada uma aplicação *web* utilizando a linguagem Python via *framework* Streamlit, que permite a simulação da geração de cada sistema monitorado por meio da inserção dos dados meteorológicos (irradiância e temperatura ambiente), dos parâmetros dos módulos fotovoltaicos e dos inversores ou microinversores (a depender do sistema).

A aplicação pode ser acessada remotamente por meio do seguinte *link*: https://gedae-ufpa.streamlit.app/Estimar_Produção_de_Energia, onde se exibe uma página *web* conforme a Figura 2.13. Nesta página, é possível escolher a forma de importação dos arquivos, seja por meio de dados próprios do usuário organizados em planilhas estruturadas, conforme foram apresentadas anteriormente nas Tabelas 2.9, 2.10 e 2.11; ou por meio de importações dos dados previamente armazenados no servidor.

Destaca-se que esta aplicação também pode ser utilizada para realizar simulações com outros SFCR diferentes dos que foram apresentados neste trabalho, desde que os dados sigam as formações das Tabelas 2.9, 2.10 e 2.11.

A seguir é apresentada a aplicação *web* e algumas das funcionalidades para estimativa da produção de energia elétrica dos SFCR.

Figura 2.13 – Página da aplicação para estimativa de produção de energia.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Na sequência, na aba “**Selecionar os componentes do SFCR**” (Figura 2.14), pode-se escolher os módulos e inversores instalados em cada sistema ou fazer combinações dos módulos com outros inversores listados, para fins de conhecimento acerca da produção que uma combinação diferente de módulos e inversores resultaria. No entanto, para fins de praticidade e evitar a ocorrência de simulações utilizando combinações de módulos e inversores diferentes das instaladas, pode-se habilitar a função “**Utilizar configurações pré-estabelecidas dos SFCR**”. Desta forma, ao selecionar qualquer um dos módulos há a alteração automática para o inversor instalado no sistema associado ao módulo selecionado.

Figura 2.14 – Seleção dos componentes do SFCR.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Na aba “**Resultados**” (Figura 2.15) é possível informar o período de integralização e a escala de tempo (em minuto, hora, dia, mês ou ano) de como se devem ser exibidos os resultados da simulação e, por fim, apresentam-se no formato de tabela os dados de potência de saída do inversor (kW), a energia c.a. produzida (kWh), irradiação (kWh/m²), a produtividade e o rendimento global (%) calculados para o sistema selecionado e conforme o intervalo de integralização definido pelo usuário. Também é apresentado o valor acumulado ou total da energia elétrica c.a. produzida desde a data de instalação do SFCR (Figura 2.16).

Figura 2.15 – Resultados da simulação.

Estimativa de Geração de Energia

[Importar Arquivos](#)
 [Selecionar os componentes do SFCR](#)
 [Resultados](#)

Integralização

Período:
 Escala de tempo:

Resultados

Considerar degradação dos módulos fotovoltaicos

Data	Potência de saída (kW)	Energia (kWh)	Irradiação (kWh/m ²)	Yf (kWh/kWp)	PR (%)
2011-01-31 00:00:00	0.7076	266.7531	126.6457	106.7013	84.2518
2011-02-28 00:00:00	0.7024	255.69	121.5599	102.276	84.1363
2011-03-31 00:00:00	0.7392	297.9041	142.0029	119.1616	83.9149

Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 2.16 – Tabela e total de energia produzida.

Resultados

Considerar degradação dos módulos fotovoltaicos

Data	Potência de saída (kW)	Energia (kWh)	Irradiação (kWh/m ²)	Yf (kWh/kWp)	PR (%)
2011-01-31 00:00:00	0.7076	266.7531	126.6457	106.7013	84.2518
2011-02-28 00:00:00	0.7024	255.69	121.5599	102.276	84.1363
2011-03-31 00:00:00	0.7392	297.9041	142.0029	119.1616	83.9149
2011-04-30 00:00:00	0.8154	295.9759	140.9421	118.3904	83.9993
2011-05-31 00:00:00	0.8032	298.7811	142.129	119.5125	84.0873
2011-06-30 00:00:00	0.9196	331.0491	158.8314	132.4196	83.3712
2011-07-31 00:00:00	0.9104	356.8931	171.772	142.7573	83.1086
2011-08-31 00:00:00	1.0041	388.5943	188.7768	155.4377	82.3394
2011-09-30 00:00:00	1.0466	376.7677	183.464	150.7071	82.1453
2011-10-31 00:00:00	1.0003	372.111	180.284	148.8444	82.5611

Total de Produção de Energia: 47675.09 kWh

Fonte: Elaborado pelo autor.

Cabe ressaltar a possibilidade de estimar a energia produzida pelos SFCR considerando a degradação nos módulos fotovoltaicos (Figura 2.17), onde o usuário pode optar por selecionar o tipo de tecnologia de célula dos módulos fotovoltaicos, a fim de utilizar um valor predefinido da taxa de degradação anual para esta tecnologia ou optar por digitar um valor de taxa de degradação, caso o tipo de tecnologia não esteja dentro da lista de seleção ou mesmo caso o usuário opte em realizar a simulação utilizando outros valores de taxa de degradação.

Há também a possibilidade de informar a data da instalação do SFCR, a fim de que sejam contabilizadas as degradações a partir da data de instalação do SFCR, ou informar outra data caso o usuário deseje realizar simulações utilizando uma data diferente do período de instalação do sistema fotovoltaico.

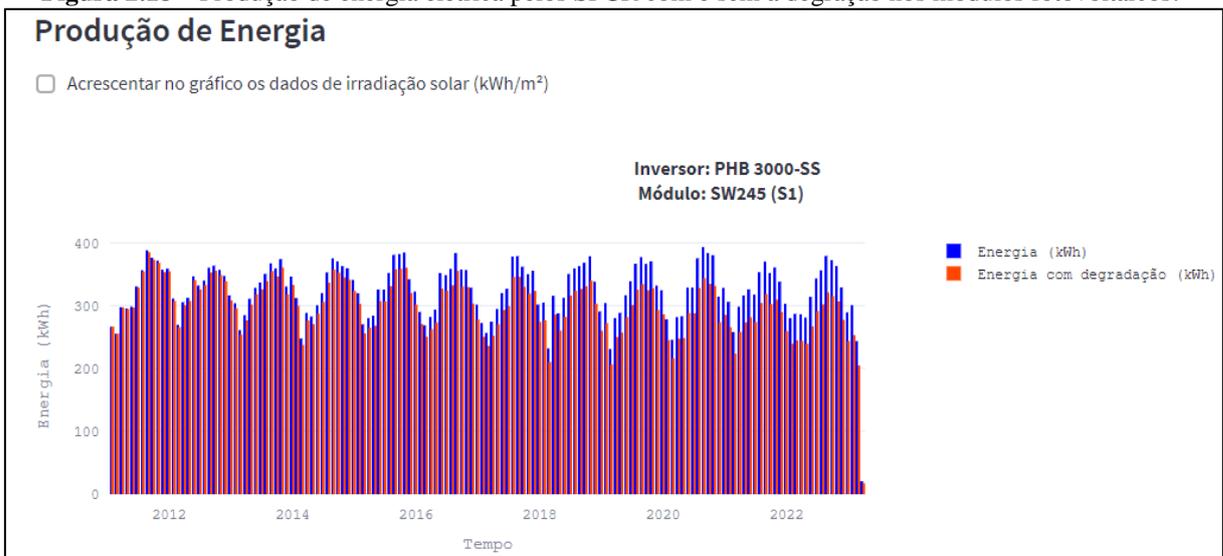
Figura 2.17 – Tabela de resultados considerando a degradação nos módulos fotovoltaicos.



Fonte: Elaborado pelo autor.

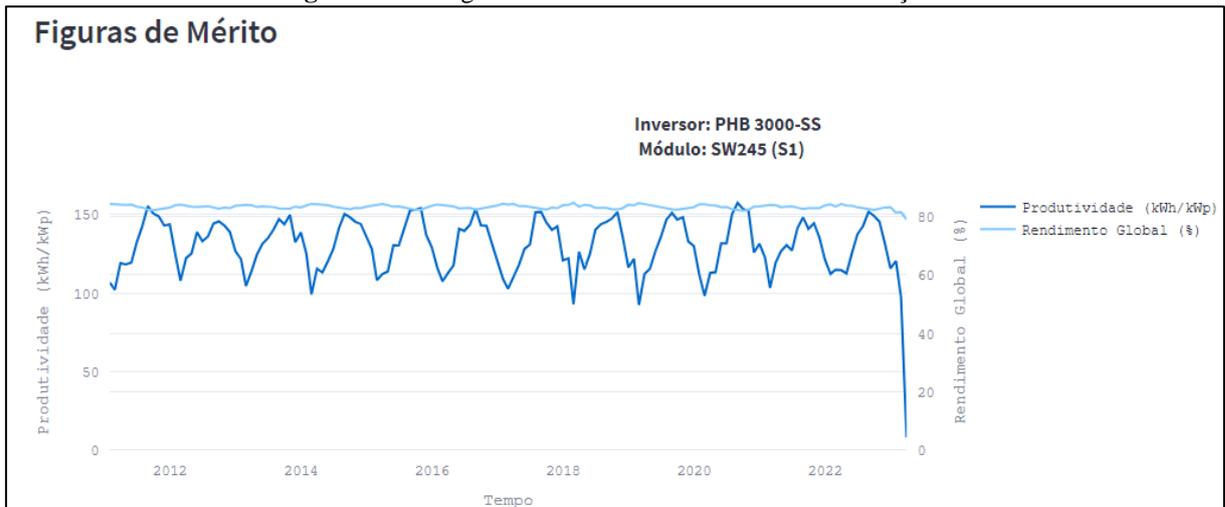
Para a visualização dos resultados são exibidos os gráficos de produção de energia (Figura 2.18) com a possibilidade de acrescentar o gráfico de irradiação. Além disso, a estimativa da produtividade e do rendimento global (Figura 2.19) são exibidos também ao longo do período simulado para o sistema, tendo-se como base as informações contidas no arquivo meteorológico.

Figura 2.18 – Produção de energia elétrica pelos SFCR com e sem a degradação nos módulos fotovoltaicos.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 2.19 – Figuras de mérito nos resultados da simulação.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Por fim, tem-se a opção de salvar os resultados obtidos na simulação (Figura 2.20), digitando-se um nome para o arquivo e escolhendo o formato para efetuar a *download* do arquivo para armazenamento.

Figura 2.20 – Salvar os resultados da simulação.

A interface de usuário para salvar os resultados da simulação. No topo, o título "Salvar Resultados" é exibido em azul escuro. Abaixo dele, há um campo de texto com o placeholder "Digite um nome para o arquivo de resultados:". O campo contém o texto "Resultados Mensais do Sistema S1_2011-2023". Abaixo do campo, há dois botões: "Download em CSV" e "Download em Excel".

Fonte: Elaborado pelo autor.

Em resumo, a estimativa da produção de energia elétrica é realizada com o auxílio de três ferramentas computacionais, quais sejam: METEONORM, para estimar os valores de irradiância no plano inclinado; Google Planilhas, para registro dos dados fornecidos pelos fabricantes dos módulos fotovoltaicos, inversores e microinversores, além dos dados meteorológicos; e a aplicação *web* Streamlit, para efetuação dos cálculos de energia ativa a partir dos dados registrados no Google Planilhas e, posteriormente, os resultados obtidos são salvos em uma nova planilha.

Com relação aos dados reais de produção de energia elétrica, estes são coletados com auxílio de três equipamentos, os medidores eletrônicos, visor do inversor e o *datalogger* e registrados em uma nova planilha.

De posse dos dados reais e estimados de produção de energia, os métodos apresentados neste capítulo servem como base para a avaliação dos resultados obtidos pela medição e pelas

simulações dos valores de energia, que são apresentados no Capítulo 4, além de como os SFCR monitorados impactaram, ao longo dos anos, no consumo de energia elétrica da edificação do GEDAE.

No próximo capítulo são apresentados os processos de confecção e montagem do quadro elétrico responsável pela conexão dos SFCR, cujo objetivo é separar a medição dos sistemas fotovoltaicos, que anteriormente estavam conectados ao circuito de tomadas do prédio, permitindo uma medição independente dos parâmetros elétricos desse circuito em relação aos SFCR. Além disso, abordam-se os processos de calibração dos medidores de multigrandezas.

CAPÍTULO 3 – DESENVOLVIMENTO DO SISTEMA DE MONITORAÇÃO PARA OS SFCR

Neste capítulo são apresentadas as principais características dos quadros implementados dos SFCR, o método utilizado para a calibração e configuração dos dispositivos de medição (medidores de multigrandezas e transformadores de corrente), além das principais alterações realizadas nos programas utilizados para a aquisição de dados dos SFCR, empregando o *software* LabVIEW, e para exibição dos dados coletados, tanto por meio do LabVIEW quanto pela aplicação *web* Streamlit.

3.1 Projeto dos quadros dos SFCR

Conforme mencionado no Subtópico 1.2.1, o GEDAE possui um sistema de monitoração próprio para registro dos parâmetros elétricos da edificação, localizado nas salas “Monitoração e Controle” e “Central de Energia” do prédio do GEDAE. Este sistema encontra-se em operação desde o dia 13 de julho de 2011.

Apesar deste sistema ser de monitoração exclusiva dos circuitos de cargas do prédio como iluminação, climatização, tomadas/equipamentos e circuito geral, a adição gradual de novos SFCR resultava na conexão desses sistemas fotovoltaicos em pontos que afetavam a monitoração das cargas do prédio, principalmente, na obtenção dos parâmetros elétricos do circuito de tomadas/equipamentos.

Portanto, fazia-se necessária a implementação de um circuito para monitoramento exclusivo dos SFCR, a fim de separá-los do circuito de tomadas/equipamentos, devido à dificuldade de se obter o valor correto da demanda medida neste circuito. Além disso, com o emprego de medidores de multigrandezas para a coleta de dados dos SFCR facilitam-se o acompanhamento e a obtenção dos parâmetros elétricos dos SFCR, uma vez que, anteriormente, a obtenção da produção de energia era realizada por meio da diferença entre a demanda do circuito geral e a demanda dos demais circuitos. Sendo assim, propôs-se a implementação de quadros parciais e geral para os SFCR.

Algumas observações quanto às monitorações já existentes dos circuitos de carga do prédio merecem destaque, tais como:

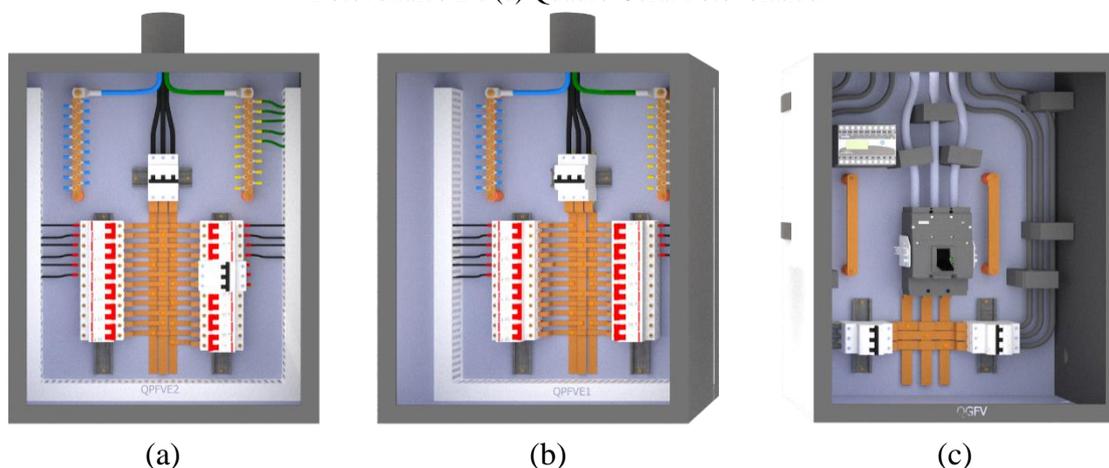
- O sistema de monitoração geral, cuja instalação tem por objetivo medir os parâmetros elétricos totais das cargas de iluminação, climatização e tomadas/equipamentos. No entanto, a partir de setembro de 2011, este sistema começou a sofrer influência de geradores fotovoltaicos

instalados após os pontos de medição da monitoração do circuito geral. Notando-se a influência por meio da diferença realizada entre os dados do circuito geral e os demais circuitos.

- O sistema de monitoração de tomadas/equipamentos passou a sofrer influência dos geradores fotovoltaicos a partir de setembro de 2013, por meio da instalação do sistema fotovoltaico com microinversor (M1), cujo ponto de conexão deste gerador com a rede elétrica situava-se em uma tomada localizada na biblioteca do GEDAE. Sendo necessária a verificação da quantidade de energia produzida por este gerador, a fim de tornar possível a contabilização do consumo do circuito de tomadas/equipamentos, desconsiderando-se o valor referente à geração de M1. Com o passar dos anos novos SFCR foram instalados em pontos partindo do quadro de circuito de tomadas, tornando ainda mais difícil a distinção dos dados coletados exclusivamente pelas tomadas do prédio. Isto tornou necessária a separação da conexão destes SFCR no circuito de tomadas, a fim de evitar a influência nos demais parâmetros elétricos mensurados pelo sistema de monitoração do circuito de tomadas.

Para a separação dos SFCR conectados no circuito de tomadas/equipamentos e a possibilidade de medição do conjunto de SFCR instalados na área externa do prédio do GEDAE, propôs-se inicialmente a confecção e a instalação de três quadros: um para funcionar como quadro geral e os outros dois, como quadros parciais conforme ilustrado na Figura 3.1.

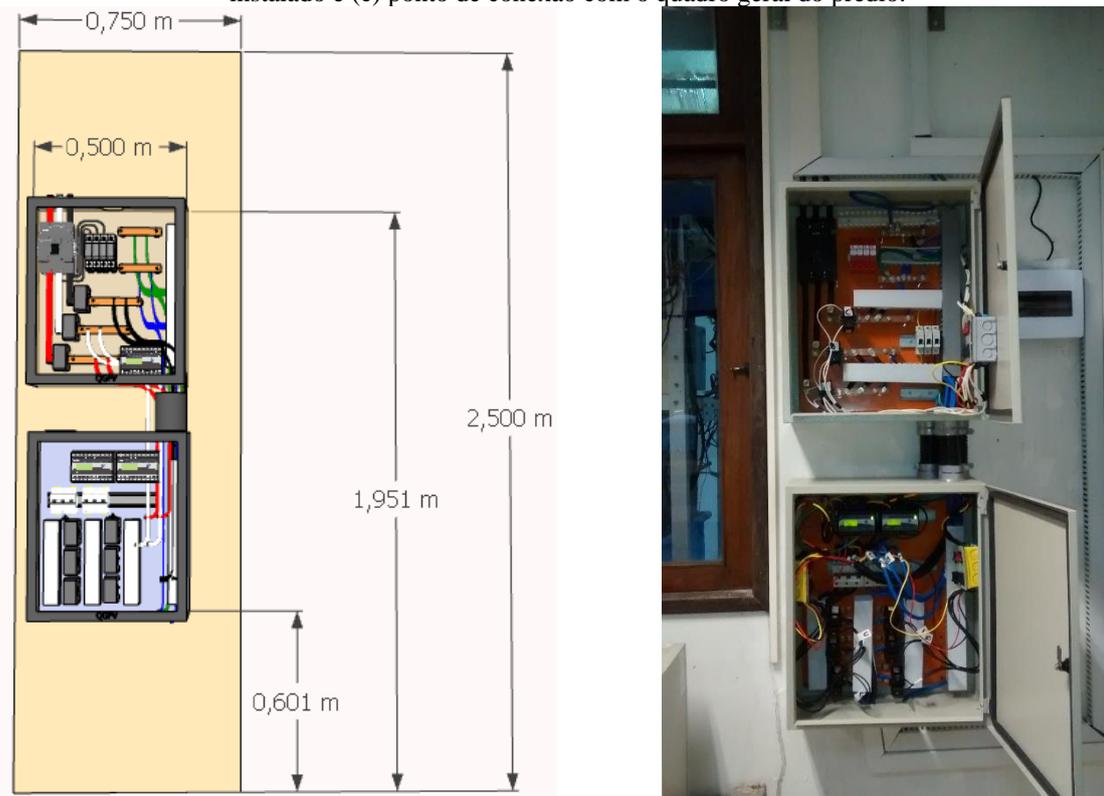
Figura 3.1 – Quadros elétrico para conexões dos SFCR: (a) Quadro Parcial Fotovoltaico 1, (b) Quadro Parcial Fotovoltaico 2 e (c) Quadro Geral Fotovoltaico.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Devido ao pouco espaço para acomodar todos os componentes de proteção e medição em um único quadro, houve a necessidade de se dividir o quadro geral em dois quadros conforme ilustrado na Figura 3.2.

Figura 3.2 – Quadro Geral para conexões dos SFCR: (a) visualização em 3D e (b) quadro geral dos SFCR instalado e (c) ponto de conexão com o quadro geral do prédio.



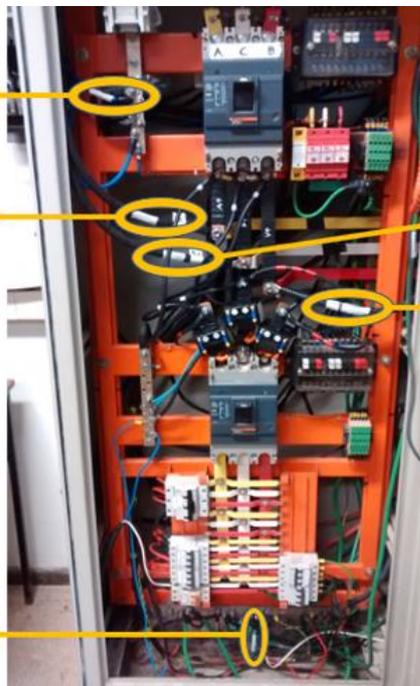
(a)

(b)

Cabo para o Neutro do QGFV

Cabo para a Fase A do QGFV

Cabo para o Terra do QGFV



Cabo para a Fase C do QGFV

Cabo para a Fase B do QGFV

(c)

Fonte: Elaborado pelo autor.

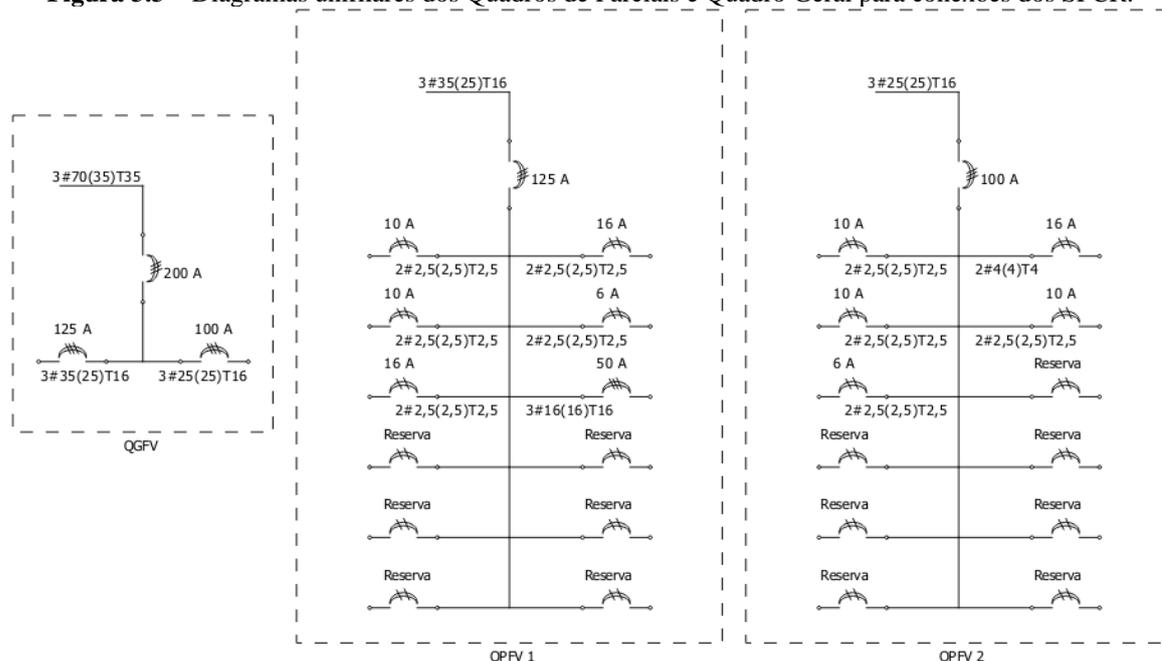
Por motivos da eletrocalha utilizada para o encaminhamento dos cabos para os principais circuitos do prédio até o quadro geral de baixa tensão (QGBT) da edificação do GEDAE/UFPA ter atingido a capacidade de acomodação dos cabos, houve a necessidade de se

adicionar uma nova eletrocalha para realizar o encaminhamento dos cabos para conexão do quadro geral para os SFCR (QGFV) ao barramento geral do QGBT. Além disto, foram instaladas canaletas para encaminhar os cabos até a eletrocalha.

Houve também a necessidade de se instalar um dispositivo, a ser utilizado em situação de eventual manutenção ou substituição dos medidores, para abrir com segurança os terminais de leitura de tensão pelos medidores e curto-circuitar a corrente no secundário dos TC, a fim de anular a corrente induzida no secundário do transformador.

Quanto ao dimensionamento dos circuitos para os quadros parciais para um conjunto de SFCR (QPFV) e o QGFV, como se tratam de conexões dos sistemas fotovoltaicos com a rede c.a., utilizou-se como referência as potências nominais de saída do inversor, considerando conexões bifásicas de 220 V para os dimensionamentos dos cabos, barramentos e disjuntores. Os diagramas unifilares para os quadros parciais e geral são apresentados na Figura 3.3.

Figura 3.3 – Diagramas unifilares dos Quadros de Parciais e Quadro Geral para conexões dos SFCR.



Fonte: Elaborado pelo autor.

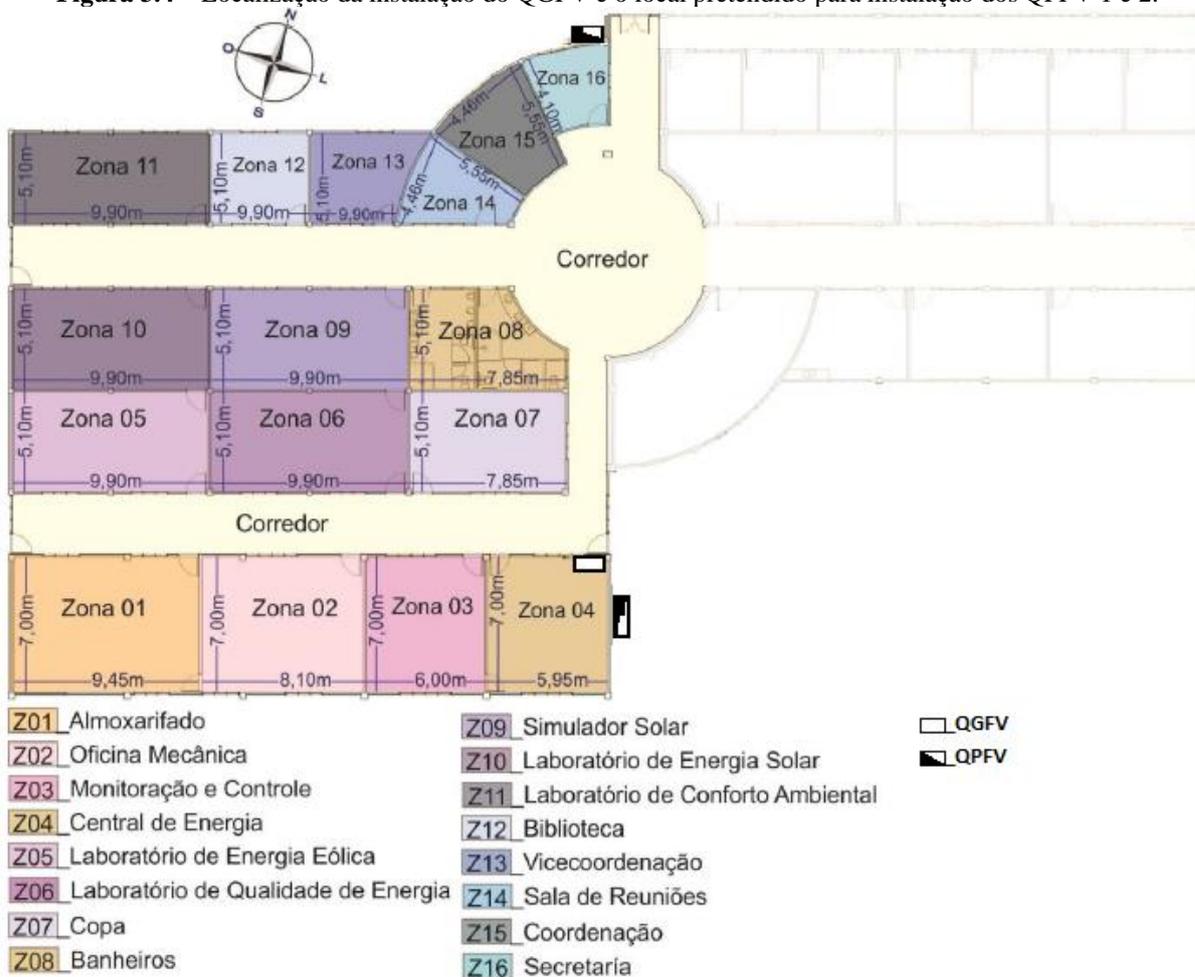
Os barramentos⁵ do quadro geral dos SFCR, QGFV, tem capacidade para suportar uma corrente de 269 A. Os barramentos dos quadros parciais dos SFCR, QPFV 1 e QPFV 2, suportam 179 A e 122 A, respectivamente, enquanto os barramentos dos circuitos para os

⁵ Apesar dos barramentos utilizados para comporem os quadros geral e parciais suportarem as correntes mencionadas no texto, as correntes de projeto, considerando os circuitos reservas, estão abaixo destes valores. Por exemplo, para o circuito do QGFV foi calculada uma corrente de projeto de 165 A (e uma corrente corrigida de 176 A), para QPFV 1 foi 96 A (e 103 A) e para QPFV 2, 70 A (e 74 A). O que justifica a escolha dos disjuntores gerais para cada um dos quadros na Figura 3.3, visando à proteção dos barramentos e dos cabos utilizados ao considerar as correntes máximas e mínimas para a atuação do disjuntor.

quadros parciais suportam 73 A. Com relação ao aspecto financeiro deste projeto, é possível verificá-lo no Apêndice B.

Na Figura 3.4 ilustra-se a posição pretendida para instalação dos quadros parciais e a localização do quadro geral dos SFCR na planta baixa do laboratório do GEDAE/UFPA. Verifica-se que o QGFV foi instalado na Central de Energia e a localização em que se pretende instalar os QPFV 1 e 2 será na área externa da edificação, mais próximo possível de cada grupo de SFCR. Sendo que o QPFV 1 será instalado próximo à entrada da fachada norte do prédio, em frente da Secretaria, substituindo o, até então instalado, quadro parcial, a fim de acomodar os SFCR já existentes e os que serão implementados futuramente, ao passo que o QPFV 2 será instalado na lateral externa do prédio, ao lado da Central de Energia, próximo à porta de acesso para a área externa.

Figura 3.4 – Localização da instalação do QGFV e o local pretendido para instalação dos QPFV 1 e 2.

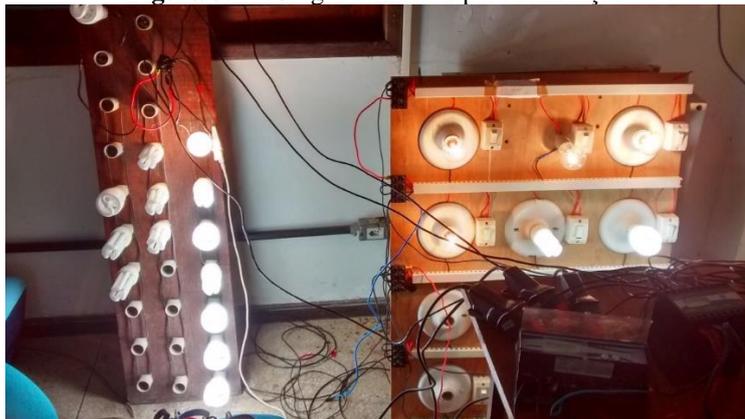


Fonte: Adaptado de Aguilar (2018).

3.2 Calibração dos dispositivos de medição

Para a calibração dos dispositivos de medição, realizaram-se testes com cargas de iluminação, como lâmpadas incandescentes e fluorescentes, ilustrado na Figura 3.5. Como referência para os valores dos parâmetros de corrente, tensão e suas respectivas THD, utilizou-se o analisador trifásico de qualidade de energia, PowerPad, modelo 3945-B, do fabricante AEMC Instruments, ilustrado na Figura 3.6.

Figura 3.5 – Cargas utilizadas para calibração.



Fonte: Elaborado pelo autor.

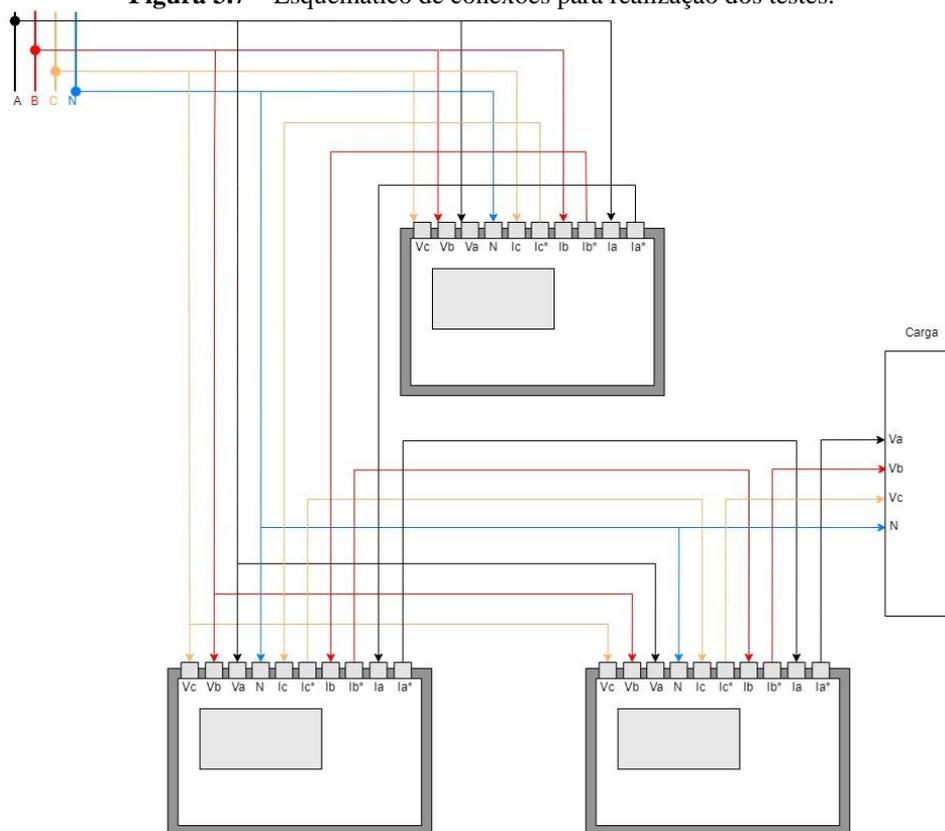
Figura 3.6 – Analisador trifásico de qualidade de energia PowerPad 3945-B.



Fonte: AEMC.

Devido à pouca quantidade de lâmpadas disponíveis no momento da realização dos testes, as entradas de tensão dos três medidores foram conectadas em paralelo e as conexões para as correntes dos três medidores ficaram em série, conforme ilustrado na Figura 3.7. As Tabelas 3.1 e 3.2 apresentam, de forma resumida, as cargas e os resultados dos testes, respectivamente.

Figura 3.7 – Esquemático de conexões para realização dos testes.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 3.1 – Descrição do carregamento para cada teste.

Teste	Descrição	Potência Nominal (W)
1	Sem Carga	0
2	1 L. Inc. 40 W	40
3	2 L. Inc. 40 W	80
4	2 L. Inc. 40 W + 1 L. Inc. 100 W	180
5	3 L. Inc. 40 W + 1 L. Inc. 100 W	220
6	3 L. Inc. 40 W + 1 L. Inc. 100 W + 1 L. PL 20 W	240
7	3 L. Inc. 40 W + 1 L. Inc. 100 W + 1 L. PL 20 W + 1 L. Hélice 24 W	264
8	3 L. Inc. 40 W + 1 L. Inc. 100 W + 3 L. PL 20 W + 2 L. Hélice 24 W	328
9	3 L. Inc. 40 W + 1 L. Inc. 100 W + 3 L. PL 20 W + 5 L. Hélice 24 W + 1 L. 72 W	472

Fonte: Elaborado pelo autor.

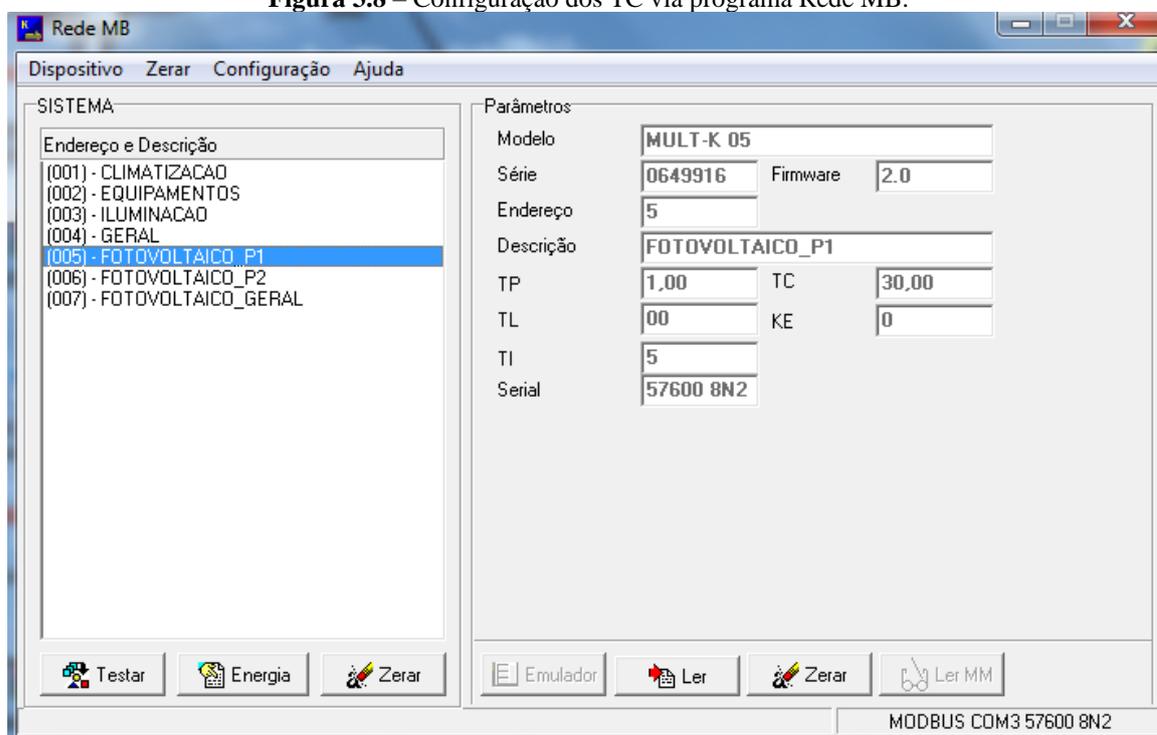
Tabela 3.2 – Resultados obtidos pelo PowerPad (_ref) e pelo medidor de multigrandezas (_med) referentes à tensão, corrente, THD e seus respectivos desvios para cada teste.

Teste	1	2	3	4	5	6	7	8	9
V_ref (V)	130,6	130,4	129,8	129,3	128,6	128,8	128,6	128,0	127,2
V_med (V)	130,5	130,3	129,7	129,2	128,4	128,9	128,6	128,0	127,3
Desvio_V (%)	0,08	0,08	0,08	0,08	0,16	-0,08	0,00	0,00	-0,08
I_ref (A)	0	0,3	0,6	1,4	1,7	1,9	2,1	2,8	4
I_med (A)	0	0,329	0,637	1,41	1,731	1,911	2,119	2,768	3,942
Desvio_I (%)	0	-9,67	-6,17	-0,71	-1,82	-0,58	-0,90	1,14	1,45
THDV_ref (%)	0	2,2	2,2	2,3	2,4	2,3	2,4	2,4	2,4
THDV_med (%)	0	2,12	2,21	2,22	2,36	2,28	2,35	2,33	2,41
Desvio_THDV (%)	0	3,64	-0,45	3,48	1,67	0,87	2,08	2,92	-0,42
THDI_ref (%)	0	2,8	2,2	2,2	2,4	10,6	20	37,7	41,7
THDI_med (%)	0	6,68	4,2	2,88	2,96	11,08	19,79	37,54	41,75
Desvio_THDI (%)	0	-138,57	-90,91	-30,91	-23,33	-4,53	1,05	0,42	-0,12

Fonte: Elaborado pelo autor.

De acordo com os testes realizados com os medidores de multigrandezas, Tabelas 3.1 e 3.2, a diferença entre os dados de THD de corrente (THDI) do medidor representam o maior desvio com relação aos dados obtidos pelo PowerPad, principalmente para baixa corrente por fase, os demais parâmetros ficaram com os valores mais próximo ao esperado, ou seja, mais próximo dos dados obtidos pelo PowerPad. Por outro lado, os TC foram configurados, conforme as especificações nominais do fabricante, obtidas em suas respectivas folhas de dados e inseridas diretamente no programa Rede MB, versão 6.04, disponibilizado pelo fabricante Kron, conforme ilustrado na Figura 3.8.

Figura 3.8 – Configuração dos TC via programa Rede MB.



Fonte: Elaborado pelo autor.

3.3 Alterações no programa de aquisição e exibição dos dados

Dentre as principais modificações realizadas na ferramenta desenvolvida em LabVIEW podem-se destacar:

- Modificação no tempo de coleta dos dados para compensar a adição dos novos medidores.

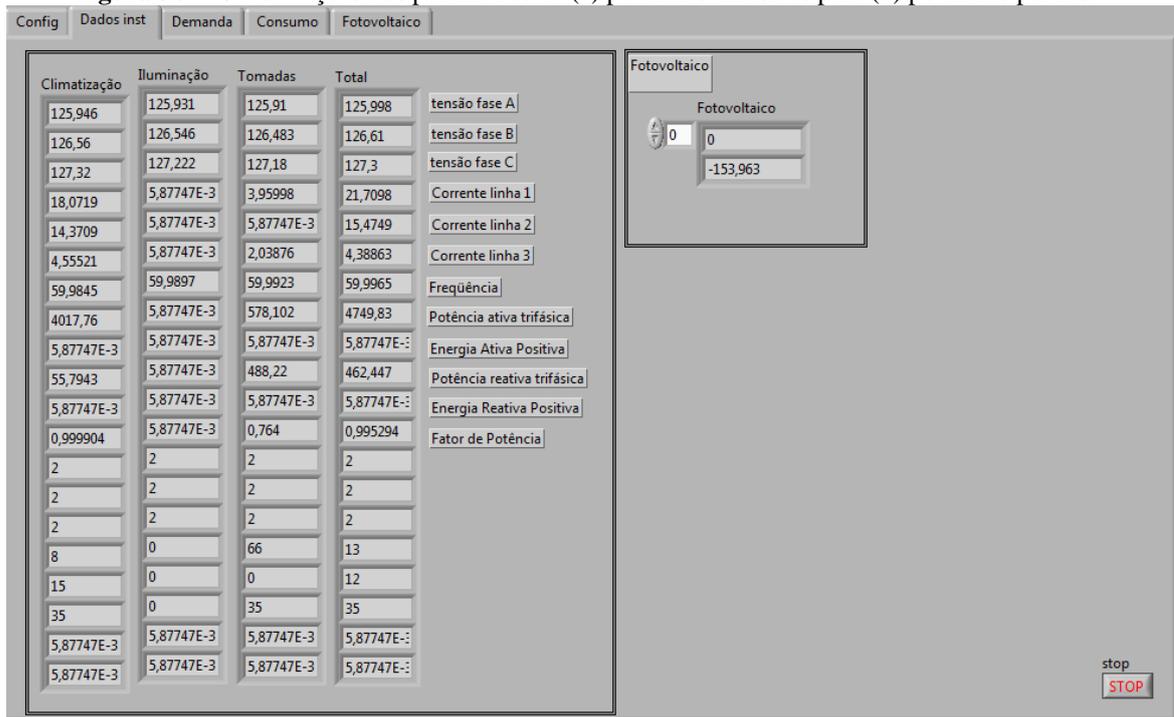
- Criação de um novo bloco para receber os dados do medidor KONECT, haja vista que os demais medidores empregados possuem os mesmos endereços pertinentes à obtenção dos parâmetros elétricos de frequência, corrente, tensão, potência ativa, potência reativa, THD de tensão e THD de corrente. Somente o medidor KONECT apresentou a localização destes mesmos parâmetros elétricos em endereços diferentes.

- Criação de uma condicional para escolha do bloco que vai receber os dados dos parâmetros elétricos do medidor.

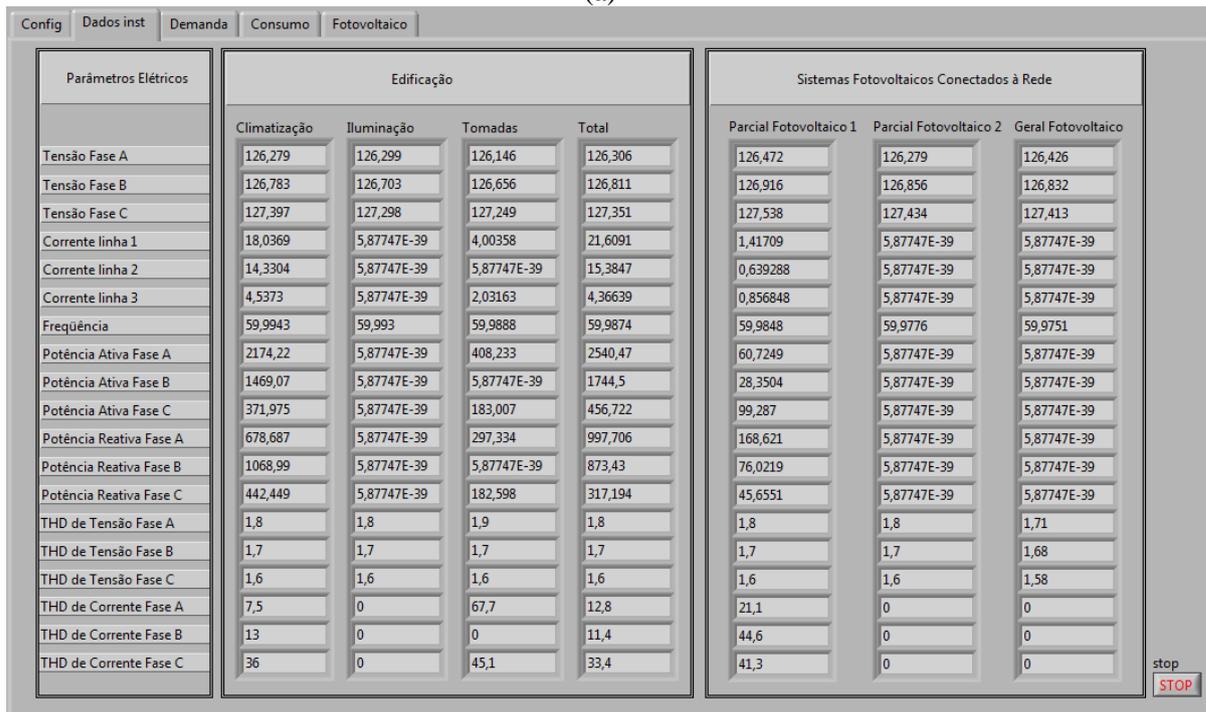
- Modificação na interface gráfica principal da ferramenta do sistema de monitoramento desenvolvido em LabVIEW: na aba de dados, com a substituição de alguns parâmetros por outros, como no caso das potências ativas e reativas trifásicas pelas potências ativas e reativas por fase, além da remoção dos dados de fator de potência trifásico⁶, conforme ilustrado na Figura 3.8; e na aba dos sistemas fotovoltaicos, com a adição de duas novas abas internas, uma para a potência produzida pelos SFCR e a outra para a energia total produzida, considerando as medições obtidas de cada um dos quadros dos SFCR, conforme ilustrado na Figura 3.9.

⁶ A decisão pela remoção dos dados de fator de potência se deve ao fato de um dos medidores Mult-K 05 apresentar valores instáveis (com grandes oscilações) no momento das leituras do fator de potência. Por este motivo, para fins de se evitar eventuais registros equivocados, optou-se pela retirada da coleta do fator de potência. Quando necessária esta informação, a sua obtenção é possível por meio do cálculo da relação entre potência ativa e o produto dos valores RMS da tensão e corrente (potência aparente).

Figura 3.9 – Substituições dos parâmetros de (a) potências trifásicas para (b) potências por fase.



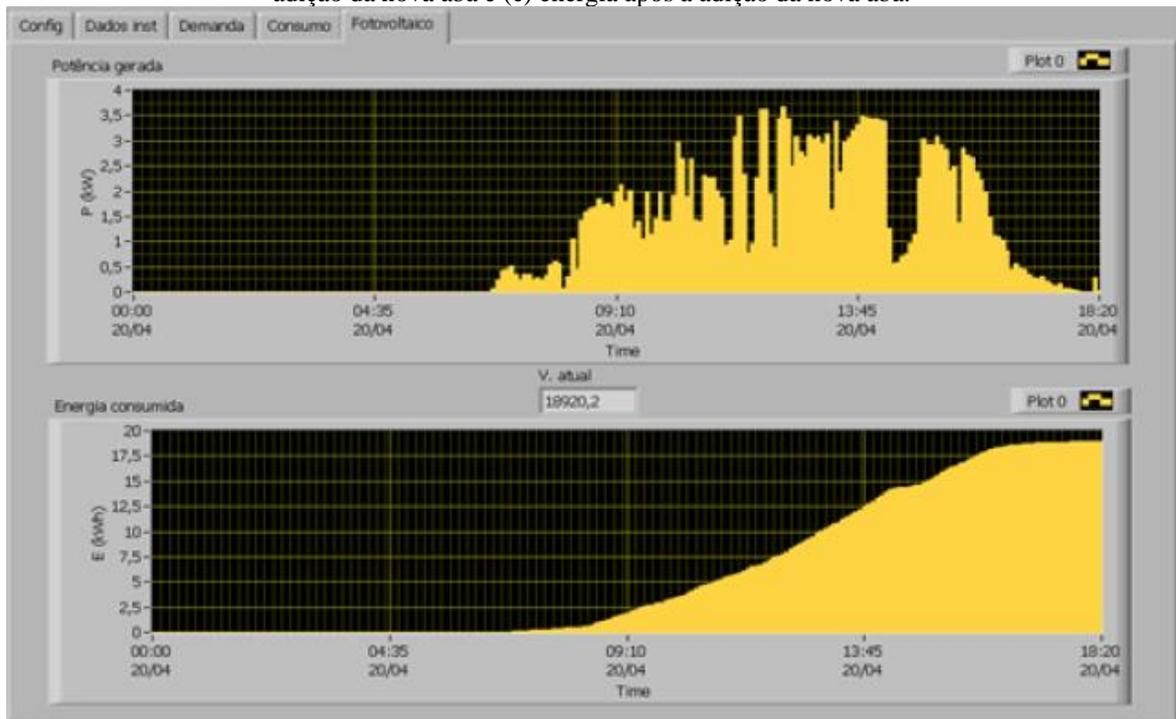
(a)



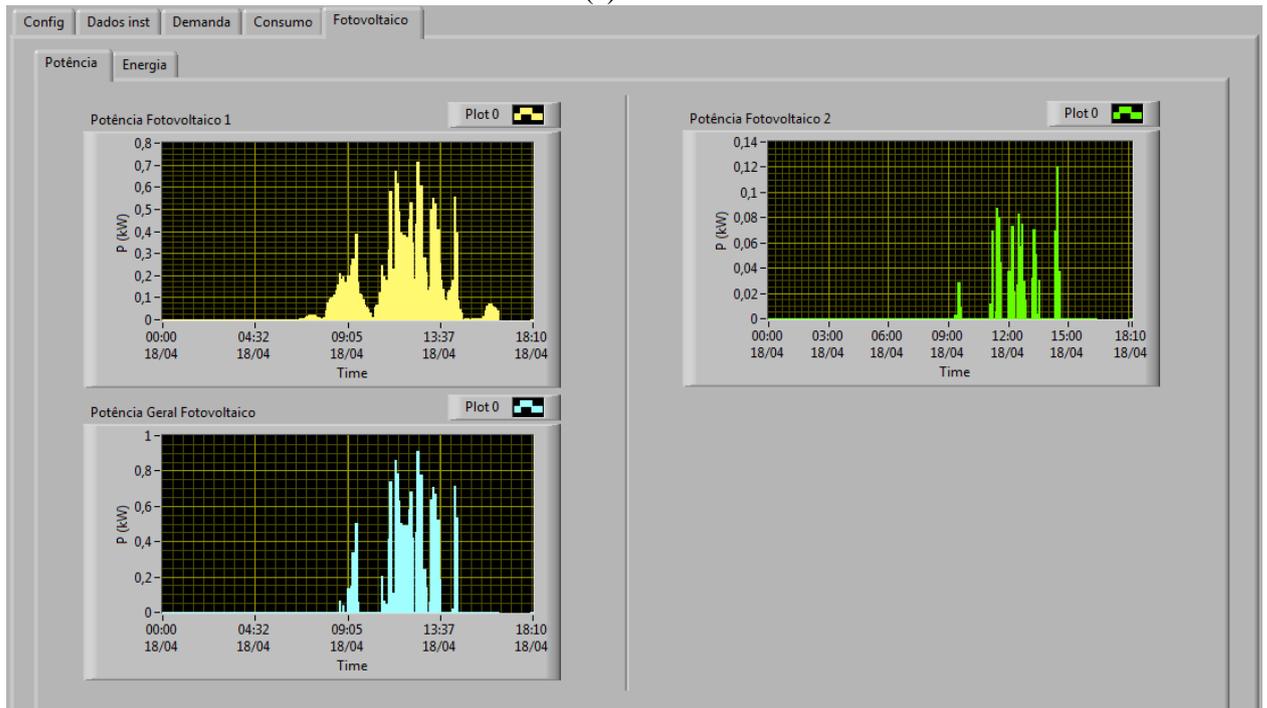
(b)

Fonte: Elaborado pelo autor.

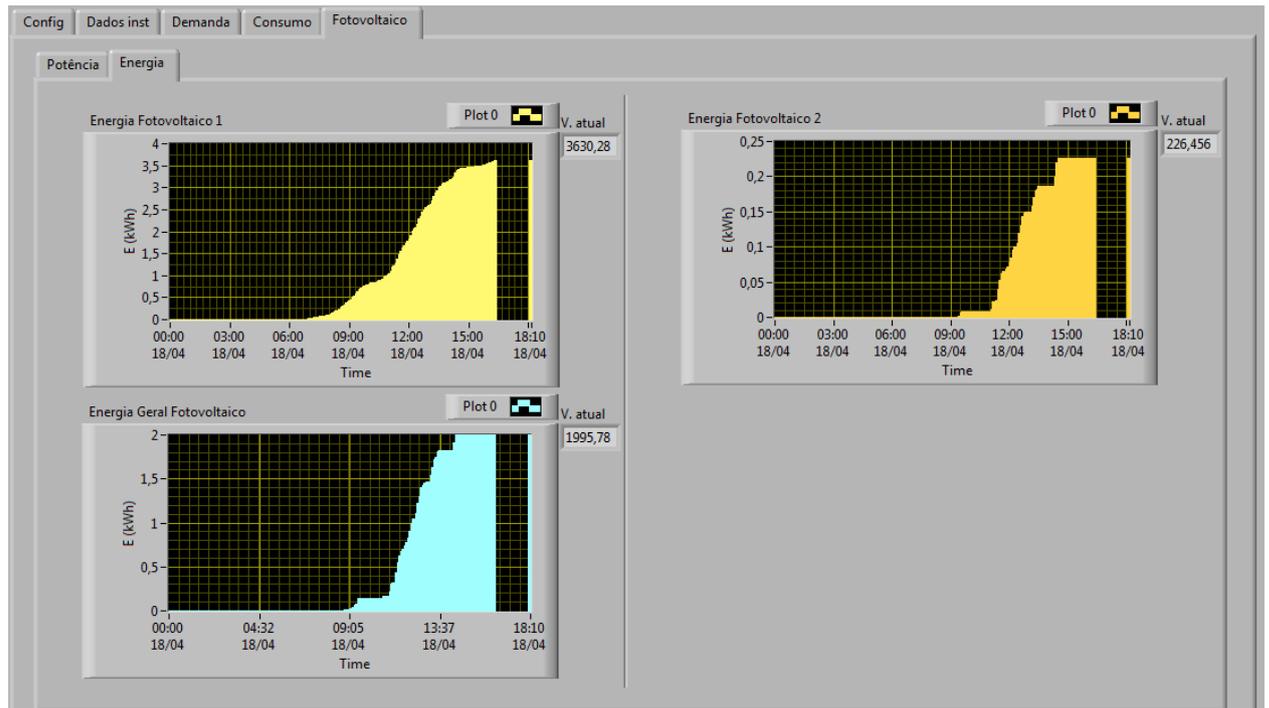
Figura 3.10 – Modificações nas abas do sistema: (a) potência e energia na versão original e (b) potência após a adição da nova aba e (c) energia após a adição da nova aba.



(a)



(b)



(c)

Fonte: Elaborado pelo autor.

- Adição de blocos para a chamada e execução de códigos em Python contendo rotinas para: atualizar, a cada 1 minuto, o estado atual do computador responsável pela aquisição e registro dos dados de monitoração dos SFCR e do prédio, se este encontra-se ligado ou desligado (estas informações são lidas e encaminhadas por um robô criado no Telegram); executar o *backup* destes dados via Google Drive; além de enviar os dados de medição para uma planilha do Google responsável por armazenar os parâmetros elétricos medidos dos SFCR e do prédio e compartilhá-los via página *web* criada em Streamlit.

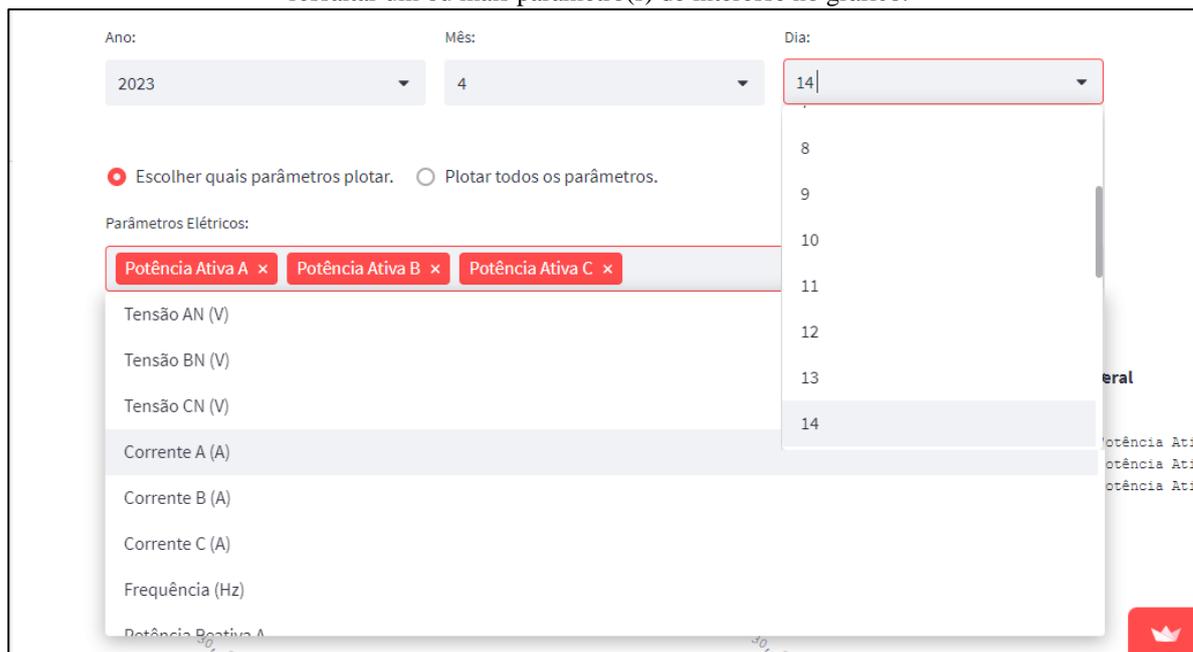
Com relação à exibição dos dados, destacam-se os seguintes modos de visualização:

- *In situ* (no local): visualização dos dados via interface gráfica criada no LabVIEW, conforme ilustrado anteriormente nas Figuras 3.8(b), 3.9(b) e 3.9(c). Por meio desta, o usuário consegue visualizar os dados instantâneos obtidos pelos medidores de multigrandezas, além de permitir que o usuário visualize, por meio de gráficos, os dados de demanda e energia do prédio, bem como a potência e energia produzida pelos SFCR, porém restrito somente aos dados registrados no dia atual. Não sendo possível a interação com esses gráficos ou com os outros parâmetros armazenados na base de dados.

- *Ex situ* (remota): É possível visualizar os dados remotamente via interface gráfica acessada pela página *web* criada utilizando o *framework* Streamlit. Apesar de não ser possível realizar a visualização instantâneas dos dados, por meio da página *web* criada, o usuário consegue visualizar e interagir com os dados por meio de gráficos, sendo possível escolher

qualquer um dos dias de dados registrados na base de dados, limitando-se a um dia por vez. Além disso, é possível exibir todos os parâmetros em uma única figura ou selecionar o(s) parâmetro(s) elétricos coletados pelos medidores de multigrandezas que se deseja visualizar, conforme observa-se na Figura 3.11.

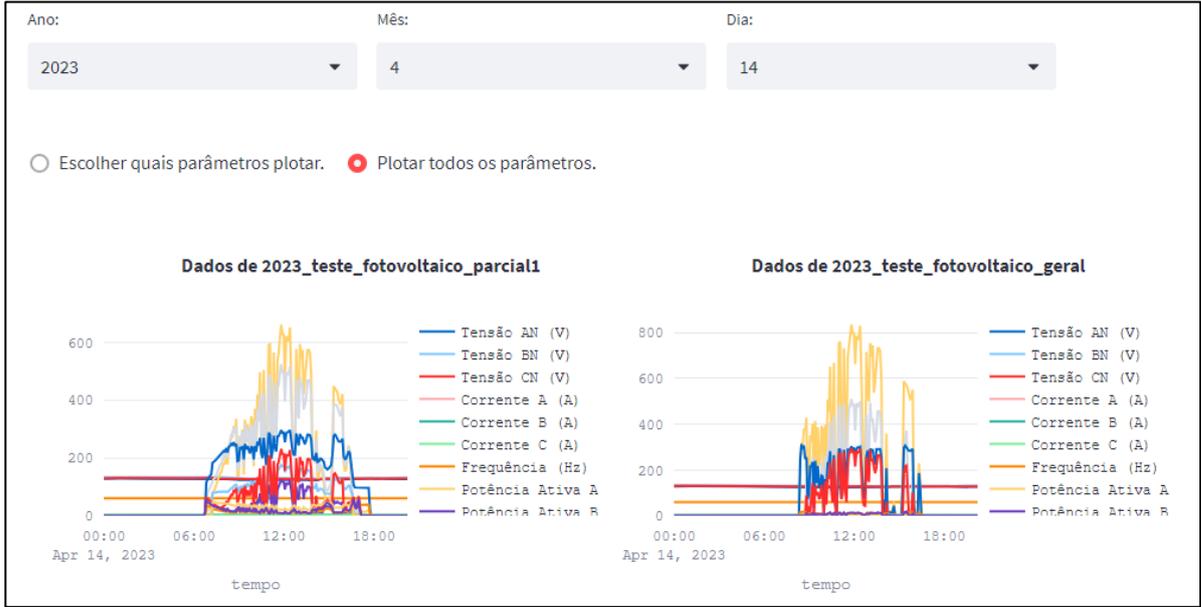
Figura 3.11 – Página *web* para visualização remota dos parâmetros elétricos monitorados do prédio e dos SFCR: (a) seleção da data e dos parâmetros elétricos; (b) exibição dos gráficos dos parâmetros escolhidos no período selecionado; (c) exibição simultânea de todos os parâmetros; (d) visualização de pontos do gráfico ao passar o ponteiro do mouse; (e) possibilidade de ampliar uma faixa específica nos eixos do gráfico; e (f) possibilidade de ressaltar um ou mais parâmetro(s) de interesse no gráfico.



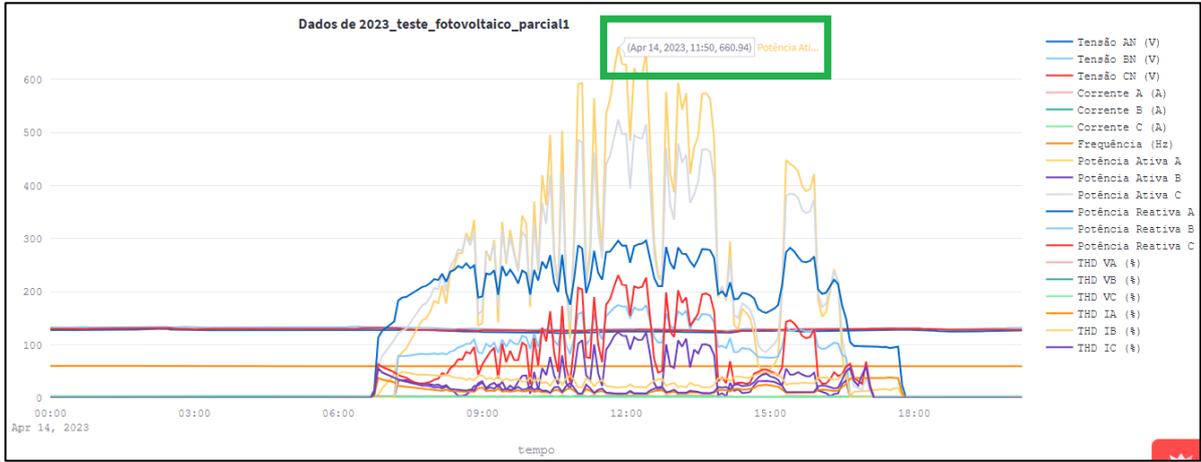
(a)



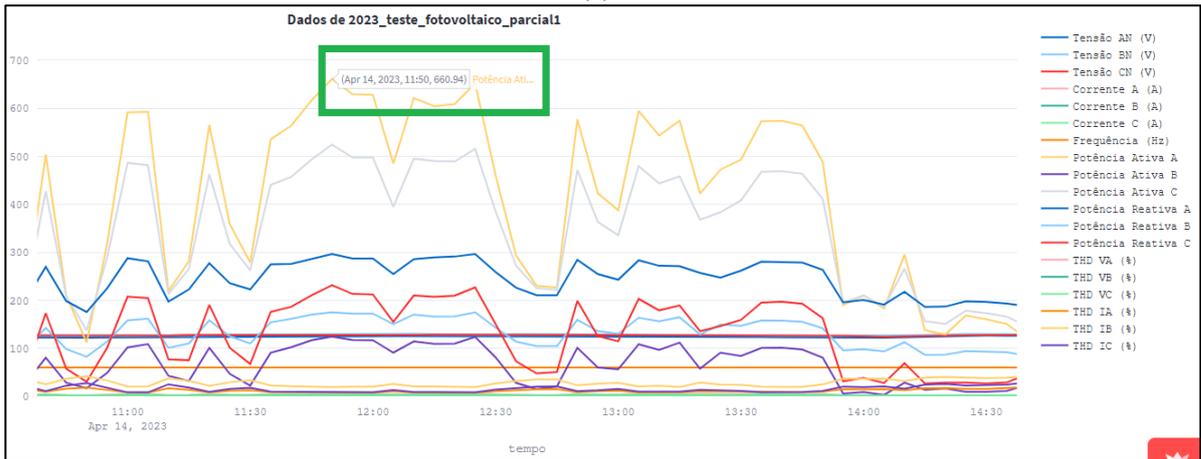
(b)



(c)



(d)



(e)



(f)

Fonte: Elaborado pelo autor.

Após a implementação do quadro geral, bem como dos dispositivos de medição dos SFCR e suas integrações com o LabVIEW, possibilita-se a obtenção de registros dos parâmetros elétricos no lado c.a. dos sistemas fotovoltaicos monitorados neste trabalho. Estes dados armazenados no computador local, dedicado antes aos registros de dados de circuitos de carga do prédio do GEDAE/UFPA, são agora compostos com os dados de geração dos SFCR.

Assim, no processo de monitoração implementado foi realizada a inserção de novos circuitos e medidores na instalação elétrica do prédio do GEDAE/UFPA e ainda adicionada a comunicação com um servidor para acesso remoto dos dados, possibilitando também o armazenamento em nuvem para *backup*.

No Capítulo 4 são apresentados e discutidos os principais resultados obtidos com os registros após a implementação do sistema de monitoração, além de se apresentar e discutir o histórico de medições e estimativas da geração dos SFCR e consumo na edificação do GEDAE/UFPA durante o período de 2011 a 2023.

CAPÍTULO 4 – AVALIAÇÃO DOS RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo são apresentados e analisados os dados de consumo e geração obtidos pelos medidores de multigrandezas do sistema de monitoração do prédio do GEDAE/UFPA, sendo os dados de geração comparados com os resultados obtidos por meio de simulação dos SFCR para o período de medição considerado e também com os dados das leituras obtidas dos visores dos inversores e medidores eletrônicos instalados próximos aos SFCR.

Por fim, analisa-se o desempenho energético dos SFCR implantados, dando-se ênfase para a contribuição dos sistemas na redução de consumo de energia elétrica da edificação vista da rede de distribuição, apresentando-se ainda uma breve estimativa de redução de custos com eletricidade para suprimento da edificação.

4.1 Considerações preliminares acerca das condições atuais dos SFCR

Para fins de auxílio nas discussões apresentadas neste capítulo, a princípio cabe ressaltar a condição atual de funcionamento de cada SFCR e dispositivos de medição, conforme resumido na Tabela 4.1.

Tabela 4.1 – Resumo do *status* atual dos SFCR e de seus respectivos equipamentos de medição.

Sistema	Status do SFCR	Componente do SFCR	Equipamento de medição	Status da medição
C1	Inativo	Inversor substituído ¹	<i>Datalogger</i>	Inoperante
M1	Inativo	Mesmo microinversor ²	Medidor eletrônico	Funcional ⁶
M2	Ativo	Mesmos microinversores	Medidor eletrônico	Ativo
S1	Inativo	Sem inversor ³	Medidor eletrônico	Funcional ⁵
S2	Ativo	Inversor substituído	Medidor eletrônico	Ativo
S3	Inativo	Sem inversor ³	Medidor eletrônico	Funcional ⁵
S4	Inativo	Mesmo inversor ⁴	Medidor eletrônico	Funcional ⁵
S5	Inativo	Sem inversor ³	Visor do inversor	Inoperante
S6	Inativo	Sem inversor ³	Visor do inversor	Inoperante
S7	Inativo	Sem inversor ³	Visor do inversor	Inoperante
S8	Ativo	Mesmo inversor	Visor do inversor	Ativo

¹ Apesar da substituição do inversor com problema, notou-se que três otimizadores (conversores c.c.-c.c.) deste SFCR estão danificados.

² O microinversor está operacional, porém ainda se faz necessário refazer o encaminhamento dos cabos para a conexão com o QPFV 1.

³ O inversor foi removido do local de instalação.

⁴ O inversor ainda está presente no local de instalação, no entanto, apresenta problemas no estágio de potência.

⁵ Funcional, porém atualmente inativo (ausência do inversor).

⁶ Funcional, porém atualmente inativo (microinversor desligado).

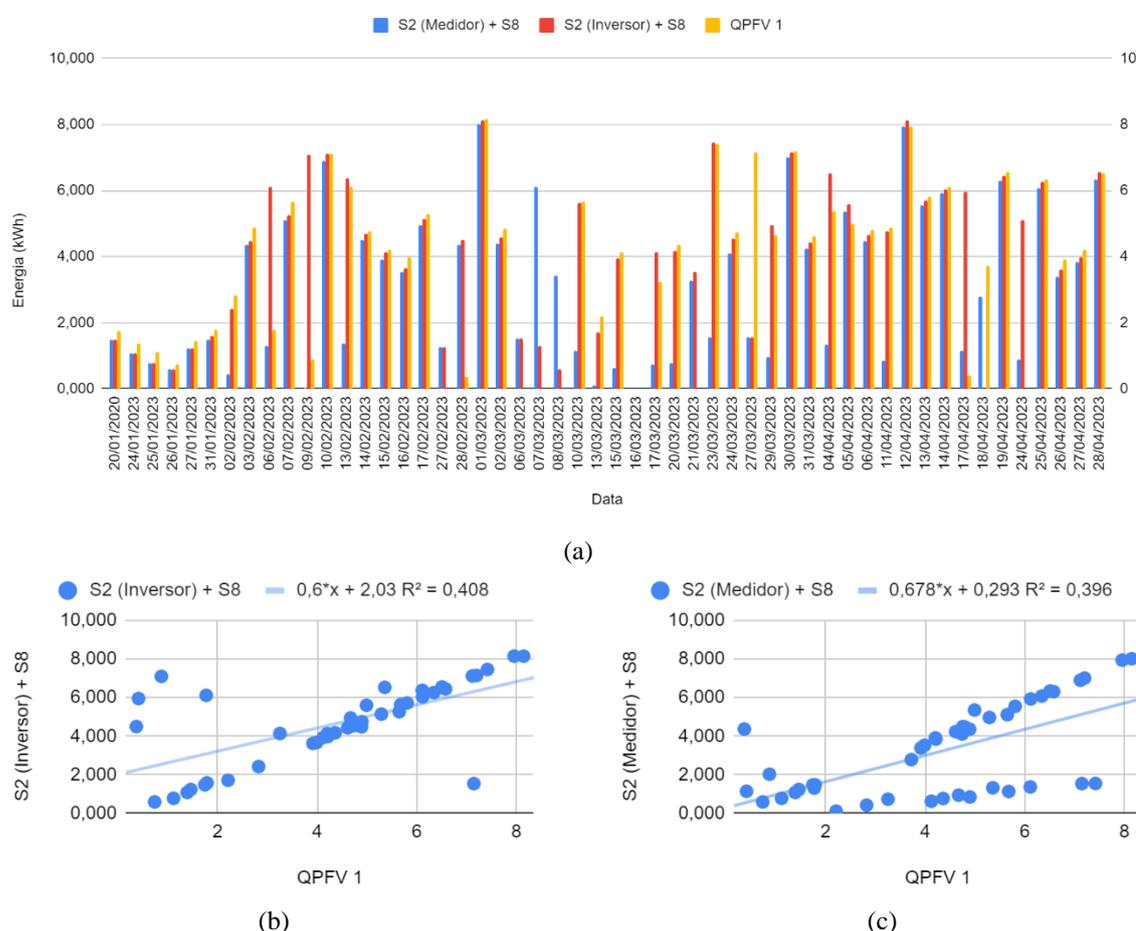
Fonte: Elaborado pelo autor.

4.2 Apresentação dos dados de geração obtidos pelos medidores de multigrandezas do sistema de monitoração

Para fins de comparação entre os dados obtidos pelos medidores eletrônicos instalados próximos aos SFCR, realizaram-se aferições ao final de cada dia útil com os valores de energia elétrica obtidos pelos visores dos inversores e pelos medidores de multigrandezas, correspondentes aos dados de geração no lado c.a.

Os dados registrados nos Quadros Parciais Fotovoltaicos 1 e 2, referentes às medições de energia elétrica, estão representados por meio dos gráficos nas Figuras 4.1 e 4.2, respectivamente.

Figura 4.1 – Comparação dos resultados da geração no Quadro Parcial Fotovoltaico 1: (a) visão geral; e linhas de tendência considerando os dados lidos pelo (b) inversor e (c) medidor eletrônico.

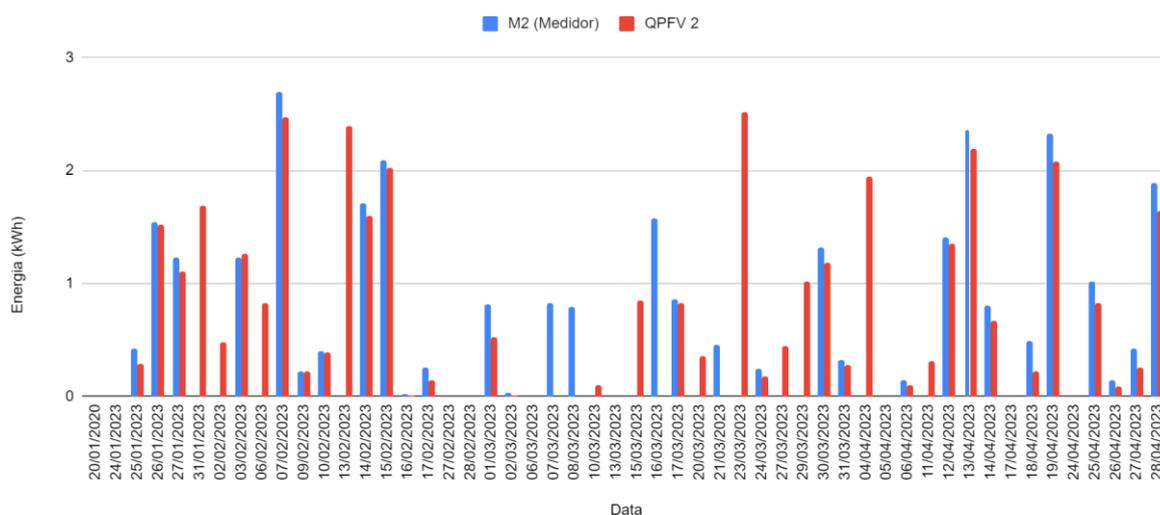


Fonte: Elaborado pelo autor.

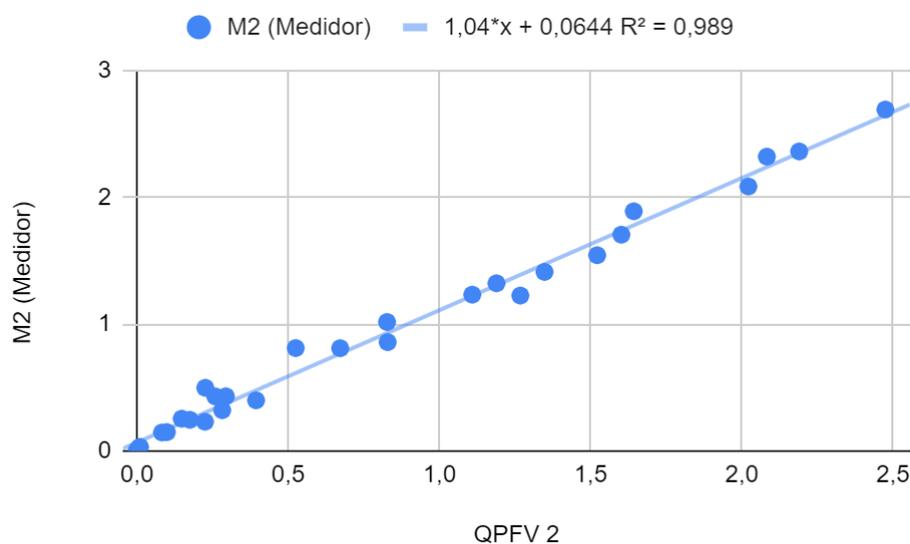
Avaliando-se o coeficiente de determinação da regressão linear, identificado como R^2 nas Figuras 4.1 (b) e 4.1 (c), nota-se uma correlação fraca entre os dados do medidor de multigrandezas elétricas e os dados do inversor e medidor eletrônico, em decorrência de alguns problemas durante a realização dos registros de dados, principalmente com relação ao Quadro Parcial Fotovoltaico 1 (QPFV 1), tais como: interrupções na execução do programa em

LabVIEW para a monitoração dos dados, com eventuais desligamentos do computador por queda de energia no campus da UFPA; além da metodologia para coleta de dados diários de geração por meio dos medidores eletrônicos e visores dos inversores, em que a ausência de um dia de medição afeta diretamente no balanço energético durante a leitura do dia seguinte, desta forma, dificultam-se as leituras em todo primeiro dia útil da semana e em dias que não se pôde obter os dados de energia, seja devido a quedas de energia ou a outras eventualidades.

Figura 4.2 – Comparação dos resultados da geração no Quadro Parcial Fotovoltaico 2: (a) visão geral; e (b) linha de tendência considerando os dados lidos pelo medidor eletrônico.



(a)



(b)

Fonte: Elaborado pelo autor.

Embora o Quadro Parcial Fotovoltaico 2 (QPFV 2) apresente os mesmos problemas do QPFV 1, na Figura 4.2 é possível notar que há uma maior similaridade entre os gráficos do QPFV2 e os dados obtidos pelos medidores. Apesar disso, em algumas situações, o sistema

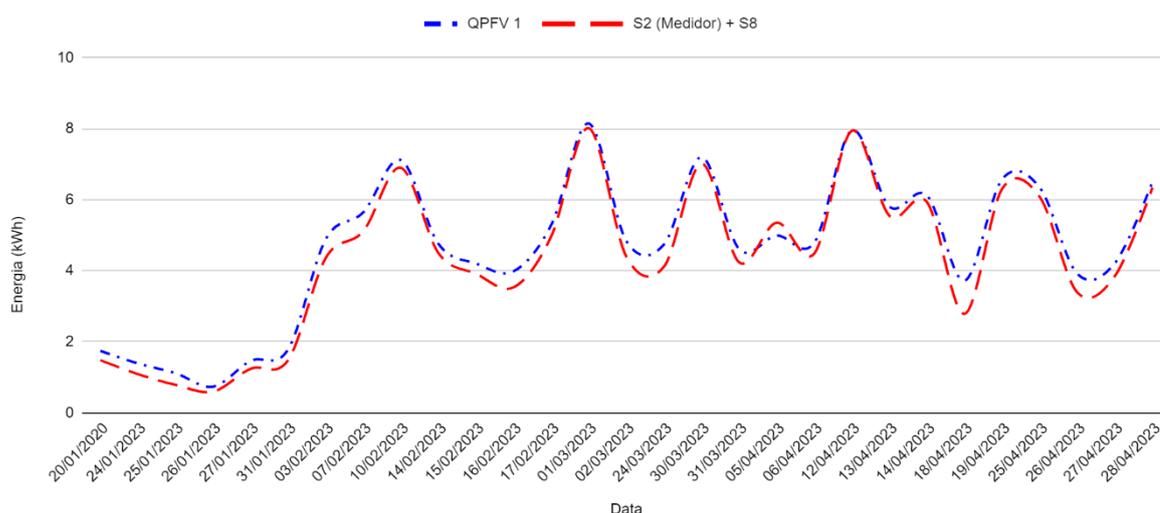
com microinversor M2 apresenta dificuldades de restabelecer sozinho a conexão com o lado c.a. da rede elétrica durante dias com baixa irradiância, fazendo-se necessária uma operação manual para realização de chaveamento no lado c.a., isto é, desliga-se o lado c.a. até que os microinversores sinalizem com o LED na cor verde e em seguida religa-se o lado c.a., desta forma o microinversor consegue conectar à rede e restabelecer o fornecimento de energia c.a.

Portanto, é importante ressaltar que, até o presente momento, o sistema M2 é único SFCR conectado ao QPFV 2. Isso significa que, mesmo quando ocorrem interrupções no programa em LabVIEW, a medição não é gravemente afetada, uma vez que o sistema M2 nem sempre está conectado à rede elétrica c.a., dada às dificuldades em restabelecer a conexão com o lado c.a. da rede após os períodos de baixa irradiância.

Devido às baixas correlações entre os dados dos medidores eletrônicos/visores dos inversores e os dados do QPFV 1, optou-se pela filtragem dos dias em que foram identificados problemas de interrupções no computador que executa o programa de monitoramento e dos dias que não houve sequências diárias de medição, tal que são eliminados da base de dados todos os dias com interrupções identificadas e sem sequência diária de medições. Esta filtragem foi também aplicada ao QPFV 2, a fim de se melhorar as correlações entre os dados, conforme ilustrada nas Figuras 4.3, 4.4 e 4.5.

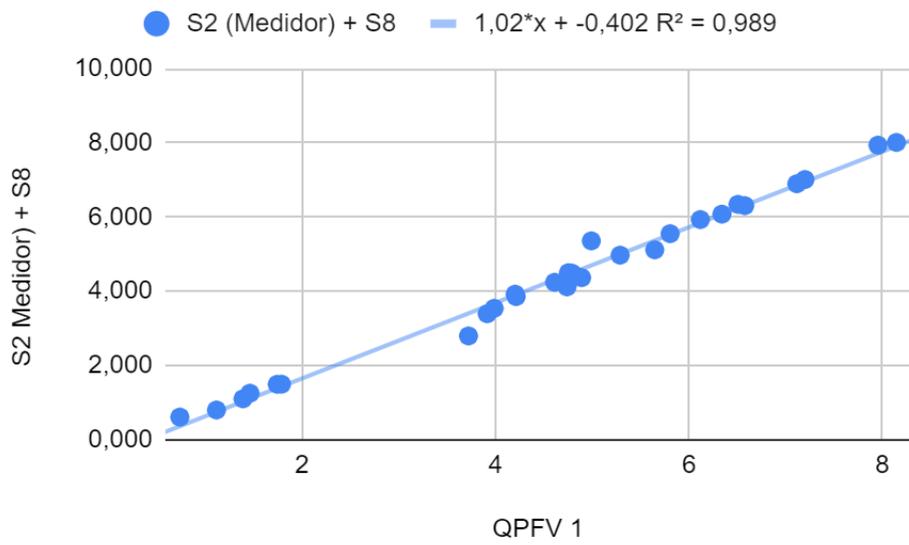
Figura 4.3 – Comparação dos resultados da geração no Quadro Parcial Fotovoltaico 1 após filtragem dos dias com problemas de medição: (a) visão geral e (b) linha de tendência considerando os dados lidos pelo medidor eletrônico.

(continua)



(a)

(conclusão)

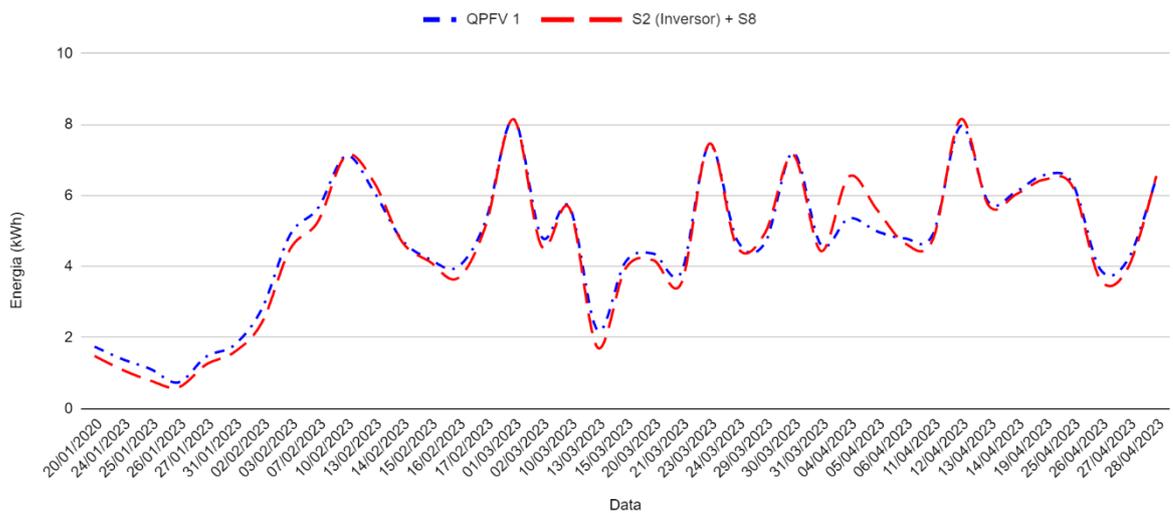


(b)

Fonte: Elaborado pelo autor.

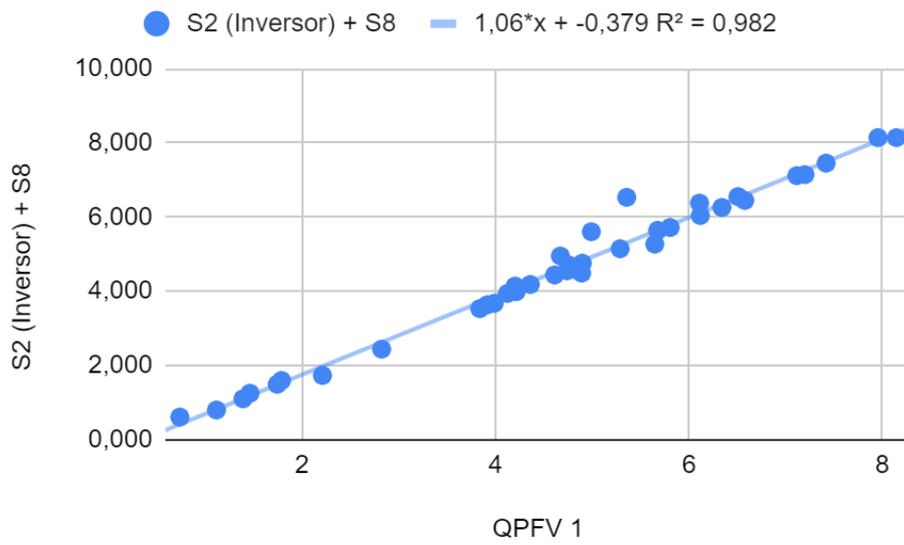
Figura 4.4 – Comparação dos resultados da geração no Quadro Parcial Fotovoltaico 1 após filtragem dos dias com problemas de medição: (a) visão geral e (b) linha de tendência considerando os dados lidos pelo visor do inversor.

(continua)



(a)

(conclusão)

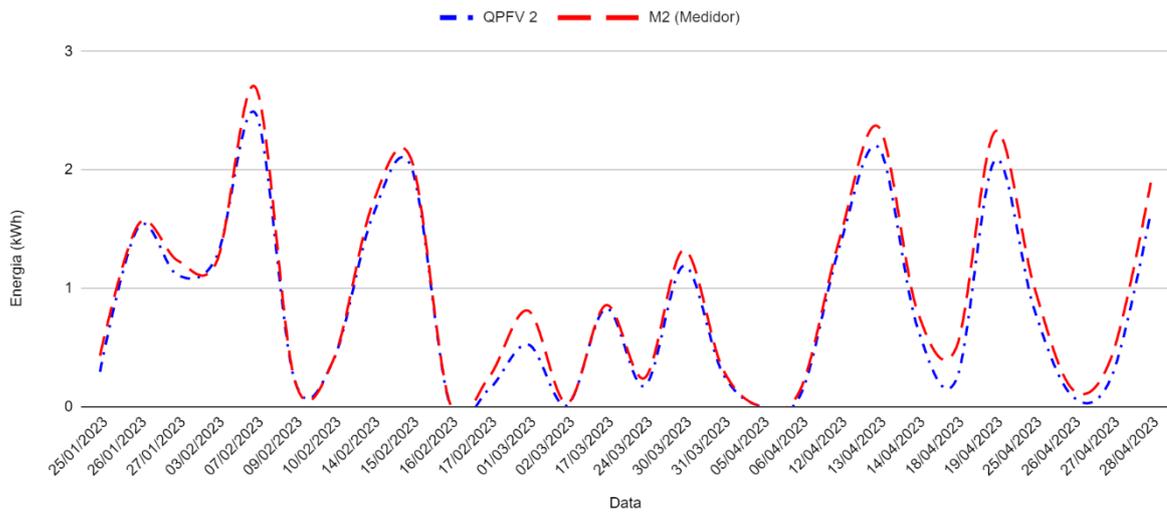


(b)

Fonte: Elaborado pelo autor.

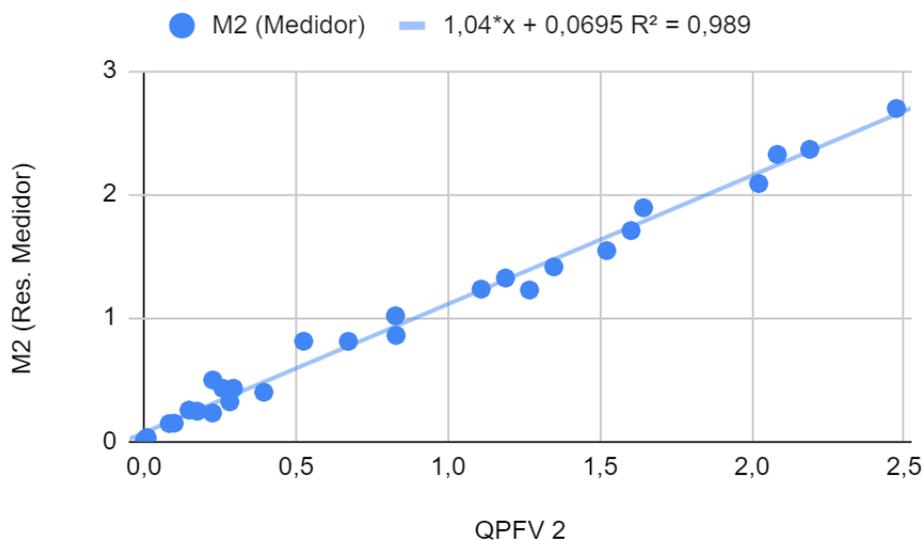
Figura 4.5 – Comparação dos resultados da geração no Quadro Parcial Fotovoltaico 2 após filtragem dos dias com problemas de medição: (a) visão geral e (b) linha de tendência considerando os dados lidos pelo medidor eletrônico.

(continua)



(a)

(conclusão)



(b)

Fonte: Elaborado pelo autor.

Observam-se melhorias nas linhas de tendência após a filtragem, principalmente, quando comparadas as linhas obtidas para o QPFV 1, as quais apresentaram correlações mais fortes, ou seja, com o coeficiente de correlação de Pearson mais próximo ao valor unitário, conforme pode ser observado nas Figuras 4.3(b) e 4.4(b).

Quanto ao QPFV 2, já havia uma correlação muito forte antes mesmo da filtragem dos dias, logo, a melhoria na correlação foi ínfima quando comparada a melhoria na correlação do QPFV 1, conforme ilustrado na Figura 4.5 (b).

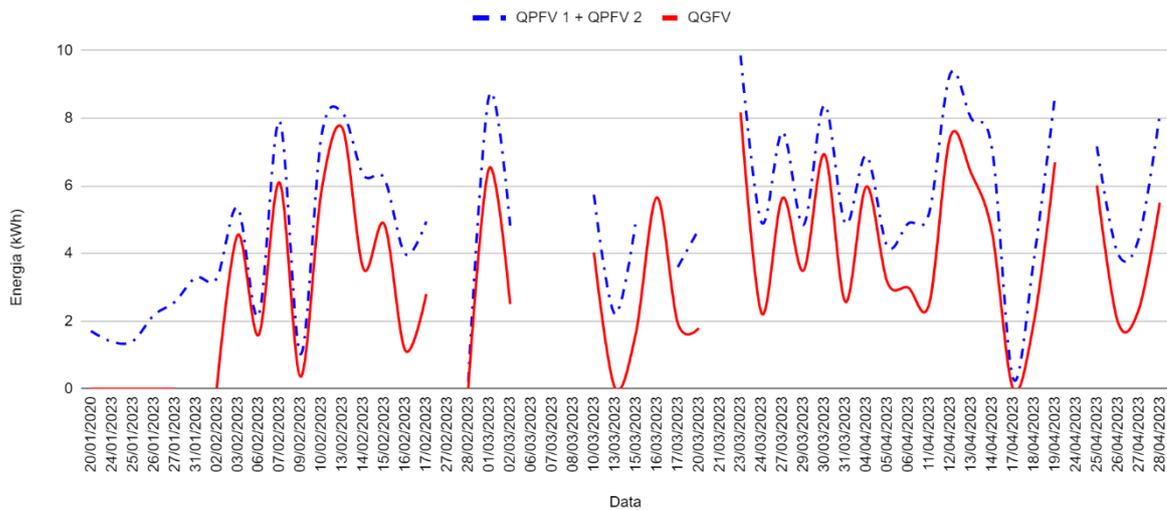
Cabe salientar que mesmo após a filtragem dos dias com problemas de interrupções, ainda houve algumas discrepâncias nos resultados obtidos pelos medidores de multigrandezas para alguns dias, tanto para o QPFV1 quanto para o QPFV 2. No entanto, isso se deve à limitação operacional destes medidores de multigrandezas, os quais necessitam de pelo menos 20 mA para sensibilizar a medição de corrente (lembrando que a leitura da corrente passa antes por um transformador de corrente de 150 / 5 A) e, até o momento de escrita deste trabalho, apenas alguns dos SFCR foram restaurados, sendo dois SFCR (S2 e S8) e somente um SFCR (M2) conectados, respectivamente, aos QPFV 1 e QPFV 2.

A sensibilização da medição de corrente junto com a atual quantidade de SFCR em operação também afetam, significativamente, a leitura de corrente no medidor de multigrandezas, principalmente, durante a ocorrência de baixa irradiância, período em que facilmente se obtém níveis de corrente inferiores a 20 mA na saída do TC.

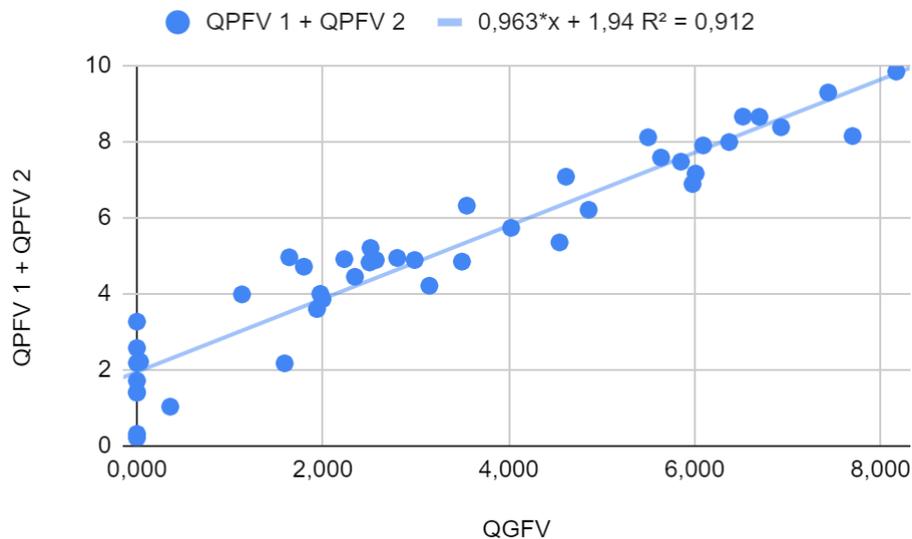
Haja vista que após o processo de filtragem já se verificaram correlações muito fortes entre as leituras de energias ativas nos medidores de multigrandezas dos quadros parciais e as

leituras, via medidores eletrônicos e visores dos inversores, das energias ativas produzidas pelos SFCR, portanto, para se evitar repetições de ilustrações gráficas, avaliam-se os dados de energia ativa no lado c.a. obtidos dos medidores de multigrandezas do Quadro Geral Fotovoltaico (QGFV) com os dados de energia ativa obtidos por meio de suas ramificações ou circuitos parciais (QPFV 1 e 2), onde computa-se a soma das energias ativas dos QPFV 1 e 2. Logo, o resultado para esta comparação entre os quadros elétricos está ilustrado na Figura 4.6.

Figura 4.6 – Comparação dos resultados da geração no Quadro Geral Fotovoltaico: (a) visão geral e (b) linha de tendência considerando os dados lidos pelos medidores de multigrandezas nos QPFV 1 e 2.



(a)



(b)

Fonte: Elaborado pelo autor.

Nota-se que os gráficos da Figura 4.6(a) seguem o mesmo perfil. No entanto, o QGFV não resultou na soma dos QPFV 1 e 2, devido à corrente de sensibilização do medidor de multigrandezas utilizado no QGFV, pois, conforme mencionado no Capítulo 2, este medidor

possui uma corrente de sensibilização de 200 mA e ainda é utilizado um transformador de corrente de 150 / 5 A para fazer a conexão com o medidor de multigrandezas.

Como atualmente encontram-se em operação somente três SFCR, há situações em que o medidor do QGFV não consegue realizar a leitura de corrente por não alcançar o mínimo para sensibilizá-lo.

No entanto, ao passo que forem sendo reativados os SFCR já existentes no GEDAE ou que forem sendo implementados novos SFCR, a leitura se dará com maior exatidão, pois será alcançado com mais facilidade o mínimo de corrente necessário para sensibilizar o medidor de multigrandezas. Conforme também visto nos testes realizados com os medidores de multigrandezas no Capítulo 3, à medida que a carga aumenta há a melhora na exatidão da leitura de corrente.

4.2.1 Validação dos dados de geração obtidos pelos medidores de multigrandezas do sistema de monitoração

A fim de validar os dados dos medidores de multigrandezas, ilustrados nas Figuras 4.2(a), 4.3(a) e 4.4(a), utilizam-se, como métricas para a avaliação de desvios, indicadores como RMSE (Raiz do Erro Médio Quadrático) e MAE (Erro Médio Absoluto), cujo objetivo é medir o quão próximo a modelagem matemática está em relação aos valores medidos experimentalmente (MARES, 2019). O RMSE é calculado por meio da Equação 4.1 e o MAE, pela Equação 4.2. Os resultados obtidos dos desvios estão apresentados nas Tabelas 4.2, 4.3, 4.4 e 4.5.

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (E_i - O_i)^2} \quad (4.1)$$

$$MAE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |E_i - O_i| \quad (4.2)$$

Sendo, N o número de observações e, a priori, O_i o valor observado por meio dos medidores de multigrandezas e E_i o valor exibido pelos medidores eletrônicos e/ou visores dos inversores. Posteriormente, no presente capítulo interpretam-se O_i e E_i , como sendo o valor observado experimentalmente e o valor estimado a partir da modelagem matemática, respectivamente.

Tabela 4.2 – Validação dos dados do medidor eletrônico do sistema M2 com os dados do QPFV 2.

Período	RMSE (kWh-dia)	MAE (kWh-dia)	RMSE (kWh-mês)	MAE (kWh-mês)
Janeiro/2023	0,116	0,114	3,599	3,524
Fevereiro/2023	0,120	0,093	3,373	2,604
Março/2023	0,134	0,096	4,142	2,966
Abril/2023	0,172	0,148	5,147	4,437
Total no ano	0,145	0,117	17,382	14,083

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 4.3 – Validação dos dados dos sistemas S8 e S2 (medidor eletrônico) com os dados do QPFV 1.

Período	RMSE (kWh-dia)	MAE (kWh-dia)	RMSE (kWh-mês)	MAE (kWh-mês)
Janeiro/2023	0,242	0,232	7,49	7,177
Fevereiro/2023	0,262	0,235	7,35	6,568
Março/2023	0,388	0,345	12,024	10,707
Abril/2023	0,501	0,388	15,031	11,654
Total no ano	0,387	0,311	46,452	37,369

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 4.4 – Validação dos dados dos sistemas S8 e S2 (inversor) com os dados do QPFV 1.

Período	RMSE (kWh-dia)	MAE (kWh-dia)	RMSE (kWh-mês)	MAE (kWh-mês)
Janeiro/2023	0,231	0,215	7,147	6,660
Fevereiro/2023	0,282	0,222	7,899	6,210
Março/2023	0,346	0,231	10,720	7,167
Abril/2023	0,605	0,357	18,141	10,703
Total no ano	0,421	0,266	50,532	31,924

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 4.5 – Validação dos dados dos QPFV 1 e 2 com os dados do QGFV.

Período	RMSE (kWh-dia)	MAE (kWh-dia)	RMSE (kWh-mês)	MAE (kWh-mês)
Janeiro/2023	-	-	-	-
Fevereiro/2023	4,118	3,531	115,309	98,873
Março/2023	3,762	3,335	116,610	103,374
Abril/2023	3,564	3,222	106,907	96,671
Total no ano	3,804	3,353	456,486	402,302

Fonte: Elaborado pelo autor.

Salienta-se que para a obtenção dos resultados diários dos desvios RMSE e MAE, consideraram-se após a realização da filtragem dos dias contendo falhas na medição, de acordo com o Subtópico 4.1.1, todos os registros de energia acumulada diariamente em cada um dos meses monitorados. Assim também se aplicou aos resultados diários para o total no ano, onde foram considerados todos os registros de dados realizados no ano durante o período monitorado.

Para os resultados mensais dos desvios, consideraram-se os resultados diários para cada mês e multiplicaram-se pela quantidade de dias que compõe aquele mês. A mesma ideia se aplicou ao registro total no ano, onde se consideraram os resultados diários obtidos durante o ano e multiplicaram-se pela quantidade de dias que compõe aquele ano.

Com relação aos resultados apresentados nas Tabelas 4.2, 4.3 e 4.4, nota-se que, durante o período observado, os meses de janeiro/2023 e abril/2023 representam, respectivamente, o menor e o maior desvio dos resultados das comparações entre as medições utilizando o monitoramento individual dos SFCR e as medições utilizando os medidores de multigrandezas dos QPFV 1 e 2.

Ao que se refere à Tabela 4.5, verificam-se desvios mais acentuados devido à corrente de sensibilização do medidor de multigrandezas do QGFV ser mais alta que as dos QPFV, além de que apenas poucos SFCR estão em funcionamento atualmente. Portanto, é preferível analisar somente os dados dos QPFV, haja vista que os desvios RMSE e MAE são menores do que no QGFV.

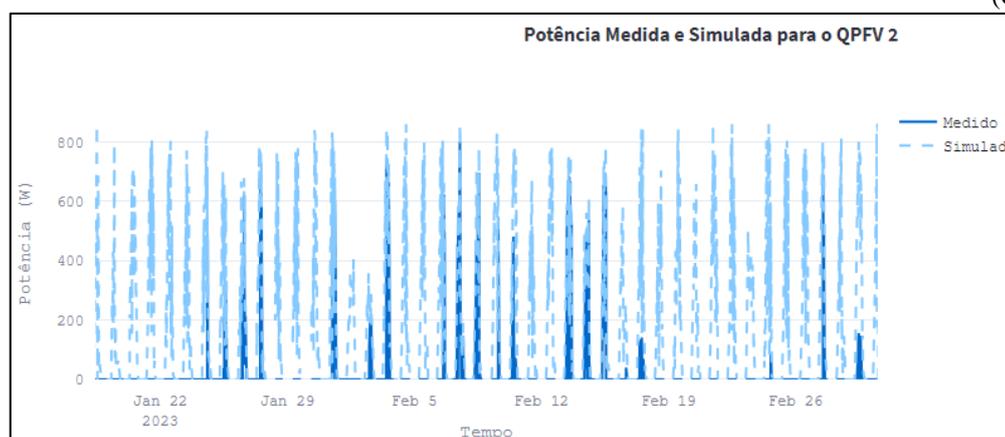
À medida que sejam revitalizados os SFCR já existentes ou que sejam instalados novos SFCR, avalia-se novamente a confiabilidade dos dados obtidos pelo QGFV para que possam ser utilizados em estudos futuros.

4.3 Comparação dos resultados de simulação com os dados obtidos por meio de medição

Com base nos dados de medição aferidos *in loco* e os resultados obtidos por meio de simulação utilizando os programas e equações expostas no Capítulo 2, fez-se a comparação dos valores de potência ativa no lado c.a. entregue pelos SFCR, ilustrada nas Figuras 4.7 e 4.8, a fim de validar os dados de simulação com os dados de medição reais.

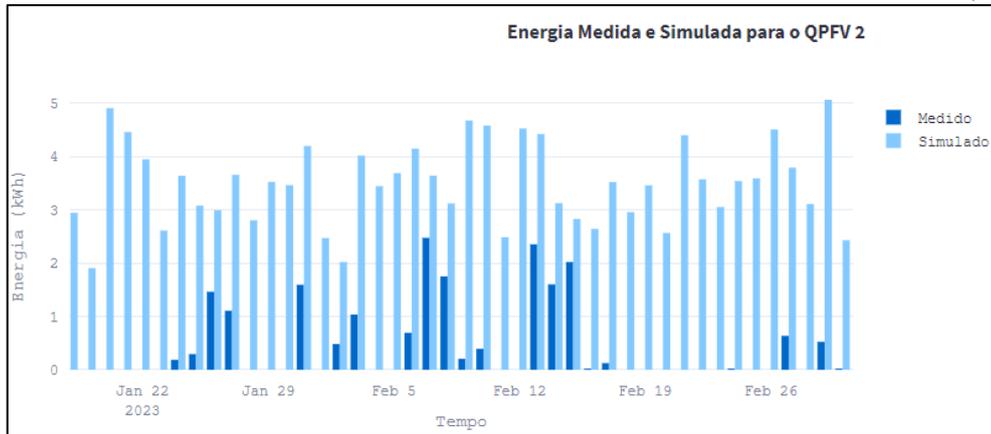
Figura 4.7 – Resultado da simulação do SFCR conectado ao QPFV 2 e os dados no medidor de multigrandezas: (a) potência no período completo (b) energia no período completo e (c) ampliação da informação no período de 07/02/2023 a 10/02/2023.

(Continua)

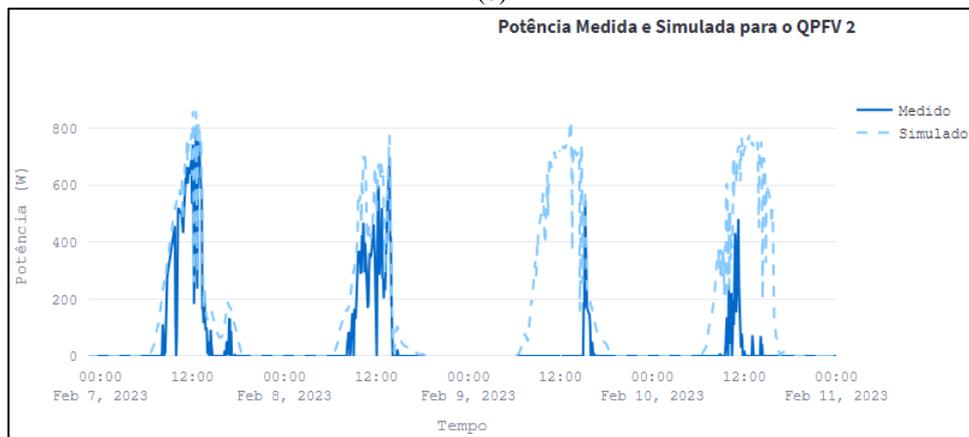


(a)

(Conclusão)



(b)

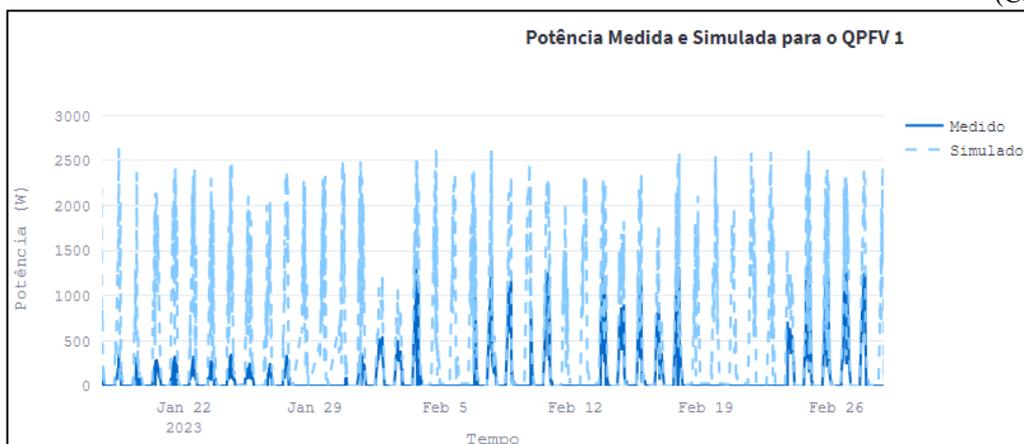


(c)

Fonte: Elaborado pelo autor.

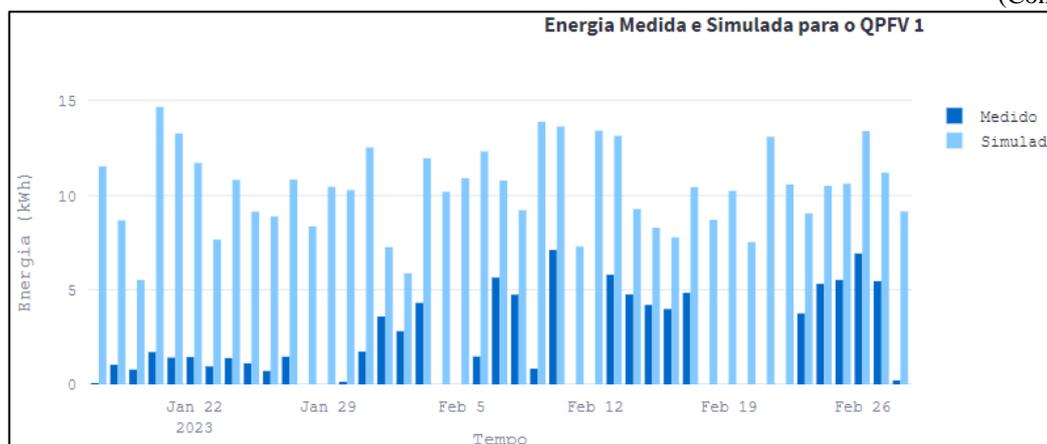
Figura 4.8 – Resultado da simulação do SFCR conectado ao QPFV 1 e os dados no medidor de multigrandezas: (a) período completo (b) energia no período completo e (c) ampliação da informação no período de 14/02/2023 a 17/02/2023.

(Continua)

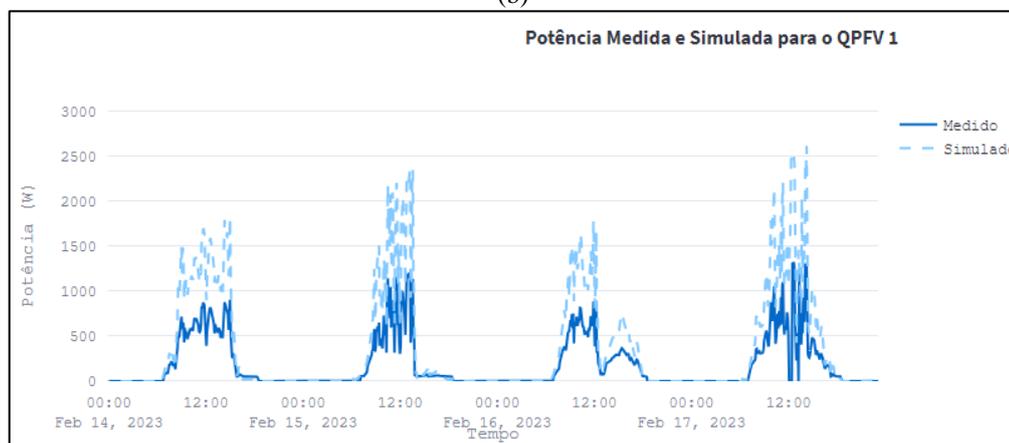


(a)

(Conclusão)



(b)



(c)

Fonte: Elaborado pelo autor.

É válido lembrar que há somente o sistema M2 em operação no QPFV 2, assim como estão somente os sistemas S2 e S8 em funcionamento no QPFV 1. Portanto, conforme apresentado nas Figuras 4.7 e 4.8, notam-se que os resultados da simulação seguem o mesmo perfil dos dados registrados da medição, embora sejam perceptíveis falhas nos registros de dados em alguns dos dias, assim como evidenciadas nas Figuras 4.7(a) e 4.8(a), devido aos problemas mencionados no tópico anterior, os quais levaram a necessidade de filtrar os dados durante estes dias.

Apesar dos desligamentos do computador, dedicado à monitoração dos parâmetros elétricos das cargas do prédio e da geração dos SFGR, afetarem ambas as medições nos QPFV 1 e 2, a Figura 4.7(a) evidencia uma maior quantidade de desligamentos do microinversor do sistema M2, indicando menos tempo de funcionamento que os demais sistemas conectados ao QPFV 1.

Com relação às Figuras 4.7(c) e 4.8(c), tem-se a seleção de períodos em que não houve problemas de registro de dados e ampliados os gráficos, a fim de melhorar a visualização.

Notam-se ligeiras perdas na geração comparado à simulação, podendo-se observar no gráfico da Figura 4.7(c) os desligamentos que eventualmente ocorrem no sistema M2, fazendo-se necessário, na ocorrência destes, o chaveamento manual no lado c.a. dos microinversores com o intuito de reconectá-los na rede elétrica c.a. Ademais, observa-se que nos dias em que não ocorrem os desligamentos, os dados de medição ficam mais próximos aos resultados da simulação do SFCR.

Contudo, ainda que os SFCR em operação no QPFV 1 não apresentem os problemas de desligamento, tal como no sistema M2, nota-se que a geração no lado c.a. obtida nos medidores de multigrandezas fica muito aquém do esperado pela simulação, conforme ilustrado na Figura 4.8(c). Isto se deve ao fato do sistema S8 estar em condições de sujidade elevada, comprometendo assim a geração do mesmo, o que afeta diretamente no resultado esperado com a simulação da geração dos SFCR.

A validação dos dados de simulação dos SFCR com os dados dos medidores de multigrandezas, ilustrados nas Figuras 4.7 e 4.8, realiza-se por meio dos indicadores de desvios RMSE e MAE, conforme apresentados nas Tabelas 4.6 e 4.7. Os dados de simulação são filtrados a partir dos dias que contém os dados obtidos pela medição nos SFCR provenientes dos medidores eletrônicos e visores dos inversores, isto é, eliminam-se os dias em que ocorreram falhas nas medições, conforme procedimento explicado anteriormente.

Tabela 4.6 – Validação dos dados de medição no QPFV 1 com os dados da simulação dos SFCR (S2 e S8).

Período	RMSE (kWh·dia)	MAE (kWh·dia)	RMSE (kWh·mês)	MAE (kWh·mês)
Janeiro/2023	9,150	8,941	283,636	277,176
Fevereiro/2023	4,934	4,865	138,148	136,227
Março/2023	6,109	5,937	189,391	184,057
Total no ano	6,885	6,474	619,638	582,668

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 4.7 – Validação dos dados de medição no QPFV 2 com os dados da simulação do SFCR (M2).

Período	RMSE (kWh·dia)	MAE (kWh·dia)	RMSE (kWh·mês)	MAE (kWh·mês)
Janeiro/2023	0,777	0,681	24,100	21,121
Fevereiro/2023	1,514	1,119	42,394	31,333
Março/2023	3,294	3,294	102,107	102,107
Total no ano	1,607	1,191	144,659	107,176

Fonte: Elaborado pelo autor.

Verifica-se, na Tabela 4.6, um maior desvio na comparação entre a simulação da geração de energia elétrica nos SFCR e os dados obtidos pelos medidores de multigrandezas do QPFV

1, em decorrência da produção de energia elétrica do sistema S8 que, devido ao seu estado atual mencionado anteriormente, está comprometendo o seu máximo potencial de geração de energia.

Enquanto, na Tabela 4.7, nota-se um desvio relativamente menor na comparação entre a simulação e os dados de medição no QPFV 2, devido à existência de um único SFCR conectado a este quadro parcial, logo há um menor acúmulo de erros associado aos desvios nas simulações individuais dos SFCR quando comparado ao QPFV 1. Além disso, conforme visto na Figura 4.7 (c), tem-se uma proximidade entre os valores medidos no QPFV 2 e simulados do sistema M2, salvo exceções em ocorrência de desconexões dos microinversores deste sistema com a rede elétrica c.a., onde aumentam-se os desvios entre a medição e simulação.

4.3.1 Ponderações a respeito da geração e simulação após à implementação do quadro elétrico dos SFCR

Com relação à geração, conforme contextualizado anteriormente, apenas três SFCR encontram-se em operação atualmente, sendo estes os sistemas S2, S8 e M2. Os demais sistemas necessitam substituir os inversores, com exceção dos sistemas M1 e C1, que ainda falta refazer o encaminhamento dos cabos elétricos do sistema M1 para o ponto de conexão com um dos novos quadros parciais, que ainda não foi confeccionado, e no caso do sistema C1, apesar do inversor já ter sido substituído, ainda faltam substituir alguns dos otimizadores de conversão c.c.-c.c. que estão danificados.

A Tabela 4.8 indica a quantidade de energia medida no lado c.a. que foi produzida mensalmente pelos três SFCR que estão em operação atualmente ao longo dos meses avaliados após a implementação do quadro elétrico dos SFCR.

Tabela 4.8 – Contribuição energética dos SFCR durante o período monitorado em 2023.

(Continua)

Dados Medidos da Produção de Energia de todos os SFCR (kWh)	
Ano	2023
Janeiro	19
Fevereiro	98
Março	142
Abril	145
Maiο	-
Junho	-
Julho	-
Agosto	-
Setembro	-
Outubro	-
Novembro	-

(Conclusão)

Dados Medidos da Produção de Energia de todos os SFCR (kWh)	
Ano	2023
Dezembro	-
Média	101
Total	404

Fonte: Elaborado pelo autor.

Com relação à simulação dos dados de produção de energia elétrica dos SFCR, devido à disponibilidade exclusiva de dados de irradiância durante o período após a implementação do quadro elétrico dos SFCR, dentre as bases de dados descritas no Capítulo 2, utilizam-se os dados do registrador local *FieldLogger* para realização das estimativas de geração dos SFCR. Na Tabela 4.9 constam os valores dos dados de irradiação média diária obtidos por meio do registrador local e da NASA.

A Tabela 4.10 indica a quantidade de dias, na base de dados do registrador local, contendo os dados de irradiação ao longo dos meses. Somente para o mês de outubro/2022 foi possível obter o desvio entre os dados do registrador local e da NASA, tendo-se os valores apresentados na Tabela 4.11.

Tabela 4.9 – Dados de irradiação média ao longo dos meses nos anos de 2022 a 2023 do registrador local e da NASA.

Ano	IRRADIAÇÃO MÉDIA (kWh/m²-dia)			
	2022		2023	
Fonte	Registrador local	NASA	Registrador local	NASA
Janeiro	-	4,30	4,78	-
Fevereiro	-	4,92	4,29	-
Março	-	4,39	5,21	-
Abril	-	4,48	-	-
Mai	-	4,85	-	-
Junho	-	5,51	-	-
Julho	-	5,55	-	-
Agosto	-	5,94	-	-
Setembro	-	6,05	-	-
Outubro	5,62	5,67	-	-
Novembro	-	5,28	-	-
Dezembro	4,80	5,10	-	-

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 4.10 – Total de dias com dados de irradiação obtidos por meio do registrador local.

QUANTIDADE DE DIAS CONTENDO DADOS DE RADIAÇÃO SOLAR		
Ano	2022	2023
Janeiro	0	31
Fevereiro	0	28
Março	0	2
Abril	0	0
Mai	0	0
Junho	0	0
Julho	0	0
Agosto	0	0
Setembro	0	0
Outubro	2	0
Novembro	0	0
Dezembro	28	0

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 4.11 – Desvios obtidos para os dias com dados válidos de radiação solar.

Período	RMSE (kWh·dia)	MAE (kWh·dia)
Outubro/2022	0,902	0,895

Fonte: Elaborado pelo autor.

A quantidade de dias contendo dados de irradiação no registrador local não é suficiente para validar com os dados da NASA, haja vista que se dispõe apenas de 2 dias de dados no mês de outubro/2022 para realizar a validação. Além disso, não foi possível validar os dados de dezembro/2022, pois mesmo que o registrador local tenha apresentado uma quantidade maior de dias contendo os dados de irradiação neste mês, os dados de irradiação fornecidos pela NASA começam a apresentar valores inconsistentes (-999) a partir do dia 02/12/2022 até o momento de escrita deste trabalho e os dados de medição obtidos no mês de dezembro/2022 pelo registrador local começam a partir do dia 04/12/2022, inviabilizando a comparação neste mês e nos meses porvindouros.

Na ausência de dados que sirvam para validação da irradiância do registrador local e na ausência de outras fontes para simulação da geração, optou-se por utilizar os dados do registrador local, deixando-se a realização da validação destes dados a partir do momento em que se obtenha novas fontes ou que a NASA atualize as informações de irradiância na sua API.

Assim, na Tabela 4.12 mostra-se a contribuição energética dos SFCR com os dias sem registro de medição preenchidos com os dados de simulação, utilizando-se da base de dados do registrador local.

Tabela 4.12 – Contribuição energética dos SFCR durante o período monitorado em 2023 completada com os resultados simulados da geração.

Dados Medidos da Produção de Energia de todos os SFCR (kWh)	
Ano	2023
Janeiro	27
Fevereiro	168
Março	13
Abril	-
Mai	-
Junho	-
Julho	-
Agosto	-
Setembro	-
Outubro	-
Novembro	-
Dezembro	-
Média	69
Total	208

Fonte: Elaborado pelo autor.

A produção de energia elétrica durante os meses de janeiro/2023 e março/2023 foram menores devido à medição, via medidores de multigrandezas, ter sido iniciada a partir do dia 17/01/2023, sendo que os sistemas M2 e S2 foram reativados, respectivamente, nos dias 24/01/2023 e 30/01/2023, estando somente o sistema S8 em operação no início das medições e o último registro de dados obtidos pelo registrador local ocorreu no dia 02/03/2023.

4.3.2 Ponderações a respeito da geração e simulação nos anos anteriores à implementação do quadro elétrico dos SFCR

Baseando-se nos dados de medição de energia elétrica produzida por cada um dos onze SFCR monitorados, verifica-se a geração fotovoltaica total no lado c.a. A Tabela 4.13 indica a quantidade de energia total produzida mensalmente dos SFCR ao longo dos anos.

Tabela 4.13 – Evolução da contribuição energética durante o período monitorado.

(Continua)

Dados Medidos da Produção de Energia de todos os SFCR (kWh)												
Ano	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022
Janeiro	-	105	-	-	147	725	938	812	658	-	****	****
Fevereiro	-	-	-	-	135	749	864	625	501	-	****	****
Março	-	-	-	-	145	803	818	916	569	**	****	****
Abril	-	-	-	-	146	873	850	1.019	650	**	****	****
Mai	-	-	-	-	184	1.322	1.128*	1.220	1.223	**	****	****
Junho	-	-	-	-	266	1.167	959	1.430	1.477	**	****	****

(Conclusão)

Dados Medidos da Produção de Energia de todos os SFCR (kWh)												
Ano	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022
Julho	-	-	-	-	555	1.360	981	1.471	1.286	_**	_***	_***
Agosto	-	-	-	-	608	1.378	904	1.414	401	_***	_***	_***
Setembro	-	-	-	-	592	1.324	938	1.308	276	_***	_***	_***
Outubro	-	-	-	-	662	1.316	864	1.195	392	_***	_***	_***
Novembro	74	-	-	-	913	1.169	957	686	159	_***	_***	_***
Dezembro	326	-	-	-	753	1.060	805	604	-	_***	_***	_***
Média	200	105	-	-	425	1.104	917	1.058	909	-	-	-
Total	400	105	-	-	5104	13.244	11.007	12.700	6.364	-	-	-

* De junho/2017 a março/2018 não foram encontrados registros das medições de energia para o sistema S2.

** Os SFCR ficaram inativos por questões de segurança em virtude do *lockdown* na pandemia do COVID-19, quando houve um longo período de ausência de pessoas no laboratório, assim não haveria ninguém para verificar e atuar no caso da ocorrência de alguma eventualidade, como exemplo, quanto a riscos de incêndios.

*** Após o retorno das atividades presenciais, apenas o sistema S8 foi reativado. A maioria dos SFCR apresentaram problemas com os inversores, sendo necessárias as substituições desses.

Fonte: Elaborado pelo autor.

Para estimar os dados de geração de energia elétrica nos anos anteriores à instalação dos quadros elétricos dos SFCR, realizam-se simulações da produção de energia, a fim de se obter um valor correspondente à geração no lado c.a. nos dias em que não ocorreram as coletas destes dados, ou seja, durante os feriados e finais de semana.

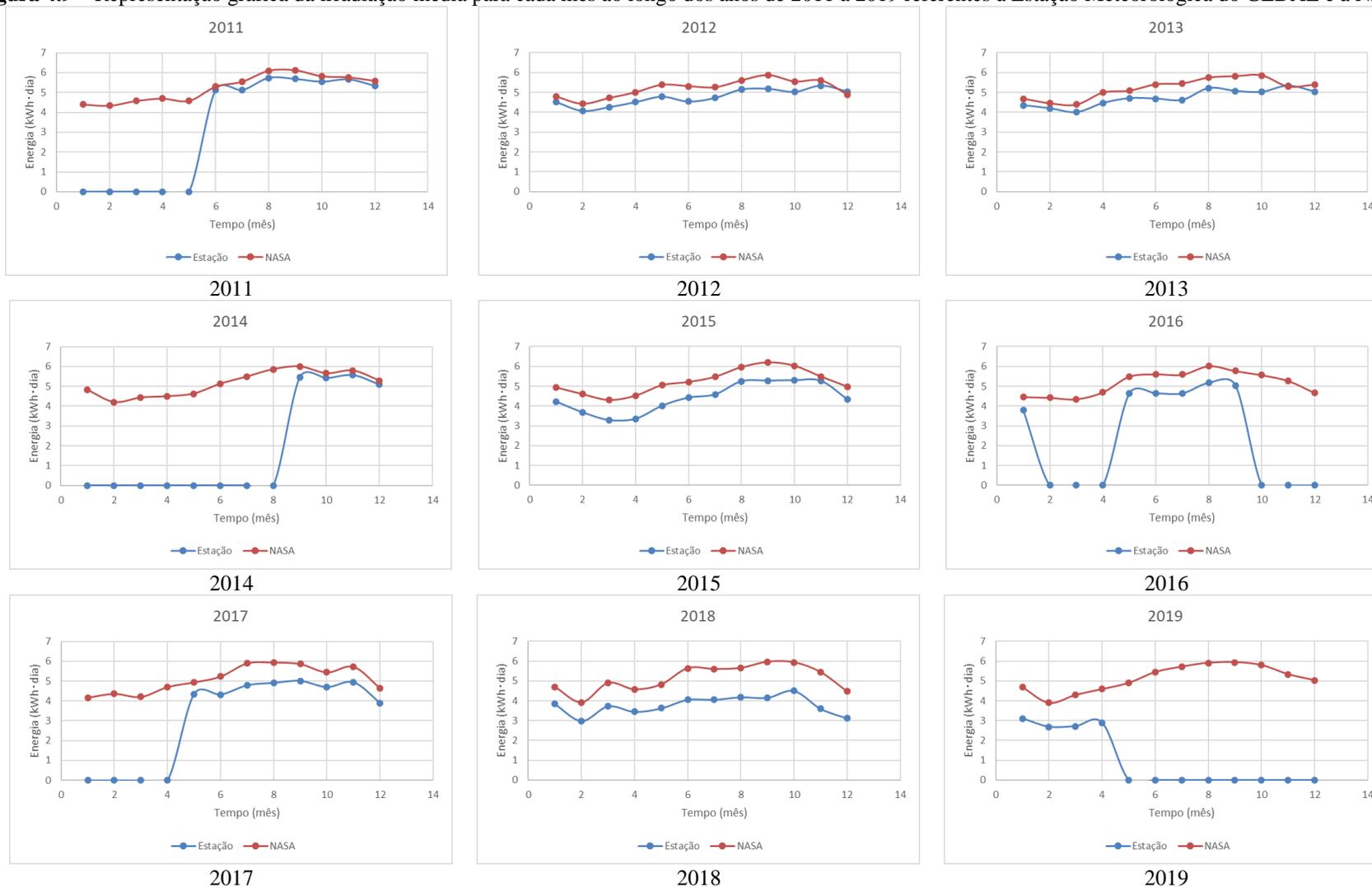
É válido ressaltar que ocorreram dias de falta de dados durante o registro na estação meteorológica, desta forma, para fins comparativos, os dados de radiação solar no plano horizontal referentes à estação meteorológica do GEDAE e aos dados extraídos da API da NASA, ambos em kWh/m²-dia, estão expostos na Tabela 4.14 e Figura 4.9. A quantidade de dias contendo os dados utilizados da estação meteorológica para realização da simulação da energia produzida pelos SFCR é apresentada na Tabela 4.15.

Tabela 4.14 – Dados de radiação solar média para cada mês ao longo dos anos de 2011 a 2019 da Estação Meteorológica do GEDAE (EMG) e da NASA.

Ano Fonte	Irradiação Média (kWh/m ² ·dia)																	
	2011		2012		2013		2014		2015		2016		2017		2018		2019	
	EMG	NASA	EMG	NASA	EMG	NASA	EMG	NASA	EMG	NASA	EMG	NASA	EMG	NASA	EMG	NASA	EMG	NASA
Janeiro	-	4,41	4,52	4,80	4,35	4,68	-	4,81	4,21	4,94	3,8	4,45	-	4,17	3,84	4,69	3,11	4,69
Fevereiro	-	4,34	4,08	4,43	4,19	4,45	-	4,20	3,67	4,59	-	4,42	-	4,36	2,99	3,92	2,69	3,90
Março	-	4,58	4,26	4,72	4	4,39	-	4,43	3,28	4,30	-	4,35	-	4,21	3,73	4,89	2,72	4,30
Abril	-	4,70	4,51	5,01	4,46	4,99	-	4,49	3,35	4,52	-	4,70	-	4,71	3,45	4,57	2,89	4,59
Mai	-	4,58	4,78	5,38	4,7	5,08	-	4,63	4,01	5,05	4,63	5,49	4,34	4,94	3,63	4,82	-	4,90
Junho	5,13	5,29	4,54	5,31	4,68	5,40	-	5,12	4,42	5,21	4,64	5,61	4,31	5,24	4,06	5,64	-	5,45
Julho	5,12	5,54	4,72	5,26	4,62	5,44	-	5,48	4,58	5,47	4,64	5,59	4,78	5,90	4,06	5,60	-	5,72
Agosto	5,74	6,09	5,14	5,60	5,21	5,74	-	5,86	5,25	5,97	5,17	6,02	4,9	5,94	4,19	5,65	-	5,91
Setembro	5,69	6,12	5,17	5,87	5,07	5,80	5,47	6,00	5,28	6,20	5,04	5,77	5	5,87	4,16	5,96	-	5,94
Outubro	5,55	5,82	5,02	5,55	5,02	5,85	5,42	5,66	5,3	6,03	0	5,56	4,69	5,45	4,51	5,94	-	5,79
Novembro	5,67	5,76	5,33	5,60	5,33	5,29	5,57	5,79	5,27	5,49	0	5,27	4,93	5,73	3,61	5,45	-	5,34
Dezembro	5,34	5,58	5,03	4,88	5,04	5,38	5,09	5,29	4,34	4,98	0	4,65	3,89	4,65	3,12	4,47	-	5,04

Fonte: Adaptado de Silva (2019).

Figura 4.9 – Representação gráfica da irradiação média para cada mês ao longo dos anos de 2011 a 2019 referentes à Estação Meteorológica do GEDAE e à NASA.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 4.15 – Total de dias com dados de irradiação medida pela Estação Meteorológica do GEDAE.

Quantidade de Dias Contendo Dados de Radiação Solar									
Ano	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019
Janeiro	0	31	31	0	31	19	0	31	23
Fevereiro	0	28	28	0	28	0	0	28	28
Março	0	31	31	0	31	0	0	31	31
Abril	0	30	30	0	19	0	0	30	23
Mai	0	31	31	0	31	19	28	31	0
Junho	14	30	30	0	30	30	30	30	0
Julho	31	31	31	0	31	31	31	31	0
Agosto	31	31	31	0	5	31	31	18	0
Setembro	30	30	30	11	20	21	3	3	0
Outubro	31	31	31	31	30	0	16	31	0
Novembro	30	30	30	30	30	0	30	11	0
Dezembro	31	31	31	29	31	0	31	30	0

Fonte: Silva (2019).

As informações a respeito das quantidades de dias com dados de radiação solar contidas na Tabela 4.15 foram utilizadas para a obtenção da irradiação média na Tabela 4.14 e esta, por sua vez, possibilitou calcular os valores dos desvios RMSE e MAE, conforme apresentam-se na Tabela 4.16.

Por meio dos valores de desvios observados na Tabela 4.15, a partir do ano de 2015 identificam-se maiores diferenças entre os dados da estação meteorológica do GEDAE e os dados da NASA. Isto se deve ao fato da necessidade de calibração do piranômetro da estação, o qual teve sua exatidão diminuída ao longo dos anos, apresentando um menor desvio durante os quatro primeiros anos de operação da estação meteorológica.

Tabela 4.16 – Desvios dos dados de irradiação média da Estação Meteorológica do GEDAE e da NASA para cada ano, durante o período de 2011 a 2019.

Ano	Irradiação Média (kWh/m ² ·dia)																	
	2011		2012		2013		2014		2015		2016		2017		2018		2019	
	Fonte	RMSE	MAE	RMSE														
Janeiro	-	-	0,6695	0,5118	0,6805	0,5972	-	-	0,9067	0,7606	0,9960	0,8976	-	-	0,9893	0,8766	1,6803	1,5858
Fevereiro	-	-	0,6382	0,4973	0,5492	0,4504	-	-	1,0229	0,9192	-	-	-	-	1,0274	0,9515	1,2942	1,2310
Março	-	-	0,6211	0,5229	0,6579	0,5522	-	-	1,0594	0,9943	-	-	-	-	1,2473	1,1422	1,6348	1,5809
Abril	-	-	0,7230	0,5615	0,7680	0,6177	-	-	1,3849	1,2835	-	-	-	-	1,2123	1,1151	1,6575	1,5963
Mai	-	-	0,7069	0,6068	0,5436	0,4287	-	-	1,1091	1,0587	1,1829	0,9987	0,8693	0,7140	1,2342	1,1769	-	-
Junho	0,5611	0,4635	0,8628	0,7382	0,8226	0,7335	-	-	0,8532	0,8115	1,1850	1,0568	1,3002	1,0829	1,5945	1,5798	-	-
Julho	0,5199	0,4196	0,7100	0,5755	0,8953	0,8127	-	-	0,9411	0,8889	1,1549	0,9621	1,2227	1,1031	1,5691	1,5403	-	-
Agosto	0,5188	0,3926	0,6071	0,4906	0,6772	0,5921	-	-	0,7759	0,7475	0,9760	0,8464	1,2960	1,1147	1,4559	1,4013	-	-
Setembro	0,5916	0,4708	0,8464	0,7096	1,0448	0,8924	0,8507	0,6848	1,7222	1,2174	0,9832	0,7883	1,1430	1,0842	1,2097	0,8831	-	-
Outubro	0,6040	0,4591	0,7061	0,5982	1,3152	1,0362	0,5036	0,4027	0,8498	0,6955	-	-	0,7819	0,6566	1,5427	1,4615	-	-
Novembro	0,4204	0,3083	0,6400	0,4951	0,9939	0,8409	0,4473	0,3812	0,5473	0,4302	-	-	1,1307	0,9474	1,3163	1,2430	-	-
Dezembro	0,6219	0,4906	0,7142	0,6014	1,3557	1,0711	0,5520	0,4326	0,7547	0,6551	-	-	1,3017	1,0952	1,6683	1,4376	-	-
Total	0,5514	0,4264	0,7078	0,5757	0,8996	0,7204	0,6870	0,4703	1,0048	0,8522	1,0874	0,9292	1,1723	0,9868	1,3701	1,2629	1,5680	1,4930

Fonte: Elaborado pelo autor.

A Tabela 4.17 mostra uma complementação para os dados de geração de energia elétrica dos SFCR realizados por Silva (2019) com os dias sem registro de medição preenchidos com os dados de simulação, utilizando-se da base de dados da NASA a partir de agosto/2019 até novembro/2022. O mês de dezembro/2022 é preenchido com os dados do registrador local, haja vista que os dados de irradiância fornecidos pela NASA tornam-se inválidos a partir do dia 02/12/2022, conforme já comentado anteriormente. Os dados do registrador local, para o mês de dezembro/2022, iniciam no dia 04/12/2022 e seguem até o final do mês.

Tabela 4.17 – Evolução da contribuição energética medida antes da implementação do quadro elétrico dos SFCR e complementada com os resultados da simulação.

Dados Medidos e Simulados da Produção de Energia de Todos os SFCR (kWh)												
Ano	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022
Janeiro	-	102	278	554	699	1.501	1.221	1.309	1.202	743	84	77
Fevereiro	-	283	248	439	588	1.467	1.131	997	913	655	71	79
Março	-	325	272	512	604	1.425	1.103	1.428	1.070	-*	82	78
Abril	-	358	305	501	706	1.521	1.156	1.486	1.165	-*	87	77
Mai	-	404	346	533	1.006	1.832	1.827	1.732	1.223	-*	89	86
Junho	-	389	341	568	849	1.520	1.673	2.001	1.477	-*	87	94
Julho	-	553	347	628	1.182	1.925	1.810	2.058	1.286	-*	97	98
Agosto	-	595	376	668	1.823	1.995	1.674	2.064	1.120	526	102	104
Setembro	-	552	371	659	1.811	1.698	1.730	1.967	1.054	513	97	102
Outubro	-	541	371	591	1.387	1.689	1.498	1.807	1.126	508	99	100
Novembro	72	552	370	808	1.365	1.512	1.547	1.291	1.112	420	93	90
Dezembro	306	520	512	866	1.476	1.374	1.299	1.069	1.019	439	83	77
Média	189	431	345	611	1.125	1.621	1.472	1.601	1.147	543	89	89
Total	378	5.173	4.137	7.327	13.496	19.458	17.670	19.211	13.767	3.803	1.070	1.063

* Os SFCR ficaram inativos durante o período de *lockdown* devido à pandemia do COVID-19

Fonte: Adaptado de Silva (2019).

Nas Tabelas 4.18 e 4.19 apresentam-se, respectivamente, os dados obtidos somente com a simulação dos sistemas sem considerar a degradação dos módulos fotovoltaicos e considerando a degradação dos módulos, para fins de comparação com os registros das Tabelas 4.12 e 4.17 e avaliação da contribuição dos SFCR na redução do consumo de energia elétrica quando visto pela rede de distribuição local.

As taxas de degradação implementadas na simulação partiram de estudos realizados por Solís-Alemán *et al.* (2019) que analisaram a diminuição de desempenho de módulos fotovoltaicos de filme fino devido às taxas de degradação dos módulos, verificando que as células fotovoltaicas de silício amorfo possuem uma taxa de degradação anual cerca de 1,32%.

Para as demais tecnologias presentes nos módulos fotovoltaicos dos SFCR monitorados, os valores das taxas de degradação partiram de estudos realizados por Tetsuyuki e Atsushi

(2017) que avaliaram a taxa de degradação anual de módulos fotovoltaicos de silício com diferentes tipos de célula fotovoltaica como monocristalino, policristalino e multijunção, que possuem taxas de degradação anual cerca de 0,4%, 0,1% e 1,5%, respectivamente.

Tabela 4.18 – Potencial de geração dos SFCR ao longo dos anos de 2011 a 2023 obtidos por meio de simulação.

Dados Simulados da Produção de Energia de Todos os SFCR (kWh)													
Ano	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023
Janeiro	-	409	542	762	812	1.639	1.538	2.072	2.066	1.889	2.080	1.902	2.031
Fevereiro	-	354	465	604	685	1.518	1.450	1.573	1.566	1.667	1.751	1.949	1.655
Março	-	401	508	705	711	1.594	1.551	2.144	1.903	1.913	2.026	1.945	140
Abril	-	410	554	690	720	1.660	1.666	1.953	1.959	1.922	2.148	1.907	-
Mai	-	455	586	734	1.153	1.991	2.174	2.123	2.151	2.233	2.215	2.133	-
Junho	-	436	601	782	1.153	1.973	2.222	2.382	2.304	2.235	2.159	2.334	-
Julho	-	607	626	862	1.247	2.029	2.569	2.442	2.493	2.551	2.402	2.421	-
Agosto	-	644	656	917	1.847	2.169	2.576	2.469	2.566	2.671	2.515	2.576	-
Setembro	-	649	676	905	1.853	2.021	2.458	2.503	2.491	2.604	2.393	2.530	-
Outubro	-	637	705	887	1.863	2.018	2.381	2.573	2.518	2.584	2.453	2.468	-
Novembro	91	620	623	1.153	1.661	1.859	2.418	2.299	2.256	2.137	2.299	2.235	-
Dezembro	471	565	846	1.093	1.823	1.704	2.050	1.973	2.204	2.231	2.059	1.842	-
Média	281	516	616	841	1.294	1.848	2.088	2.209	2.206	2.220	2.208	2.187	1.275
Total	562	6.187	7.388	10.093	15.528	22.174	25.053	26.506	26.477	26.637	26.499	26.242	3.826

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 4.19 – Potencial de geração dos SFCR ao longo dos anos de 2011 a 2023 obtidos por meio de simulação considerando a degradação dos módulos fotovoltaicos.

Dados Simulados com Degradação na Produção de Energia de Todos os SFCR (kWh)													
Ano	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023
Janeiro	-	409	540	756	805	1.629	1.523	2.050	2.038	1.857	2.039	1.858	1.990
Fevereiro	-	354	463	600	679	1.508	1.436	1.556	1.544	1.638	1.716	1.904	1.609
Março	-	401	506	699	704	1.583	1.536	2.120	1.876	1.880	1.984	1.899	137
Abril	-	410	551	685	713	1.649	1.648	1.931	1.930	1.888	2.103	1.862	-
Mai	-	455	582	727	1.145	1.976	2.155	2.098	2.119	2.193	2.169	2.082	-
Junho	-	435	597	775	1.144	1.958	2.201	2.353	2.269	2.195	2.113	2.277	-
Julho	-	606	621	854	1.237	2.013	2.545	2.412	2.455	2.504	2.351	2.362	-
Agosto	-	642	651	908	1.836	2.152	2.552	2.438	2.525	2.621	2.460	2.512	-
Setembro	-	648	671	896	1.842	2.005	2.434	2.471	2.451	2.555	2.340	2.467	-
Outubro	-	636	699	877	1.852	2.000	2.357	2.540	2.477	2.534	2.399	2.405	-
Novembro	91	618	617	1.143	1.650	1.842	2.393	2.268	2.219	2.095	2.247	2.179	-
Dezembro	471	563	840	1.083	1.813	1.689	2.028	1.946	2.168	2.188	2.012	1.793	-
Média	281	515	612	834	1.285	1.834	2.067	2.182	2.173	2.179	2.161	2.133	1.245
Total	562	6.176	7.340	10.003	15.420	22.004	24.809	26.181	26.071	26.148	25.934	25.600	3.735

Fonte: Elaborado pelo autor.

Ao comparar os resultados das produções totais ao longo dos anos apresentados nas Tabelas 4.18 e 4.19, as degradações nos módulos fotovoltaicos, até o presente momento, ainda não representam perdas que comprometam em grande parte a produção anual dos SFCR.

A maior diferença está na produção anual de energia elétrica no ano de 2022, com cerca de 642 kWh, que representa uma quantidade de energia relativamente pequena na escala da produção total neste ano. Portanto, adiante quando for abordado no subtópico sobre economia no custo de energia, para fins comparativos serão considerados somente os dados registrados nas Tabelas 4.12 e 4.17 com os dados da Tabela 4.18.

No Apêndice C estão contidas as medições individuais dos SFCR complementadas com os dados de simulação e os resultados das simulações da produção de energia elétrica de cada SFCR, considerando o pleno funcionamento a partir de suas respectivas datas de implementações até o ano de 2023.

4.4 Avaliação do desempenho dos SFCR

Para a avaliação operacional dos SFCR, normalmente, utilizam-se figuras de mérito, pois são indicadores que permitem comparar diferentes sistemas fotovoltaicos, avaliar seu desempenho ao longo do tempo e identificar possíveis falhas ou problemas que afetem a eficiência do sistema. Dentre as figuras de mérito existentes para avaliação de desempenho de sistemas fotovoltaicos, utiliza-se a produtividade final (Y_F) e o rendimento global (PR).

É válido ressaltar que nos dados utilizados para obtenção tanto da produtividade final quanto do rendimento global foram adicionados dados de simulação para preenchimento de lacunas nos dias com ausência da medição.

4.4.1 Produtividade final (Y_F) dos SFCR

Para a obtenção da produtividade final (Y_F) mensal de cada sistema ao longo dos anos de operação, utilizou-se a Equação (2.18) apresentada no Capítulo 2, sendo esboçados os gráficos de produtividade dos SFCR mostrados na Figura 4.10.

Ao longo do período monitorado, de 2011 a 2023, o sistema S5 teve a maior produtividade anual com cerca de 1.554 kWh/kWp durante o ano de 2018. Neste mesmo ano o sistema C1 apresentou a menor produtividade anual, cerca de 550 kWh/kWp, justamente no ano em que ficou inoperante.

Ainda durante o ano de 2018, observa-se que o mês de agosto foi o mês com a maior máxima produtividade final registrada e, novamente, tem-se que o sistema S5 obteve a maior

produtividade para este mês, com cerca de 151 kWh/kWp. No entanto, desta vez o sistema S4 apresentou a menor produtividade, com cerca de 69 kWh/kWp.

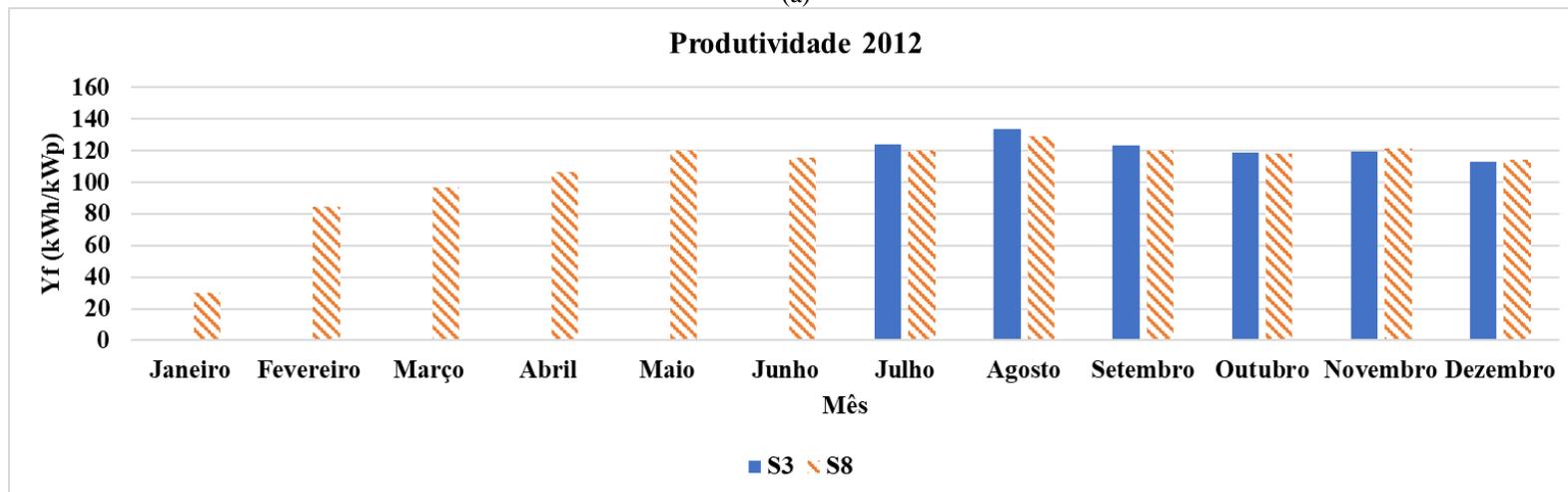
Atualmente, com apenas três SFCR em funcionamento, o sistema S2 tem apresentado uma maior produtividade até o período monitorado com seu valor máximo no período de fevereiro/2023, com cerca de 88 kWh/kWp e a menor produtividade foi registrada pelo sistema S8 neste mesmo mês, com cerca de 12 kWh/kWp.

Figura 4.10 – Produtividade dos SFCR ao longo dos anos: (a) 2011, (b) 2012, (c) 2013, (d) 2014, (e) 2015, (f) 2016, (g) 2017, (h) 2018, (i) 2019, (j) 2020, (k) 2021, (l) 2022 e (m) 2023.

(Continua)

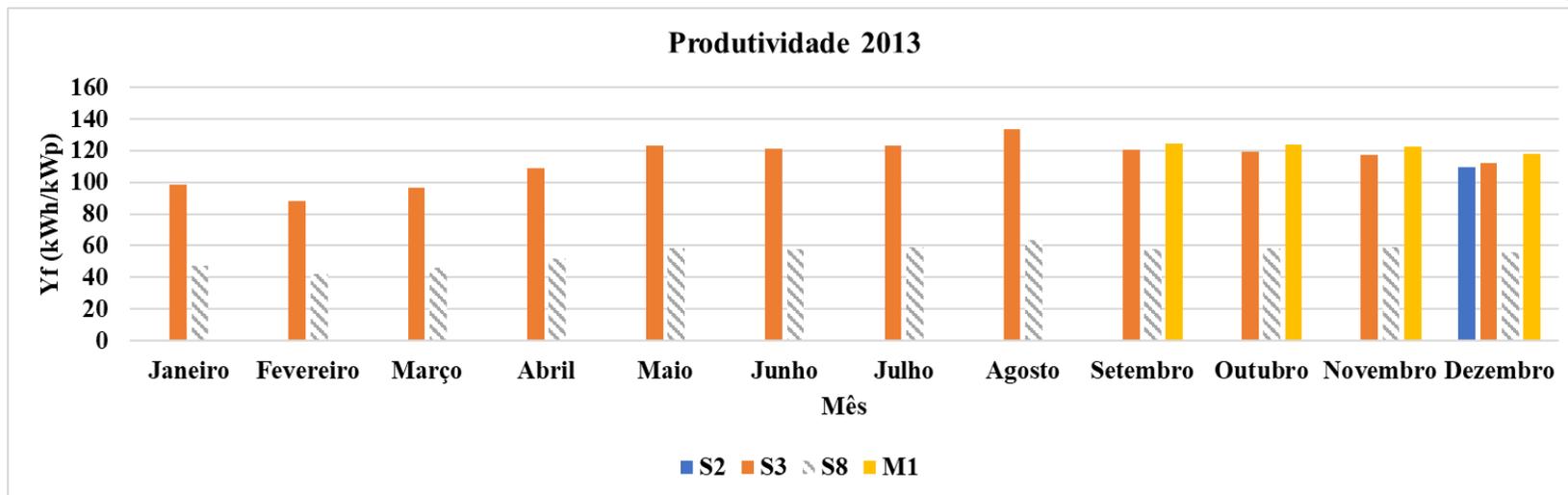


(a)

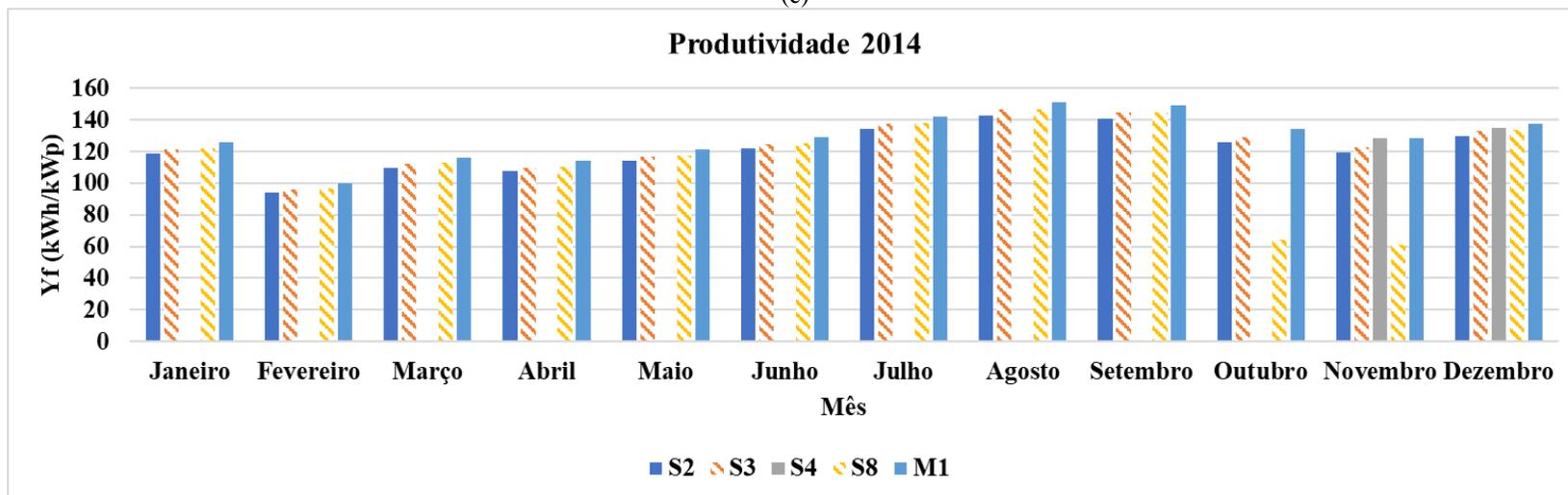


(b)

(Continua)

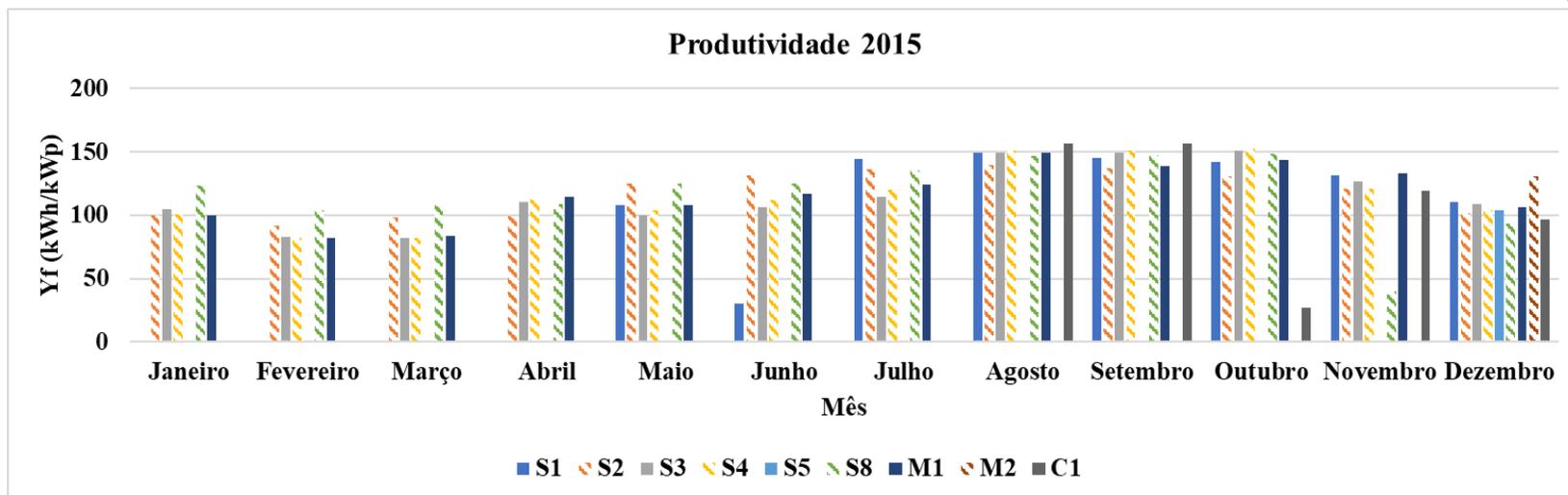


(c)

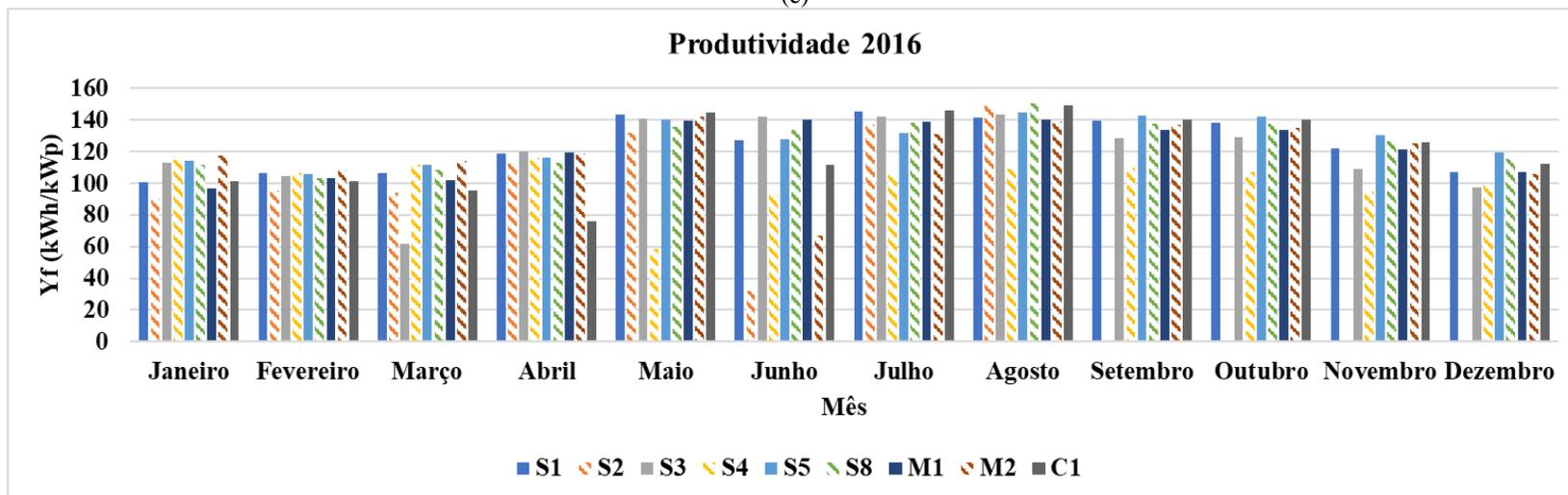


(d)

(Continua)

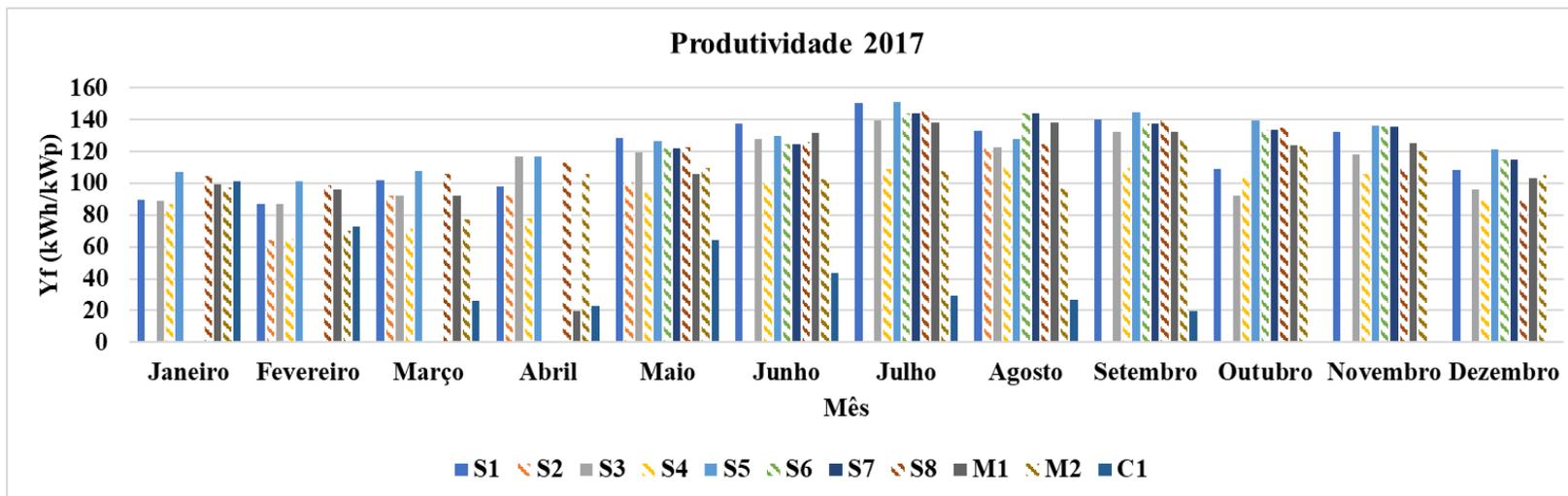


(e)

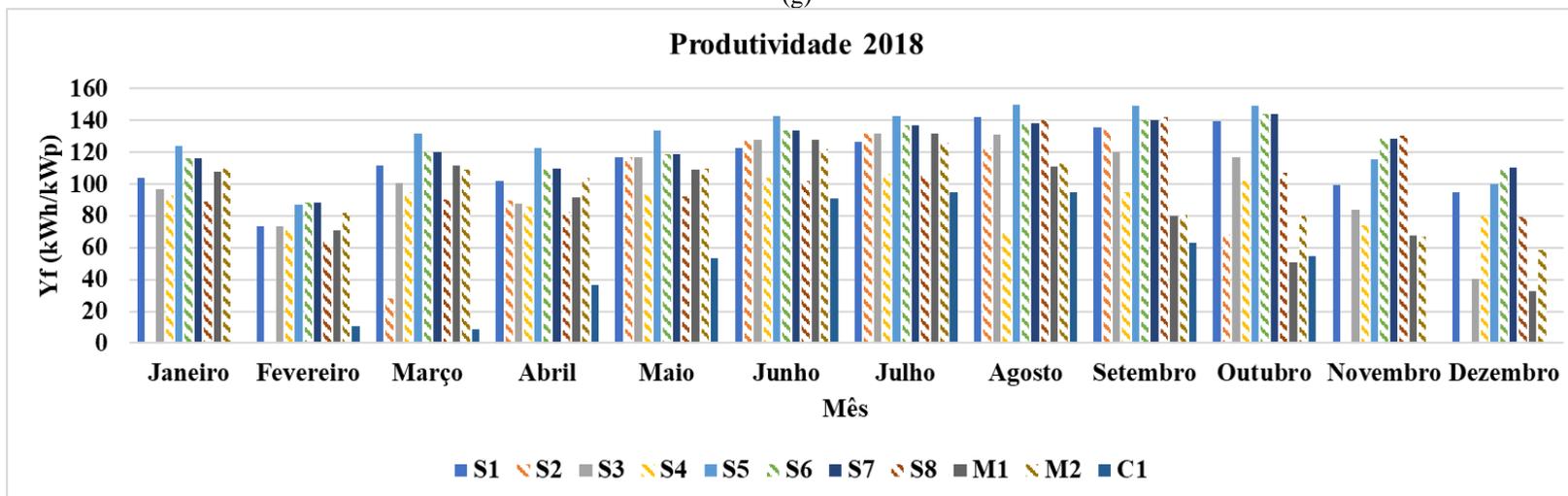


(f)

(Continua)

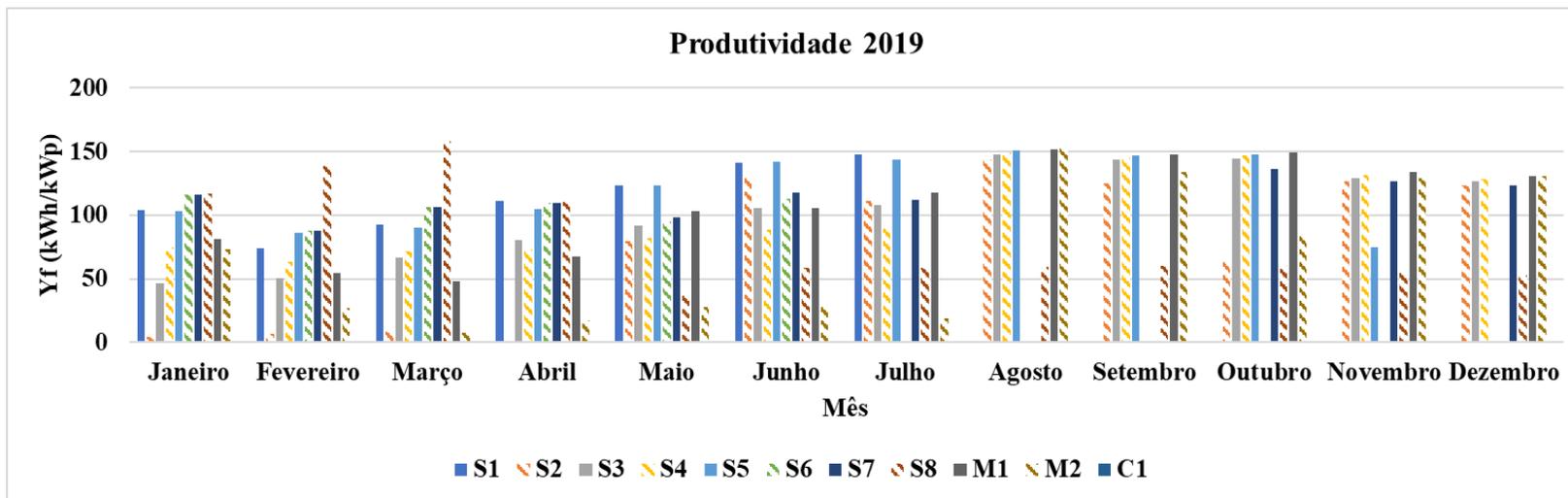


(g)

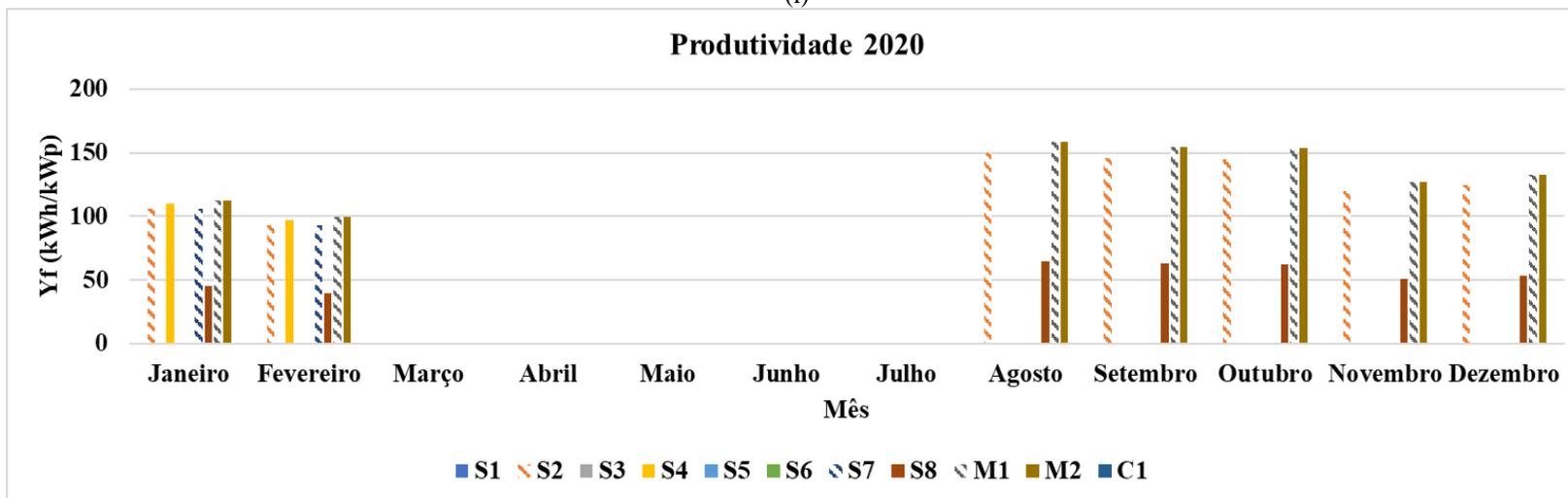


(h)

(Continua)

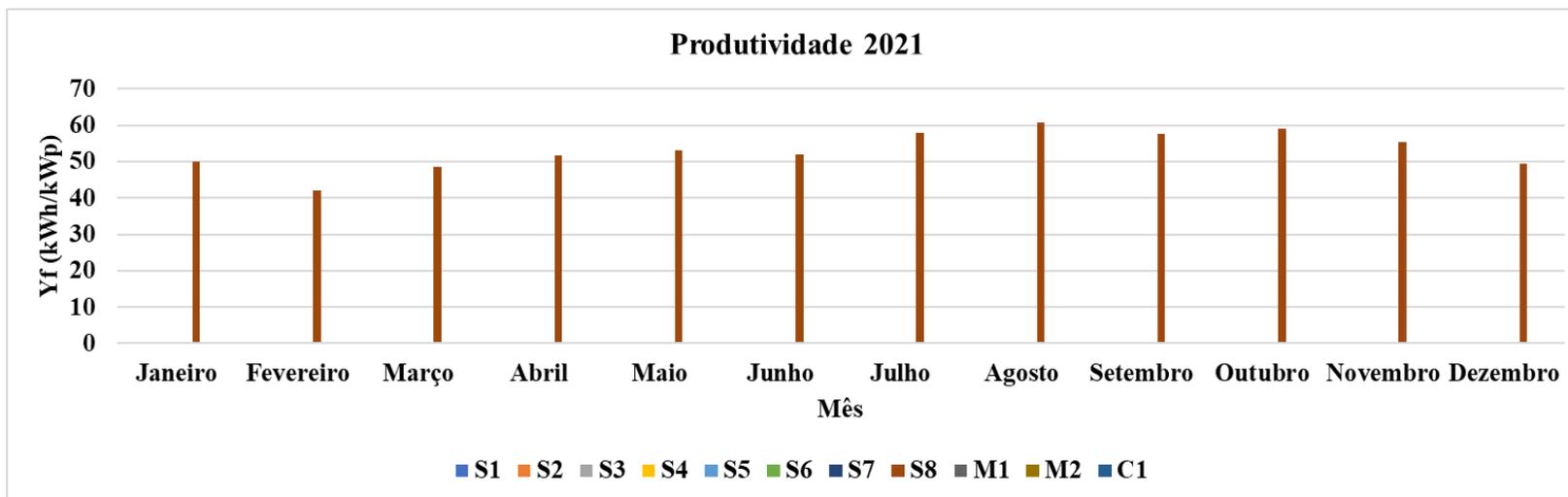


(i)

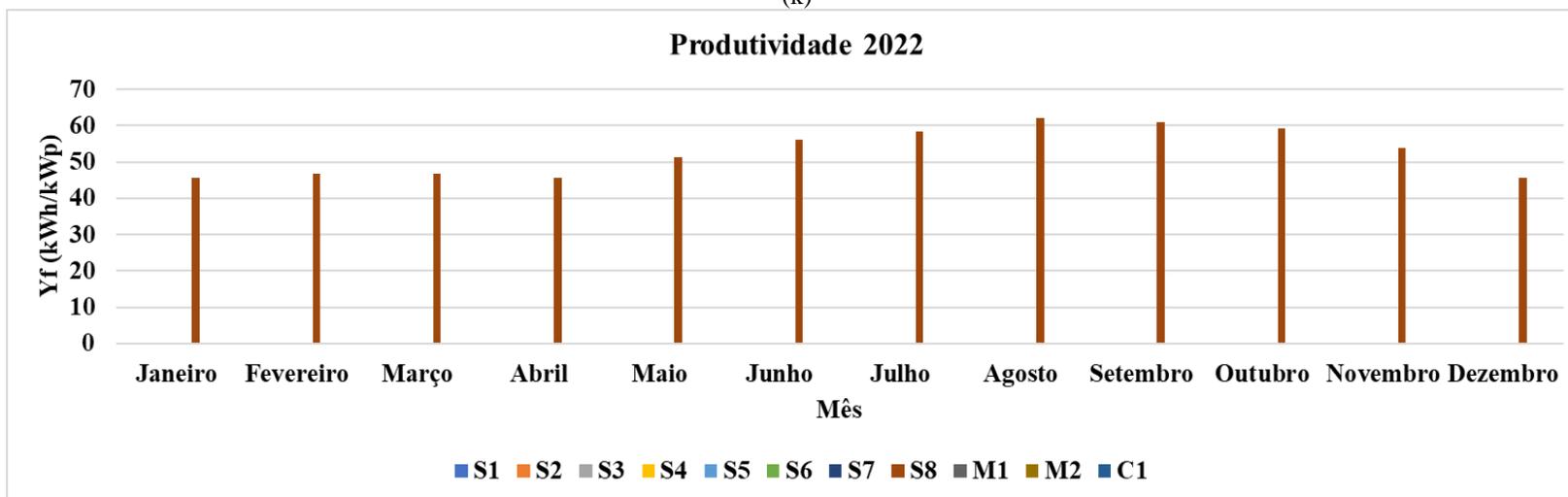


(j)

(Continua)

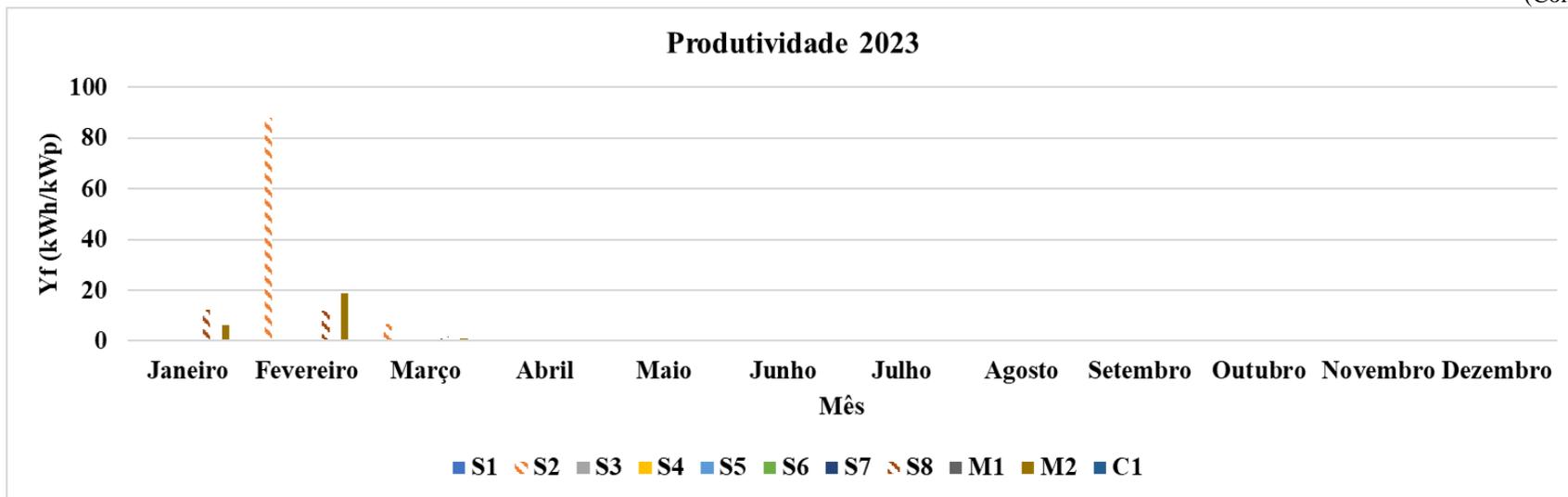


(k)



(l)

(Conclusão)



(m)

Fonte: Elaborado pelo autor.

4.4.2 Rendimento global (PR) dos SFCR

Para a obtenção do rendimento global (PR) de cada sistema ao longo dos anos de operação, utiliza-se a Equação (2.19) apresentada no Capítulo 2 e, com isto obtiveram-se os gráficos na Figura 4.11. Salienta-se que os resultados de rendimento global mais próximos de 80% ocorreram principalmente durante os períodos sem registros de medição e que houve a necessidade de complementação com os dados de simulação.

Nota-se, com os gráficos da Figura 4.11, que os sistemas S6 e S7 apresentaram o maior rendimento global comparado aos demais sistemas ao longo dos anos, isto ocorreu durante o mês de outubro/2017, quando apresentou um PR de aproximadamente 79%.

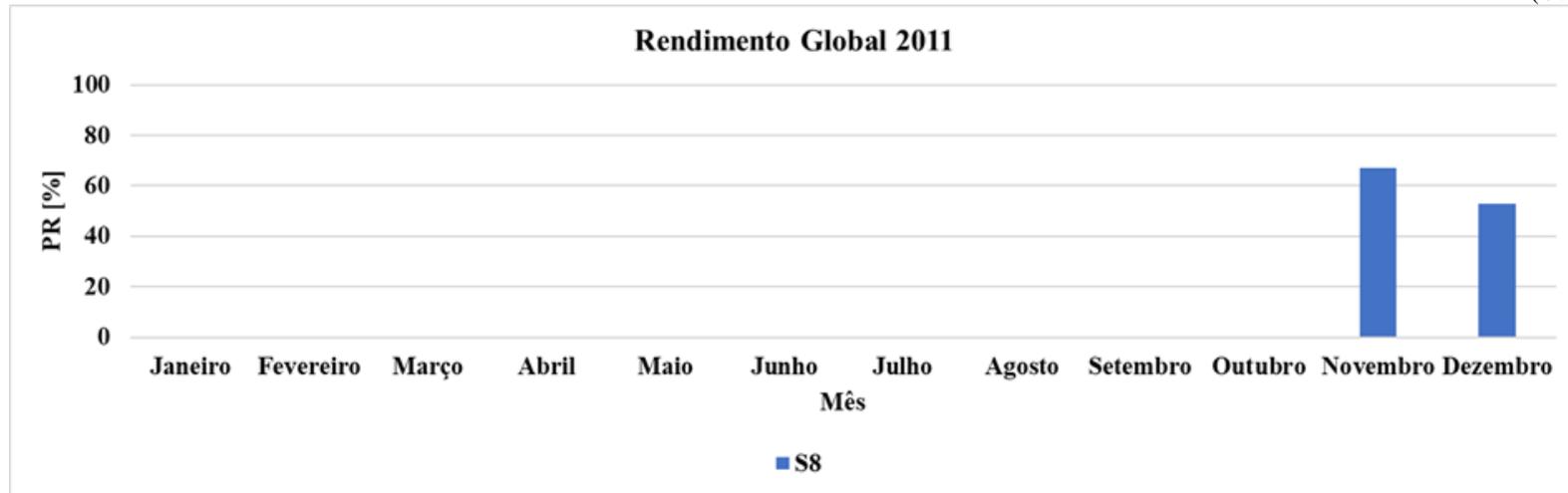
Observa-se que por volta de maio/2019, o sistema S8 teve uma redução significativa no seu desempenho, tendo seu PR reduzido pela metade, quando comparado aos meses anteriores.

Nota-se que o sistema M2 começa a apresentar reduções de desempenho a partir de setembro/2018, e depois estas reduções começam a se intensificar após janeiro/2019 devido aos problemas de desligamentos e dificuldades de reconexão com a rede c.a.

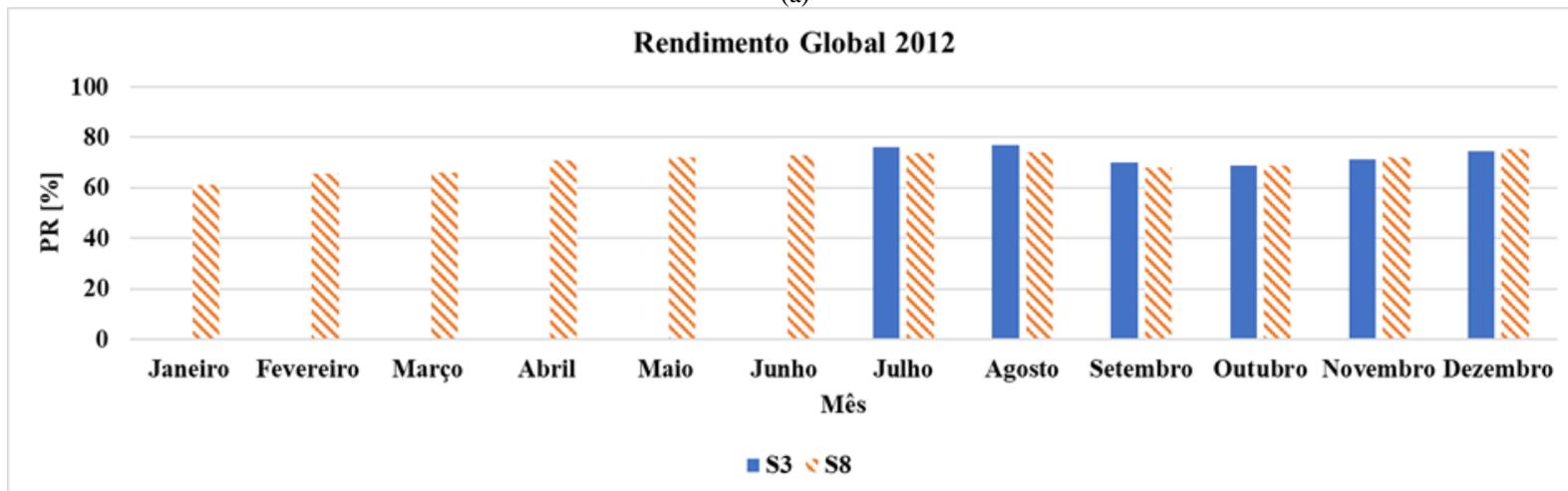
Atualmente, dentre os SFCR em funcionamento, ou seja, os sistemas S2, S8 e M2, verifica-se que o sistema S2 obteve o maior rendimento dentre os demais SFCR durante o ano de 2023, apresentando cerca de 73% no mês de fevereiro. Por fim, com o menor desempenho, o sistema S8 apresentando apenas 8% em março/2023.

Figura 4.11 – Produtividade dos SFCR ao longo dos anos: (a) 2011, (b) 2012, (c) 2013, (d) 2014, (e) 2015, (f) 2016, (g) 2017, (h) 2018, (i) 2019, (j) 2020, (k) 2021, (l) 2022 e (m) 2023.

(Continua)

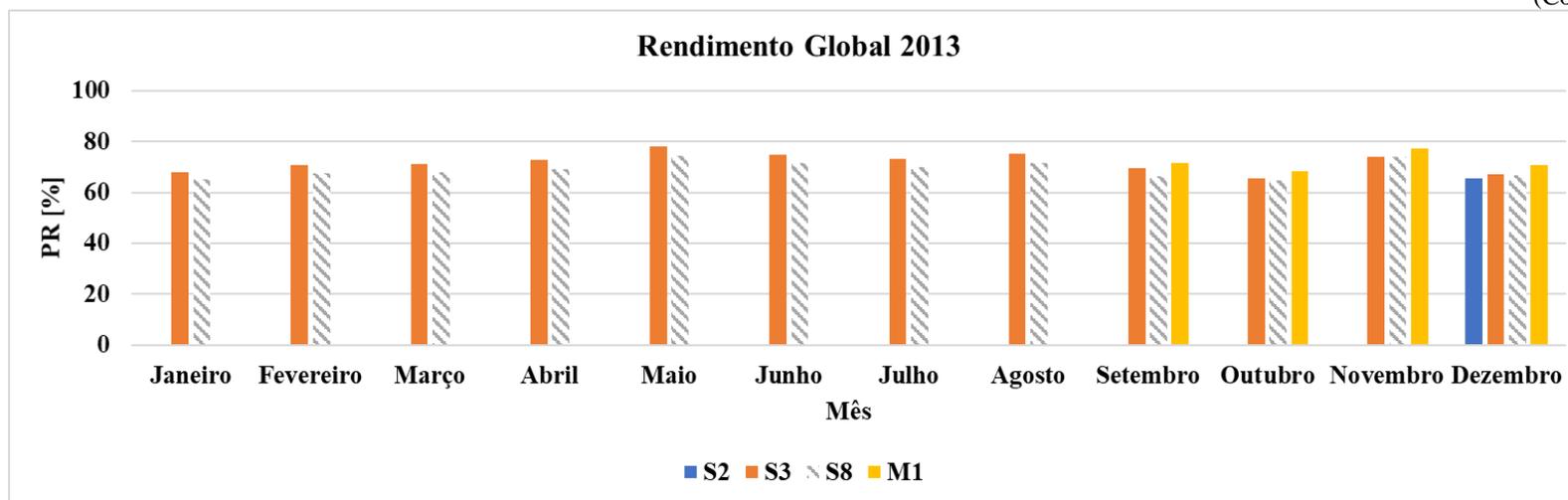


(a)

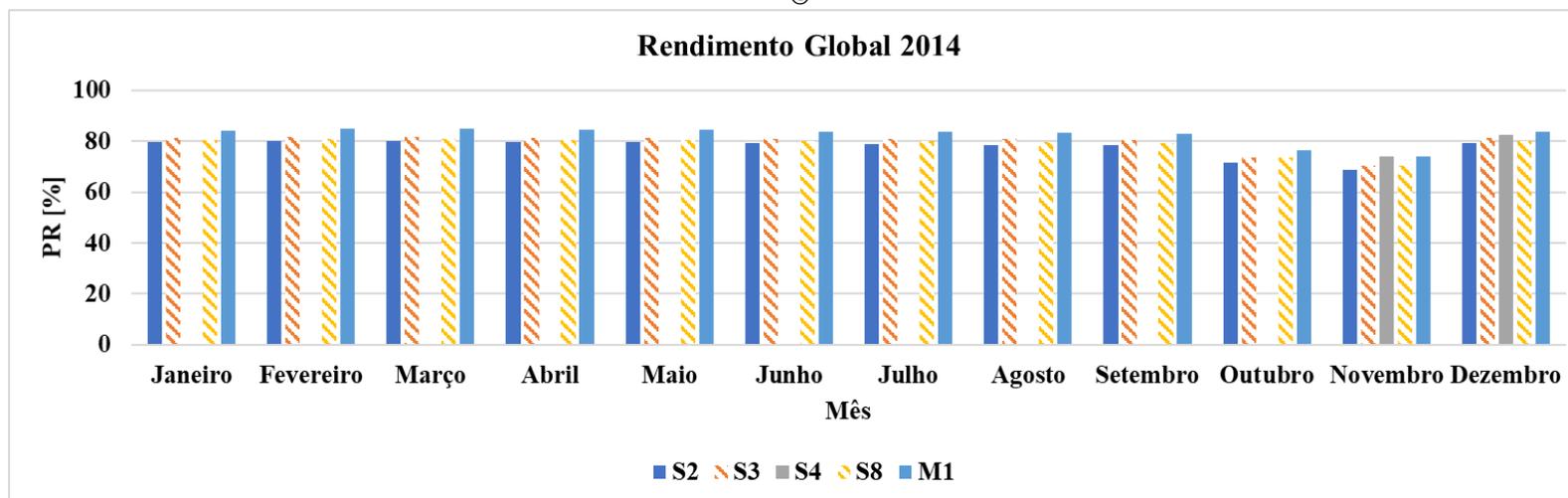


(b)

(Continua)

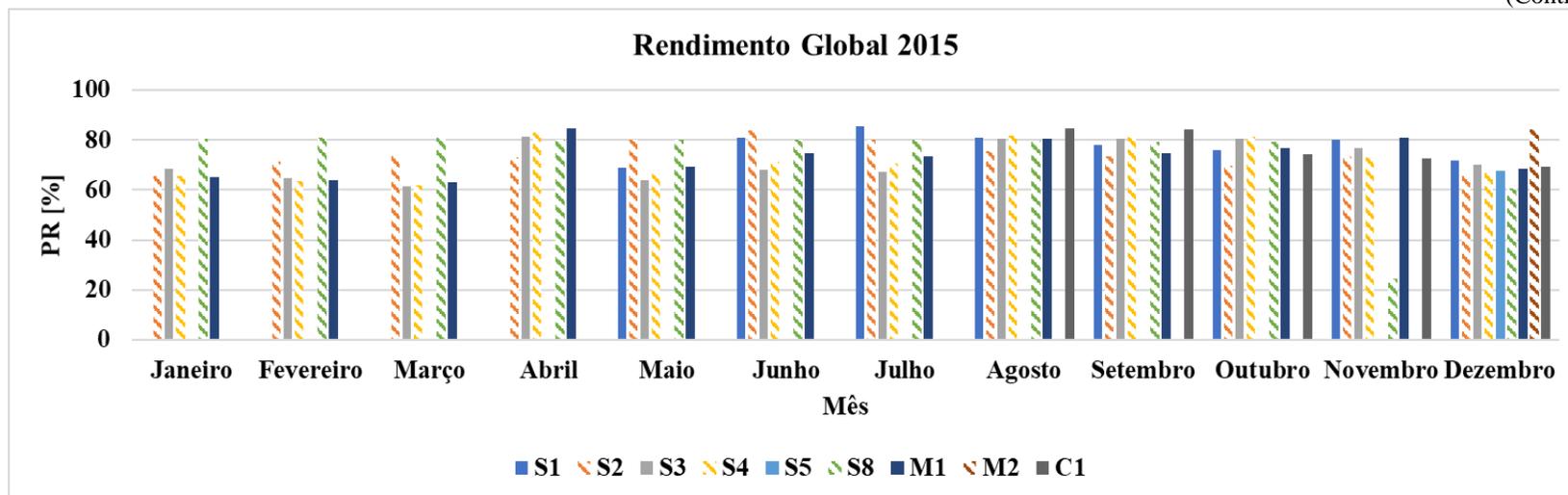


©

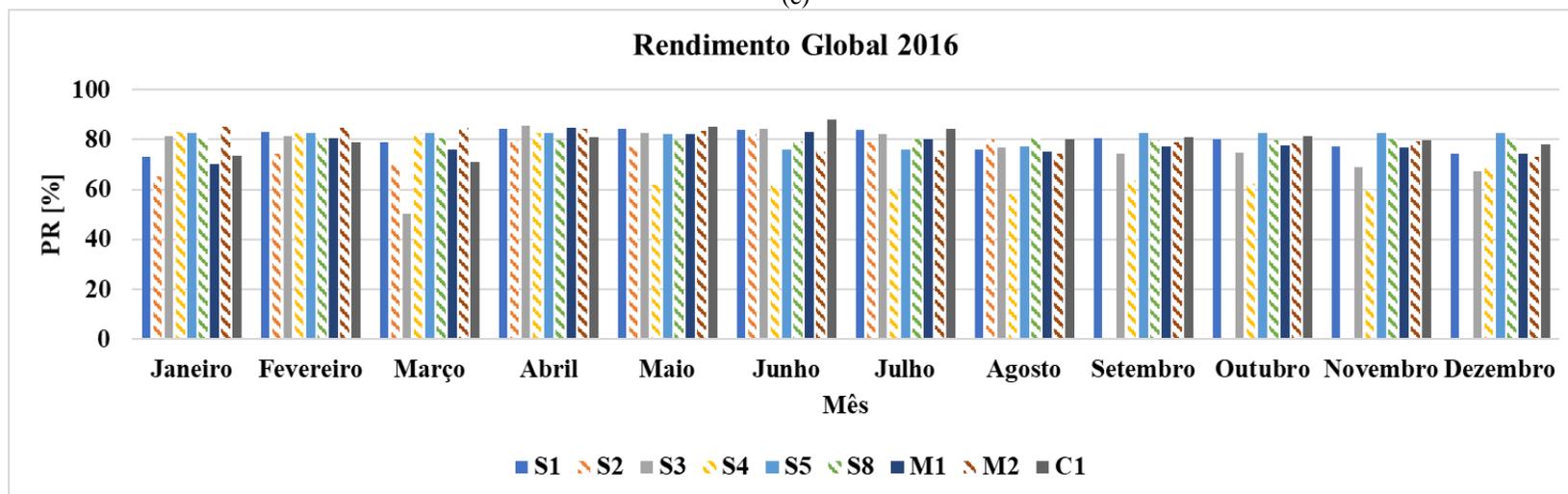


(d)

(Continua)

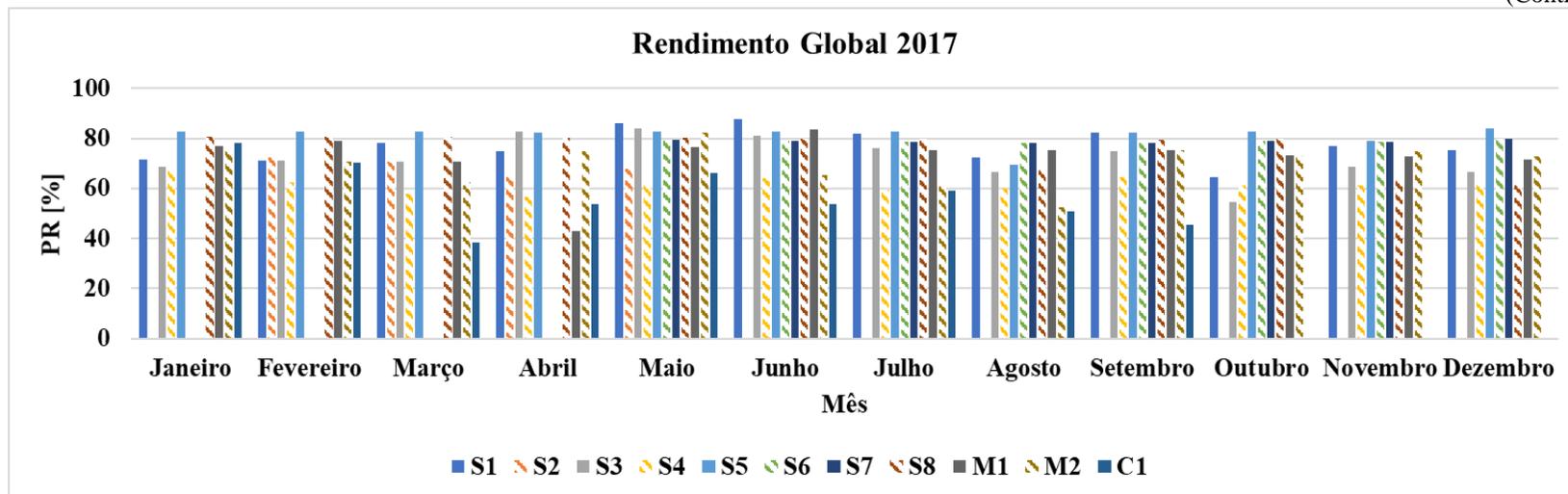


(e)

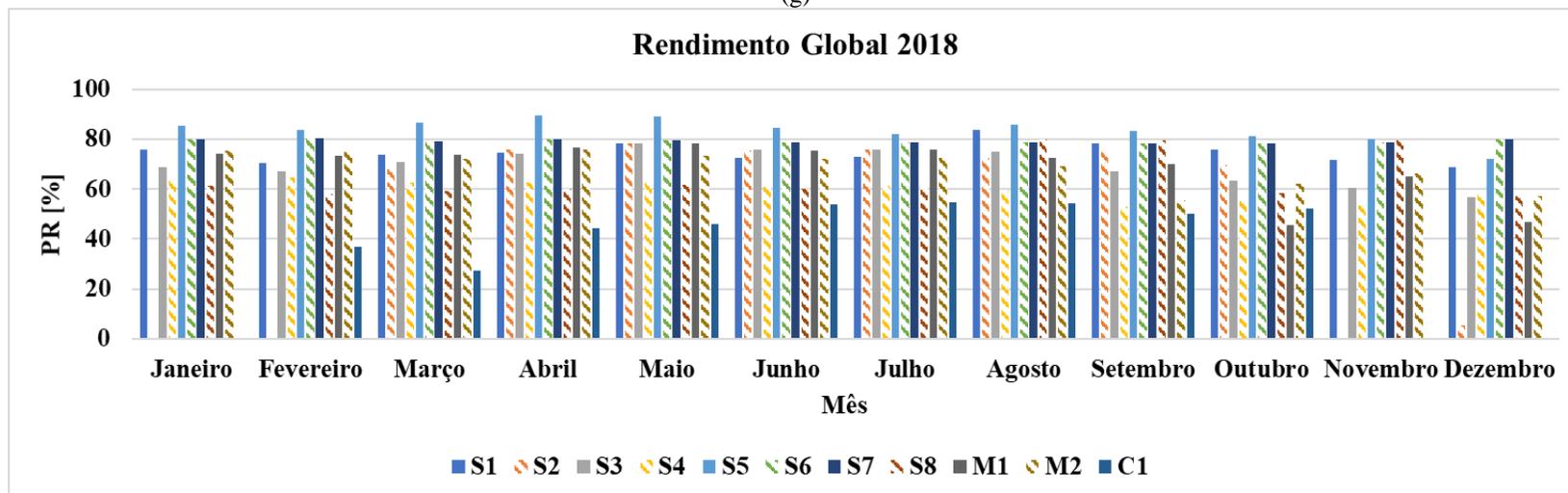


(f)

(Continua)

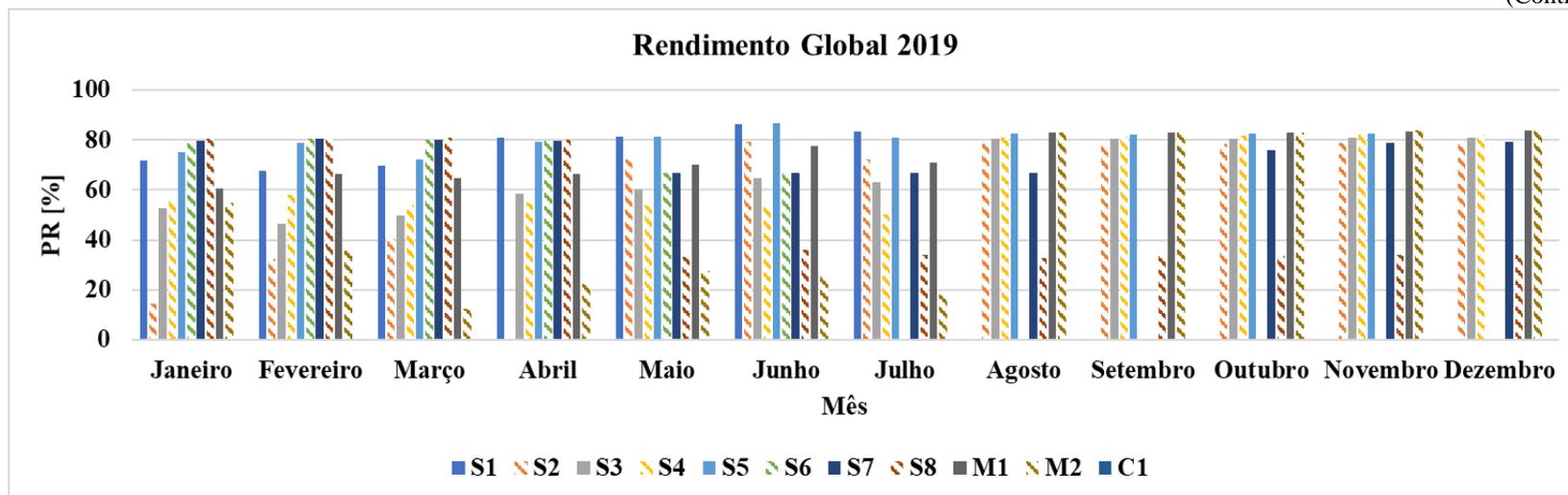


(g)

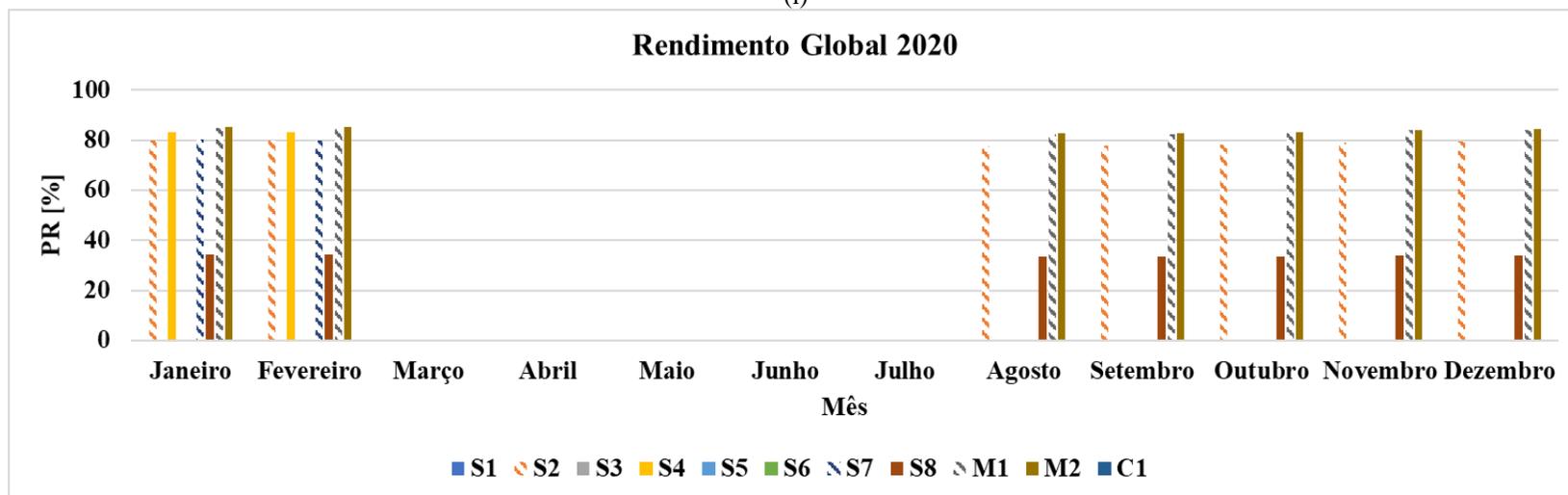


(h)

(Continua)

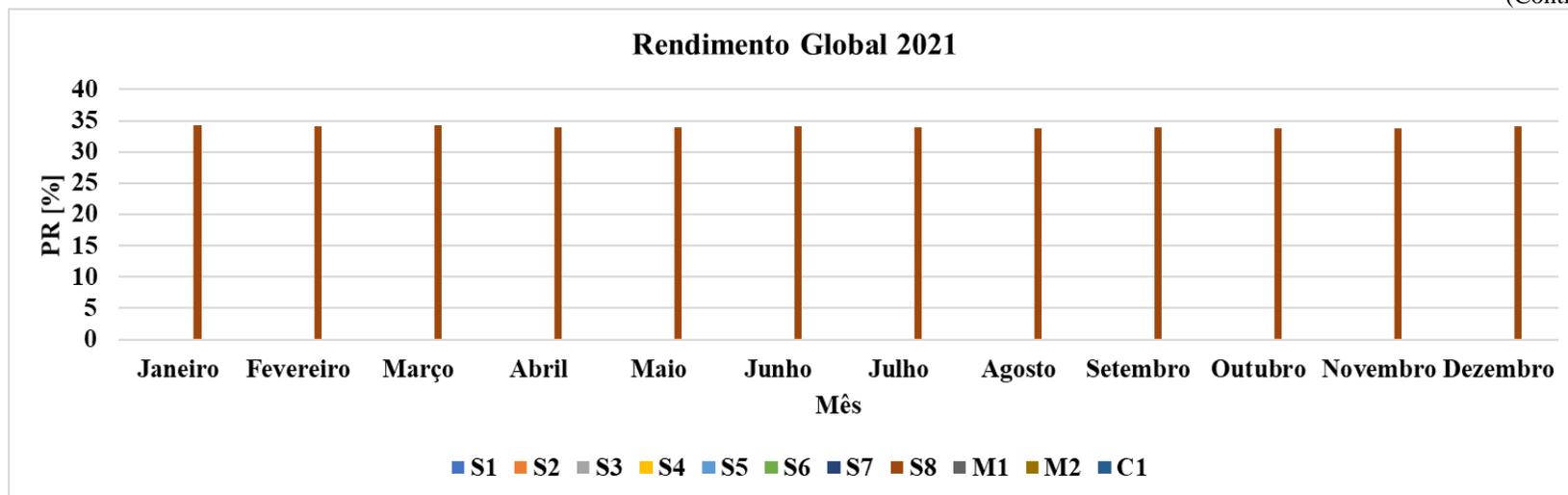


(i)

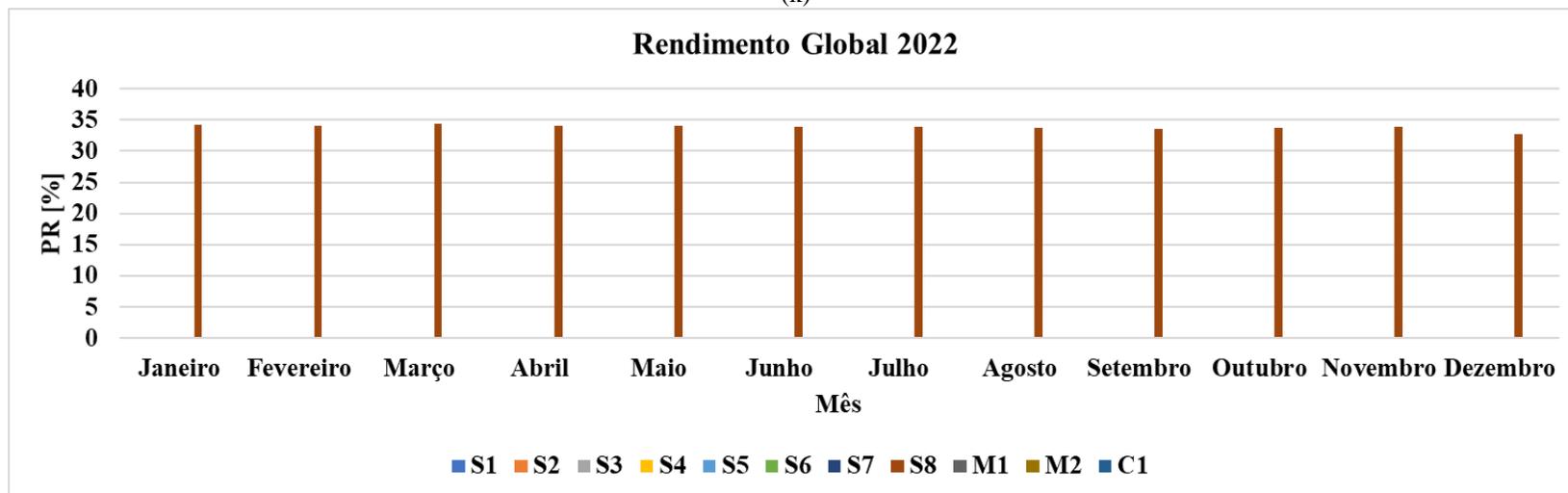


(j)

(Continua)

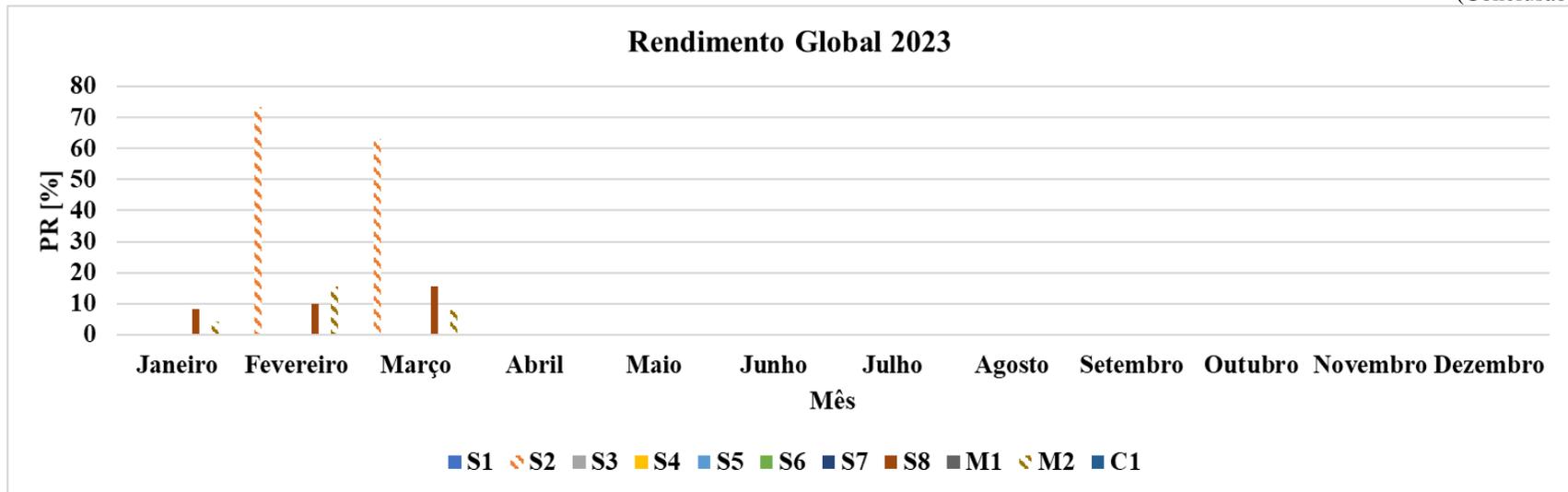


(k)



(l)

(Conclusão)



(m)

Fonte: Elaborado pelo autor.

4.5 Balanço Energético e Análise Econômica

Para a realização do balanço energético, algumas considerações necessitam ser ressaltadas, pois durante o processo de armazenamento dos dados de medição ocorreram alguns problemas, os quais produziram lacunas nos registros de medição em alguns instantes dos dias e em outros casos durante alguns dias do mês, conforme observa-se na Tabela 4.18. Como por exemplo, a necessidade de ajustes e substituição dos componentes antigos que compunham o sistema de monitoração de consumo de energia elétrica, tais como a realização de *backup* dos dados e a substituição do computador, além das eventuais quedas de energia elétrica na UFPA, as quais acarretaram no comprometimento temporário do registro das medições de consumo de energia elétrica nestes instantes, pois houve dias em que o *nobreak* descarregou completamente, ocasionando no desligamento do computador utilizado para a coleta de dados dos medidores de multigrandezas, havendo a necessidade de ter uma pessoa para ligá-lo novamente e, posteriormente, a ocorrência de *lockdown* durante a pandemia do COVID-19, inviabilizando o acesso à universidade por questões sanitárias, a fim de evitar aglomerações em ambientes fechados.

Os dados de medição de consumo de energia elétrica coletados pelo sistema de monitoração de energia do GEDAE estão expressos na Tabela 4.20 e a dinâmica do consumo ao longo dos meses durante o período entre os anos de 2011 a 2023 pode ser visto na Figura 4.12.

Para realizar a estimativa do consumo de energia elétrica da edificação do GEDAE, utilizaram-se os valores para um dia típico de consumo com base nos dados de medição nos anos de 2011 a 2023, haja vista que, durante o período mencionado, não houve modificações expressivas quanto à carga instalada na edificação, além de se manter relativamente constante a quantidade de membros frequentando o espaço pertencente ao GEDAE e a partir disso considerou-se que o consumo de energia elétrica em média se manteve constante ao longo destes anos.

Tendo em vista as considerações realizadas, a estimativa do consumo de energia elétrica da edificação após o preenchimento das lacunas com os valores de dia típico, obtiveram-se os dados da Tabela 4.21 e a dinâmica do consumo ao longo dos meses durante o período de julho de 2011 a abril de 2023, conforme pode ser visto na Figura 4.13.

Tabela 4.20 – Consumo de energia elétrica coletado pelo sistema de monitoração no período de 2011 a 2023.

Consumo de Energia Elétrica Total (kWh) Coletado pelo Sistema de Monitoração													
Ano	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023
Janeiro	-	2.845	0	2.379	1.757	2.206	874	3.276	3.000	0	0	1205	757
Fevereiro	-	2.859	0	1.853	1.858	1.759	1.181	2.389	3.035	1013	0	83	854
Março	-	3.208	0	2.486	2.051	2.421	580	3.806	2.356	779	0	1104	1398
Abril	-	3.500	0	151	1.852	2.802	465	2.568	2.817	0	0	636	1156
Mai	-	3.528	0	0	2.212	2.578	1.857	3.636	3.144	0	0	1099	432
Junho	-	3.354	0	0	2.933	2.778	2.111	2.918	3.481	0	0	1674	52
Julho	2.133	592	0	0	662	1.524	3.626	2.368	3.552	0	0	718	0
Agosto	2.414	0	0	1.525	989	2.359	3.733	2.763	67	0	1135	474	0
Setembro	0	0	0	3.172	0	2.871	3.264	3.566	0	0	1656	1502	0
Outubro	0	0	2.309	2.839	0	1.670	2.503	3.936	0	0	1605	721	0
Novembro	2.087	0	2.811	4.196	0	1.499	3.780	3.954	0	0	1193	257	0
Dezembro	3.168	0	2.700	2.701	781	2.206	3.023	2.715	0	0	655	567	0
Total	9.802	19.886	7.820	21.301	15.094	26.672	26.998	37.895	21452	1793	6243	10042	4650

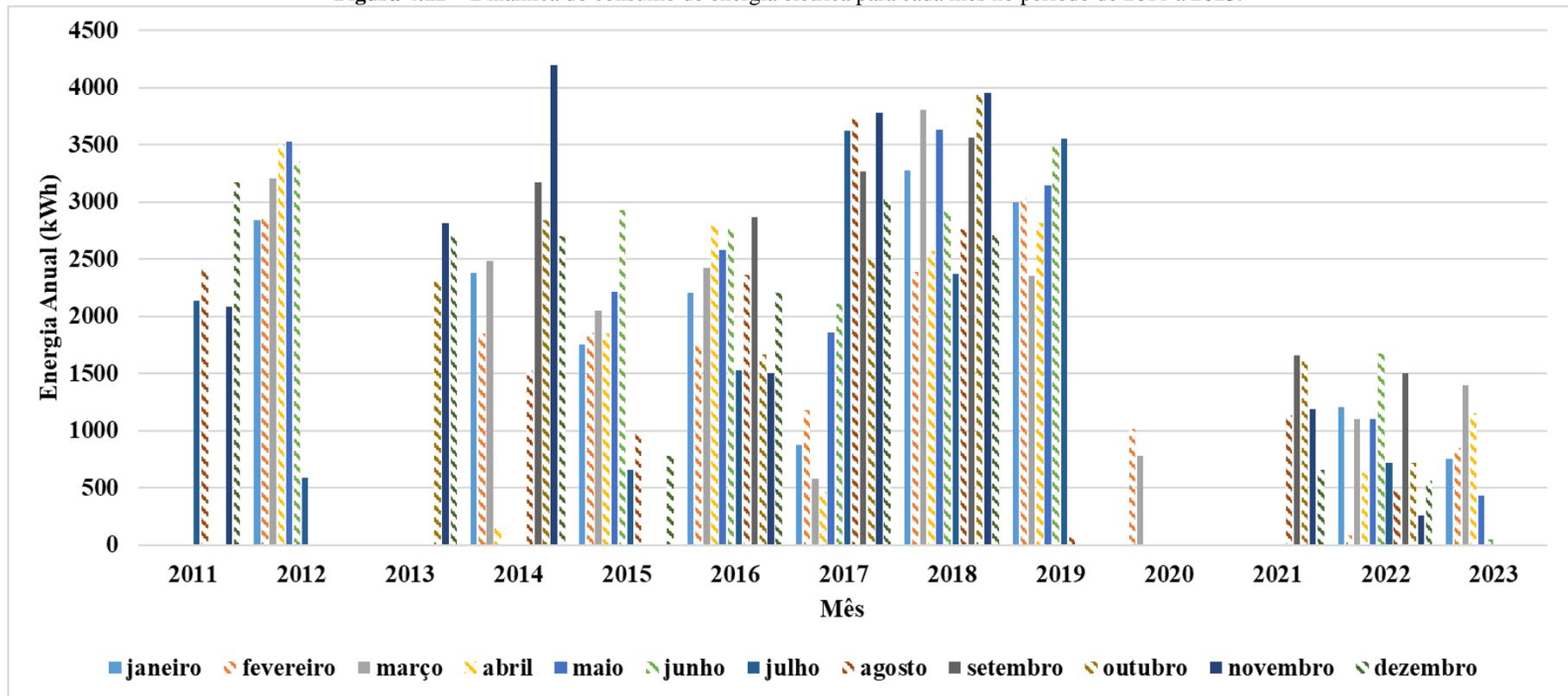
Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 4.21 – Consumo de energia elétrica preenchido com os dados de dia típico no período de 2011 a 2023.

Consumo de Energia Elétrica Total (kWh) Preenchido com os Dados de Dia Típico													
Ano	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023
Janeiro	-	4012	3431	3236	3642	3.065	3.612	3.433	3.016	3431	3431	3702	3241
Fevereiro	-	3206	3015	3333	2974	3.256	3.091	2.394	3.066	2873	3015	3035	2878
Março	-	3721	3254	2769	3396	2.878	3.020	3.923	3.074	3336	3254	3096	3274
Abril	-	3649	3070	3054	2663	3.020	2.885	3.279	2.936	105	3069	2545	3181
Mai	-	4036	3714	3714	3086	3.863	4.065	4.086	3.150	105	3714	3767	3688
Junho	-	3545	3672	3672	3510	3.610	3.721	3.884	3.761	116	3672	4145	3226
Julho	3.556	3494	3388	3388	3315	2.921	3.760	2.954	3.718	111	3388	2840	0
Agosto	3.244	3759	3759	3872	3794	3.704	4.123	3.816	3759	3759	3395	2676	0
Setembro	3.566	3566	3566	3748	3566	3.200	3.741	3.576	3566	3566	4245	4044	0
Outubro	3.550	3550	3182	3646	3550	3.255	3.707	3.959	3550	3550	3763	2926	0
Novembro	4.399	3435	3243	4556	3435	3.103	3.797	3.955	3435	3435	3386	2482	0
Dezembro	4.580	3550	3194	4572	2816	3.343	3.292	2.727	3550	3550	3308	3150	0
Total	22.894	43.522	40.487	43.559	39.748	39.219	42.813	41.985	40581	27937	41642	38408	19489

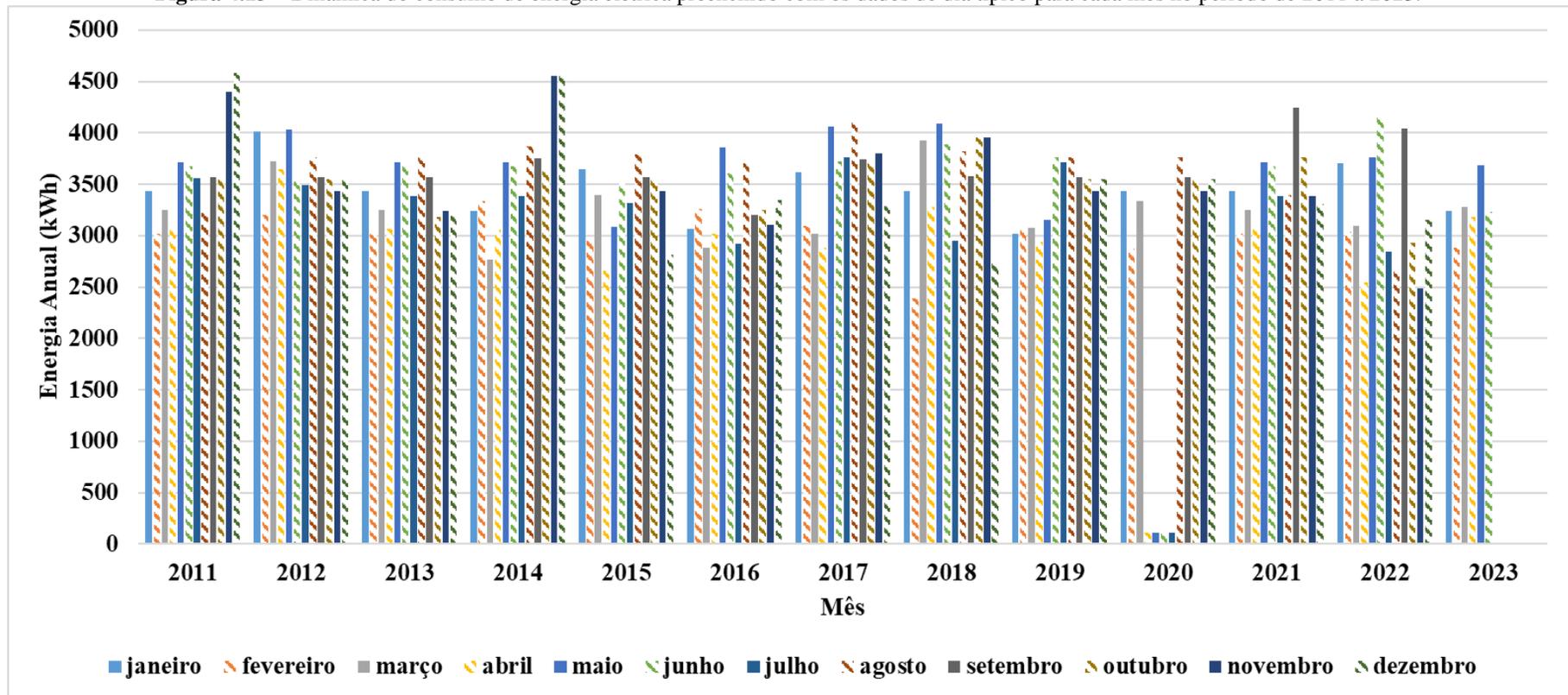
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 4.12 – Dinâmica do consumo de energia elétrica para cada mês no período de 2011 a 2023.



Fonte: Elaborado pelo autor.

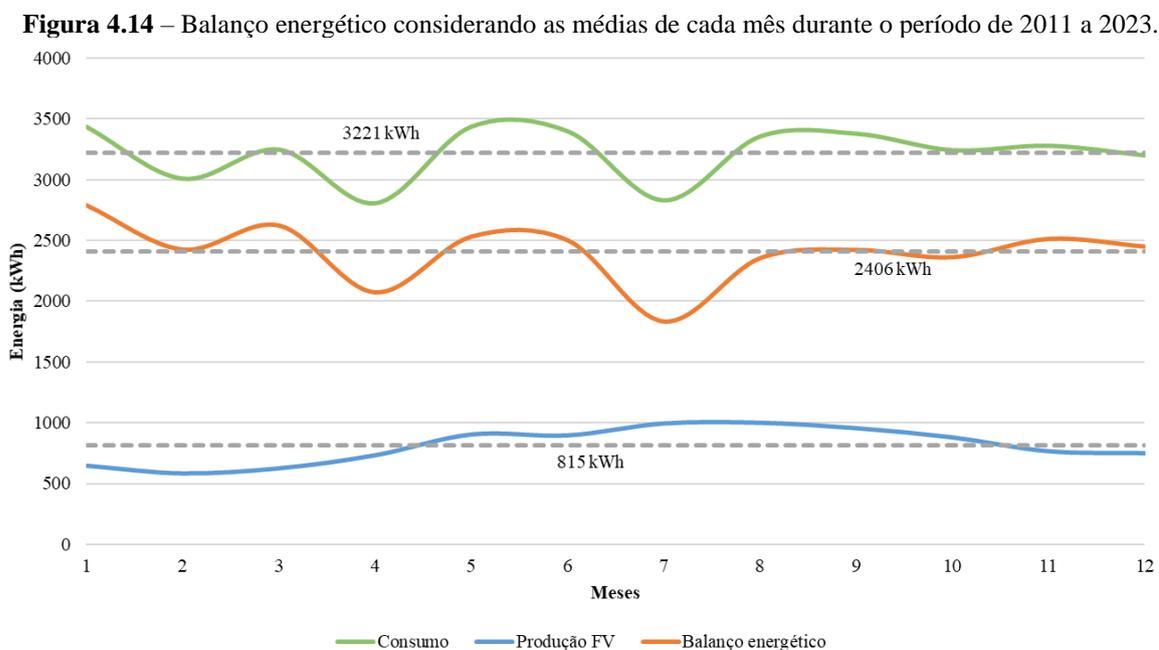
Figura 4.13 – Dinâmica do consumo de energia elétrica preenchido com os dados de dia típico para cada mês no período de 2011 a 2023.



Fonte: Elaborado pelo autor.

É válido ressaltar que o sistema de aquisição de dados de consumo de energia elétrica do prédio do GEDAE ficou desligado por um pouco mais de um ano durante o período pandemia do COVID-19, devido a problemas com o computador responsável pelo monitoramento do consumo de energia, como por exemplo, a perda do disco rígido. O período de desligamento foi de março/2020 a agosto/2021, o que justifica o baixo consumo durante esse período. Para reestabelecer a monitoração do consumo de energia por meio do computador houve a necessidade da desconexão do disco rígido escravo que havia sido danificado, substituição da bateria do CMOS e aumento da memória RAM de 1 GB para 4 GB.

Considerando os dados de geração dos SFCR e consumo de energia elétrica nas Tabelas 4.12, 4.17 e 4.21, obteve-se os dados para o balanço energético médio mensal durante os anos monitorados conforme ilustra-se na Figura 4.14.



Durante o período monitorado entre os anos de 2011 a 2023, nota-se que os SFCR reduziram em média cerca de cerca de 25% no consumo de energia elétrica da edificação do GEDAE/UFPA, tendo maior contribuição durante os meses de julho a setembro, que são os meses que com maior quantidade de irradiação global incidente, conforme observado nos registros históricos de irradiação na Tabela 4.13.

4.5.1 Economia anual

A edificação do GEDAE está situada dentro do Campus Guamá da UFPA. De acordo com os dados fornecidos pela Prefeitura Multicampi da UFPA, o contrato atual de fornecimento de energia elétrica estabelece que a UFPA pertence ao grupo/subgrupo tarifário A/A4, na

modalidade horo sazonal verde sobre uma demanda contratada de 6.024 kW, independente do horário do dia. Nessa modalidade, aplicam-se tarifas distintas para os períodos de ponta e fora de ponta. A atual demanda contratada entrou em vigência em 27/07/2023, sendo o valor de demanda normalmente atualizado a cada 6 meses.

Em virtude da capacidade instalada dos SFCR monitorados, do consumo e da demanda contratada do Campus Guamá da UFPA, os SFCR contribuem para a redução na conta de energia somente durante o período fora de ponta. Por isso, neste estudo, consideram-se apenas as tarifas aplicadas durante o período fora de ponta. As Tabelas 4.22 e 4.24 apresentam, respectivamente, os dados das tarifas aplicadas (Tarifa de Uso do Sistema de Distribuição - TUSD e Tarifa de Energia - TE) para o consumo fora de ponta e as bandeiras tarifárias (BT) aplicadas durante o período de 2011 a 2023, levando em consideração os valores homologados pela ANEEL referentes aos reajustes tarifários da concessionária de energia elétrica local, conforme as suas resoluções homologatórias. Considerou-se fixos os valores dos tributos ICMS, PIS e COFINS conforme os valores apresentados por Aguilar (2018), os quais estão listados na Tabela 4.23.

Tabela 4.22 – Tarifas de aplicação para consumo fora ponta.

Vigência	Tarifas de Aplicação		
	TUSD	TE	Total
	R\$/kWh	R\$/kWh	R\$/kWh
07/08/2011 a 06/08/2012	0,06023	0,1145	0,17473
07/08/2012 a 06/08/2013	0,06613	0,13036	0,19649
07/08/2013 a 06/08/2014	0,04132	0,12376	0,16508
07/08/2014 a 06/08/2015	0,05162	0,19063	0,24225
07/08/2015 a 06/08/2016	0,06404	0,20385	0,26789
07/08/2016 a 06/08/2017	0,06301	0,22658	0,28959
07/08/2017 a 06/08/2018	0,07101	0,23454	0,30555
07/08/2018 a 06/08/2019	0,08615	0,26375	0,34990
07/08/2019 a 06/08/2020	0,08874	0,21790	0,30664
07/08/2020 a 06/08/2021	0,07111	0,21559	0,28670
07/08/2021 a 06/08/2022	0,09732	0,19398	0,29130
07/08/2022 a 06/08/2023	0,11495	0,21159	0,32654

Fonte: Adaptado de ANEEL (2012; 2013; 2014; 2015; 2016; 2017; 2018; 2019; 2020; 2021; 2022).

Tabela 4.23 – Impostos aplicados.

ICMS	25%
PIS	6,8788%
COFINS	1,574%

Fonte: Aguilar (2018).

Tabela 4.24 – Bandeiras tarifárias aplicadas ao longo dos meses no período de 2011 a 2023.

Mês	2015		2016		2017		2018		2019		2020		2021		2022		2023	
	BT	R\$/kWh	BT	R\$/kWh	BT	R\$/kWh	BT	R\$/kWh	BT	R\$/kWh	BT	R\$/kWh	BT	R\$/kWh	BT	R\$/kWh	BT	R\$/kWh
Janeiro	BVM ¹	0,03	BVM	0,045	BVD	0	BVD	0	BVD	0	BAM	0,0134	BAM	0,0134	E	0,142	BVD	0
Fevereiro	BVM	0,03	BVM-1 ²	0,03	BVD	0	BVD	0	BVD	0	BVD	0	BAM	0,0134	E	0,142	BVD	0
Março	BVM	0,055	BAM ³	0,015	BAM	0,02	BVD	0	BVD	0	BVD	0	BAM	0,0134	E	0,142	BVD	0
Abril	BVM	0,055	BVD ⁴	0	BVM-1	0,03	BVD	0	BVD	0	BVD	0	BAM	0,0134	E/BVD	0,071	BVD	0
Mai	BVM	0,055	BVD	0	BVM-1	0,03	BAM	0,01	BAM	0,01	BVD	0	BVM-1	0,0416	BVD	0	BVD	0
Junho	BVM	0,055	BVD	0	BVD	0	BVM-2	0,05	BVD	0	BVD	0	BVM-2	0,0624	BVD	0	BVD	0
Julho	BVM	0,055	BVD	0	BAM	0,02	BVM-2	0,05	BAM	0,015	BVD	0	BVM-2	0,0949	BVD	0	BVD	0
Agosto	BVM	0,055	BVD	0	BVM-1	0,03	BVM-2	0,05	BVM-1	0,04	BVD	0	BVM-2	0,0949	BVD	0	-	-
Setembro	BVM	0,045	BVD	0	BVD	0,02	BVM-2	0,05	BVM-1	0,04	BVD	0	E ⁶	0,142	BVD	0	-	-
Outubro	BVM	0,045	BVD	0	BVM-2 ⁵	0,035	BVM-2	0,05	BAM	0,015	BVD	0	E	0,142	BVD	0	-	-
Novembro	BVM	0,045	BAM	0,015	BVM-2	0,05	BAM	0,01	BVM-1	0,0416	BVD	0	E	0,142	BVD	0	-	-
Dezembro	BVM	0,045	BVD	0	BVM-1	0,03	BVD	0	BAM	0,0134	BVM-2	0,0624	E	0,142	BVD	0	-	-

¹ BVM: Bandeira Vermelha;

² BVM-1: Bandeira Vermelha Patamar 1;

³ BAM: Bandeira Amarela;

⁴ BVD: Bandeira Verde;

⁵ BVM-2: Bandeira Vermelha Patamar 2;

⁶ E: Bandeira de Escassez Hídrica.

- Apesar do sistema de bandeiras tarifárias ter sido regulamentado em dezembro/2012 pela ANEEL, as cobranças começaram a partir de janeiro/2015.

- Somente a partir do dia 01/02/2016 a bandeira vermelha passou a ter dois patamares.

- Em setembro/2021 foi criada a bandeira de escassez hídrica, sendo extinta em meado de abril/2022.

Fonte: Adaptado de Silva (2019); ANEEL (2023).

Sendo conhecidos os impostos e parâmetros tarifários, avalia-se o quanto foi reduzido no custo de energia. Tendo em vista que em um sistema fotovoltaico conectado à rede, a economia mensal de energia elétrica está diretamente relacionada com a quantidade de energia produzida por estes sistemas, logo, baseando-se nos valores apresentados nas Tabelas 4.12, 4.17, 4.18, 4.22, 4.23 e 4.24, e utilizando-se a Equação (4.1) para obtenção da economia⁷ mensal de energia considerando a energia total produzida em um determinado mês pelos SFCR em conjunto com o preço da energia quando aplicados os tributos, conforme indicado pela ELETROBRAS (2011), obtém-se os valores apresentados nas Tabelas 4.25 e 4.26.

Na Tabela 4.25 os valores de economia mensal foram obtidos pelas medições em conjunto com a simulação dos SFCR monitorados para preenchimento de dados nos dias em que não houve registro de medição. Na Tabela 4.26 os valores de economia mensal foram calculados considerando o resultado da simulação de geração dos SFCR. A Figura 4.15 ilustra a economia proporcionada nestas duas situações.

$$Economia [R\$] = Energia\ FV [kWh] \cdot \frac{(TE + TUSD + BT) [R\$/kWh]}{1 - \frac{(ICMS + PIS + COFINS) [\%]}{100}} \quad (4.1)$$

Tabela 4.25 – Economia da energia medida e complementada com a energia estimada por meio de simulação ao longo dos anos monitorados.

(Continua)

Ano	Economia de Energia Anual [R\$]												
	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023
Janeiro	-	18	55	92	191	471	355	401	422	238	25	33	9
Fevereiro	-	50	49	73	161	439	329	306	321	202	21	34	55
Março	-	57	54	85	180	405	343	438	376	-	25	34	4
Abril	-	63	60	83	211	409	371	456	409	-	26	28	-
Mai	-	71	68	88	300	492	586	548	442	-	29	25	-
Junho	-	68	67	94	253	408	486	714	519	-	31	28	-
Julho	-	97	68	104	353	517	562	734	471	-	37	29	-
Agosto	-	117	62	162	590	580	563	828	390	151	39	34	-
Setembro	-	109	61	160	569	493	565	789	366	147	42	34	-
Outubro	-	107	61	144	435	491	512	725	363	146	43	33	-
Novembro	13	109	61	196	429	462	552	466	389	121	40	30	-
Dezembro	54	103	85	210	463	399	438	375	327	154	36	25	-

⁷ Para fins de estimativa da economia de energia elétrica, a Equação (4.1) não considerou as mudanças ocorridas devido à Lei Nº 14.300, de 6 de janeiro de 2022 que institui o marco legal da microgeração e minigeração distribuída, o Sistema de Compensação de Energia Elétrica (SCEE) e o Programa de Energia Renovável Social (PERS), a qual permite a cobrança no Fio B, que faz parte da Tarifa de Uso dos Sistemas de Distribuição (TUSD). A equação considerou a vigência da Resolução Normativa nº 482 de 17 de abril de 2012. Haja vista que os SFCR foram instalados durante a vigência dessa resolução. Ademais, não há a produção de créditos de energia, devido à quantidade de energia elétrica produzida mensalmente pelo conjunto de SFCR implantados ser bem menor que o consumo mensal de energia elétrica do Campus Universitário Guamá da UFPA.

(Conclusão)

Economia de Energia Anual [R\$]													
Ano	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023
Média	33	81	63	124	345	464	472	565	399	166	33	31	23
Total	66	967	753	1.492	4.135	5.566	5.661	6.781	4.793	1.159	395	366	68

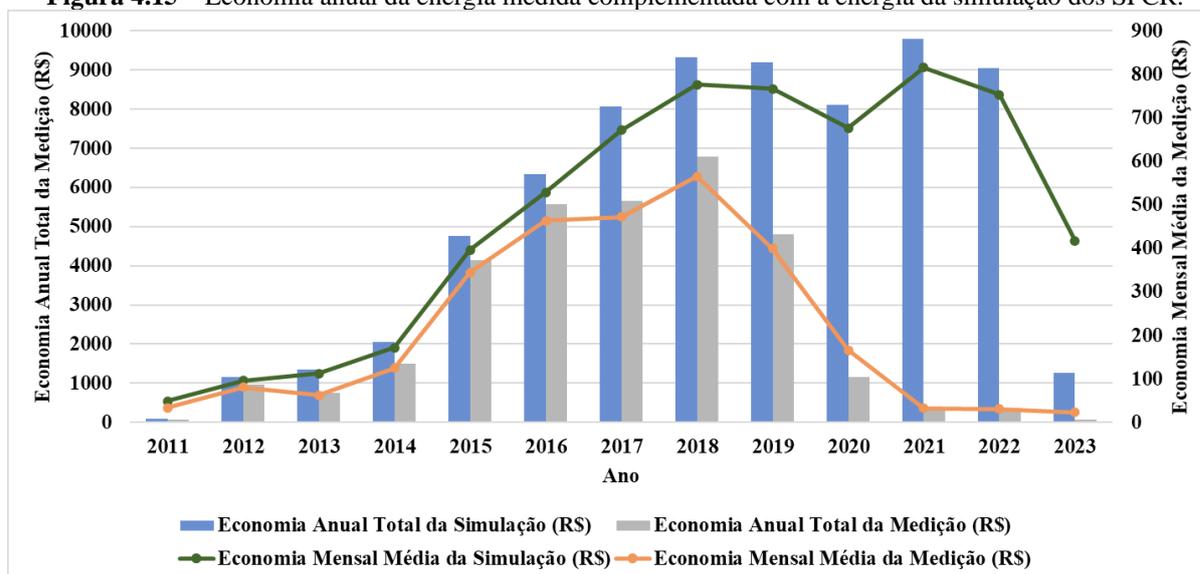
Fonte: Adaptado de Silva (2019).

Tabela 4.26 – Economia da energia estimada por meio de simulação ao longo dos anos monitorados.

Economia de Energia Anual [R\$]													
Ano	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023
Janeiro	-	72	107	126	222	515	447	635	725	607	626	827	666
Fevereiro	-	62	92	100	187	454	421	482	550	513	527	847	542
Março	-	70	100	117	212	452	482	657	668	589	610	846	46
Abril	-	72	109	114	215	446	534	599	688	591	647	693	-
Maio	-	80	115	122	344	535	697	672	777	687	730	623	-
Junho	-	76	119	129	344	530	646	850	809	688	756	682	-
Julho	-	106	123	143	372	545	798	871	913	785	920	708	-
Agosto	-	127	109	223	598	630	867	991	892	768	974	844	-
Setembro	-	128	112	220	582	587	803	1.004	866	749	1.040	829	-
Outubro	-	126	117	216	585	586	814	1.033	813	743	1.067	808	-
Novembro	16	122	103	280	521	568	863	830	788	615	999	732	-
Dezembro	83	111	140	266	572	495	690	693	708	782	895	603	-
Média	49	96	112	171	396	529	672	776	766	676	816	754	418
Total	99	1.153	1.346	2.055	4.754	6.344	8.061	9.317	9.197	8.116	9.791	9.043	1.254

Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 4.15 – Economia anual da energia medida complementada com a energia da simulação dos SFCR.



Fonte: Adaptado de Silva (2019).

Ressalta-se que o período para a avaliação da economia gerada pelos SFCR se limita até o dia 02/03/2023, haja vista que só existem registros de dados meteorológicos por meio das

fontes utilizadas neste trabalho até a data mencionada, inviabilizando a projeção da produção de energia elétrica pelos SFCR após este dia.

Nota-se que, ao longo dos anos de 2011 a 2023, os SFCR instalados no GEDAE/UFPA viabilizou uma redução de R\$ 32.203,00 no custo de energia da universidade do Campus Guamá e, em média, houve uma redução de R\$ 2.477,00 por ano. Os anos de 2015 a 2019 representam o período com maior produção de energia elétrica, devido à maioria dos onze SFCR estarem em operação, atuando ativamente na diminuição do consumo da edificação visto pela rede de distribuição.

De 2011 a 2014, apenas os sistemas S8, S3, S2, M1 e S4 estavam em funcionamento, o que justifica a baixa contribuição durante este período, além também do fato do registro de dados de geração destes SFCR se aterem ao período em que se realizavam estudos tendo como objeto alvo o desempenho operacional de alguns destes sistemas fotovoltaicos, cessando-se assim os registros após a realização do estudo.

A partir de 2019, alguns dos SFCR começaram a apresentar defeitos internos em seus respectivos inversores, sendo os inversores da linha SMA os mais afetados com problemas no relé interno ao inversor (mensagem de *KI-OPEN*), comprometendo uma parte não tão significativa da geração.

Em 2020, houve o período de *lockdown* devido à pandemia do COVID-19, conforme comentado anteriormente, e por questões de segurança, os SFCR foram desativados, uma vez que não haveria permissão de acesso à universidade devido ao fechamento temporário de ambientes com grandes aglomerações mediante também ao bandeiramento⁸ vigente. Logo, não apenas a medição foi afetada durante este período, mas também a geração de energia elétrica dos SFCR.

Com a volta à normalidade das atividades no laboratório, verificou-se que somente os sistemas S8, S2, M2 e M1 ainda se encontravam operacionais, com os demais apresentando problemas com os inversores ou otimizadores, como no caso do sistema C1. Após o período de *lockdown*, apenas o sistema S8 retomou à operação com produção de energia elétrica. Os outros três SFCR restantes permaneceram desativados até o período de finalização da confecção do QGFV, com exceção do sistema M1 que se optou por mantê-lo desativado até a instalação dos novos quadros parciais, a fim de evitar custos adicionais com um encaminhamento provisório dos cabos elétricos para reativação do sistema M1 e, posteriormente, ter que arcar com as

⁸ O sistema de bandeiramento foi estabelecido pelo Grupo de Trabalho da UFPA sobre o Novo Coronavírus, conforme Resolução número 1.513/2020 do Conselho Superior de Administração da UFPA.

despesas relacionadas ao encaminhamento definitivo para realizar a conexão do sistema M1 ao QPFV 1.

De 01/01/2021 a 23/01/2023, somente o sistema S8 ficou em operação e nos dias 24/01/2023 e 30/01/2023 foram reativados os sistemas M2 e S2, respectivamente. Ainda ficando pendente a reativação do sistema M1.

Os dados de medição por meio dos medidores de multigrandezas se restringiram ao período em que ainda existem os dados meteorológicos e, por este motivo, os dados de geração de energia elétrica pelos SFCR se limitam até o mês de março/2023. Haja vista que, dentre as fontes de dados meteorológicos utilizadas, somente o registrador local contém os dados para realização das simulações a partir do dia 04/12/2022.

Observa-se ainda a relevância de se revitalizar os SFCR que estão atualmente inoperantes, substituindo os componentes danificados (principalmente os inversores que apresentaram problemas) e potencializando as instalações elétricas (como cabeamentos e proteções), haja vista que durante o período em que todos ou a maioria dos SFCR estiveram em operação se obteve uma maior economia no custo de energia correspondendo a uma economia anual de R\$ 26.936,00 entre os anos de 2015 a 2019, o que representa uma economia anual média de R\$ 5.387,00 nesses cinco anos de geração de energia elétrica pelos SFCR.

Além disso, a partir do ponto de vista em que todos os SFCR estão em pleno funcionamento desde a época de suas respectivas instalações até os dias atuais, é notório que a economia anual seria muito mais expressiva, visto que haveria uma redução de R\$ 70.530,00 em despesas com energia elétrica, correspondendo a aproximadamente o dobro do valor economizado com base nos registros e preenchimento das medições da geração (lacunas existentes) durante a operação dos SFCR. Reitera-se, uma vez mais, a importância da reativação dos SFCR que ainda se encontram inoperantes, a fim de se obter um maior aproveitamento do recurso solar e, conseqüentemente, uma maior economia de energia elétrica.

CONCLUSÕES

O presente trabalho teve foco na implementação do sistema de monitoramento de parâmetros elétricos no lado c.a. dos SFCR instalados no prédio do GEDAE/UFPA. A forma de aquisição de dados anterior carecia de uma monitoração independente dos circuitos de carga da edificação. Com a implementação do sistema de monitoramento desenvolvido no presente trabalho, evita-se a obtenção de forma indireta da contribuição da produção de energia pelos SFCR, antes obtida por meio do balanço energético das cargas de consumo do circuito geral com os demais circuitos.

Para isto, a implantação de um quadro geral para os SFCR (QGFV) foi necessária, contendo dispositivos de proteção e monitoramento, fazendo-se a separação dos circuitos de geração dos SFCR conectados aos circuitos de carga referentes às tomadas/equipamentos no QGBT da edificação. Assim, a partir disto, agora é possível a obtenção dos dados de produção de energia elétrica dos SFCR de forma direta e sem que haja interferência no registro real de consumo do circuito de tomadas/equipamentos.

Como forma de aprimoramento do sistema existente para monitoração de parâmetros elétricos na edificação do GEDAE/UFPA, realizou-se a integração/comunicação dos dados obtidos nos medidores de multigrandezas utilizados para monitorar os parâmetros elétricos c.a. dos SFCR por meio da ferramenta em LabVIEW, com o registro das medições e visualização dos dados dos parâmetros elétricos monitorados, tanto da geração por meio de SFCR quanto dos circuitos de uso final da edificação. Com isto, é composto o histórico de registros dos dados dos SFCR e das cargas que servirão para embasar futuros estudos relacionados à geração e consumo de energia na edificação.

No presente trabalho também foi desenvolvida uma plataforma para acesso remoto (aplicação em página *web*), visando à visualização de dados e estimativa de produção de energia elétrica dos SFCR monitorados. Por meio desta ferramenta é possível verificar a dinâmica de cada parâmetro elétrico das cargas da edificação e dos SFCR, escolhendo o dia em que se deseja realizar as análises; e realizar simulações com a utilização de dados meteorológicos e dados nominais relacionados a parâmetros de módulos fotovoltaicos e inversores. Destaca-se a replicabilidade das simulações desta aplicação para outros conjuntos de dados de módulos fotovoltaicos, inversores e dados meteorológicos de outras regiões, desde que sejam seguidas as formatações das tabelas indicadas no Capítulo 2.

Além disso, devido à aplicação em página *web* com o processamento de dados na plataforma *online*, não há necessidade de instalação de um programa computacional na máquina

do usuário e este não se limita ao acesso somente via computador, podendo ser realizado o acesso via *smartphones* e *tablets*, desde que haja conexão com a internet.

Com relação às diferentes bases de dados meteorológicas utilizados no presente trabalho, no que tange as comparações entre os dados obtidos pela estação meteorológica própria do GEDAE/UFPA e pela NASA, constatou-se que os desvios entre estas bases de dados intensificam-se a partir do ano de 2015.

Ademais, os registros de geração dos SFCR e dos parâmetros elétricos das cargas do GEDAE/UFPA permitiram a avaliação operacional e o balanço energético entre geração e consumo.

Ressalta-se a necessidade de atenção aos registros do medidor no QGFV, pois exige um valor de corrente de sensibilização acima de 200 mA, requerendo que mais SFCR estejam em funcionamento para aumentar a confiabilidade da monitoração. Já os medidores de multigrandezas nos quadros parciais para um conjunto de SFCR (QPFV) foram mais confiáveis, uma vez que demandam apenas cerca de 20 mA para sensibilização da leitura de corrente.

Quanto à avaliação operacional dos SFCR, computou-se a produtividade final e o rendimento global dos SFCR ao longo dos anos de 2011 a 2023, estimando-se ainda as perdas na geração relacionadas à degradação dos módulos fotovoltaicos ao longo do tempo.

Dentre os SFCR em funcionamento, o sistema M2 apresentou uma grande perda no rendimento após o mês de janeiro/2019, mas isto está relacionado à intensificação de problemas com desligamentos nos microinversores deste sistema.

Avaliou-se ainda a economia nos custos de energia elétrica dos SFCR, comparando com a simulação considerando o pleno funcionamento. De 2011 a 2023, os SFCR possibilitaram uma economia de R\$ 32.203,00, porém este valor equivale à cerca da metade do potencial de economia caso todos estivessem operando em pleno funcionamento.

Como sugestões para trabalhos futuros apontam-se:

- Implementar melhorias na aplicação *web* para realização das estimativas de produção de energia dos SFCR, tal como, a adição de uma análise conjunta dos SFCR, especificando o período em que cada gerador foi implementado, análise de tempo do retorno do investimento e análise considerando o grau de sujidade dos módulos fotovoltaicos.

- Implantar um sistema de aquisição de dados de irradiância global e temperatura ambiente, a fim de adicioná-los ao conjunto de dados obtidos pelo sistema de monitoramento implementado neste trabalho e de se obter uma fonte alternativa de dados meteorológicos quando não há disponibilidade em outras fontes.

- Desenvolver um sistema de aquisição de dados de irradiância no plano do gerador FV e temperatura de célula para cada um dos sistemas, a fim de se obter com maior exatidão os dados de simulação, evitando assim as incertezas associadas aos cálculos de estimativa para correção da inclinação dos parâmetros de irradiância.

- Desenvolver um sistema para monitoração dos parâmetros elétricos de corrente e tensão para cada um dos sistemas, a fim de não depender somente do valor acumulado diário de energia e conseguir identificar os períodos em que o sistema sofreu interrupções, além de contribuir para o aprimoramento da avaliação operacional dos SFCR.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AEMC. Manual de uso – PowerPad 2945-B Analisador trifásico de qualidade de energia. GU-1261.
- AGUILAR, H. **Desempenhos Térmico e Energético de uma Edificação na Região Amazônica Brasileira**. Tese de Doutorado. UFPA. Belém, Pará: 2018.
- AGUILAR, H. **Projeto de uma Edificação Energeticamente Autônoma e Eficiente para uso como Laboratório de Energias Renováveis e de Eficiência Energética**. Dissertação de Mestrado. UFPA. Belém, Pará: 2004.
- ALEO SOLAR. **Datasheet – Solarmodul aleo S_19 gen2**. Ago. 2012.
- AMORIM, A. S. **Bancada De Demonstração De Sistemas Fotovoltaicos Conectados à Rede Elétrica de Baixa Tensão**. Trabalho de Conclusão de Curso. UFPA. Belém, Pará: 2015.
- ANDRADE, F. C. **Desenvolvimento de um Sistema de Telemetria Baseado em Web**. Trabalho de Conclusão de Curso. UFPA. Belém, Pará: 2022.
- ANEEL. **Resolução Homologatória N° 1.327, de 31 de julho de 2012**. 2012.
- ANEEL. **Resolução Homologatória N° 1.328, de 31 de julho de 2012**. 2012.
- ANEEL. **Resolução Homologatória N° 1.578, de 06 de agosto de 2013**. 2013.
- ANEEL. **Resolução Homologatória N° 1.769, de 05 de agosto de 2014**. 2014.
- ANEEL. **Resolução Homologatória N° 1.930, de 04 de agosto de 2015**. 2015.
- ANEEL. **Resolução Homologatória N° 2.117, de 02 de agosto de 2016**. 2016.
- ANEEL. **Resolução Homologatória N° 2.284, de 31 de julho de 2017**. 2017.
- ANEEL. **Resolução Homologatória N° 2.433, de 07 de agosto de 2018**. 2018.
- ANEEL. **Resolução Homologatória n° 2.588, de 06 de agosto de 2019**. 2019.
- ANEEL. **Resolução Homologatória n° 2.750, de 06 de agosto de 2020**. 2020.
- ANEEL. **Resolução Homologatória n° 2.920, de 07 de agosto de 2021**. 2021.
- ANEEL. **Resolução Homologatória n° 3.092, de 07 de agosto de 2022**. 2022.
- ANEEL. **Sobre bandeiras tarifárias**. Disponível em: <<https://www.gov.br/aneel/pt-br/assuntos/tarifas/bandeiras-tarifarias>>. Acesso: Jul. 2023.
- AYOMPE, L. M.; DUFFY, A.; MCCORMACK, S. J.; CONLON, M. **Measured performance of a 1.72 kW rooftop grip connected photovoltaic system in Ireland**. Energy Conversion and Management, v. 52, n. 2. 2011.
- BRITO, T. R. **Medição de módulos fotovoltaicos a sol-real por meio de duas cargas capacitivas**. Dissertação de Mestrado. UFPA. Belém, Pará: 2018.
- CARVALHO, L. H. L. **Desenvolvimento de um Sistema de Monitoração para Avaliação de Desempenho Operacional de um Sistema Fotovoltaico Conectado à Rede de Baixa Tensão**. Trabalho de Conclusão de Curso. UFPA. Belém, Pará: 2015.

CAVALCANTE, R. L. **Análise Operacional de dois Sistemas Fotovoltaicos Conectados à Rede Elétrica do Campus Universitário da UFPA, na Cidade de Belém/PA.** Trabalho de Conclusão de Curso. UFPA. Belém, Pará: 2011.

CORRÊA, J. A. L. **Implantação e Avaliação de Desempenho de dois Geradores Fotovoltaicos Conectados Diretamente no Barramento C.C. de um Sistema Híbrido de Energia.** Trabalho de Conclusão de Curso. UFPA. Belém, Pará: 2017.

DUFFIE, J.; BECKMAN, W. **Solar Engineering of Thermal Processes.** 4ª edição: John Wiley and Sons. New York, USA: 2013.

ENPHASE ENERGY. **Datasheet** – Enphase M215 Microinverter. Nov. 2016.

FIGUEIREDO, G.; VASCONCELOS, F. M. **Metodologia para Projeto e Análise de Sistemas Fotovoltaicos Conectados à Rede Elétrica de Baixa Tensão: Estudo de Desempenho de um Sistema de 1,575 kWp.** Trabalho de Conclusão de Curso. UFPA. Belém, Pará: 2010.

FONSECA, A. C. **Qualidade da Energia Elétrica de uma Nanorrede de Distribuição em Corrente Contínua sob Diferentes Condições Operacionais.** Dissertação de Mestrado. UFPA. Belém, Pará: 2023.

FRONIUS. **Datasheet** – Fronius Galvo. Version 6. Abr. 2016.

GEDAE. 2009. Laboratório de Energias Renováveis e Eficiência Energética - Convênio Eletronorte/UFPA nº 0509/06. Arquivo digital: **GEDAE_instalação_elétrica_P1eP2.dwg.**

GEDAE. **Apresentação.** Disponível em: <<https://gedae.ufpa.br/index.php/apresentacao>>. Acesso em: Jul. 2023.

GERGAUD, O.; MULTON, B.; AHMED, H. B. **Analysis and Experimental Validation of Various Photovoltaic System Models.** 7th International ELECTRIMACS Congress. Montréal, 2002.

GO SOLAR CALIFORNIA. **Grid Support Inverters List – Full Data.** Disponível em: <<https://www.gosolarcalifornia.org/equipment/inverters.php>>. Acesso: 16 mai. 2018.

JA SOLAR. **Datasheet** – JAP6-60-265/3BB. Jan. 2015.

KRON. **Ficha Técnica** – Transformador de Corrente Medição – KR 127. Revisão 4. São Paulo, Brasil: Jan. 2022.

KRON. **Manual do Usuário** – Medidores de Energia Digital – Konect. Revisão 3.0. São Paulo, Brasil: Mai. 2021.

KRON. **Manual do Usuário** – Medidores de Energia e Transdutores Digitais de Grandezas Elétricas – Mult-K 05. Revisão 4.8. São Paulo, Brasil: Out. 2021.

KYOCERA. **Datasheet** – Solar Modules, assembly and maintenance instructions, KD-Serie: KD240GH-4FB2~KD250GH-4FB2. Set. 2013.

MACÊDO, W. N. **Análise do Fator de Dimensionamento do Inversor Aplicado a Sistemas Fotovoltaicos Conectados à Rede.** Tese de Doutorado. USP. São Paulo: 2006.

MANITO, A. R. A. **Desenvolvimento e implantação de um sistema para monitoração do desempenho energético de edificações.** Dissertação de Mestrado. UFPA. Belém, Pará: 2012.

- MARES, F. M. **Avaliação experimental de diferentes modelos matemáticos aplicados na previsão de desempenho de geradores fotovoltaicos**. Dissertação de Mestrado. UFPA, Belém, Pará: 2019.
- MARTÍN, E. C. **Edifícios Fotovoltaicos Conectados a la Red Eléctrica: Caracterización e Análisis**. Tese de Doutorado. Universidad Politécnica de Madrid. Madrid: 1998.
- METEONORM. **Global Meteorological Database**, Versão 7.0. 2014.
- MONTEIRO, C. B. **Bancadas didáticas para a capacitação sobre sistemas fotovoltaicos conectados à rede de baixa tensão**. Trabalho de Conclusão de Curso. UFPA. Belém, Pará: 2019.
- NASA. Power – Data Access Viewer. Disponível em: < <https://power.larc.nasa.gov/data-access-viewer/>>. Acesso em: Jul. 2023.
- NOVUS. **Manual de Instruções** – FieldLogger. Rio Grande do Sul, Brasil: 2021.
- ONSET. **User’s Manual** – 12-Bit Temperature Smart Sensor (S-TMB-M0XX). Doc: 7105-G. 2008.
- ONSET. **User’s Manual** – Silicon Pyronometer Smart Sensor (S-LIB-M003). Doc: 6708-D. 2010.
- OUTBACK POWER. **Owner’s Manual: FLEXmax Series Charge Controllers (FLEXmax 80, FLEXmax 60)**. Version C. Arlington, Washington, USA: jul. 2013.
- PHB Solar. **Datasheet** – 1º Inversor Solar Fotovoltaico Nacional Certificado pelo INMETRO. Concessão 000150/2015. 2015.
- PIRES, J. R. A. **Desenvolvimento de um Sistema de Monitoração de Grandezas Elétricas com a Aplicação em um Sistema Fotovoltaico com Microinversores**. Trabalho de Conclusão de Curso. UFPA. Belém, Pará: 2021.
- RODRIGUES, M. J. S. **Avaliação teórica e experimental de geradores fotovoltaicos sob diferentes condições de sombreamento**. Dissertação de Mestrado. UFPA. Belém, Pará: 2017.
- RODRIGUES NETO, J. A. R.; SILVA, Y. S.; GALHARDO, M. A. B.; MACÊDO, W. N. **Sistemas de Monitoração de Parâmetros Elétricos e Solarimétricos para a Avaliação Operacional de Sistemas Fotovoltaicos Conectados à Rede**. VIII Congresso Brasileiro de Energia Solar. Fortaleza, Ceará: 2020.
- RODRIGUES NETO. **Análise da Potência Elétrica Fornecida por um Sistema Fotovoltaico Conectado à Rede a partir da Comparação entre o seu Modelo Teórico e Medições Realizadas**. Trabalho de Conclusão de Curso. UFPA. Belém, Pará: 2017.
- SÁ, L. F. **Desenvolvimento de um Sistema de Monitoração e Divulgação de um Sistema Fotovoltaico Conectado à Rede de Baixa Tensão**. Trabalho de Conclusão de Curso. UFPA. Belém, Pará: 2015.
- SCHMIDT, H.; JANTSCH, M.; SCHMID, J. **Results of the concerted action on power conditioning and control**. 11th European Photovoltaic Solar Energy Conference. Montreux, Switzerland: 1992.
- SILVA, M. B. **Análise comparativa de sistemas fotovoltaicos conectados à rede instalados em Curitiba com diferentes topologias**. Dissertação de Mestrado. UTFPR. Curitiba, Paraná: 2022.

SILVA, Y. S. **Contribuição energética de sistemas fotovoltaicos conectados à rede na edificação do GEDAE/UFPA**. Trabalho de Conclusão de Curso. UFPA, Belém, Pará: 2019.

SMA America. **Datasheet** – Sunny Boy 1200 / 1700 / 2500 / 3000. Installation Guide – SB1200_3000-DEN110712. Fev. 2011.

SMA America. **Datasheet** – Sunny Boy 2000HF–US/2500HF–US/3000HF–US: Installation Guide – SB20_25_30HFUS-eng-IUS111610, IMUS-SB20-30HFUS, Version 1.0. Denver, Colorado, USA: 2011.

SMA America. **Datasheet** – Sunny Boy 700U: Photovoltaic, Grid-Tied String Inverter. Installation Guide – SB700U-11: SE1104. Grass Valley, California: 2003.

SOLAR EDGE. **Datasheet** – SolarEdge Power Optimizer Module Add-On P300 / P350 / P405 / P500. Jul. 2014.

SOLAR EDGE. **Datasheet** – SolarEdge Single Phase Inverter SE2200 – SE6000. Mai. 2013.

SOLARWORLD. **Datasheet** – Sunmodule SW 245 poly / Version 2.0 and 2.5 Frame, SW-02-5009BP. Jun. 2012.

SOLÍS-ALEMÁN, E. N.; DE LA CASA, J.; ROMERO-FIANCES, I.; SILVA, J. P.; NOFUENTES, G. **A study on the degradation rates and the linearity of the performance decline of various thin film PV technologies**. Solar Energy, 188, 813–824. 2019.

SUNPOWER. **Datasheet** – SPR-220-BLK-I. Document #001-45627. Abr. 2008.

SUZHOU FOBERRIA NEW ENERGY TECHNOLOGY CO. LTD. **Flood Lead Acid Battery Deep Cycle OPzS Tubular Battery For Telecom 2V 200-3000ah**. Disponível em: <https://www.acid-battery.com/china-flood_lead_acid_battery_deep_cycle_opzs_tubular_battery_for_telecom_2v_200_3000ah-14400130.html>. Acesso em: Ago. 2023.

TEIXEIRA JUNIOR, L. R. **Desenvolvimento de um Sistema de Monitoração para Avaliação de Desempenho de Dois Sistemas Fotovoltaicos Conectados à Rede de Diferentes Configurações**. Trabalho de Conclusão de Curso. UFPA. Belém, Pará: 2017.

TELES, M. B. **Avaliação operacionais das diferentes arquiteturas de interligação de geradores fotovoltaicos à rede elétrica**. Dissertação de Mestrado. UFPA. Belém, Pará: 2017.

TETSUYUKI, I.; ATSUSHI M. **Annual degradation rates of recent crystalline silicon photovoltaic modules**. Progress in Photovoltaics: Research and Applications, 25, 953–967. 2017.

TORRES, P. F. **Desenvolvimento e Modelagem de uma Nanorrede de Distribuição em Corrente Contínua em Baixa Tensão com Sistemas de Geração Distribuída**. Dissertação de Mestrado. UFPA. Belém, Pará: 2019.

TORRES, P. F.; PONTES, S. S. N.; JÚNIOR, W. B.; CAVALCANTE, R. L.; MACÊDO, W. N.; GALHARDO, M. A. B.; PINHO, J. T. **Análise da Eficiência de um Microinversor Conectado à Rede Elétrica**. V Congresso Brasileiro de Energia Solar. Recife, Pernambuco: 2014.

TRITEC. **Installation Instructions** – Irradiation Sensor – Spektron 210. 2022.

XANTREX. **Owner's Manual** – Xantrex Grid Tie Solar Inverter. Revision D. Livermore, California, USA: Dec. 2009.

YINGLI SOLAR. **Datasheet** – DS_YGE60Cell-29b_40mm_EU_EN_201211_v02.20. Nov. 2012.

YINGLI SOLAR. **Datasheet** – DS_YL185P-23b-EU-EN-200908-A143-v01. Ago. 2009.

ZILLES, R.; MACÊDO, W. N.; GALHARDO, M. A. B.; DE OLIVEIRA; S. H. F. **Sistemas fotovoltaicos conectados à rede elétrica**. São Paulo-SP: Oficina de Textos, 2012.

ZOU, X.; BIAN, L.; YOUNGHUI, Z.; HAITAO, L. **Performance monitoring and test system for grid-connected photovoltaic systems**. In: 2012 Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference, IEEE, 2012.

APÊNDICE A – Lista completa dos módulos fotovoltaicos, inversores e microinversores registrados como parâmetros no Google Planilhas.

Tabela A.1 – Inversores e microinversores registrados como parâmetros no Google Planilhas.

Inversor	PHB 3000-SS	<i>Sunny Boy</i> 1200	FRONIUS GALVO 1.5-1	GT2.8-NA-240/208 UL-05	M215-60-2LL-SS2	SE2200
P_{nInv}	3000	1200	1500	2800	215	2200
η_{10%} (%)	95,62	85	89,7	88,6	94,5	94,42
η_{50%} (%)	97,37	91,15	95,5	94,7	96,1	97,35
η_{100%} (%)	96,77	89,6	95,9	94,2	95,5	97,47
P_{max}	3000	1200	1500	2800	215	2200
V_{MPPTmáx}	450	320	335	550	36	500
V_{MPPTmín}	125	100	120	195	22	270
V_{máx}	500	400	420	600	48	500
I_{nom}	18	12,6	13,3	11,7	0,9	12
I_{máx}	18	12,6	13,3	11,7	0,9	12

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela A.2 – Módulos fotovoltaicos registrados como parâmetros no Google Planilhas.

Módulo	SW245 (S1)	YL245P-29b (S2)	DA121-C1 (S3)	ALEO S19-240 + YL245P-29b (S4)	ASI100 (S5)	KD250GH-4FB2 (S6)	KD250GH-4FB2 (S7)	KC120-1 + AP120 (S8)	ALEO S19G245 (M1)	KD250GH-4FB2 (M2)	JAP6-60-265/3BB (C1)
P_{mp}	245	245	121	240	100	250	250	120	245	250	265
V_{mp}	30,8	30,2	115,8	30,8	17,5	29,8	29,8	16,9	30,1	29,8	30,96
I_{mp}	7,96	8,11	1,03	7,8	5,71	8,39	8,39	7,1	8,13	8,39	8,56
V_{oc}	37,5	37,8	148,6	36,9	23,8	36,9	36,9	21,5	37,4	36,9	38,14
I_{sc}	8,49	8,63	1,23	8,47	6,79	9,09	9,09	7,45	8,64	9,09	9,1
TNOC	46	46	45	47	49	45	45	47	47	45	45
β (%)	0,37	0,33	0,34	0,34	0,33	0,36	0,36	0,38	0,31	0,36	0,33
α (%)	0,081	0,06	0,08	0,03	0,08	0,06	0,06	0,08	0,04	0,06	0,058
γ (%)	0,45	0,45	0,34	0,48	0,2	0,46	0,46	0,5	0,44	0,46	0,41
Quantidade de módulos em série	10	6	2	8	10	6	6	14	1	1	12
Quantidade de módulos em paralelo	1	1	5	1	1	1	1	2	1	1	1
Número referente a coluna do inversor	1	2	2	3	2	2	2	4	5	5	6

Fonte: Elaborado pelo autor.

APÊNDICE B – Lista de materiais e orçamento para a confecção dos quadros para os SFCR

Ao todo são três quadros elétricos para os SFCR, um Quadro Geral (QGFV) e dois Quadros Parciais (QPFV1 e QPFV2). Os itens empregados nos quadros estão listados na Tabela B1. Alguns dos materiais precisaram ser comprados recentemente e outros já tinham disponíveis no prédio do GEDAE (em destaque na cor vermelha).

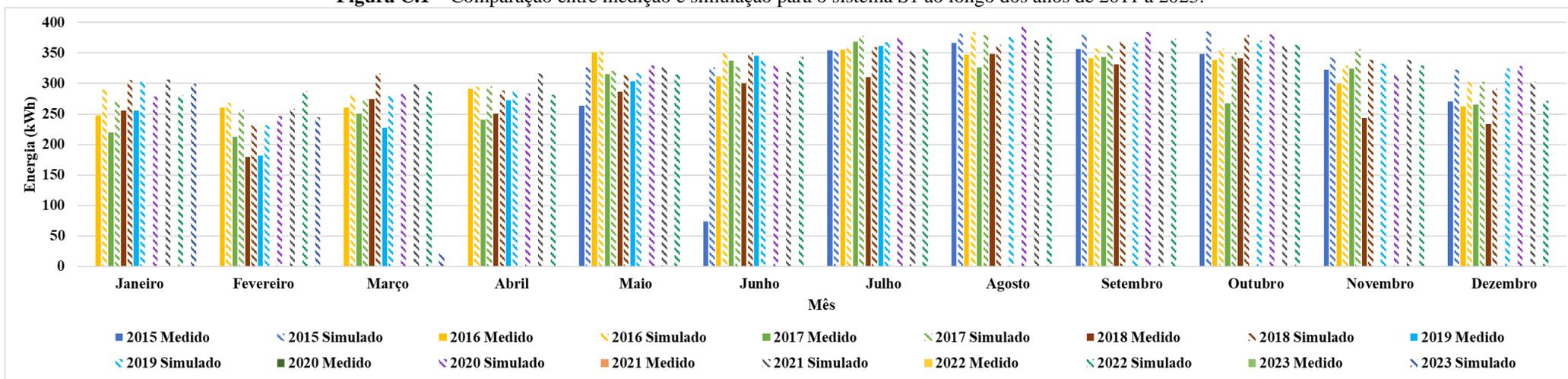
Tabela B.1 – Orçamento dos materiais para confecção dos quadros elétricos.

	Descrição	Quantidade	Preço unit.	Preço Total
QUADRO	Barra de cobre 3/4" x 1/4" (269A)	1	R\$ 92,00	R\$ 92,00
	Barra de cobre 1/2" x 1/4" (179A)	1	R\$ 144,90	R\$ 144,90
	Barra de cobre 5/8" x 1/8" (122A)	1	R\$ 92,00	R\$ 92,00
	Barramento para 12 circuitos 3/8" x 1/8" (73A)	1	R\$ 57,44	R\$ 57,44
	2m de Canaleta vazada 50mm x 50mm	2	R\$ 62,58	R\$ 125,16
	Terminal Elétrico Olhal de 16mm	4	R\$ 4,55	R\$ 18,22
	Terminal Elétrico Olhal de 25mm	7	R\$ 5,07	R\$ 35,52
	Terminal Elétrico Olhal de 35mm	5	R\$ 4,28	R\$ 24,12
	Terminal Elétrico Olhal de 70mm	3	R\$ 8,36	R\$ 25,09
	Terminal de pressão simples 25mm	3	R\$ 4,80	R\$ 14,40
	Terminal de pressão simples 35mm	3	R\$ 4,84	R\$ 14,52
	Terminal de pressão simples 70mm	3	R\$ 5,87	R\$ 17,61
	Disjuntor termomagnético CAIXA MOLDADA 3P-225 A	1	R\$ 1.034,87	R\$ 1.034,87
	Disjuntor termomagnético DIN 2P-6 A Schneider	2	R\$ 68,77	R\$ 137,54
	Disjuntor termomagnético DIN 2P-10 A Schneider	5	R\$ 31,86	R\$ 159,30
	Disjuntor termomagnético DIN 2P-16 A Schneider	3	R\$ 32,28	R\$ 96,84
	Disjuntor termomagnético DIN 3P-100 A Schneider	2	R\$ 162,46	R\$ 324,92
	DPS Classe I 275Vca 45kA	4	R\$ 53,90	R\$ 215,60
	kit 10 peças de Isoladores 30x30x1/4 Sibratec	3	R\$ 133,80	R\$ 401,40
	Quadro Comando 60x50x25 cm	3	R\$ 340,61	R\$ 1.021,83
2m de Trilho DIN	1	R\$ 69,19	R\$ 69,19	
MEDIÇÃO	Multimedidor Mult-K 05 Kron	3	R\$ 1.206,12	R\$ 3.618,37
	Multimedidor KONECT Kron	1	R\$ 400,00	R\$ 400,00
	kit 3 peças de TC tipo Janela KR-127 150/5A Kron	1	R\$ 152,00	R\$ 152,00
	kit 3 peças de TC tipo Janela KR-127 150/5A Kron	1	R\$ 152,00	R\$ 152,00
	TC tipo Janela BDX-74A 400/5A Isolet	3	R\$ 453,05	R\$ 1.359,15
	TOTAL			R\$ 9.643,31

Fonte: Elaborado pelo autor.

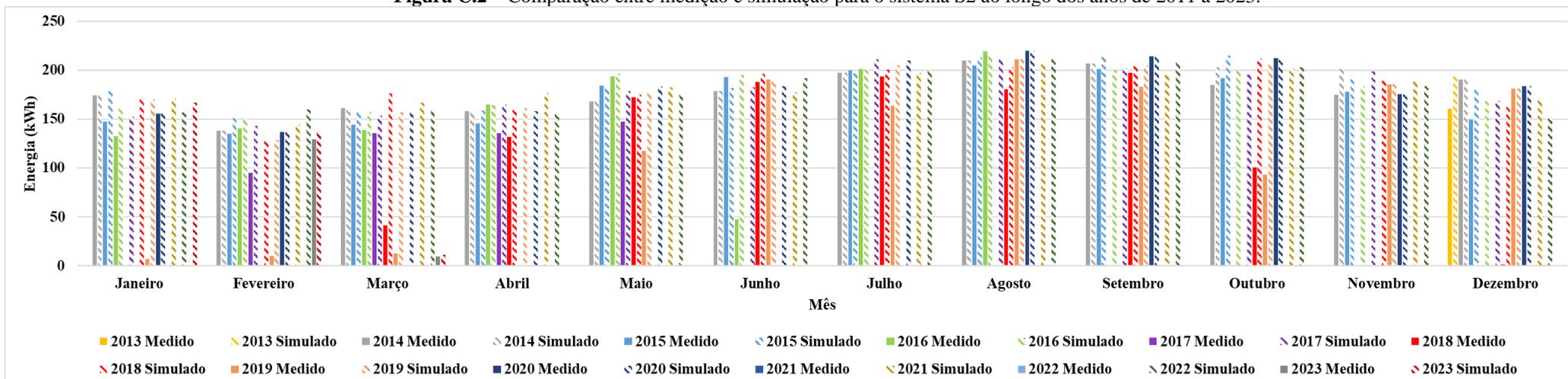
APÊNDICE C – Comparação entre as medições dos SFCR em conjunto com os dados de simulação e as simulações da produção de energia elétrica dos SFCR desde suas respectivas datas de implementações

Figura C.1 – Comparação entre medição e simulação para o sistema S1 ao longo dos anos de 2011 a 2023.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura C.2 – Comparação entre medição e simulação para o sistema S2 ao longo dos anos de 2011 a 2023.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura C.3 – Comparação entre medição e simulação para o sistema S3 ao longo dos anos de 2011 a 2023.

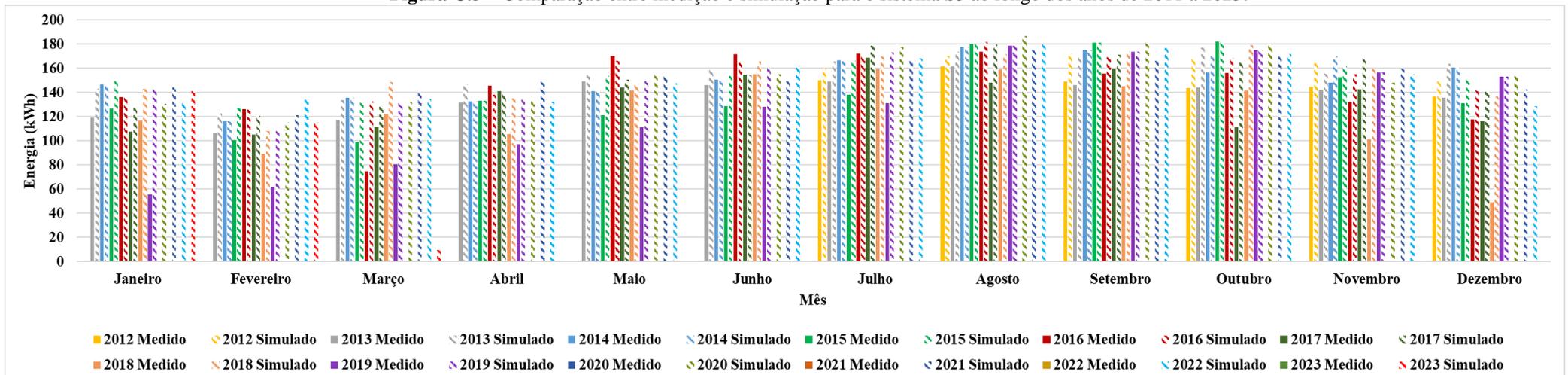


Figura C.4 – Comparação entre medição e simulação para o sistema S4 ao longo dos anos de 2011 a 2023.

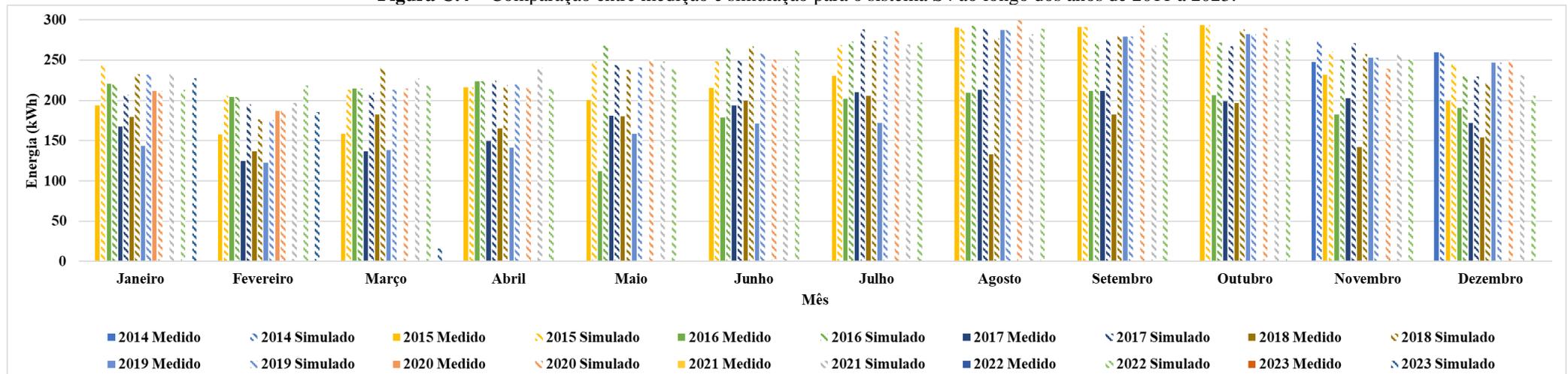


Figura C.5 – Comparação entre medição e simulação para o sistema S5 ao longo dos anos de 2011 a 2023.

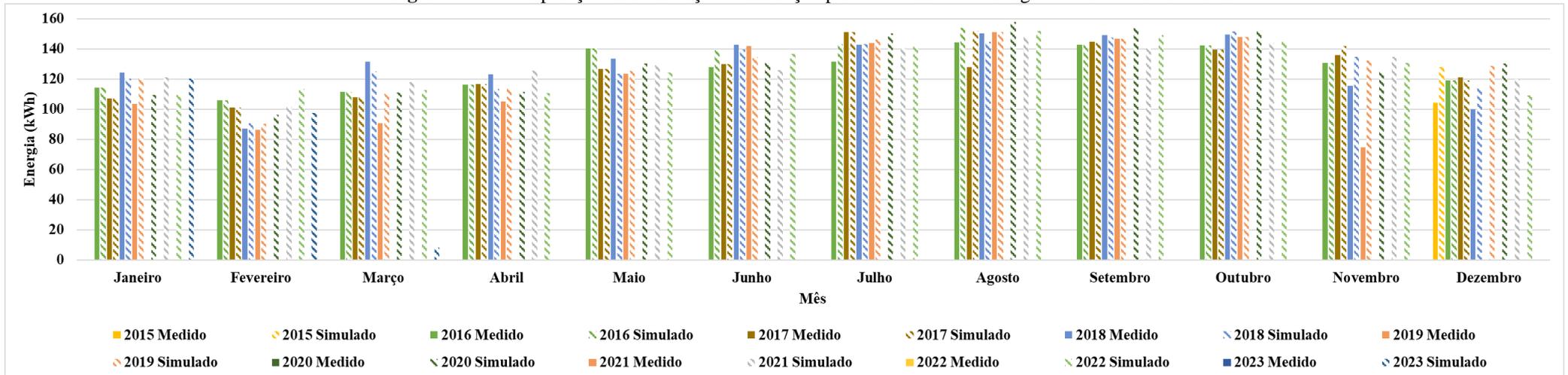


Figura C.6 – Comparação entre medição e simulação para o sistema S6 ao longo dos anos de 2011 a 2023.

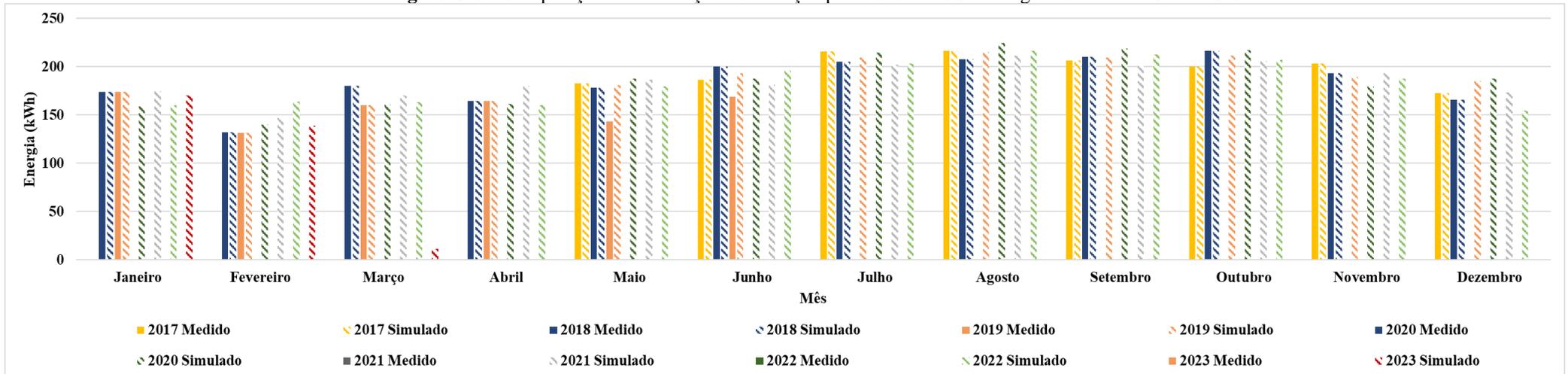


Figura C.7 – Comparação entre medição e simulação para o sistema S7 ao longo dos anos de 2011 a 2023.

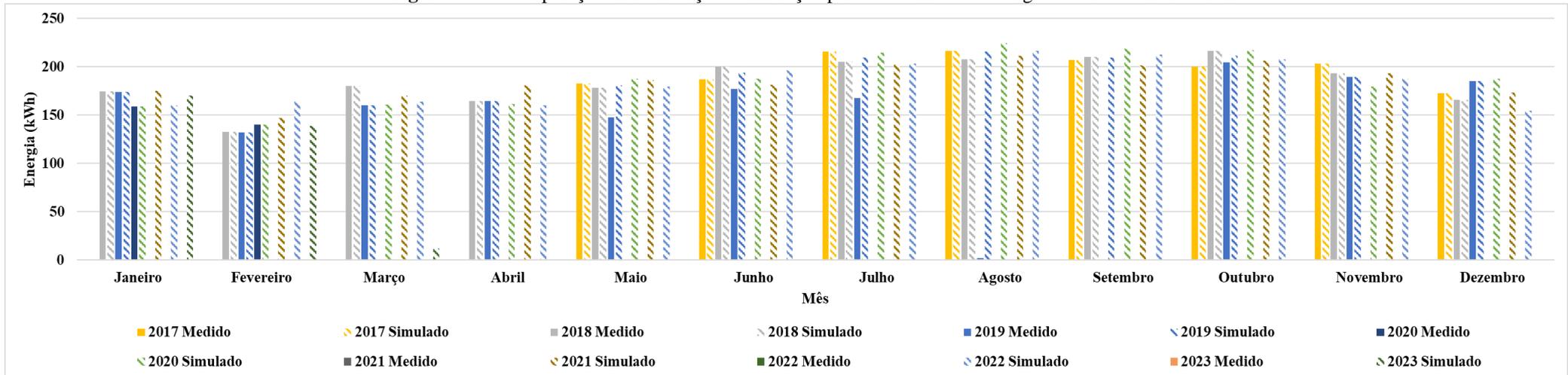


Figura C.8 – Comparação entre medição e simulação para o sistema S8 ao longo dos anos de 2011 a 2023.

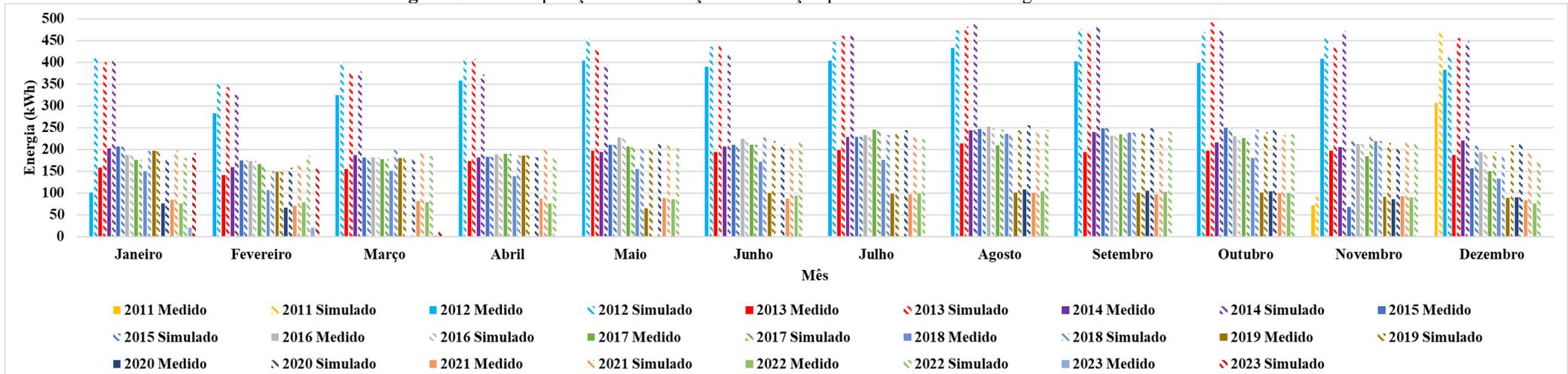
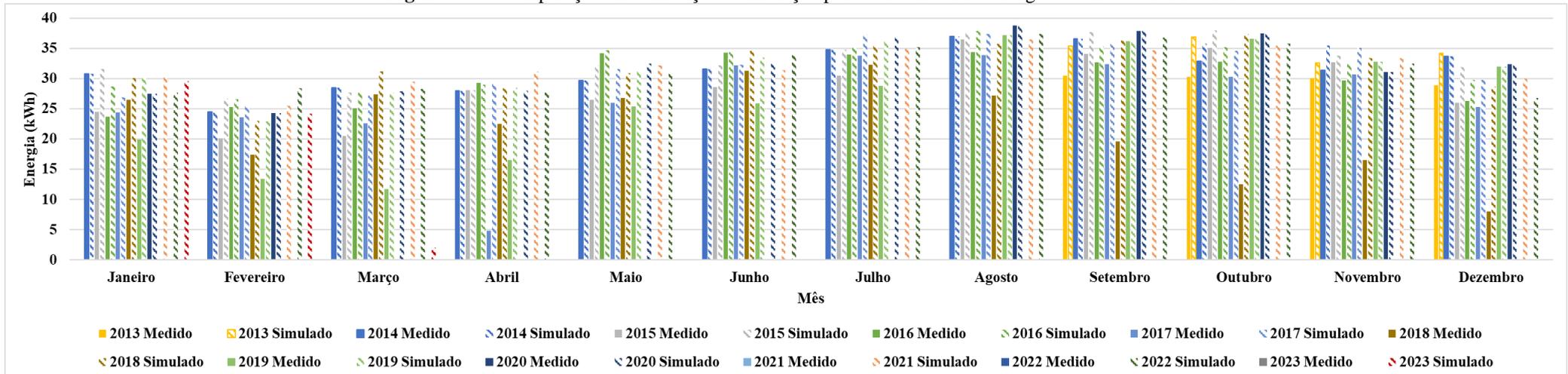
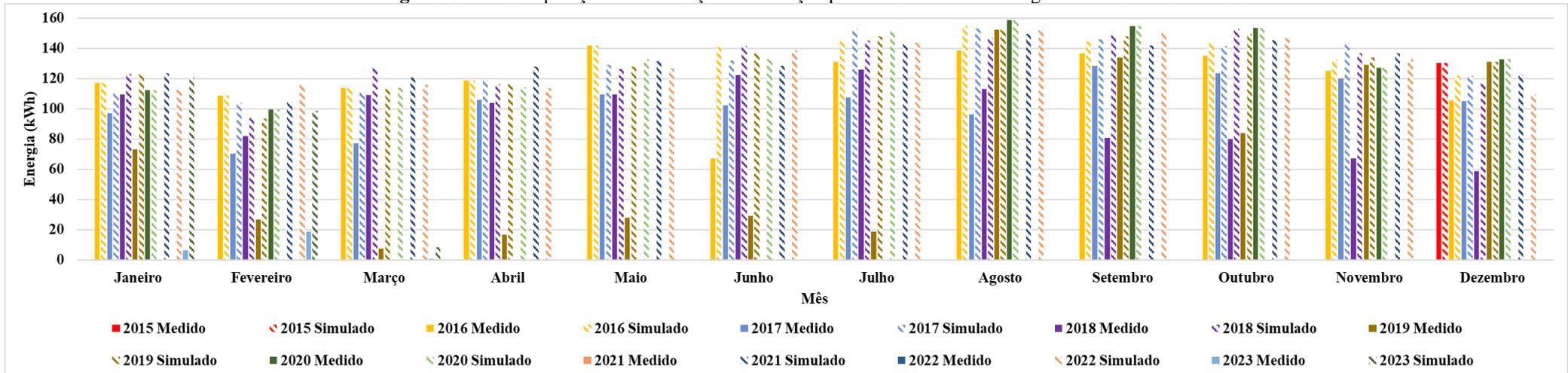


Figura C.9 – Comparação entre medição e simulação para o sistema M1 ao longo dos anos de 2011 a 2023.



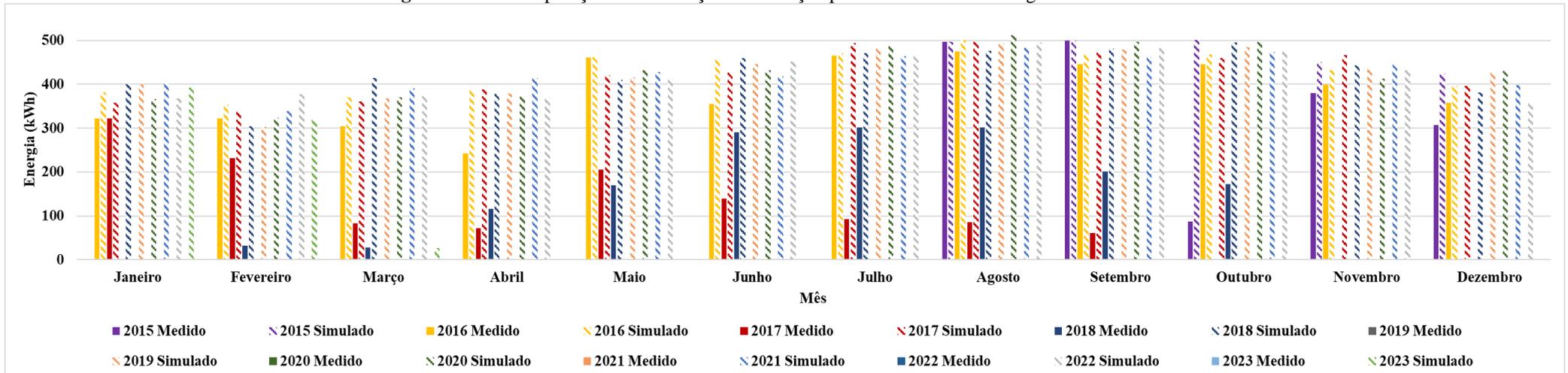
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura C.10 – Comparação entre medição e simulação para o sistema M2 ao longo dos anos de 2011 a 2023.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura C.11 – Comparação entre medição e simulação para o sistema C1 ao longo dos anos de 2011 a 2023.



Fonte: Elaborado pelo autor.