

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

QUALIDADE DA ENERGIA ELÉTRICA DE UMA NANORREDE DE DISTRIBUIÇÃO
EM CORRENTE CONTÍNUA SOB DIFERENTES CONDIÇÕES OPERACIONAIS

ARTHUR CORREA DA FONSECA

DM 06/23

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

ARTHUR CORREA DA FONSECA

QUALIDADE DA ENERGIA ELÉTRICA DE UMA NANORREDE DE DISTRIBUIÇÃO
EM CORRENTE CONTÍNUA SOB DIFERENTES CONDIÇÕES OPERACIONAIS

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)

F676q Fonseca, Arthur Correa da Fonseca.
Qualidade da Energia Elétrica de uma Nanorrede de
Distribuição em Corrente Contínua Sob Diferentes Condições
Operacionais / Arthur Correa da Fonseca Fonseca. — 2023.
179 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. Corrente contínua. 2. Nanorredes. 3. Qualidade de
energia. 4. IEEE Std 1159. I. Título.

CDD 621.47

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

**“QUALIDADE DA ENERGIA ELÉTRICA DE UMA NANORREDE DE
DISTRIBUIÇÃO EM CORRENTE CONTÍNUA SOB DIFERENTES CONDIÇÕES
OPERACIONAIS”**

AUTOR: ARTHUR CORREA DA FONSECA

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: 17/03/2023

BANCA EXAMINADORA:

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

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

Dr. André Ricardo Mocelin
(Avaliador Externo – IEE/USP)

Prof. Dr. João Tavares Pinho
(Avaliador Externo – IEE/USP)

VISTO:

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

AGRADECIMENTOS

Agradeço inicialmente a Deus, por permitir que meus caminhos fossem trilhados, até o momento, com dedicação, respeito e sabedoria.

Agradeço à minha mãe, Márcia Maria Corrêa da Fonseca e ao meu pai, José Raimundo da Fonseca, por sempre proporcionarem suporte, em todas as instâncias, necessário para realização das minhas conquistas.

À minha irmã, Ana Cecília Corrêa da Fonseca, avó, Cecília de Nazaré da Fonseca, e irmãos que a vida proporcionou, Igor Fonseca Gomes e Elton Alex da Silva, os quais são fonte de inspiração e determinação.

À minha companheira Camila Santana da Silva, por sempre me apoiar e incentivar em todos os momentos.

Agradeço ao professor orientador, Dr. Marcos André Barros Galhardo e ao Prof. Dr. Wilson Negrão Macêdo, por toda convivência, ensinamentos e o auxílio durante a realização deste trabalho.

Aos meus colegas do GEDAE/UFPA, Victor Alves, Yan Silva, Wesley Monteiro, Pedro Torres, Orlando Silva, Ivan Parijós, pela colaboração direta ou indireta durante a realização deste trabalho.

Por fim, agradeço a todos que contribuíram direta ou indiretamente para a realização deste sonho.

RESUMO

Este trabalho apresenta um estudo experimental da qualidade da energia elétrica em uma Nanorrede de Distribuição em Corrente Contínua (NDCC) implantada na área de testes do prédio do Grupo de Estudos e Desenvolvimento de Alternativas Energéticas (GEDAE) da Universidade Federal do Pará (UFPA), campus Guamá, cidade de Belém-Pará. Os eventos de qualidade de energia são identificados por meio de ensaios realizados na NDCC e classificados com base na recomendação do IEEE (*Institute of Electrical and Electronic Engineers*) – *Recommendation Practice for Monitoring Electric Power Quality* - Std 1159, de 2019. Apresentam-se as características da NDCC e os bancos de cargas submetidos aos ensaios, utilizando cargas comerciais disponíveis no mercado, bem como a instrumentação utilizada para medições e aquisições de dados elétricos e ambientais. Entre os eventos de qualidade da energia elétrica identificados, avaliam-se as variações de longa duração, eventos transitórios durante o acionamento de conversores c.c.-c.c., elevações e afundamentos de tensão com o acionamento e saída de cargas e a presença de ondulações (*ripple*) na tensão ao longo da NDCC. Como estudo de caso adicional, avaliam-se ainda eventos de interrupção em uma NDCC localizada na Ilha das Onças, no município de Barcarena. Assim, diante dos ensaios e medições realizados, evidenciam-se eventos de qualidade de energia elétrica presentes na NDCC suprida por geradores fotovoltaicos e bancos de baterias dispersos, destacando-se a influência desses eventos em diferentes cargas conectadas ao longo da rede de distribuição e para diferentes condições operacionais.

Palavras-chave: Corrente contínua; Nanorredes; Qualidade de energia; IEEE Std 1159.

ABSTRACT

This work presents an experimental study of electric power quality in a Direct Current Distribution Nanogrid (DCDN) implemented in the testing area of the Grupo de Estudos e Desenvolvimento de Alternativas Energéticas (GEDAE) building at the Universidade Federal do Pará (UFPA), Guamá campus, city of Belém-Pará. Power quality events are identified through tests carried out on the DCDN and classified based on the recommendation of the Institute of Electrical and Electronic Engineers (IEEE) - Recommendation Practice for Monitoring Electric Power Quality - Std 1159, 2019. The characteristics of the DCDN and the load banks subjected to the tests are presented, using commercial loads available on the market, as well as the instrumentation used for electrical and environmental measurements and data acquisition. Among the identified power quality events, long-term variations, transient events during the start operation of DC-DC converters, voltage elevations and sags with the operation and output of loads, and voltage ripple along the DCDN are evaluated. As an additional case study, interruption events are also evaluated in a DCDN located in Onças Island, in the municipality of Barcarena. Thus, in view of the tests and measurements carried out, power quality events present in the DCDN supplied by dispersed photovoltaic generators and battery banks are evidenced, highlighting the influence of these events on different loads connected along the distribution network and under different operational conditions.

Palavras-chave: Direct Current; Nanogrids; Power Quality; IEEE Std 1159.

LISTA DE FIGURAS

CAPÍTULO 1

Figura 1.1 - Padrões e aplicação para distribuição de energia elétrica em corrente contínua. ...	5
Figura 1.2 - Faixa de operação de equipamentos c.c. conforme a norma EN 50155.	13
Figura 1.3 - Forma de onda de tensão caracterizada pelo evento de flutuação de tensão.	13
Figura 1.4 - Forma de onda de tensão sob evento de ondulação de tensão.	15
Figura 1.5 - Corrente de <i>inrush</i> na entrada do conversor c.c.	16

CAPÍTULO 2

Figura 2.1 - Diagrama unifilar da NDCC.	24
Figura 2.2 - Controlador de carga EPEVER vista frontal (a) e vista diagonal (b).	25
Figura 2.3 - <i>Datalogger</i> eLOG01 com componentes auxiliares.	27
Figura 2.4 - <i>Datalogger</i> instalado na área de testes do GEDAE/UFPA (a) e modelo FieldLogger (b).	28
Figura 2.5 - Sensor de irradiância instalado na área de testes do GEDAE/UFPA (a) e modelo Spektron 210 (b).	29
Figura 2.6 - Sensor de temperatura no banco de baterias (a), ambiente (b), parte posterior o módulo fotovoltaico (c) e ilustrativo (d).	31
Figura 2.7 - Disposição de cada GFV na área de testes do GEDAE/UFPA.	33
Figura 2.8 - Disposição dos bancos de baterias na área de testes do GEDAE/UFPA.	34
Figura 2.9 - Diagrama unifilar do BC1.	36
Figura 2.10 - Painel LED vista frontal (a) e costas (b).	37
Figura 2.11 - Configuração dos LEDs do painel LED do fabricante Blumenau.	38
Figura 2.12 - <i>Driver</i> de fábrica do painel LED circuito (a) e capa protetora (b).	38
Figura 2.13 - Conversores c.c.-c.c. descentralizado (a) e centralizado (b).	39
Figura 2.14 - Lâmpada LED do fabricante Ourolux.	40
Figura 2.15 - Configuração dos LEDs da lâmpada LED do fabricante Ourolux.	41
Figura 2.16 - Lâmpada LED do fabricante G-Light.	42
Figura 2.17 - Configuração dos LEDs da lâmpada LED do fabricante G-Light.	42
Figura 2.18 - Lâmpada LED do fabricante City Lumi.	43
Figura 2.19 - Configuração dos LEDs da lâmpada LED do fabricante City Lumi.	44
Figura 2.20 - Carga resistiva de alta potência.	44
Figura 2.21 - Inversor autônomo de onda senoidal pura, vista frontal (a) e perspectiva (b). ...	45
Figura 2.22 - Cargas c.a. lâmpada fluorescente compacta (a), TV (b), <i>datalogger</i> (c) e conversor digital (d).	46
Figura 2.23 - Condutor de alumínio multiplexado da NDCC.	47
Figura 2.24 - Localização da NDCC na área de testes do GEDAE/UFPA.	48
Figura 2.25 - Esquema da NDCC, com a identificação dos pontos de conexão de cada SGA e BC na rede.	49
Figura 2.26 - Centro de conexões.	50

CAPÍTULO 3

Figura 3.1 - Protótipo Arduino.	55
Figura 3.2 - Forma de onda de tensão e corrente no barramento da carga, com a indicação do valor RMS na parte superior considerando a presença das componentes c.a. e c.c.	57
Figura 3.3 - Forma de onda obtida no terminal da carga do controlador.	57

Figura 3.4 - Forma de onda de tensão e corrente no barramento da carga, com a indicação do valor RMS na parte superior considerando a presença das componentes c.a. e c.c.	60
Figura 3.5 - Forma de onda registrada pelo controlador de carga no barramento da carga.	60
Figura 3.6 - Ferramenta para visualização operacional da NDCC do GEDAE/UFPA.	61

CAPÍTULO 4

Figura 4.1 - Período da realização dos ensaios.....	63
Figura 4.2 - Parâmetros ambientais do ensaio I.	65
Figura 4.3 - Tensão da NDCC próxima à saída de cada SGA com a indicação (linha tracejada) dos valores de tensão em 21,6 V (0,9 p.u.), 24 V (1 p.u.) e 26,4 V (1,1 p.u.) do ensaio I.	66
Figura 4.4 - Potência fornecida de cada GFV do ensaio I.	67
Figura 4.5 - Formas de onda de tensão nos pontos de conexão das cargas e corrente no BC3, com a indicação do valor RMS na parte superior considerando a presença: (a) das componentes c.a. e c.c., (b) somente da componente c.c. e (c) somente da componente c.a.	68
Figura 4.6 - Formas de onda de tensão nos pontos de conexão das cargas e corrente no BC1, com a indicação do valor RMS na parte superior considerando a presença: (a) das componentes c.a. e c.c., (b) somente da componente c.c. e (c) somente da componente c.a.	68
Figura 4.7 - Espectro de amplitude da corrente para o BC3.....	68
Figura 4.8 - Formas de onda de tensão nos pontos de conexão das cargas e corrente no BC3, com a indicação do valor RMS na parte superior considerando a presença: (a) das componentes c.a. e c.c., (b) somente da componente c.c. e (c) somente da componente c.a.	69
Figura 4.9 - Formas de onda de tensão nos pontos de conexão das cargas e corrente no BC1, com a indicação do valor RMS na parte superior considerando a presença: (a) das componentes c.a. e c.c., (b) somente da componente c.c. e (c) somente da componente c.a.	69
Figura 4.10 - Espectro de amplitude da corrente para o BC3.....	70
Figura 4.11 - Formas de onda de tensão nos pontos de conexão das cargas e corrente no BC3, com a indicação do valor RMS na parte superior considerando a presença: (a) das componentes c.a. e c.c., (b) somente da componente c.c. e (c) somente da componente c.a.	70
Figura 4.12 - Formas de onda de tensão nos pontos de conexão das cargas e corrente no BC1, com a indicação do valor RMS na parte superior considerando a presença: (a) das componentes c.a. e c.c., (b) somente da componente c.c. e (c) somente da componente c.a.	71
Figura 4.13 - Espectro de amplitude da tensão para o BC3 (a), BC1 (b), BC2 (c) e para corrente no BC3 (d) e BC1 (e).....	71
Figura 4.14 - Formas de onda de tensão nos pontos de conexão das cargas e corrente no BC3, com a indicação do valor RMS na parte superior considerando a presença: (a) das componentes c.a. e c.c., (b) somente da componente c.c. e (c) somente da componente c.a.	72
Figura 4.15 - Formas de onda de tensão nos pontos de conexão das cargas e corrente no BC1, com a indicação do valor RMS na parte superior considerando a presença: (a) das componentes c.a. e c.c., (b) somente da componente c.c. e (c) somente da componente c.a.	72
Figura 4.16 - Espectro de amplitude da tensão para o BC3 (a), BC1 (b), BC2 (c) e para corrente no BC3 (d) e BC1 (e).....	72
Figura 4.17 - Temperatura na base da lâmpada do BC1 (carga C2-1).	73
Figura 4.18 - Cargas C2-1 do BC1 após avaria.	74
Figura 4.19 - Forma de onda de tensão e corrente durante o acionamento, operação e saída do BC2.....	75
Figura 4.20 - Evento transitório oscilatório durante acionamento da carga C1-1 do BC1 desde o primeiro acionamento (a), os seguintes (b), (c), (d), (e) até a última carga acionada (f).....	75

Figura 4.21 - Formas de onda de tensão nos pontos de conexão das cargas e corrente no BC3, com a indicação do valor RMS na parte superior considerando a presença: (a) das componentes c.a. e c.c., (b) somente da componente c.c. e (c) somente da componente c.a.	76
Figura 4.22 - Formas de onda de tensão nos pontos de conexão das cargas e corrente no BC1, com a indicação do valor RMS na parte superior considerando a presença: (a) das componentes c.a. e c.c., (b) somente da componente c.c. e (c) somente da componente c.a.	77
Figura 4.23 - Espectro de amplitude da tensão para o BC3 (a), BC1 (b), BC2 (c) e para corrente no BC3 (d) e BC1 (e).....	77
Figura 4.24 - Valor de tensão eficaz nos pontos de conexão das cargas do ensaio I.	80
Figura 4.25 - Parâmetros ambientais do ensaio II.	81
Figura 4.26 - Tensão da NDCC próxima à saída de cada SGA com a indicação (linha tracejada) dos valores de tensão em 21,6 V (0,9 p.u.), 24 V (1 p.u.) e 26,4 V (1,1 p.u.) do ensaio II.....	82
Figura 4.27 - Potência fornecida de cada GFV do ensaio II.....	82
Figura 4.28 - Formas de onda de tensão nos pontos de conexão das cargas e corrente no BC3, com a indicação do valor RMS na parte superior considerando a presença: (a) das componentes c.a. e c.c., (b) somente da componente c.c. e (c) somente da componente c.a.	83
Figura 4.29 - Formas de onda de tensão nos pontos de conexão das cargas e corrente no BC1, com a indicação do valor RMS na parte superior considerando a presença: (a) das componentes c.a. e c.c., (b) somente da componente c.c. e (c) somente da componente c.a.	83
Figura 4.30 - Espectro de amplitude da corrente para o BC3.....	84
Figura 4.31 - Formas de onda de tensão nos pontos de conexão das cargas e corrente no BC3, com a indicação do valor RMS na parte superior considerando a presença: (a) das componentes c.a. e c.c., (b) somente da componente c.c. e (c) somente da componente c.a.	84
Figura 4.32 - Formas de onda de tensão nos pontos de conexão das cargas e corrente no BC1, com a indicação do valor RMS na parte superior considerando a presença: (a) das componentes c.a. e c.c., (b) somente da componente c.c. e (c) somente da componente c.a.	85
Figura 4.33 - Espectro de amplitude da tensão e corrente para o BC3.	85
Figura 4.34 - Formas de onda de tensão nos pontos de conexão das cargas e corrente no BC3, com a indicação do valor RMS na parte superior considerando a presença: (a) das componentes c.a. e c.c., (b) somente da componente c.c. e (c) somente da componente c.a.	86
Figura 4.35 - Forma de onda de tensão e corrente com valor de corrente no BC1, com a indicação do valor RMS na parte superior considerando a presença: (a) das componentes c.a. e c.c., (b) somente da componente c.c. e (c) somente da componente c.a.	86
Figura 4.36 - Espectro de amplitude da tensão para o BC3 (a), BC1 (b), BC2 (c) e para corrente no BC3 (d) e BC1 (e).....	86
Figura 4.37 - Evento transitório oscilatório durante acionamento da carga C2-2 do BC1 desde o primeiro acionamento (a), os seguintes (b), (c), (d), (e), (f), (g) até a última carga acionada (h).	87
Figura 4.38 - Temperatura na base da lâmpada, carga C2-2 do BC1.....	88
Figura 4.39 - Formas de onda de tensão nos pontos de conexão das cargas e corrente no BC3, com a indicação do valor RMS na parte superior considerando a presença: (a) das componentes c.a. e c.c., (b) somente da componente c.c. e (c) somente da componente c.a.	88
Figura 4.40 - Formas de onda de tensão nos pontos de conexão das cargas e corrente no BC1, com a indicação do valor RMS na parte superior considerando a presença: (a) das componentes c.a. e c.c., (b) somente da componente c.c. e (c) somente da componente c.a.	89
Figura 4.41 - Espectro de amplitude da tensão para o BC3 (a), BC1 (b), BC2 (c) e para corrente no BC3 (d) e BC1 (e).....	89
Figura 4.42 - Formas de onda de tensão nos pontos de conexão das cargas e corrente no BC3, com a indicação do valor RMS na parte superior considerando a presença: (a) das componentes c.a. e c.c., (b) somente da componente c.c. e (c) somente da componente c.a.	90

Figura 4.43 - Formas de onda de tensão nos pontos de conexão das cargas e corrente no BC1, com a indicação do valor RMS na parte superior considerando a presença: (a) das componentes c.a. e c.c., (b) somente da componente c.c. e (c) somente da componente c.a.	90
Figura 4.44 - Espectro de amplitude da tensão para o BC3 (a), BC1 (b), BC2 (c) e para corrente no BC3 (d) e BC1 (e).....	91
Figura 4.45 - Valor de tensão eficaz nos pontos de conexão das cargas do ensaio II.	93
Figura 4.46 - Parâmetros ambientais do ensaio III.	94
Figura 4.47 - Tensão da NDCC próxima à saída de cada SGA com a indicação (linha tracejada) dos valores de tensão em 21,6 V (0,9 p.u.), 24 V (1 p.u.) e 26,4 V (1,1 p.u.) do ensaio III.....	95
Figura 4.48 - Irradiância global e potência fornecida por cada GFV no ensaio III.....	96
Figura 4.49 - Formas de onda de tensão nos pontos de conexão das cargas e corrente no BC3, com a indicação do valor RMS na parte superior considerando a presença: (a) das componentes c.a. e c.c., (b) somente da componente c.c. e (c) somente da componente c.a.	96
Figura 4.50 - Formas de onda de tensão nos pontos de conexão das cargas e corrente no BC1, com a indicação do valor RMS na parte superior considerando a presença: (a) das componentes c.a. e c.c., (b) somente da componente c.c. e (c) somente da componente c.a.	97
Figura 4.51 - Espectro de amplitude da corrente para o BC3.....	97
Figura 4.52 - Formas de onda de tensão nos pontos de conexão das cargas e corrente no BC3, com a indicação do valor RMS na parte superior considerando a presença: (a) das componentes c.a. e c.c., (b) somente da componente c.c. e (c) somente da componente c.a.	98
Figura 4.53 - Formas de onda de tensão nos pontos de conexão das cargas e corrente no BC1, com a indicação do valor RMS na parte superior considerando a presença: (a) das componentes c.a. e c.c., (b) somente da componente c.c. e (c) somente da componente c.a.	98
Figura 4.54 - Espectro de amplitude da tensão e corrente para o BC3.	98
Figura 4.55 - Formas de onda de tensão nos pontos de conexão das cargas e corrente no BC3, com a indicação do valor RMS na parte superior considerando a presença: (a) das componentes c.a. e c.c., (b) somente da componente c.c. e (c) somente da componente c.a.	99
Figura 4.56 - Formas de onda de tensão nos pontos de conexão das cargas e corrente no BC1, com a indicação do valor RMS na parte superior considerando a presença: (a) das componentes c.a. e c.c., (b) somente da componente c.c. e (c) somente da componente c.a.	99
Figura 4.57 - Espectro de amplitude da tensão para o BC3 (a), BC1 (b), BC2 (c) e para corrente no BC3 (d) e BC1 (e).....	99
Figura 4.58 - Formas de onda de tensão nos pontos de conexão das cargas e corrente no BC3, com a indicação do valor RMS na parte superior considerando a presença: (a) das componentes c.a. e c.c., (b) somente da componente c.c. e (c) somente da componente c.a.	100
Figura 4.59 - Espectro de amplitude da tensão para o BC3 (a), BC1 (b), BC2 (c) e para corrente no BC3 (d).	100
Figura 4.60 - Carga C2-3 do BC1 após avaria.	101
Figura 4.61 - Formas de onda de tensão nos pontos de conexão das cargas e corrente no BC3, com a indicação do valor RMS na parte superior considerando a presença: (a) das componentes c.a. e c.c., (b) somente da componente c.c. e (c) somente da componente c.a.	102
Figura 4.62 - Formas de onda de tensão nos pontos de conexão das cargas e corrente no BC1, com a indicação do valor RMS na parte superior considerando a presença: (a) das componentes c.a. e c.c., (b) somente da componente c.c. e (c) somente da componente c.a.	102
Figura 4.63 - Espectro de amplitude da tensão para o BC3 (a), BC1 (b), BC2 (c) e para corrente no BC3 (d) e BC1 (e).....	103
Figura 4.64 - Valor de tensão eficaz nos pontos de conexão das cargas do ensaio III.....	105
Figura 4.65 - Parâmetros ambientais do ensaio IV.....	106
Figura 4.66 - Tensão da NDCC próxima à saída de cada SGA com a indicação (linha tracejada) dos valores de tensão em 21,6 V (0,9 p.u.), 24 V (1 p.u.) e 26,4 V (1,1 p.u.) do ensaio IV. .	107

Figura 4.67 - Potência fornecida de cada GFV do ensaio IV.	107
Figura 4.68 - Formas de onda de tensão nos pontos de conexão das cargas e corrente no BC3, com a indicação do valor RMS na parte superior considerando a presença: (a) das componentes c.a. e c.c., (b) somente da componente c.c. e (c) somente da componente c.a.	108
Figura 4.69 - Formas de onda de tensão nos pontos de conexão das cargas e corrente no BC1, com a indicação do valor RMS na parte superior considerando a presença: (a) das componentes c.a. e c.c., (b) somente da componente c.c. e (c) somente da componente c.a.	109
Figura 4.70 - Espectro de amplitude de corrente para o BC3.....	109
Figura 4.71 - Formas de onda de tensão nos pontos de conexão das cargas e corrente no BC3, com a indicação do valor RMS na parte superior considerando a presença: (a) das componentes c.a. e c.c., (b) somente da componente c.c. e (c) somente da componente c.a.	110
Figura 4.72 - Formas de onda de tensão nos pontos de conexão das cargas e corrente no BC1, com a indicação do valor RMS na parte superior considerando a presença: (a) das componentes c.a. e c.c., (b) somente da componente c.c. e (c) somente da componente c.a.	110
Figura 4.73 – Espectro de amplitude da tensão e corrente para o BC3.	110
Figura 4.74 - Formas de onda de tensão nos pontos de conexão das cargas e corrente no BC3, com a indicação do valor RMS na parte superior considerando a presença: (a) das componentes c.a. e c.c., (b) somente da componente c.c. e (c) somente da componente c.a.	111
Figura 4.75 - Formas de onda de tensão nos pontos de conexão das cargas e corrente no BC1, com a indicação do valor RMS na parte superior considerando a presença: (a) das componentes c.a. e c.c., (b) somente da componente c.c. e (c) somente da componente c.a.	111
Figura 4.76 - Espectro de amplitude da tensão para o BC3 (a), BC1 (b), BC2 (c) e para corrente no BC3 (d).	111
Figura 4.77 - Formas de onda de tensão nos pontos de conexão das cargas e corrente no BC3, com a indicação do valor RMS na parte superior considerando a presença: (a) das componentes c.a. e c.c., (b) somente da componente c.c. e (c) somente da componente c.a.	112
Figura 4.78 - Formas de onda de tensão nos pontos de conexão das cargas e corrente no BC1, com a indicação do valor RMS na parte superior considerando a presença: (a) das componentes c.a. e c.c., (b) somente da componente c.c. e (c) somente da componente c.a.	113
Figura 4.79 - Espectro de amplitude da tensão para o BC3 (a), BC1 (b), BC2 (c) e para corrente no BC3 (d) e BC1 (e).....	113
Figura 4.80 - Evento transitório oscilatório durante acionamento da carga C1-2 do BC1.....	114
Figura 4.81 - Formas de onda de tensão nos pontos de conexão das cargas e corrente no BC3, com a indicação do valor RMS na parte superior considerando a presença: (a) das componentes c.a. e c.c., (b) somente da componente c.c. e (c) somente da componente c.a.	114
Figura 4.82 - Formas de onda de tensão nos pontos de conexão das cargas e corrente no BC1, com a indicação do valor RMS na parte superior considerando a presença: (a) das componentes c.a. e c.c., (b) somente da componente c.c. e (c) somente da componente c.a.	115
Figura 4.83 - Espectro de amplitude da tensão para o BC3 (a), BC1 (b), BC2 (c) e para corrente no BC3 (d).	115
Figura 4.84 - Valor de tensão eficaz nos pontos de conexão das cargas do ensaio IV.	118

CAPÍTULO 5

Figura 5.1 - Localização da NDCC.	122
Figura 5.2 - Estrutura da NDCC na Ilha das Onças.....	125
Figura 5.3 - Tensão na saída do controlador de cada SGA para a NDCC, durante o período de operação em análise.....	126
Figura 5.4 - Tensão na saída do controlador de cada SGA para a NDCC, nos dias de 22/04/2022 e 23/04/2022.	127

Figura 5.5 - Potência fornecida por cada subsistema ao suprimento da NDCC.....	128
Figura 5.6 - Geração por subsistema.	128
Figura 5.7 - Tensão da NDCC próximo ao SGA nos dias de 27/04/2022 a 28/04/2022.....	130
Figura 5.8 - Potência fornecida por cada subsistema ao suprimento da NDCC.....	130
Figura 5.9 - Geração por subsistema.	131

LISTA DE TABELAS

CAPÍTULO 1

Tabela 1.1 - Padrões e recomendações práticas para distribuição de energia elétrica em corrente contínua.	6
Tabela 1.2 - Eventos de qualidade de energia em sistemas de corrente contínua.	17
Tabela 1.3 - Classificação dos eventos transitórios.	20
Tabela 1.4 - Classificação da variação de tensão de curta duração (VTCD).	21
Tabela 1.5 - Classificação da variação de tensão de longa duração (VLD).	21

CAPÍTULO 2

Tabela 2.1 - Informações técnicas do controlador de carga EPEVER XTRA.	25
Tabela 2.2 - Parâmetros de controle para baterias de chumbo-ácido em 24 V.	26
Tabela 2.3 - Informações técnicas do <i>datalogger</i> eLOG01.	28
Tabela 2.4 - Informações técnicas referentes à configuração do <i>datalogger</i> Fieldlogger.	29
Tabela 2.5 - Informações técnicas do sensor de irradiância.	30
Tabela 2.6 - Características técnicas nas STC do módulo FV.	32
Tabela 2.7 - Características térmicas do módulo FV.	32
Tabela 2.8 - Características técnicas nas STC de cada GFV.	32
Tabela 2.9 - Informações técnicas dos bancos de cargas utilizados.	34
Tabela 2.10 - Descrição do BC1.	35
Tabela 2.11 - Informações técnicas dos conversores c.c.-c.c.	39
Tabela 2.12 - Informações técnicas da lâmpada LED do fabricante Ourolux.	40
Tabela 2.13 - Informações técnicas da lâmpada LED do fabricante G-Light.	41
Tabela 2.14 - Informações técnicas da lâmpada LED do fabricante City Lumi.	43
Tabela 2.15 - Informações técnicas do inversor do fabricante Steca, modelo P110-L60.	45
Tabela 2.16 - Cargas c.a. utilizadas supridas pelo inversor.	46
Tabela 2.17 - Características técnicas do condutor cabo de alumínio XLPE 0,6/1 kV da fabricante Alubar.	47
Tabela 2.18 - Distância das cargas e geração em relação à NDCC.	49
Tabela 2.19 - Especificações técnicas dos disjuntores c.c. utilizados na proteção do SGA.	50

CAPÍTULO 3

Tabela 3.1 - Configuração dos canais do osciloscópio para obtenção dos dados.	53
Tabela 3.2 - Valores registrados pelo osciloscópio e pelo controlador de carga em diferentes barramentos.	56
Tabela 3.3 - Valores registrados pelo osciloscópio e pelo controlador de carga em diferentes barramentos.	59

CAPÍTULO 4

Tabela 4.1 - Cargas utilizadas e códigos de referência.	64
Tabela 4.2 - Horários de acionamento de cargas.	64
Tabela 4.3 - Registro de potência aparente, ativa e não ativa no ponto de conexão de carga do ensaio I.	78
Tabela 4.4 - Registro de potência ativa fornecida pelo controlador de carga na saída de cada SGA do ensaio I.	78

Tabela 4.5 - Evento transitório oscilatório referente ao ensaio I.....	79
Tabela 4.6 - Ondulação de tensão ao longo do dia na NDCC durante o ensaio I.	79
Tabela 4.7 - Registro de potência aparente, ativa e não ativa no ponto de conexão de carga do ensaio II.	91
Tabela 4.8 - Registro de potência ativa fornecida pelo controlador de carga na saída de cada SGA do ensaio II.	92
Tabela 4.9 - Evento transitório oscilatório referente ao ensaio II.	92
Tabela 4.10 - Ondulação de tensão ao longo do dia na NDCC durante o ensaio II.	93
Tabela 4.11 - Registro de potência aparente, ativa e não ativa no ponto de conexão de carga do ensaio III.	103
Tabela 4.12 - Registro de potência ativa fornecida pelo controlador de carga na saída de cada SGA do ensaio III.	104
Tabela 4.13 - Evento transitório oscilatório referente do ensaio III.	104
Tabela 4.14 - Ondulação de tensão ao longo do dia na NDCC durante o ensaio III.	105
Tabela 4.15 - Registro de potência aparente, ativa e não ativa no ponto de conexão de carga do ensaio IV.	116
Tabela 4.16 - Registro de potência ativa fornecida pelo controlador de carga na saída de cada SGA do ensaio IV.	116
Tabela 4.17 - Evento transitório oscilatório referente ao ensaio IV.	116
Tabela 4.18 - Ondulação de tensão ao longo do dia na NDCC durante o ensaio IV.	117

CAPÍTULO 5

Tabela 5.1 - Armazenamento em banco de baterias em cada subsistema.	123
Tabela 5.2 - Sistemas de GFVs em cada subsistema.	123
Tabela 5.3 - Cargas c.a. utilizadas em cada subsistema.	124
Tabela 5.4 - Cargas c.c. utilizadas em cada subsistema.	124
Tabela 5.5 - Evento de desconexão do SGA entre os dias 22/04/2022 e 23/04/2022.	129
Tabela 5.6 - Evento de desconexão do SGA entre os dias 27/04/2022 e 28/04/2022.	132
Tabela 5.7 - Evento de interrupção sustentada na rede elétrica entre os dias 27/04/2022 e 28/04/2022.	132

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
BB	Banco de Baterias
BC	Banco de Carga
c.a.	Corrente Alternada
c.c.	Corrente Contínua
CC	Controlador de Carga
CCSA	<i>China Communications Standards Association</i> (Associação de Padrões de Comunicações da China)
DC	<i>Direct Current</i> (Corrente Contínua)
DPS	Dispositivo de Proteção Contra Surtos
EM	<i>European Standard</i> (Padrão Europeu)
ETSI	<i>European Telecommunications Standards Institute</i> (Instituto Europeu de Padrões de Telecomunicações)
GC	Geração Centralizada
GD	Geração Distribuída
GEDAE	Grupo de Estudos e Desenvolvimento de Alternativas Energéticas
GFV	Gerador Fotovoltaico
IEC	<i>International Electrotechnical Commission</i> (Comissão Eletrotécnica Internacional)
IEEE	<i>Institute of Electrical and Electronics Engineers</i> (Instituto de Engenheiros Eletricistas e Eletrônicos)
ISO	<i>International Organization for Standardization</i> (Organização Internacional para Padronização)
ITU	<i>International Telecommunication Union</i> (União Internacional de Telecomunicações)
LCD	<i>Liquid Crystal Display</i> (Mostrador de Cristal Líquido)
LED	<i>Light Emitting Diode</i> (Diodo Emissor de Luz)
LVDC	<i>Low Voltage Direct Current</i> (Corrente Contínua em Baixa Tensão)
MDCA	Microrrede de Distribuição em Corrente Alternada
MDCC	Microrrede de Distribuição em Corrente Contínua
MPPT	<i>Maximum Power Point Tracking</i> (Seguidor do Ponto de Máxima Potência)
NBR	Norma Técnica Brasileira
NDCC	Nanorrede de Distribuição em Corrente Contínua
p.u.	<i>Per unit</i> (por unidade)
p-p	Pico a Pico
QEE	Qualidade da Energia Elétrica
RED	Recurso Energético Distribuído
FP	Fator de Potência
SEG	<i>Systems Evaluation Group</i> (Grupo de Avaliação de Sistemas)
SEP	Sistema Elétrico de Potência

SGA	Sistema de Geração e Armazenamento
SyC	<i>Systems Committee</i> (Comitê de Sistemas)
TI	Tecnologia da Informação
UE	União Europeia
UFPA	Universidade Federal do Pará
USB	<i>Universal Serial Bus</i> (Porta Serial Universal)
VCD	Variações de Curta Duração
VLD	Variações de Longa Duração

LISTA DE SÍMBOLOS

Na	Potência Não Ativa
P	Potência Ativa
S	Potência Aparente
η	Eficiência

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO	1
CAPÍTULO 1 QUALIDADE DE ENERGIA E NORMAS APLICADAS À DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA EM CORRENTE CONTÍNUA EM BAIXA TENSÃO	4
1.1. Normas e Padrões para Distribuição de Energia Elétrica em Corrente Contínua em Baixa Tensão	4
1.2. Qualidade de Energia Elétrica em Redes de Distribuição em Corrente Contínua	10
1.3. Eventos de QEE em MDCC	16
1.4. IEEE 1159-2019 - <i>Recommended Practice for Monitoring Electric Power Quality</i>	19
1.4.1. Eventos Transitórios	19
1.4.2. Variações de Longa Duração (VLD), Variações de Curta Duração (VCD) e Interrupções	20
1.5. Considerações Finais Sobre o Capítulo 1	22
CAPÍTULO 2 NANORREDE DE DISTRIBUIÇÃO EM CORRENTE CONTÍNUA IMPLANTADA NO GEDAE/UFPA	23
2.1. Configuração da Nanorrede de Distribuição em Corrente Contínua do GEDAE/UFPA	23
2.2. Controlador de Carga (CC)	24
2.3. Registrador de Dados do Sistema (<i>datalogger</i>) eLOG01	27
2.4. Registrador de Dados de Parâmetros Ambientais (<i>datalogger</i>) FieldLogger	28
2.4.1. Sensor de Irradiância	29
2.4.2. Sensor de Temperatura	30
2.5. Gerador Solar Fotovoltaico (GFV)	31
2.6. Banco de Baterias (BB)	33
2.7. Banco de Cargas (BC)	34
2.7.1. Banco de Carga nº 1 (BC1)	35
2.7.1.1. Luminária Painel LED com Conversor c.c.-c.c.	37
2.7.1.2. Lâmpada LED Ourolux	40
2.7.1.3. Lâmpada LED G-Light	41
2.7.1.4. Lâmpada LED City Lumi	42
2.7.2. Banco de Carga nº 2 (BC2)	44
2.7.3. Banco de Carga nº 3 (BC3)	45
2.7.3.1. Cargas Convencionais Supridas pelo Inversor	46
2.8. Rede de Distribuição	47
2.9. Considerações Finais Sobre o Capítulo 2	51
CAPÍTULO 3 INSTRUMENTAÇÃO EMPREGADA PARA MEDIÇÃO DE GRANDEZAS ELÉTRICAS	52
3.1. Materiais e Métodos	52
3.2. Validação de Registros Armazenados pelo Elog0-1-V1-2-1	54
3.2.1. Ensaio com Potência Constante	55
3.2.2. Ensaio com Ondulação de Tensão	58
3.2.3. Visualização e Tratamento dos Dados	60
3.3. Considerações Finais Sobre o Capítulo 3	61
CAPÍTULO 4 QUALIDADE DA ENERGIA ELÉTRICA EM ENSAIOS REALIZADOS NA NDCC DO GEDAE/UFPA	62
4.1. Ensaio da NDCC – GEDAE/UFPA	62
4.1.1. Ensaio I	65
4.1.2. Ensaio II	80

4.1.3.	Ensaio III.....	94
4.1.4.	Ensaio IV.....	106
4.2.	Considerações Finais Sobre o Capítulo 4.....	118
CAPÍTULO 5 VERIFICAÇÃO DO EVENTO INTERRUPÇÃO EM UMA NDCC LOCALIZADA EM ILHA DAS ONÇAS/PA.....		121
5.1.	Descrição da NDCC – Ilha das Onças.....	121
5.2.	Operação da NDCC – Ilha das Onças.....	125
5.2.1.	Desconexão de Parte dos SGAs (22/04/2022 e 23/04/2022).....	126
5.2.2.	Desconexão dos SGA e Evento de Interrupção na Rede Elétrica (27/04/2022 e 28/01/2022).....	129
5.3.	Comentários Sobre o Evento Interrupção Aferido na NDCC de Ilha das Onças.....	132
CONCLUSÕES.....		134
REFERÊNCIAS.....		136
APÊNDICE A.....		141
APÊNDICE B.....		147
APÊNDICE C.....		149
APÊNDICE D.....		156

INTRODUÇÃO

O aumento da inserção de fontes renováveis, em específico a solar fotovoltaica, no Sistema Elétrico de Potência (SEP) brasileiro vem alcançando marcas relevantes dentro do *mix* de fontes da matriz energética para produção de eletricidade, tanto no âmbito de Geração Centralizada (GC) quanto de Geração Distribuída (GD). Já no início do ano de 2023, registrou-se a operação de mais de 7,7 GW de geração centralizada e aproximadamente 17,7 GW de geração distribuída por fonte solar fotovoltaica (ANEEL, 2023), representando a segunda maior fonte renovável empregada para produção de eletricidade no Brasil, resultado direto de políticas e investimentos voltados aos aspectos técnicos e econômicos vantajosos, proporcionados pela implementação dessa fonte (EPE, 2018).

A maior inserção de sistemas de geração que utilizam fontes renováveis e produzem eletricidade em corrente contínua (c.c.), como sistemas fotovoltaicos, além do uso de sistemas de armazenamento por meio de bancos de baterias, combinado com o avanço da tecnologia em conversores de potência c.c.-c.c., permite o uso direto da energia elétrica em corrente contínua de forma mais eficiente, eliminando perdas associadas à conversão de energia.

Concomitantemente, muitas cargas quando supridas diretamente em corrente contínua, excluindo-se estágios de conversão de corrente alternada (c.a.) para c.c., apresentam uma maior eficiência. Como exemplos dessas cargas, têm-se, sistemas de iluminação a LED, dispositivos eletrônicos portáteis supridos por baterias, motores c.c. e inversores de frequência variável.

Neste sentido, visando ao suprimento de energia elétrica em corrente contínua, o uso de Microrredes de Distribuição em Corrente Contínua (MDCCs) apresenta, em geral, vários benefícios sobre as Microrredes de Distribuição em Corrente Alternada (MDCAs), no que diz respeito à qualidade de energia, confiabilidade, expansibilidade e, especialmente, eficiência energética e de custo, devido ao número reduzido de componentes e etapas de conversão. Por exemplo, MDCC podem ser aplicadas em *datacenters*, edifícios comerciais e comunidades remotas/isoladas (OPIYO, 2019) (JITHIN *et al.*, 2022).

No entanto, um dos grandes desafios para aplicação em grande escala desses sistemas ainda se resume ao fato de que são limitados os aparelhos que podem ser usados diretamente ou adaptados para operação com nível de tensão c.c. da rede, visto que ainda são projetados para uso com redes de distribuição convencionais em corrente alternada (IRENA, 2018). Neste contexto, tem-se a necessidade de requisitos de qualidade de energia que possam prover a operação confiável de equipamentos em sistemas em corrente contínua, assim como ocorre em sistemas convencionais em corrente alternada.

A operação dessas redes sob a perspectiva da análise de Qualidade da Energia Elétrica (QEE) tendo como referência normas e padrões voltados a eventos no lado de corrente contínua tornam-se importantes, atribuindo-se assim maior confiabilidade, melhor desempenho e ganhos econômicos para utilização destes sistemas.

Esforços de normatização vêm sendo realizados por instituições como: *International Electrotechnical Commission* (IEC), que já dispõe de normas como IEC 61000-4-17 e IEC 61000-4-29 onde abordam métodos de teste e indicadores para eventos específicos em corrente contínua, além de possuir a formação do grupo estratégico SG4 para avaliação de sistemas de distribuição em corrente contínua em baixa tensão em até 1.500 V; *The Institute of Electrical and Electronics Engineering Standards Association* (IEEE), que dispõe atualmente de diversas atividades relacionadas a esse tema, como o P2030.10 (projeto, operação e manutenção de MDCC para aplicação rural ou remota), além do padrão IEEE Std 1159, o qual caracteriza alguns eventos de QEE, com algumas definições que podem ser aplicadas a sistemas em corrente contínua; EMerge Alliance, que lançou duas normas, uma para sistemas residenciais e comerciais em 24 V e outra para *datacenters* e centros de telecomunicação em 380 V.

Em vista disso, o presente trabalho tem como objetivo realizar uma análise de QEE utilizando definições e a caracterização de eventos de QEE presentes na recomendação do *Institute of Electrical and Electronic Engineers* (IEEE) *Recommendation Practice for Monitoring Electric Power Quality - Std 1159*, de 2019. Para isso, faz-se um estudo experimental da qualidade da energia elétrica, com a aferição e caracterização de eventos presentes em uma Nanorrede de Distribuição em Corrente Contínua (NDCC) instalada no GEDAE/UFPA em Belém-PA. Nesta NDCC observam-se eventos de qualidade de energia como variações de longa e curta duração, além de transitórios.

No escopo do presente trabalho também são aferidos eventos denominados de *AC offset*, que nesse caso, podem também ser caracterizados como ondulação (*ripple*) de tensão, os quais foram verificados nos ensaios realizados na NDCC do GEDAE/UFPA, conforme a demanda de alguns equipamentos inseridos na rede.

Por fim, para a caracterização do evento relacionado à interrupção no suprimento de energia elétrica, neste trabalho optou-se por englobar um estudo de caso em uma NDCC instalada na Ilha das Onças em Barcarena-PA.

No Capítulo 1, apresenta-se o cenário de normas e padrões relacionados à caracterização de eventos de QEE, segurança de dispositivos relacionados às redes de distribuição em corrente contínua. Destaca-se também estudos atuais que englobam, de forma mais geral, o estudo de QEE aplicado a sistemas c.c., utilizando-se padrões que dispõem de métodos para análises e

interpretações dos eventos. Além disso, apresenta-se o padrão IEEE - Std 1159, destacando eventos de QEE que podem ser avaliados em c.c., suas definições e classificações.

No Capítulo 2, apresenta-se a NDCC construída na área externa do prédio do GEDAE, além dos componentes que fazem parte do sistema de geração, armazenamento e distribuição de energia elétrica, como também dos bancos de cargas utilizados, evidenciando suas características e finalidades.

No Capítulo 3 descreve-se a metodologia empregada para medições e avaliação dos dados obtidos. É apresentada a instrumentação utilizada para visualização dos parâmetros elétricos do sistema de geração e armazenamento e para medições realizadas ao longo da rede de distribuição.

No Capítulo 4 apresenta-se a realização de quatro ensaios propostos sob condições ambientais distintas na NDCC do GEDAE/UFPA, além de discutir os resultados obtidos durante as medições envolvendo os registros na saída dos sistemas de geração e armazenamento, assim também como a avaliação da QEE no ponto de conexão dos bancos de cargas, identificando e caracterizando eventos de longa e curta duração, transitórios e ondulações de tensão.

No Capítulo 5 descreve-se brevemente as características da NDCC que opera na Ilha das Onças em Barcarena-PA, com a apresentação e análise de eventos de longa duração, relacionados à desconexão de sistemas distribuídos de geração e armazenamento, bem como a caracterização do evento de interrupção no fornecimento de energia elétrica.

Ao fim do trabalho, apresentam-se as conclusões e as sugestões de trabalhos futuro visando aprofundamento do trabalho desenvolvido.

CAPÍTULO 1 QUALIDADE DE ENERGIA E NORMAS APLICADAS À DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA EM CORRENTE CONTÍNUA EM BAIXA TENSÃO

Neste capítulo é discutido o cenário atual de recomendações, normas e padrões que são aplicáveis para distribuição de energia elétrica em corrente contínua, englobando também sistemas com Microrredes de Distribuição em Corrente Contínua (MDCCs), destacando as finalidades para cada documento proposto.

Além disso, abordam-se conceitos de Qualidade da Energia Elétrica (QEE) aplicados em sistemas operando em corrente contínua, apresentando eventos que podem impactar na operação de cargas conectadas a estes sistemas. Também é apresentado o padrão do *Institute of Electrical and Electronic Engineers (IEEE) Recommendation Practice for Monitoring Electric Power Quality - Std 1159*, de 2019, o qual define e caracteriza eventos de QEE, fazendo-se uso destas definições no presente trabalho para aplicação em sistemas em corrente contínua.

1.1. Normas e Padrões para Distribuição de Energia Elétrica em Corrente Contínua em Baixa Tensão

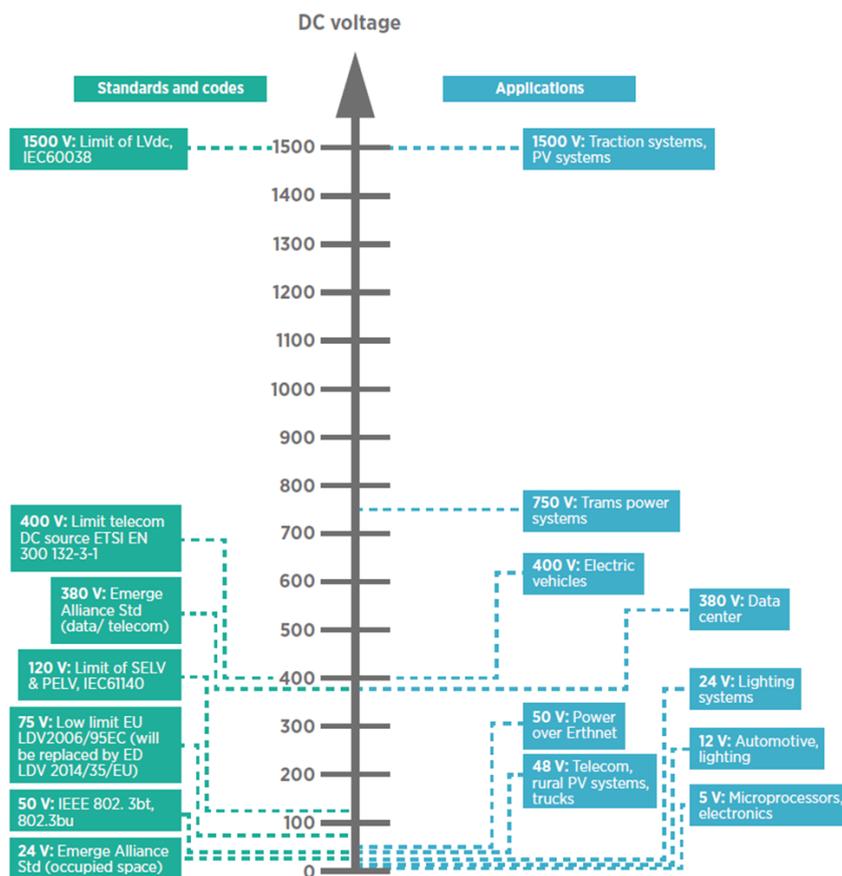
A existência de normas e recomendações práticas, específicas para distribuição em corrente contínua (c.c.), possibilitam a implementação de sistemas de distribuição em c.c. de forma mais confiável, eficiente e consciente, atribuindo deveres e responsabilidades a órgãos/entidades e indivíduos que usufruam deste tipo de sistema. Na União Europeia (UE), por exemplo, equipamentos elétricos devem ser comercializados seguindo a diretiva 2006/95/EC, a qual estabelece regras de segurança para equipamentos elétricos de baixa tensão com valores de 50 a 1.000 V em corrente alternada (c.a.) e 75 a 1.500 V em corrente contínua, incluindo a proteção contra choques elétricos, sobrecargas e outros riscos elétricos, contribuindo para possibilidade de implementação de sistemas de distribuição em corrente contínua.

A discussão de recomendações e padrões técnicos utilizando sistemas em corrente contínua aplicados a *datacenters*, por exemplo, começaram a ser debatidos por volta de 2009 indicando o nível de tensão de 380 V para essa aplicação, atribuindo critérios de maior ganho em eficiência energética e vida útil de equipamentos (INAMORI *et al.*, 2014) por meio da *International Electrotechnical Commission (IEC)*, *European Telecommunications Standards*

Institute (ETSI) e International Telecommunication Union – Telecommunication Standardization Sector (ITU-T).

Apesar de sistemas de Microrredes de Distribuição em Corrente Contínua (MDCC) serem considerados um segmento relativamente novo no mercado, principalmente para aplicações comerciais e residenciais (IRENA, 2020), já vêm sendo explorados em ambientes acadêmicos e em projetos de Pesquisa e Desenvolvimento (P&D) (LOPÉZ *et al.*, 2021), por meio de simulações e de aplicações reais (JINWOOK LEE *et al.*, 2018). Destacam-se diversas aplicações para estes sistemas, considerando estruturas em MDCC (RODRIGUEZ-DIAZ *et al.*, 2016), conforme ilustra a Figura 1.1.

Figura 1.1 - Padrões e aplicação para distribuição de energia elétrica em corrente contínua.



Fonte: IRENA (2020).

Para tensões igual ou menor que 380 V, destaca-se, mais recentemente, a organização sem fins lucrativos, Emerge Alliance que trabalha para a rápida adoção de MDCC em edifícios comerciais através do desenvolvimento de projetos e demonstrações de corrente contínua para sistemas de 380 V e 24 V. Além disso, a organização atua para o desenvolvimento de padrões nacionais e internacionais para sistemas de corrente contínua (JOHNSON *et al.*, 2016).

Tecnologias empregadas para a proteção em MDCC também são menos exploradas, referente às Microrredes de Distribuição em Corrente Alternada (MDCA), e carecem de padronização adequada (WHAITE; GRAINGER; KWASINSKI, 2015). No Brasil, apenas a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) Norma Brasileira (NBR) IEC 61643-1 de 2007 dispõe de diretivas ao uso de DPS (dispositivo de proteção contra surtos), contra efeitos diretos e indiretos de descargas atmosféricas ou outras sobretensões transitórias, aplicado ao lado c.c. em tensões de até 1.500 V. No mundo, há esforços de vários órgãos/associações que trabalham para o *design* e desenvolvimento de padrões e recomendações técnicas em vários aspectos dos sistemas de energia elétrica em corrente contínua, indo dos componentes de geração a utilização da carga. A Tabela 1.1 lista alguns padrões já definidos, enquanto outros estão ainda em fase de composição ou não publicados (MISHRA *et al.*, 2022).

Tabela 1.1 - Padrões e recomendações práticas para distribuição de energia elétrica em corrente contínua.

(continua)

Padrões	Área de Padronização/Recomendações Práticas
IEEE P2030.10	<i>Application of DCMGs in Rural and Remote Electricity Access.</i>
IEEE 1547–2018	<i>Standard for Interconnection and Interoperability of DERs with Associated EPS Interfaces (The standard is formulated for DERs of 60 Hz source. Specifically suitable for hybrid microgrid design).</i>
IEEE 946–2004	<i>Design of DC Auxiliary Power Systems for Generating Systems.</i>
IEEE 946–2020	<i>Design of DC Power Systems for Stationary Applications.</i>
IEC SEG 4	<i>Standardization of LVDC systems up to 1500 V.</i>
IEC SEG 6	<i>Nonconventional Distribution Networks/Microgrids and their interconnectability with traditional grids.</i>
IEC SEG 9	<i>Standardization on electrical installations and communication technology for a Smart Home/Office Building Systems.</i>
SyC LVDC	<i>Systems level standardization, coordination and guidance in the areas of LVDC and LVDC for Electricity Access.</i>
IEC 62040–5-3:2016	<i>DC output UPS (not exceeding 1500 V); Performance and test requirements.</i>
IEC TS 62257:2015	<i>Guidelines for small RES based non-hybrid and hybrid systems for rural electrification.</i>
IEC 60364	<i>Low-voltage electrical Installations. Dwells upon; Protection against electric shock, Protection against OC (buildings), Protection against voltage and electro-magnetic disturbances.</i>
Pika Energy REbus™	<i>DC energy network standard enabling building of cost effective, scalable renewable energy systems.</i>

(conclusão)

Padrões	Área de Padronização/Recomendações Práticas
EMerge Alliance	<i>Standard for five different categories of building spaces: Occupied Space, Data & Telecom Space, Building Services, Outdoor MG, Whole Campus/Building MG.</i>
ETSI EN 300 132–3-1	<i>Environmental Engineering (EE); power supply interface at the input to telecommunications and Datacom (ICT) equipment. (AC or DC sources up to 400 V).</i>
ITU-T L.1200 (2012–05)	<i>DC power feeding interface up to 400 V at the input to telecommunication and ICT equipment's.</i>
ITU-T L.1201 (2014–03)	<i>Architecture of power feeding systems of up to 400 V DC.</i>
ITU-T L.1202 (2015–04)	<i>Evaluation methodologies for DC power feeding systems of rating up to 400 V and its impact on environment.</i>
CCSA YD/T 2378–2011	<i>240 V DC power supply system (PSS) for telecommunications.</i>
CCSA YD/T 2556–2013	<i>Maintenance requirements of 240 V DC PSS for telecommunications.</i>
CCSA YD/T 3091–2016	<i>Communication with 240/336 V DC PSS evaluation requirements and methods of running.</i>

Fonte: Adaptado de Mishra *et al.* (2022).

O padrão IEEE P2030.10, por exemplo, discorre sobre arquitetura de MDCC para aplicações em áreas rurais e/ou remotas com tensão de 48 V, definindo métrica para tensão e qualidade de energia visando suprimento às cargas conectadas a esta aplicação de microrrede. Esse padrão é focado no quesito distribuição de energia elétrica e possui como referência a *International Organization for Standardization (ISO) 21780:2020, Road vehicles — Supply voltage of 48 V — Electrical requirements and tests.*

O padrão IEEE Std 1547-2003, revisado em 2018, fornece especificações técnicas e de teste de interconexão, interoperabilidade e requisitos para Recursos Energéticos Distribuídos (RED), estabelecendo critérios e requisitos para interligação de RED com a rede de distribuição convencional e interfaces associadas, possibilitando a formação de microrredes em sistemas que operam em corrente contínua. O padrão IEEE 946-2004, revisado em 2020 por meio do padrão IEEE 946-2020, inclui uma seção específica para sistemas c.c. e fornece diretrizes para a análise de riscos em sistemas c.c. A versão atualizada em 2020, além de ter uma seção específica para sistemas elétricos de potência em corrente contínua, inclui também informações e exemplos de análise de riscos em sistemas de baterias e veículos elétricos, os quais operam em corrente contínua.

Os grupos de avaliação de sistemas, *Systems Evaluation Group* (SEG) 4, 6 e 9, de forma geral, avaliam o *status* da padronização no campo de aplicação para produtos em corrente contínua operando em baixa tensão, visando também à utilização de sistemas de distribuição de energia elétrica em corrente contínua em baixa tensão, sejam em diferentes ambientes de integração em economias desenvolvidas e em desenvolvimento, com o objetivo principal de aumentar a eficiência energética.

O subcomitê *Systems Committee* (SyC) *Low Voltage Direct Current* (LVDC) da IEC é destinado à normatização no domínio de sistemas de corrente contínua de baixa tensão, de forma a desenvolver padrões para sistemas de distribuição de energia elétrica em corrente contínua. Dentre os padrões publicados pelo SyC LVDC, destaca-se o IEEE 2030.5 o qual especifica os requisitos para a comunicação de dados de sistemas de energia inteligente, incluindo sistemas de corrente contínua de baixa tensão, objetivando promover a interoperabilidade de sistemas de energia inteligente e permitir a integração de fontes de energia renovável e armazenamento de energia.

A norma internacional IEC 62040-5-3:2016 estabelece requisitos para sistemas de alimentação ininterrupta, *Uninterruptible Power Supply* (UPS), e fontes de alimentação de energia em geral, podendo ser em corrente contínua ou corrente alternada. Essa norma estabelece os requisitos de desempenho e de segurança para as fontes de energia elétrica utilizadas em sistemas críticos, tais como *datacenters*, hospitais, instalações militares, etc.

A norma técnica internacional IEC *Technical Specification* (TS) 62257-2:2015 estabelece diretrizes para a implantação de sistemas de energia renovável híbridos em comunidades isoladas, abrangendo tanto sistemas de corrente contínua quanto sistemas de corrente alternada. Essa norma define os requisitos para o projeto, instalação, operação e manutenção de sistemas de energia renovável híbridos que utilizam várias fontes de energia, incluindo energia solar, eólica, hidráulica e biomassa.

A IEC 60364 é composta por uma série de normas que estabelecem requisitos para a instalação elétrica em edifícios e outras instalações, independentemente do tipo de sistema utilizado (c.c. ou c.a.). Esse padrão define as diretrizes para o projeto, instalação, operação e manutenção de sistemas elétricos em edifícios e outras instalações, incluindo a seleção de materiais, a proteção contra sobrecargas e curtos-circuitos, aterramento, proteção a choque elétrico, entre outros aspectos.

Portanto, as normas IEC 62040-5-3:2016, IEC TS 62257:2015 e IEC 60364 podem ser aplicadas tanto para sistemas de corrente alternada quanto para sistemas de corrente contínua, dependendo do contexto em que são utilizadas. A escolha da norma adequada dependerá das

características específicas do sistema elétrico em questão e das necessidades de desempenho e segurança da aplicação.

O objetivo do Pika Energy REbus™ é fornecer uma plataforma para *Smart Grid* escalável para sistemas de geração, armazenamento e gerenciamento de energia em edifícios e residências. O REbus™ é uma arquitetura de comunicação para sistemas de energia desenvolvida pela empresa Pika Energy, que permite a interconexão de dispositivos “inteligentes” em um sistema de energia residencial ou comercial. Ele é projetado para ser flexível e modular, permitindo que diferentes dispositivos de energia sejam adicionados ou removidos conforme necessário, facilitando a expansão ou atualização do sistema. Nesse sentido, por meio desta ferramenta tem-se a possibilidade de implementação de MDCC.

A EMerge Alliance possui padrões desenvolvidos, como exemplo o *Occupied Space Standard*, que é um padrão para sistemas de energia elétrica em edifícios, incluindo dispositivos de iluminação, tomadas elétricas e equipamentos de Tecnologia da Informação (TI). O padrão visa aprimorar a eficiência energética e a flexibilidade dos sistemas elétricos, além de permitir o uso de fontes de energia renovável. O *Task Level/Fixture Level Standard* é um padrão que estabelece requisitos para o uso de sistemas de iluminação de baixa tensão em edifícios. Esse padrão é baseado em dispositivos de iluminação alimentados por corrente contínua, em vez de corrente alternada, permitindo maior eficiência energética e integração com sistemas de automação. Por fim, o *DC Power Standard* é um padrão que estabelece diretrizes para a distribuição e uso de energia elétrica em corrente contínua em edifícios, a partir de fontes de energia renovável e outras fontes de energia eficiente.

A *European Standard* (EN) por meio da *European Telecommunications Standards Institute* (ETSI) 300 132 Part. 3-1 não estabelece requisitos específicos relacionados à forma de corrente elétrica utilizada, podendo ser aplicada a corrente contínua. A norma estabelece requisitos técnicos para equipamentos de rádio (equipamentos para transmissão e recepção de sinais de rádio) e sistemas de rádio de micro-ondas, definindo especificações de desempenho, segurança e compatibilidade eletromagnética para equipamentos de transmissão e recepção de rádio que operam em frequências acima de 1 GHz. Em geral, estes equipamentos são supridos por fontes de energia elétrica de corrente contínua. Portanto, torna-se importante garantir que esses equipamentos atendam aos requisitos de desempenho, segurança e compatibilidade eletromagnética estabelecidos pela norma ETSI EN 300 132-3-1.

A *International Telecommunication Union – Telecommunication Standardization Sector* (ITU-T) dispõe das recomendações ITU L.1200 de 2012, ITU-T L.1201 de 2014 e ITU-T L.1202 de 2015, as quais especificam a interface de corrente contínua entre o sistema de

alimentação e equipamentos, como dispositivos de tecnologia da informação e comunicação (*Information and Communication Technology Equipment – ICT*), para fontes c.c. de até 400 V em centros de telecomunicações, *datacenters* e servidores.

A ITU-T L.1200 de 2012 fornece as diretrizes gerais para a implementação de sistemas de alimentação c.c. em telecomunicações, incluindo requisitos técnicos para fontes de alimentação, cabos, baterias e outros componentes do sistema. A recomendação define padrões para o controle de qualidade, instalação e manutenção de sistemas de alimentação c.c., com o objetivo de garantir a confiabilidade do serviço de telecomunicações.

A ITU-T L.1201 de 2014 é uma atualização da ITU-T L.1200 e fornece especificações técnicas detalhadas para componentes específicos do sistema de alimentação c.c., incluindo retificadores, baterias e sistemas de monitoramento. A recomendação também estabelece padrões para o controle de qualidade, instalação e manutenção desses componentes.

A ITU-T L.1202 de 2015 é uma atualização da ITU-T L.1200 e fornece diretrizes para o projeto e implementação de sistemas de alimentação c.c. em redes de telecomunicações de alta capacidade, incluindo redes de fibra ótica. A recomendação aborda questões técnicas específicas, como a seleção de componentes, cálculo de capacidade e gerenciamento de energia em sistemas de alimentação em corrente contínua. As recomendações ITU-T L.1200, ITU-T L.1201 e ITU-T L.1202 são importantes, para sistemas c.c., porque estabelecem padrões e especificações técnicas para garantir a confiabilidade e qualidade dos serviços de telecomunicações.

Por fim, as normas da *China Communications Standards Association (CCSA)* CCSA YD/T 2378 de 2011, CCSA YD/T 2556 de 2013 e CCSA YD/T 3091 de 2016 especificam a composição, requisitos técnicos, métodos de teste, regras de inspeção, marcação, embalagem, transporte e armazenamento de sistemas de alimentação em corrente contínua de 240 V para sistemas de telecomunicações.

1.2. Qualidade de Energia Elétrica em Redes de Distribuição em Corrente Contínua

No âmbito do estudo de qualidade de energia elétrica (QEE), torna-se necessário, em um primeiro momento, uma definição adequada que seja geral e possa abranger o estudo e análises da qualidade de energia tanto em corrente alternada quanto em corrente contínua.

Desse modo, considera-se adequada a definição fornecida pela IEC 61000-1-1 (*Electromagnetic compatibility (EMC) – Part. 1-1: General – Application and interpretation of fundamental definitions and terms*), pois não faz distinção entre QEE em sistema operando

em c.a. ou c.c., ao mencionar que a qualidade de energia abrange as características da eletricidade em um determinado ponto de um sistema elétrico, sendo avaliada em relação a um conjunto de parâmetros técnicos de referência (VAN DEN BROECK; STUYTS; DRIESEN, 2018). Esta definição também é encontrada na ABNT NBR IEC 61000-4-30, que compreende técnicas de medição e ensaio – métodos de medição de qualidade da energia, embora seu escopo esteja para sistemas de alimentação em corrente alternada a 50/60 Hz.

Além disso, destacam-se as IEC 61000-4-29 (*Electromagnetic compatibility (EMC) – Part. 4-29: Testing and measurement techniques – Voltage dips, short interruptions and voltage variations on DC input power port immunity tests*) e IEC 61000-4-17 (*Electromagnetic compatibility (EMC) – Part. 4-17: Testing and measurement techniques – Ripple on DC input power port immunity test*), que tratam de alguns eventos de QEE, como variações de curta duração, interrupções e ondulação (*ripple*) de tensão presentes em sistemas de corrente contínua.

O módulo 8 dos Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional (PRODIST) trata da QEE em sistemas de distribuição e apresenta um conjunto de conceitos que consideram aspectos técnicos da qualidade do fornecimento de energia elétrica, englobando a qualidade do serviço e a qualidade do produto. Contudo, estes aspectos estão relacionados a sistemas de distribuição operando em c.a., verificando-se a conformidade da onda de tensão, em regime permanente e transitório, estabelecendo seus indicadores, valores de referência, entre outros.

Por outro lado, outros padrões, por exemplo, IEEE Std 1709 de 2018, abordam pontualmente um evento que pode ser encontrado em sistemas de distribuição de média tensão em corrente contínua de 1 a 35 kV, definindo qualidade de energia como conformidade com tolerâncias de tensão especificadas e ondulação (*ripple*) de tensão. Essa definição restringe claramente a QEE, referente a sistemas c.c., à qualidade da tensão, que é uma característica fundamental dos sistemas de distribuição de energia em corrente contínua.

Nesse contexto, mesmo a QEE sendo uma questão importante para o projeto e operação de redes de distribuição em corrente contínua, atualmente ainda não existem normas ou padrões específicos para a QEE nesses sistemas (VAN DEN BROECK; STUYTS; DRIESEN, 2018). Assim, os comitês internacionais encarregados da manutenção da Norma Europeia EN 50160 (*Voltage Disturbances Standard EN 50160 – Voltage Characteristics in Public Distribution System*) e da IEC 61000-4-30 (*Electromagnetic compatibility (EMC) – Part. 4-30: Testing and measurement techniques – Power quality measurement methods*) começaram alguns estudos preliminares para estender o escopo dessas duas normas às redes de distribuição pública em

corrente contínua de baixa e média tensão em suas revisões futuras (BARROS; APRÁIZ; DIEGO, 2019).

Na literatura, discutem-se quais eventos devem ser considerados para definir a QEE em sistemas c.c. e quais índices e indicadores devem ser definidos para sua caracterização. Assim como acontece com as redes de distribuição convencionais (c.a.) de baixa e média tensão, a QEE é um fator importante para assegurar o correto desempenho das redes de distribuição c.c., bem como um fator chave para a correta e eficiente integração dos novos RED na rede.

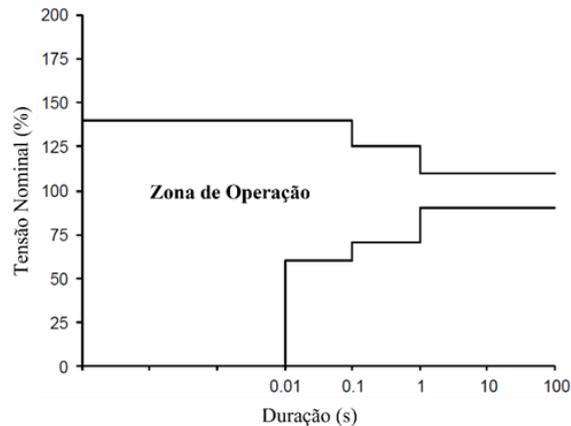
Uma má QEE no fornecimento de tensão em sistemas c.c. pode produzir mau funcionamento ou danificar equipamentos elétricos e eletrônicos, afetando a correta operação de cargas que podem fazer parte de processos ou de uso produtivo da energia elétrica, com importantes impactos econômicos e técnicos.

Uma abordagem mais geral dos eventos para caracterização da QEE em sistemas c.c. já são discutidos na literatura envolvendo variações de longa e curta duração, transitórios, flutuação de tensão, desequilíbrio de tensão (aplicadas a redes c.c. de topologia bipolar), *ripple* de tensão, presença de componentes harmônicas e interharmônicas, sobretensão/subtensão, interrupções, afundamentos/elevações de tensão e cintilação (*flicker*) (BARROS; APRÁIZ; DIEGO, 2019) (WANG *et al.*, 2021).

Assim como em redes convencionais, afundamentos e elevações de tensão, além de sobretensões e subtensões em conjunto de interrupções no fornecimento de energia, causadas basicamente por falhas no suprimento, mudanças de entrada/saída ou comutação de carga, podem causar danos e avarias a cargas supridas por redes de distribuição em corrente contínua.

Nesse sentido, também é importante o emprego de normas que definam tolerância de equipamentos a subtensões ou afundamentos de tensão, interrupções ou sobretensões ou elevações de tensão aplicadas a MDCC. A norma europeia EN 50155, por exemplo, define os limites de fornecimento de energia elétrica para equipamentos eletrônicos utilizados em sistemas ferroviários supridos por sistemas em corrente contínua, onde os equipamentos elétricos e eletrônicos possam operar de forma confiável na faixa de 0,7 a 1,25 p.u. durante um tempo menor que 1 segundo, na faixa de 0,6 a 1,4 p.u. durante um tempo menor que 0,1 segundo e até 10 milissegundos durante uma interrupção de tensão como ilustrado na Figura 1.2. Esta característica depende do tempo e da magnitude da tensão de suprimento.

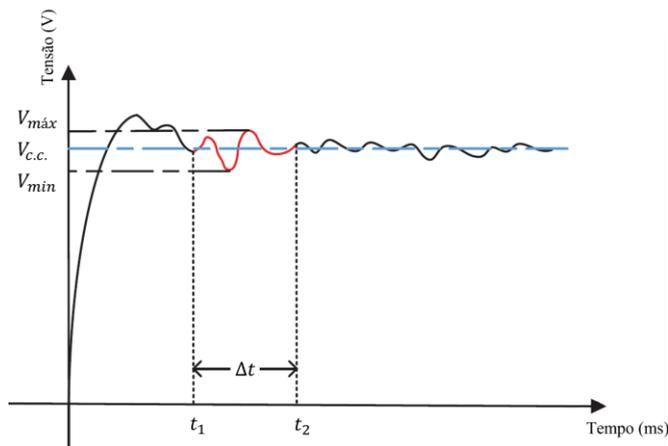
Figura 1.2 - Faixa de operação de equipamentos c.c. conforme a norma EN 50155.



Fonte: Adaptado de Wang *et al.* (2021).

Um evento de flutuação de tensão pode ser definido como mudanças contínuas dentro de uma certa faixa de amplitude sob a premissa de estabilidade do sistema, podendo ser expressa pela mudança de tensão dentro de um determinado período de amostragem, conforme ilustrado na Figura 1.3. De forma geral, as mudanças de tensão devem ocorrer dentro dos limites atendendo aos requisitos de conexão da rede e satisfazer a operação normal dos dispositivos elétricos. Segundo Wang *et al.* (2021) sugere-se que o coeficiente estável de flutuação da tensão do barramento c.c. não deva exceder $\pm 10\%$.

Figura 1.3 - Forma de onda de tensão caracterizada pelo evento de flutuação de tensão.



Fonte: Adaptado de Wang *et al.* (2021).

Este evento prevalece em redes de corrente contínua que não possuem controle de tensão no barramento (FONSECA, 2021). Esta mudança rápida de tensão pode ser produzida em redes c.c. por meio de operações de comutação em equipamentos, como partida de motores, unidades de geração, cargas flutuantes ou corte de carga, e podem afetar o desempenho de

equipamentos elétricos e eletrônicos, podendo até produzir cintilação. No caso da geração fotovoltaica, mudanças rápidas na irradiância solar podem causar variações instantâneas na saída de energia fotovoltaica, resultando em rápidas mudanças de tensão (TRINDADE; FERREIRA; LOPES; FREITAS, 2017).

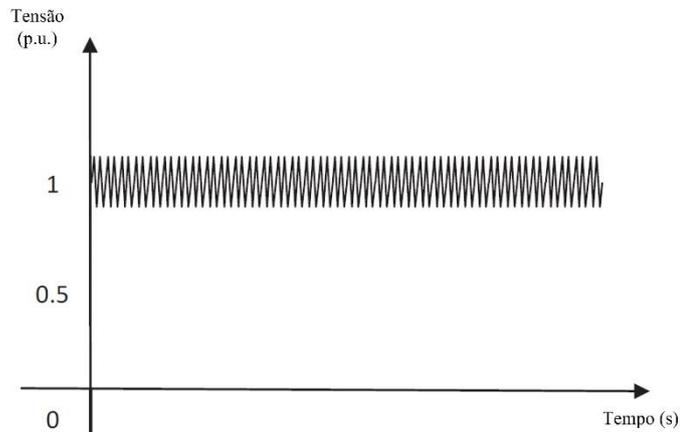
Para fins de detecção e caracterização dos eventos de afundamentos, elevações e as interrupções no fornecimento de tensão em sistemas c.c., Barros, Apráiz, Diego (2019) propõem o uso de uma tensão contínua calculada como a média aritmética das tensões contínuas instantâneas em uma janela deslizante de 20 milissegundos, calculando um novo valor médio c.c. com cada nova amostra de tensão adquirida. Nesse sentido, quando esta magnitude de tensão está abaixo ou acima de um limite de detecção definido, um afundamento ou elevação de tensão é detectado.

Segundo o padrão IEEE Std 1709, o *ripple* de tensão é uma ondulação que ocorre sobre um nível de tensão em corrente contínua. Na Figura 1.4 ilustra-se uma forma de onda de tensão contendo o nível c.c. e a presença de ondulação (*ripple*).

Essa flutuação pode ser causada por vários fatores, como a presença de capacitores de filtro, oscilações do sistema de alimentação elétrica ou outras fontes de interferência elétrica. As principais fontes de ondulação de tensão em redes c.c. são a ondulação produzida pela conversão c.a.-c.c. e c.c.-c.a., referente principalmente a inversores isolados (*off-grid*) e híbridos (ARAÚJO, 2019). A ondulação de tensão pode produzir aquecimento adicional, aumentar as perdas e, em alguns casos, ruído audível em circuitos de áudio, por conter componentes harmônicas com frequências dentro da banda de áudio, além de poder interferir em transmissões televisivas.

Até o momento, não há limites claros para a magnitude da ondulação, com até 15 % da tensão nominal em aplicações ferroviárias, ou até 5 % em sistemas de distribuição em corrente contínua em navios, conforme a IEEE Std 1709, e nenhum limite definido para a distorção da frequência de ondulação com a norma IEC 61000-4-17, definindo apenas métodos de teste para imunidade a ondulação de tensão na porta ou terminal de entrada c.c. de equipamentos elétricos e eletrônicos.

Figura 1.4 - Forma de onda de tensão sob evento de ondulação de tensão.

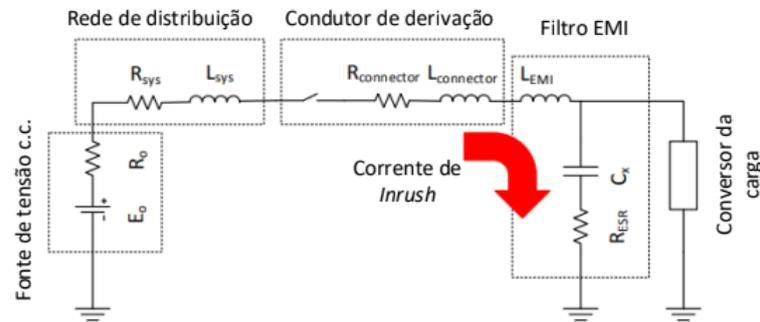


Fonte: Adaptado de Wang *et al.* (2021).

Dois parâmetros principais são usados em padrões internacionais, a exemplo da IEC 161-02-25, para caracterização de ondulação de tensão: magnitude e frequência. No caso da magnitude da ondulação, dois índices são utilizados para sua avaliação: o fator *pico-ripple* e o fator *RMS-ripple*. Além disso, Barros, Apráiz, Diego (2019) abordam um indicador, denominado de Fator de Distorção de *Ripple* (RDF), para caracterizar a presença de componentes espectrais da ondulação de tensão sobre um sinal c.c. Este indicador é semelhante à distorção harmônica total (THD) usado para caracterização de distorção harmônica em redes convencionais c.a.

Na literatura também são destacados eventos de QEE referentes à operação de MDCC, como a corrente de *inrush* e corrente circulante. A corrente *inrush* pode ocorrer durante a conexão de um conversor de potência desenergizado em uma MDCC, conforme ilustrado na Figura 1.5. O capacitor de entrada do conversor, associado ao filtro contra interferência eletromagnética (EMI), carrega com uma corrente inicial elevada, causando oscilação na tensão na entrada de equipamentos conectados à rede (ASAKIMORI *et al.*, 2014). Essa corrente é limitada apenas pela capacidade de fornecimento dos demais conversores conectados em paralelo, capacitâncias no barramento c.c. e baterias, em caso de acoplamento direto no barramento. Correntes de *inrush* podem causar danos na conexão e até o surgimento de afundamentos de tensão que, conseqüentemente, afetam o funcionamento de equipamentos dessa rede.

Figura 1.5 - Corrente de *inrush* na entrada do conversor c.c.



Fonte: Fonseca (2021).

Este evento indesejado pode ser minimizado de duas formas: realizando um carregamento inicial do conversor antes de conectá-lo à rede ou adotando uma metodologia de pré-carga (*soft-start*), utilizado para evitar correntes de *inrush* em transformadores e motores nas redes convencionais.

De um modo geral, as normas e padrões apresentados neste capítulo dispõem da possibilidade de avaliação de eventos individuais de QEE. No presente trabalho utilizou-se o padrão do IEEE – *Recommendation Practice for Monitoring Electric Power Quality* - Std 1159, de 2019, para caracterização dos eventos de QEE da MDCC em operação, a qual abrange o monitoramento das características dos sistemas elétricos de potência, incluindo descrições consistentes de fenômenos eletromagnéticos conduzidos que ocorrem em sistemas de energia. A recomendação prática apresenta definições de condições nominais e desvios dessas condições nominais, que podem se originar na fonte de alimentação ou equipamento de carga ou mesmo podem se originar de interações entre a fonte e a carga.

Destaca-se que neste trabalho nem todos os eventos apresentados pelo padrão são aplicados na análise de QEE, visto que os mesmos se referem a eventos que ocorrem com base em ciclos na forma de onda de tensão e corrente.

1.3. Eventos de QEE em MDCC

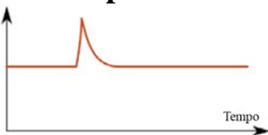
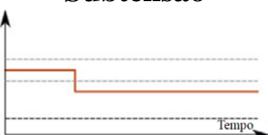
Eventos relacionados à qualidade de energia elétrica podem ser classificados como transitórios, de curta duração, longa duração e em regime permanente. O estudo dos problemas de qualidade de energia e suas formas de mitigação, em especial na distribuição em corrente

contínua, é de fundamental importância para um funcionamento correto e eficiente das cargas que são supridas por MDCC.

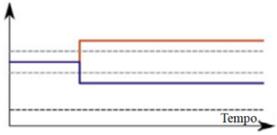
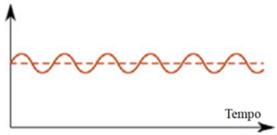
Na Tabela 1.2 apresentam-se eventos de qualidade de energia relevantes a serem observados, evidenciando sua categoria, causas e possíveis consequências em sistemas em corrente contínua.

Tabela 1.2 - Eventos de qualidade de energia em sistemas de corrente contínua.

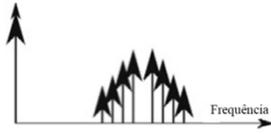
(continua)

Categoria	Indicadores	Possíveis Causas	Possíveis Consequências
Transitório			
Impulsivo 	<ul style="list-style-type: none"> – Tempo de subida. – Tempo de descida. – Magnitude. 	<ul style="list-style-type: none"> – Descargas atmosféricas. – Chaveamento de indutores. 	<ul style="list-style-type: none"> – Tensões ou correntes ressonantes. – Falhas no isolamento.
Oscilatório 	<ul style="list-style-type: none"> – Duração. – Magnitude. – Componente espectral. 	<ul style="list-style-type: none"> – Chaveamento na rede e de capacitores. – Variações na potência transmitida. 	<ul style="list-style-type: none"> – Tensões ou correntes ressonantes. – Falhas no isolamento.
Variações de Curta Duração (VCD)			
Afundamento 	<ul style="list-style-type: none"> – Duração. – Magnitude. 	<ul style="list-style-type: none"> – Chaveamento de capacitores. – Variações na potência transmitida. 	<ul style="list-style-type: none"> – Desligamento do equipamento.
Elevação 	<ul style="list-style-type: none"> – Duração. – Magnitude. 	<ul style="list-style-type: none"> – Faltas. – Chaveamento de capacitores. – Variações na potência transmitida. 	<ul style="list-style-type: none"> – Má atuação da proteção. – Sobrecarga em equipamentos. – Falhas no isolamento.
Interrupção 	<ul style="list-style-type: none"> – Duração. – Magnitude. 	<ul style="list-style-type: none"> – Faltas. 	<ul style="list-style-type: none"> – Desligamento do equipamento.
Variações de Longa Duração (VLD)			
Subtensão 	<ul style="list-style-type: none"> – Magnitude. 	<ul style="list-style-type: none"> – Má regulação da tensão do sistema. – Sobrecarga. 	<ul style="list-style-type: none"> – Aumento nas perdas. – Instabilidade na tensão.

(continuação)

Categoria	Indicadores	Possíveis Causas	Possíveis Consequências
Variações de Longa Duração (VLD)			
Sobretensão		– Magnitude.	– Sobrecarga em equipamentos.
Interrupção sustentada		– Magnitude.	– Desligamento do equipamento.
Desequilíbrio			
Tensão		– Magnitude.	– Subtensão ou sobretensão entre polos.
Corrente		– Magnitude.	– Falhas na interconexão c.a. e c.c. – Acoplamento eletromagnético.
Distorções na Forma de Onda			
AC offset (Ripple)		– Magnitude.	– Falhas na interconexão c.a. e c.c. – Acoplamento eletromagnético.
Notching		– Magnitude (profundidade <i>notching</i>).	– Aumento nas perdas. – Aumento do valor de corrente nos capacitores de filtro. – Perturbação nos equipamentos de medição e comunicação.

(conclusão)

Categoria	Indicadores	Possíveis Causas	Possíveis Consequências
Distorções na Forma de Onda			
Componentes espúrias (Harmônicos e Inter-harmônicos) 	<ul style="list-style-type: none"> – Componentes espectrais. – Magnitude. 	<ul style="list-style-type: none"> – Chaveamento dos conversores de potência. 	<ul style="list-style-type: none"> – Aumento nas perdas. – Aumento do valor de corrente nos capacitores de filtro. – Perturbação nos equipamentos de medição e comunicação.

Fonte: Adaptado Van Den Broeck, Stuyts, Driesen (2018).

1.4. IEEE 1159-2019 - Recommended Practice for Monitoring Electric Power Quality

Com base na recomendação IEEE – *Recommendation Practice for Monitoring Electric Power Quality* - Std 1159, de 2019, podem-se estabelecer valores de tensão ou corrente (p.u.), tempo de ocorrência do evento, limites ou valores de referência que devem ser tomados como base para o desenvolvimento do estudo ou classificação de um evento de QEE (VAN DEN BROECK; STUYTS; DRIESEN, 2018).

1.4.1. Eventos Transitórios

Um evento transitório impulsivo é causado, geralmente, por descargas atmosféricas e pode ser descrito como uma mudança repentina unidirecional (de valor positivo ou negativo) na tensão, na corrente, ou em ambas em relação à condição nominal. Este evento é caracterizado pelo tempo de subida, descida e magnitude, conforme apresentado na Tabela 1.3.

Um evento transitório oscilatório pode ser entendido como uma mudança repentina na condição de regime permanente da tensão, da corrente, ou em ambas, assumindo valor negativo e positivo com amortecimento no decorrer do tempo, por exemplo, causado durante o chaveamento de capacitores ou de carga no barramento c.c.

Tabela 1.3 - Classificação dos eventos transitórios.

Categoria	Subcategoria	Duração do Evento	Amplitude da Tensão Instantânea em relação à tensão de referência
Impulsivo	Nanosegundos	< 50 ns	–
	Microsegundos	50 ns – 1 ms	
	Milisegundos	> 1 ms	
Oscilatório	Frequência baixa	0,3 ms – 50 ms	0 – 4 p.u.
	Frequência média	20 μ s	0 – 8 p.u.
	Frequência alta	5 μ s	0 – 4 p.u.

Fonte: Adaptado de IEEE (2019).

1.4.2. Variações de Longa Duração (VLD), Variações de Curta Duração (VCD) e Interrupções

No que diz respeito à tensão, é possível categorizar as variações com base na duração, magnitude e se é positiva ou negativa. Variações de curta duração, por exemplo, podem ser causadas por chaveamentos, faltas no barramento e flutuações na potência transmitida na rede. Variações de longa duração também podem ser causadas por flutuações na potência transmitida na rede, falta ou má regulação da tensão do barramento.

O padrão IEEE - Std 1159 define afundamento na tensão (do inglês *voltage sag*), como uma redução no valor eficaz da tensão entre 0,1 e 0,9 p.u., verificada entre 0,5 ciclo¹ até 1 minuto. A elevação na tensão (do inglês *voltage swell*) é definida como um aumento no valor eficaz da tensão acima de 1,1 p.u., verificada entre 0,5 ciclo até 1 minuto. Por fim, uma interrupção de curta duração é definida como uma diminuição no valor eficaz de tensão abaixo de 0,1 p.u., verificada entre 0,5 ciclo até 1 minuto. A Tabela 1.4 apresenta de forma mais detalhada em subcategorias os eventos de variação de tensão de curta duração.

¹ A recomendação IEEE – Std 1159 quantifica a duração do evento em termo de ciclos, tomando-se como base a frequência de operação em redes ou sistemas em corrente alternada.

Tabela 1.4 - Classificação da variação de tensão de curta duração (VTCD).

Categoria	Subcategoria	Duração do Evento	Magnitude da Tensão (RMS) em relação à tensão de referência
Afundamento	Instantânea	0,5 – 30 ciclos	0,1 – 0,9 p.u.
	Momentânea	30 ciclos – 3 seg.	
	Temporária	>3 seg. – 1 min.	
Elevação	Instantânea	0,5 – 30 ciclos	1,1 – 1,8 p.u.
	Momentânea	30 ciclos – 3 seg.	1,1 – 1,4 p.u.
	Temporária	>3 seg. – 1 min.	1,1 – 1,2 p.u.
Interrupção	Momentânea	0,5 ciclo – 3 seg.	< 0,1 p.u.
	Temporária	>3 seg. – 1 min.	

Fonte: Adaptado de IEEE (2019).

A IEEE - Std 1159 define as subcategorias: subtensão, sobretensão e interrupções sustentadas, como variações de tensão por períodos mais longos (acima de 1 minuto). Os níveis de magnitudes diferem aos níveis de magnitude de eventos de curta duração. Na Tabela 1.5 mostra-se a classificação dos eventos de variação de tensão de longa duração.

Tabela 1.5 - Classificação da variação de tensão de longa duração (VLD).

Categoria	Duração do Evento	Magnitude da Tensão (RMS) em relação à tensão de referência
Subtensão	> 1 min.	0,8 – 0,9 p.u.
Sobretensão		1,1 – 1,2 p.u.
Interrupção Sustentada		0,0 p.u.

Fonte: Adaptado de IEEE (2019).

Interrupções sustentadas estão associadas, por exemplo, a uma seção do barramento desconectada após uma falha. Sobretensões podem ser causadas por variações na potência ou por má atuação do regulador de tensão. Destaca-se este fenômeno como um dos mais impactante em uma MDCC, pois os equipamentos e os condutores podem sofrer avarias ou danos à estrutura isolante do equipamento (VAN DEN BROECK; STUYTS; DRIESEN, 2018). Subtensões podem causar o desligamento ou mau funcionamento de equipamentos conectados ao barramento, afetando a disponibilidade do sistema.

1.5. Considerações Finais Sobre o Capítulo 1

Normas e padrões são fundamentais para garantir a segurança e o desempenho adequado de sistemas em corrente contínua. Essas diretrizes estabelecem critérios técnicos para projeto, instalação, operação e manutenção de equipamentos, que visam evitar danos às pessoas e às propriedades.

Observa-se que atualmente já existem recomendações e padrões referentes à concepção física de sistemas em corrente contínua, definindo melhor aplicação a estes sistemas. Além disso, também já se tem padrões referentes a eventos isolados que ocorrem em sistemas em c.c., como exemplo, ondulação de tensão e corrente.

Dentre os padrões que podem ser aplicáveis a sistemas em corrente contínua, destaca-se o IEEE Std 1159, que trata de questões relacionadas à qualidade de energia elétrica, especificamente de distúrbios elétricos, tais como eventos de longa e curta duração, transientes e ruído elétrico. Esses distúrbios podem afetar a operação de equipamentos e até mesmo causar falhas em sistemas elétricos. Contudo, ainda se torna necessário o aprofundamento de estudos visando ao estabelecimento de limites aceitáveis para os distúrbios elétricos presentes em sistemas em corrente contínua, permitindo que os projetistas, operadores e mantenedores desses sistemas possam avaliar e monitorar adequadamente a qualidade da energia elétrica.

CAPÍTULO 2 NANORREDE DE DISTRIBUIÇÃO EM CORRENTE CONTÍNUA IMPLANTADA NO GEDAE/UFPA

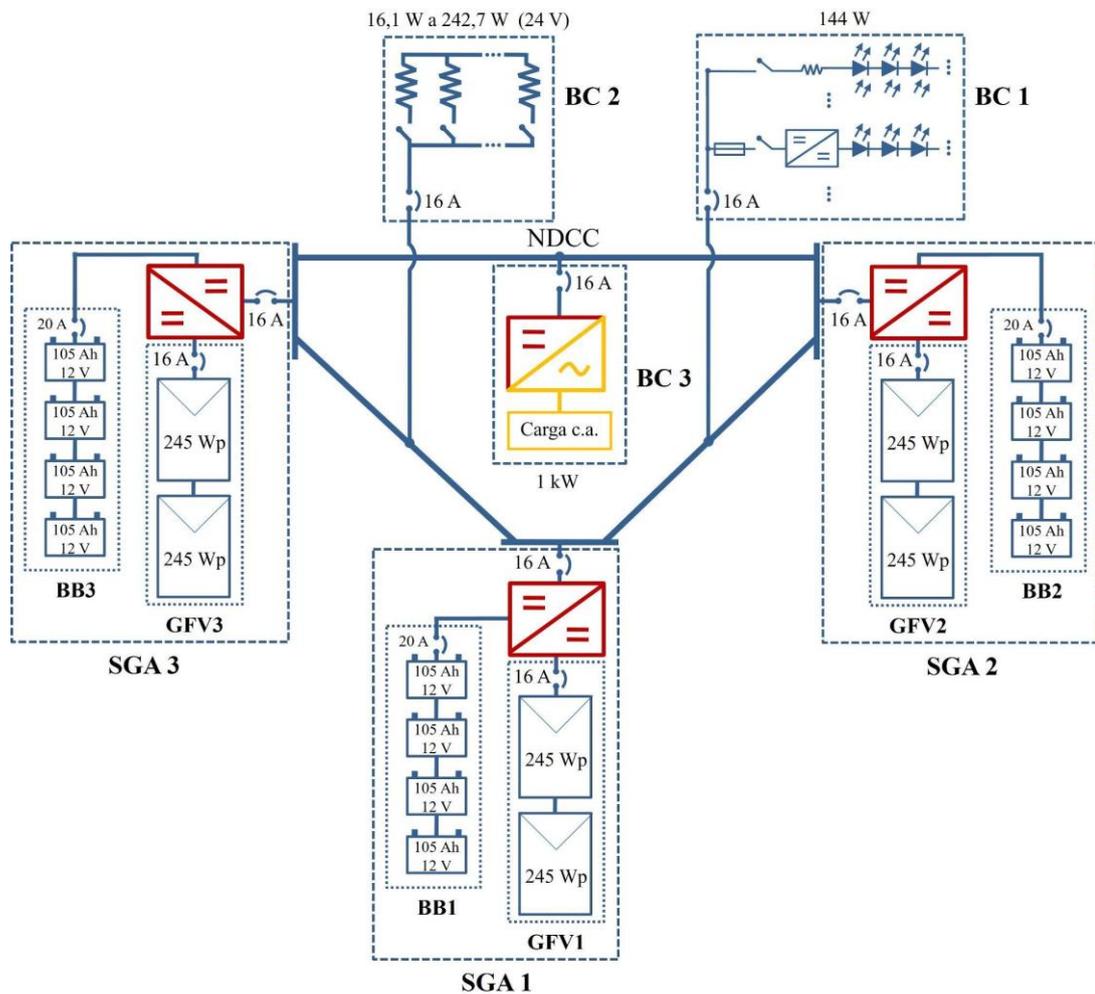
Este capítulo apresenta a descrição da Nanorrede de Distribuição em Corrente Contínua (NDCC) instalada na área de testes do prédio do Grupo de Estudos e Desenvolvimento de Alternativas Energéticas da Universidade Federal do Pará (GEDAE/UFPA), localizada na cidade de Belém-PA. Esta NDCC é empregada no presente trabalho para o estudo experimental da QEE. Assim, descrevem-se as especificações da rede de distribuição, os principais componentes do sistema de geração e armazenamento de energia, as cargas empregadas e os instrumentos para aquisição de dados presentes na NDCC.

2.1. Configuração da Nanorrede de Distribuição em Corrente Contínua do GEDAE/UFPA

A NDCC está instalada e operando na área externa do prédio do GEDAE, localizado na cidade universitária Prof. José da Silveira Neto da UFPA, cidade de Belém-Pará. Esta NDCC, representada pelo diagrama unifilar da Figura 2.1, é formada por três sistemas de geração e armazenamento (SGA), os quais incluem o sistema de geração fotovoltaica (GFV) e armazenamento por meio de bancos de baterias (BB), acessando a NDCC com a utilização de Controladores de Carga (CC). A NDCC possui três bancos de cargas (BC) que estão dispostos ao longo da rede em pontos de conexão distintos e com potências instaladas distintas.

Os três sistemas de geração e armazenamento em conjunto com os bancos de cargas estão localizados em uma estrutura construída de forma a simular um telhado residencial, facilitando uma ação de manutenção preventiva ou corretiva dos equipamentos, além de oferecer o suporte necessário ao arranjo fotovoltaico. A estrutura também abriga o centro de conexões, o qual acomoda um quadro elétrico contendo os controladores de carga.

Figura 2.1 - Diagrama unifilar da NDCC.



Fonte: Adaptado de FONSECA (2021).

A NDCC é classificada como unipolar com tensão nominal de 24 V, possuindo apenas um condutor positivo (+) e um negativo (-). A arquitetura empregada na NDCC é em anel e isolada, não possuindo um *link* com a rede c.a. convencional. O sistema é do tipo isolado da terra e, atualmente, possui apenas o controle realizado pelos conversores de potência, de interface com a rede, na gestão do fluxo de potência entre geração, armazenamento e carga.

2.2. Controlador de Carga (CC)

Os SGAs possuem o controlador de carga, ilustrado na Figura 2.2, da fabricante EPEVER modelo XTRA *series* – 2210N, para realização da interface com a NDCC. O controlador possui a tecnologia de Seguimento do Ponto de Máxima Potência (SPMP), a fim de se obter maior aproveitamento da geração fotovoltaica. O controlador pode operar com um

banco de baterias de 12 V ou 24 V, com detecção automática da tensão do banco. Esse controlador possui a opção de uso com baterias de tecnologias mais recentes, por exemplo, íon Lítio, além de uma interface visual por meio de um *display* LCD, apresentando parâmetros elétricos do sistema. Na Tabela 2.1 apresentam-se as características do controlador.

Figura 2.2 - Controlador de carga EPEVER vista frontal (a) e vista diagonal (b).



Fonte: EPEVER (2022).

Tabela 2.1 - Informações técnicas do controlador de carga EPEVER XTRA.

(continua)

Seção	Parâmetro	12 V		24 V		
FV	Potência máxima	260 W		520 W		
	Tensão máxima de circuito aberto	92 V (25 °C) e 100 V (< 25 °C)				
	Tensão de MPPT	(Tensão da bateria +2 V) ~ 72 V				
	Corrente máxima de curto-circuito	20 A				
Bateria	Tensão de entrada	8 V – 32 V				
	Corrente em modo de espera	< 35 mA		< 22 mA		
Carregador	Tensão de carga	Etapa	Flooded	VRLA	Flooded	VRLA
		<i>Boost</i>	14,6 V	14,4 V	29,2 V	28,8 V
		Tensão no modo <i>Float</i>	13,8 V		27,6 V	
		Corrente máxima de carga e descarga	20 A			
	Faixa de compensação de temperatura	+ 3 mV/°C/2 V				
Equalização	Tensão máxima de equalização	14,8 V	14,6 V	29,6 V	29,2 V	
Proteções internas	Corrente máxima no terminal das cargas	20 A				
	Tensão de desconexão por subtensão	11,1 V		22,2 V		

(conclusão)

Seção	Parâmetro	12 V	24 V
Proteções internas	Tensão de reconexão após subtensão	12,6 V	25,2 V
	Tensão de desconexão por sobretensão	15,0 V	30,0 V
Eficiência	MPPT	> 99,5 %	
	Conversão	Até 98 %	

Fonte: EPEVER (2022).

Os controladores de carga dos SGAs são empregados a fim de preservar o banco de baterias, impedindo descargas profundas e evitando a redução da vida útil do banco, além de otimizar a geração FV por meio do SPMP.

Há a possibilidade de alterar os *setpoints* dos controladores de carga, de acordo com a tecnologia de banco de baterias utilizada, por meio do modo de configuração “usuário”. A Tabela 2.2 apresenta os dados pré-definidos para o carregamento dos bancos de baterias (valores referentes a sistemas em 24 V), classificados por tecnologia de chumbo-ácido, e a faixa de valores que pode ser utilizada no modo “usuário”.

Tabela 2.2 - Parâmetros de controle para baterias de chumbo-ácido em 24 V.

Característica da Tensão	Tipo do Banco de Baterias			
	Selada	Inundada	Gel	Usuário
Tensão de desconexão por alta tensão	32,0 V			
Tensão limite de carregamento				
Tensão de reconexão após corte por alta tensão	30,0 V			
Tensão de equalização	29,2 V	29,6 V	-	18 ~ 34 V
Tensão de absorção	28,8 V	29,2 V	28,4 V	
Tensão de flutuação	27,6 V			
Tensão de reconexão da absorção	26,4 V			
Tensão de reconexão após corte por baixa tensão	25,2 V			
Tensão para aviso da reconexão após corte de baixa tensão	24,4 V			
Tensão de aviso de baixa tensão	24,0 V			
Tensão de desconexão por baixa tensão	22,2 V			
Tensão limite de descarga	21,2 V			
Duração da equalização	120 min	-	0 ~ 180 min	
Duração da absorção	120 min	-	10 ~ 180 min	

Fonte: EPEVER (2022).

2.3. Registrador de Dados do Sistema (*datalogger*) eLOG01

O *datalogger* da fabricante EPEVER modelo eLOG01 ilustrado na Figura 2.3 é o componente responsável pela aquisição de dados do controlador de carga, por meio da interface de comunicação RS485, o qual inclui a obtenção dos parâmetros elétricos do gerador fotovoltaico, banco de baterias, cargas, além do *status* do sistema e valores de energia gerada e consumida diária, mensal e anual. O intervalo de amostragem padrão é de 10 minutos, com capacidade de armazenamento de aproximadamente 4 meses e meio.

Além disso, por meio do eLOG01 e utilizando o *software* disponibilizado pelo fabricante, também é possível configurar os parâmetros de operação do controlador de carga, como por exemplo, o nível de tensão dos estágios de carregamento do banco de baterias, a tecnologia do banco de baterias, os níveis máximos e mínimos de tensão de operação, dentre outros.

Figura 2.3 - *Datalogger* eLOG01 com componentes auxiliares.



Fonte: EPEVER (2022).

Para o presente trabalho, a aquisição de dados por meio do eLOG01 foi realizada configurando o *datalogger* para o tempo de amostragem de 1 minuto, utilizando o *software* de reconfiguração de tempo disponibilizado pelo fabricante. Na Tabela 2.3 constam mais algumas características referentes ao componente utilizado. O eLOG01 é suprido pela conexão da porta de transferência de dados, com conector RJ45 e tensão de 5 V proveniente do controlador de carga.

Tabela 2.3 - Informações técnicas do *datalogger* eLOG01.

Parâmetro	Valor
Tensão de alimentação	4 - 10 V
Autoconsumo	0,3 W
Comunicação	RS485
Interface	2 RJ45 e 1 Micro USB
Tempo de amostragem (padrão)	10 minutos
Capacidade de armazenamento	20.000 amostras
Dimensões	71 x 67,62 x 25,8 mm
Peso	42 g

Fonte: EPEVER (2022).

2.4. Registrador de Dados de Parâmetros Ambientais (*datalogger*) FieldLogger

O monitoramento dos parâmetros ambientais é realizado utilizando o *datalogger* do fabricante NOVUS, modelo FieldLogger, um equipamento de aquisição e registro de dados analógicos e digitais. O equipamento foi instalado na estrutura de abrigo para os componentes da NDCC, conforme ilustrado na Figura 2.4 (a). O *datalogger* FieldLogger permite configurar as entradas analógicas para qualquer sensor que possua a faixa de operação conforme indicado na Tabela 2.4.

Figura 2.4 - *Datalogger* instalado na área de testes do GEDAE/UFPA (a) e modelo FieldLogger (b).



(a)



(b)

Fonte: Autoria própria; NOVUS (2022).

Tabela 2.4 - Informações técnicas referentes à configuração do *datalogger* Fieldlogger.

Entradas Analógicas		
Tipo de Entrada	Faixa de Medição	Exatidão
Linear 0 a 20 mA	Configurável	$\pm 0,15$ % (F.E.)
Linear 4 a 20 mA	Configurável	$\pm 0,15$ % (F.E.)
Linear 0 a 20 mV	Configurável	$\pm 0,15$ % (F.E.)
Linear 0 a 50 mV	Configurável	$\pm 0,15$ % (F.E.)
Linear 0 a 60 mV	Configurável	$\pm 0,15$ % (F.E.)
Linear -20 a 20 mV	Configurável	$\pm 0,15$ % (F.E.)
Linear 0 a 5 V	Configurável	$\pm 0,15$ % (F.E.)
Linear 0 a 10 V	Configurável	$\pm 0,15$ % (F.E.)

Fundo de Escala (F.E.)

Fonte: NOVUS (2022).

O armazenamento no *datalogger* pode ser feito tanto na memória *flash* interna, com capacidade próxima a 2 MB, quanto em cartões SD, podendo ser extraído em formato .csv ou .txt. A aquisição circular também é uma opção, inscrevendo dados anteriores por novos assim que a memória chegue à capacidade total. Visando monitoramento de parâmetros ambientais, foram inseridos quatro sensores no *datalogger*, sendo sensor de irradiância e sensor de temperatura: ambiente, banco de baterias e parte posterior do módulo fotovoltaico.

2.4.1. Sensor de Irradiância

Para medição do parâmetro ambiental de irradiância global foi utilizado o sensor da fabricante Tritec modelo Spektron 210, com as características ilustradas na Tabela 2.5.

O sensor foi instalado na estrutura de suporte dos geradores fotovoltaicos de modo a possuir a mesma inclinação dos geradores fotovoltaicos, conforme ilustrado na Figura 2.5 (a).

Figura 2.5 - Sensor de irradiância instalado na área de testes do GEDAE/UFPA (a) e modelo Spektron 210 (b).



(a)



(b)

Fonte: Autoria própria; Tritec (2022).

Tabela 2.5 - Informações técnicas do sensor de irradiância.

Parâmetro	Valor
Modelo	Spektron 210
Sensor	Célula de Si Monocristalino (13 mm / 33 mm)
Faixa de medição	0 – 1.500 W/m ²
Exatidão do sensor	± 5% média anual
Saída	Aproximadamente 75 mV a 1.000 W/m ²
Dimensões	118 mm x 50 mm x 44 mm
Proteção	IP65
Peso	250 g (incluindo o cabo)

Fonte: Tritec (2022).

Para melhor exatidão durante as medições, foi realizada a calibração do sensor. Realizou-se um ensaio em um simulador solar presente no laboratório do GEDAE, modelo *HighLight 3c* do fabricante *Pasan Measurement Systems*, classe A+A+A+, obtendo-se o valor de referência de 74,145 mV na tensão de saída do sensor para a irradiância global incidente de 1.000 W/m². Desta forma, a irradiância global é obtida segundo a equação 2.1.

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

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

2.4.2. Sensor de Temperatura

Para medição de temperatura ambiente, do banco de baterias e da parte posterior do módulo fotovoltaico, utilizou-se um termopar da fabricante LABFACILITY tipo K para medição de temperatura ambiente e tipo T para medição de temperatura do banco de baterias e temperatura na parte posterior do módulo. O termopar possui faixa de operação de -50 a 350 °C com cabo de 2 metros de comprimento, conforme ilustra a disposição dos sensores na Figura 2.6.

Figura 2.6 - Sensor de temperatura no banco de baterias (a), ambiente (b), parte posterior o módulo fotovoltaico (c) e ilustrativo (d).



(a)



(b)



(c)



(d)

Fonte: Autoria própria.

2.5. Gerador Solar Fotovoltaico (GFV)

O gerador fotovoltaico presente em cada SGA é formado pela associação em série de dois módulos fotovoltaicos do fabricante *Yingli Solar*, modelo YL245P-29b de 245 Wp de potência nominal. Durante a construção da NDCC estes módulos foram submetidos a um ensaio de curva I-V, como descrito em Torres (2019). As características elétricas nas condições padrão de ensaio² são apresentadas na Tabela 2.6. Tais valores pertencem a um módulo avulso utilizado na NDCC, a partir do ensaio no simulador solar, presente no laboratório do GEDAE.

² *Standard Test Conditions - STC*: temperatura da célula FV, $T_{C, STC} = 25\text{ }^{\circ}\text{C}$, irradiância global incidente no plano do gerador FV, $G_{i, STC} = 1000\text{ W/m}^2$ e massa de ar, $AM = 1,5$.

Tabela 2.6 - Características técnicas nas STC do módulo FV.

Parâmetro	Valor
Potência nominal	238,25 Wp
Tensão na máxima potência	29,22 V
Corrente na máxima potência	8,15 A
Tensão de circuito aberto	37,21 V
Corrente de curto-circuito	8,76 A

Fonte: Torres (2019).

Na Tabela 2.7 constam os coeficientes térmicos dos módulos utilizados, obtidos na folha de dados do fabricante (YINGLI SOLAR, 2014).

Tabela 2.7 - Características térmicas do módulo FV.

Parâmetro	Valor
Temp. nominal de operação da célula – TNOC	46 °C
Coef. térmico de potência	-0,45 %/°C
Coef. térmico de corrente de curto-circuito	0,06 %/°C
Coef. térmico de tensão de circuito aberto	-0,33 %/°C
Coef. térmico de tensão na máxima potência	-0,45 %/°C

Fonte: Yingli Solar (2014).

As características elétricas de cada gerador fotovoltaico (GFV) estão apresentadas na Tabela 2.8 e na Figura 2.7 indica-se a disposição dos três geradores em uma estrutura com telhado localizada na área de testes do prédio do GEDAE. Todos os geradores possuem sua orientação para o norte magnético, com desvio azimutal de aproximadamente 20° em relação ao norte geográfico e ângulo de inclinação de 11° em relação ao plano horizontal.

Tabela 2.8 - Características técnicas nas STC de cada GFV.

Parâmetro	Valor
Potência nominal	476,5 Wp
Tensão na máxima potência	58,44 V
Corrente na máxima potência	8,15 A
Tensão de circuito aberto	74,42 V
Corrente de curto-circuito	8,76 A

Fonte: Torres (2019).

Figura 2.7 - Disposição de cada GFV na área de testes do GEDAE/UFPA.



Fonte: Autoria própria.

Destaca-se, no entanto, que a potência atual dos módulos fotovoltaicos utilizados na NDCC não corresponde mais à potência nominal de catálogo, visto o tempo de instalação e posterior degradação dos mesmos.

2.6. Banco de Baterias (BB)

Os bancos de baterias estão dispostos sob a estrutura de telhado e cada banco é formado por quatro baterias seladas de chumbo-ácido com a associação série-paralelo. As baterias que compõem o banco são do modelo 12MS111Ah, da fabricante Moura, tendo tensão nominal de 12 V e capacidade nominal de 111 Ah (C20).

Na Figura 2.8 ilustram-se os três bancos que compõem atualmente a NDCC.

Cada banco de baterias possui uma associação em paralelo de um conjunto de duas baterias de 12 V conectadas em série, proporcionando um banco com tensão nominal de 24 V e capacidade nominal de 222 Ah.

Figura 2.8 - Disposição dos bancos de baterias na área de testes do GEDAE/UFPA.



Fonte: Autoria própria.

2.7. Banco de Cargas (BC)

Para fins de testes de demanda e consumo na NDCC, empregam-se bancos de carga conectados em diferentes pontos da rede. A especificação dos bancos de carga utilizados está apresentada na Tabela 2.9, os quais foram também pensados considerando premissas distintas, conforme apresentados a seguir.

Tabela 2.9 - Informações técnicas dos bancos de cargas utilizados.

BC	Carga	Tipo de Carga	Tensão Nominal	Potência Total
1	Iluminação LED	Potência constante	24 V	144 W
2	Resistiva	Resistência constante	-	16,1 – 242,7 ³ W
3	Inversor Autônomo	Potência constante	24 V	1.000 W

Fonte: Autoria própria.

O banco de cargas nº 1 (BC1) é constituído de cargas de iluminação a LED, utilizadas cotidianamente em residências e encontradas facilmente no mercado. O banco de cargas nº 2 (BC2) foi pensado como um banco de carga que pudesse causar impacto considerável durante sua entrada ou saída da rede, sendo uma carga resistiva. Para o banco de carga nº 3 (BC3) utiliza-se um inversor para realização da interface da rede c.c. com cargas c.a., dessa forma,

³ Com ajuste da resistência para se obter uma demanda variável do banco de cargas nº 2, considerando o suprimento por uma tensão nominal de 24 V em corrente contínua.

observando os possíveis impactos para a NDCC. As subseções seguintes fazem o detalhamento de cada banco de carga.

2.7.1. Banco de Carga nº 1 (BC1)

A utilização de iluminação LED aplicada em residências, comércios, indústrias ou mesmo vias públicas é realidade pelo preço de mercado competitivo, se comparado a vida útil e a eficiência de conversão de energia elétrica em energia luminosa em relação às lâmpadas de outras tecnologias. Assim, o BC1 é constituído de iluminação a LED em dois tipos disponíveis no mercado: lâmpadas de LEDs de bulbo de três fabricantes diferentes (com e sem conversor c.c.-c.c.) e painéis LED *SLIM* com conversor c.c.-c.c. em duas configurações distintas, conforme descritas na Tabela 2.10. A potência demandada pelo referido banco de cargas quando todas as cargas estão acionadas é de 144 W com consumo de 3,45 kWh/dia.

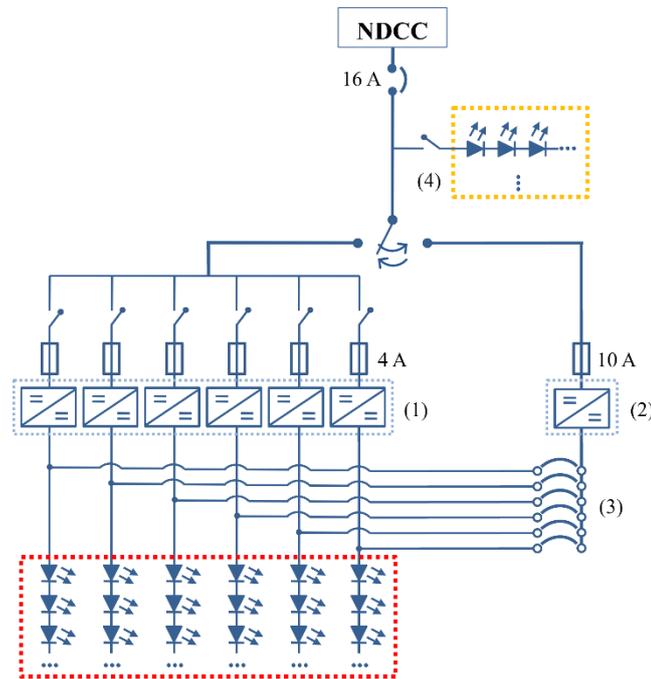
Tabela 2.10 - Descrição do BC1.

Equipamento	Fabricante	Unidade	Modelo	Potência	Conversor c.c.-c.c.
Lâmpada LED	Ourolux	8	Bulbo	9 W	Não
	G-Light			8 W	Sim
	City Lumi			9 W	Não
Painel LED	Blumenau	6	Embutir	12 W	Sim

Fonte: Autoria própria.

As lâmpadas de LED bulbo utilizadas possuem fixação padrão residencial modelo E-27 e nos ensaios realizados são acionadas individualmente por meio de chaves seletoras de duas posições *on/off*, conforme ilustrado na Figura 2.9 pela indicação (4) e pontilhado laranja. Este produto é comercializado sob a indicação para uso com sistemas fotovoltaicos isolados, nesse caso, utilizando banco de baterias. De modo geral, apenas para as lâmpadas de LED bulbo tem-se uma potência total próxima a 72 W, quando se tem as 8 unidades acionadas.

Figura 2.9 - Diagrama unifilar do BC1.



Fonte: Autoria própria.

Os painéis LED, indicado com o pontilhado vermelho Figura 2.9, estão arranjados de forma a possibilitarem duas configurações distintas de utilização do conversor c.c.-c.c., conforme o esquema ilustrado na Figura 2.9: um conversor c.c.-c.c. por lâmpada, isto é, descentralizado (1); ou um conversor para um conjunto de lâmpadas, ou seja, centralizado (2). Assim, para o acionamento das luminárias ou painéis LED, inicialmente uma chave alavanca de três posições possibilita a escolha do modo que as lâmpadas serão acionadas, seja com conversor c.c.-c.c. descentralizado ou centralizado.

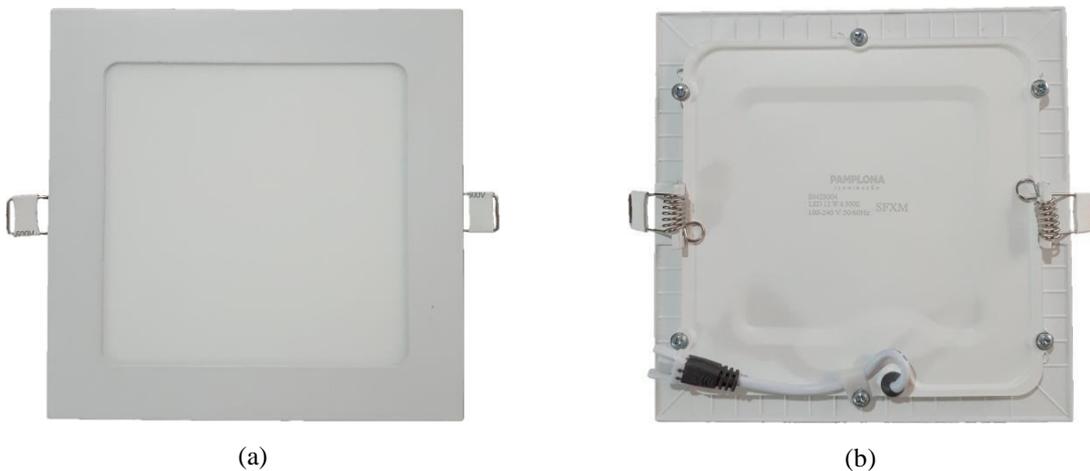
Posteriormente, se o modo escolhido para alimentação das cargas for o conversor c.c.-c.c. descentralizado, cada luminária possui uma chave de acionamento e, no caso da utilização do conversor c.c.-c.c. centralizado, o acionamento das cargas é feito com a utilização de condutores de comprimentos diferentes (3), a fim de simular distâncias distintas da conexão ou instalação das luminárias com a NDCC. Tal modo ou estratégia de ensaio torna-se interessante por mostrar qual configuração está mais passível de sofrer influências de um distúrbio da rede de distribuição, causando consequências para as cargas que serão supridas.

O sistema de proteção adotado constitui-se pela adição de fusíveis na entrada de cada conversor, considerando sua corrente máxima de entrada disponível na folha de dados do componente. Além disso, emprega-se um disjuntor na conexão entre a NDCC e o BC1.

2.7.1.1. Luminária Painel LED com Conversor c.c.-c.c.

No BC1 há seis luminárias do fabricante Blumenau Iluminação, modelo Painel LED *SLIM* com estrutura de alumínio, cor branca fria. As luminárias operam com uma potência nominal de 12 W e tensão de entrada de 100 a 240 V_{rms} em corrente alternada. Portanto, a parte do BC1, composto pelas referidas luminárias, possui uma potência nominal de 72 W e um consumo diário de aproximadamente 1,73 kWh, considerando as seis luminárias acionadas. Na Figura 2.10 (a) e (b) apresentam-se as fotografias tomadas das partes frontal e traseira da luminária Painel LED *SLIM*, respectivamente.

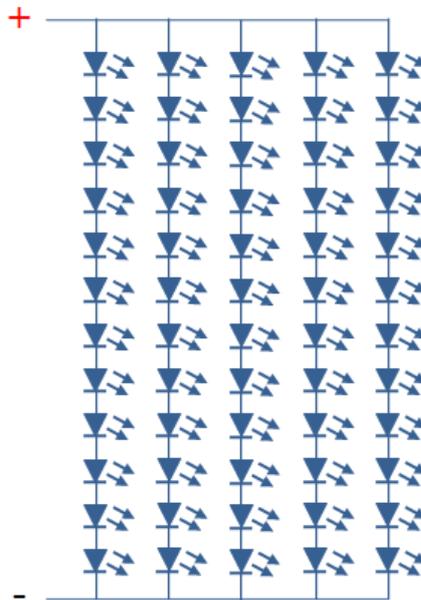
Figura 2.10 - Painel LED vista frontal (a) e costas (b).



Fonte: Blumenau Iluminação (2021).

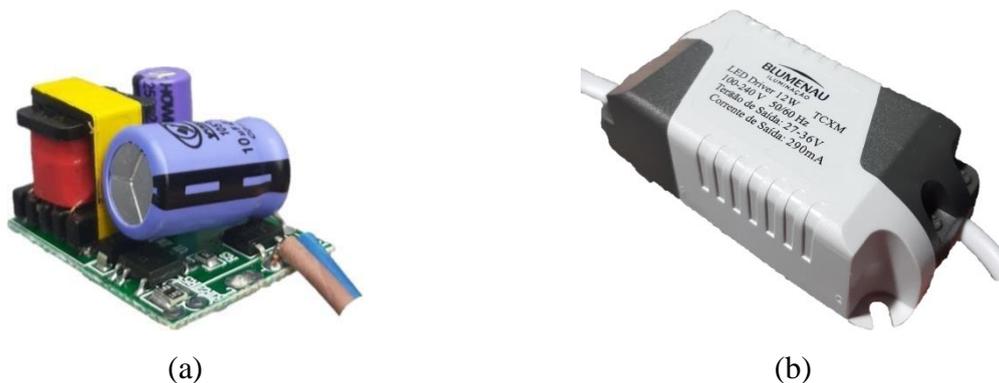
Internamente as luminárias possuem, sob uma fita condutora, um arranjo de 60 LEDs, sendo 12 em série e 5 em paralelo, como mostra a Figura 2.11. Nesse caso, os LEDs estão conectados diretamente um ao outro sem um componente que auxilia no limite de corrente que irá passar em cada LED logo, faz-se necessária a utilização de um *driver*.

Figura 2.11 - Configuração dos LEDs do painel LED do fabricante Blumenau.



Fonte: Autoria própria.

As luminárias comerciais de LEDs são normalmente vendidas com seus respectivos *drivers* de conexão, que realiza a adequação do nível de tensão da rede de distribuição convencional e retifica a um valor de corrente constante à luminária, evitando que a mesma seja danificada. Na Figura 2.12 apresenta-se a placa de circuito e a capa protetora do *driver* que acompanha os painéis LED utilizados no trabalho.

Figura 2.12 - *Driver* de fábrica do painel LED circuito (a) e capa protetora (b).

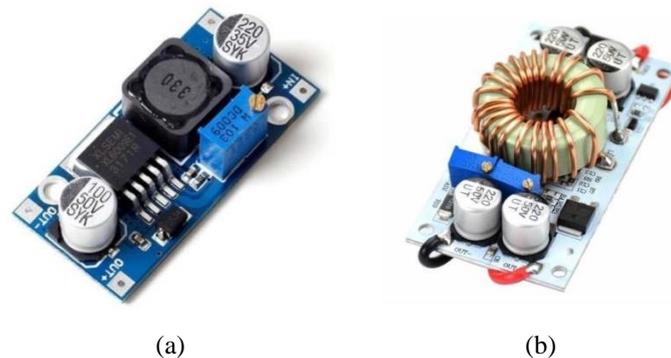
Fonte: Autoria própria.

Para os painéis de LED foi realizada a troca do *driver* de fábrica por um conversor c.c.-c.c. visando elevar a tensão de suprimento dos LEDs que constituem o painel, de 24 V nominal

na entrada para 36 V na saída do conversor. Para o modo descentralizado, foi utilizado o conversor c.c.-c.c., apresentado na Figura 2.13 (a), do tipo *step up* ou *boost*, modelo do *chip* base XL6009. A tensão de saída do conversor é ajustável inicialmente por meio de um *trimpot*, oferecendo uma tensão de 5,5 a 36 V em corrente contínua e uma potência nominal de operação de até 25 W, sendo necessária a utilização de um dissipador de calor acima dessa potência. As características do conversor são apresentadas na Tabela 2.11.

Para o modo centralizado, utilizou-se o conversor c.c.-c.c. apresentado na Figura 2.13, do tipo *step up* ou *boost*, *open hardware*, *chip* base TL494C. O conversor de tensão centralizado possui as mesmas finalidades do conversor descentralizado, diferindo apenas na sua potência nominal, que pode operar até 250 W. Pode-se ainda realizar o ajuste da tensão e corrente de saída do conversor por meio de resistor variável individual.

Figura 2.13 - Conversores c.c.-c.c. descentralizado (a) e centralizado (b).



Fonte: Autoria própria.

Tabela 2.11 - Informações técnicas dos conversores c.c.-c.c.

Parâmetro	Conversor c.c.-c.c.	
	Descentralizado	Centralizado
Tensão de entrada	5 – 32 V _{cc}	8 – 45 V _{cc}
Tensão de saída	5,5 – 36 V _{cc}	12 – 50 V _{cc}
Corrente máxima de entrada	4 A	8 A
Corrente máxima de saída	2,5 A	10 A
Eficiência de conversão	88 – 95 %	88 – 92 %
Frequência de chaveamento	400 kHz	156 kHz
Temperatura de operação	- 40 – 85 °C	- 40 – 85 °C
Utilização de dissipador	> 25 W	> 150 W
Dimensões	43 x 21 x 14 mm	70 x 46 x 13 mm

Fonte: Autoria própria.

2.7.1.2. Lâmpada LED Ourolux

A lâmpada LED modelo bulbo da fabricante Ourolux, ilustrada na Figura 2.14, possui tensão nominal de operação 24 V e potência nominal de 9 W. A especificação desta lâmpada está apresentada na Tabela 2.12.

Tabela 2.12 - Informações técnicas da lâmpada LED do fabricante Ourolux.

Parâmetro	Valor
Tensão nominal	24 V
Corrente nominal	375 mA
Potência nominal	9 W
Fluxo luminoso	810 lm
Eficiência luminosa	90 lm/W
Base	E27
Temperatura de operação	-10 - 50 °C
Vida útil	15.000 h
Peso	26 g

Fonte: Ourolux (2022).

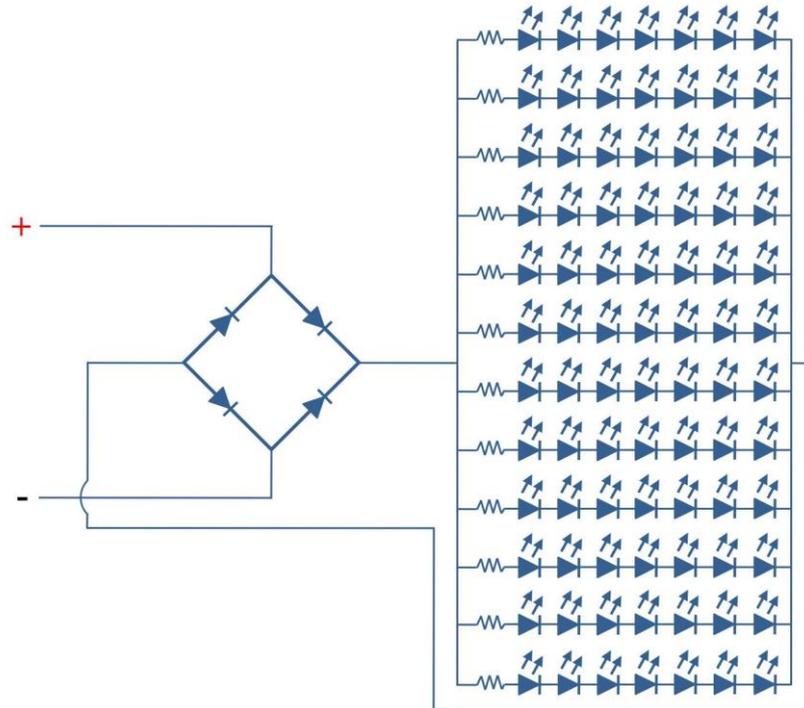
Figura 2.14 - Lâmpada LED do fabricante Ourolux.



Fonte: Ourolux (2022).

A lâmpada é constituída por uma ponte retificadora de diodos (SS24), possibilitando conectá-la de modo que a rosca/soquete da lâmpada sirva tanto para o polo positivo quanto para o negativo. Além disso, 7 LEDs são dispostos em série em conjunto com um resistor SMD de 59 Ω , sendo ao todo 12 fileiras de LEDs conectadas em paralelo, conforme ilustrado na Figura 2.15, onde o conjunto é disposto no dissipador ou base de apoio dentro da lâmpada.

Figura 2.15 - Configuração dos LEDs da lâmpada LED do fabricante Ourolux.



Fonte: Autoria própria.

2.7.1.3. Lâmpada LED G-Light

A lâmpada LED modelo bulbo do fabricante G-Light, ilustrada na Figura 2.16, possui tensão nominal de operação 24 V e potência nominal de 8 W. As especificações técnicas da lâmpada estão apresentadas na Tabela 2.13.

Tabela 2.13 - Informações técnicas da lâmpada LED do fabricante G-Light.

Parâmetro	Valor
Tensão nominal	24 V (AC/DC)
Corrente nominal	308 mA (DC)
Potência nominal	8 W
Fluxo luminoso	700 lm
Eficiência luminosa	87,5 lm/W
Base	E27
Vida útil	25.000 h
Peso	55 g

Fonte: G-Light (2022).

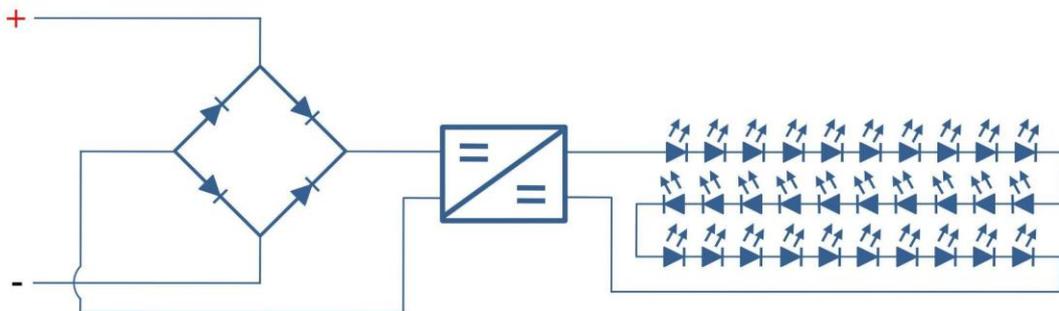
Figura 2.16 - Lâmpada LED do fabricante G-Light.



Fonte: G-Light (2022).

A lâmpada possui uma ponte retificadora de diodos (SS26), possibilitando conectá-la de modo que a rosca/soquete da lâmpada sirva tanto para o polo positivo quanto para o negativo, em conjunto com um conversor c.c.-c.c. BP1808 e uma associação LEDs, dispostos no dissipador ou base da parte interna. O conversor c.c.-c.c. é do tipo *step-up* ou *boost* para alimentação de 30 LEDs em série, elevando a tensão de operação de entrada de 24 V para aproximadamente 90 V, conforme esquemático ilustrado na Figura 2.17.

Figura 2.17 - Configuração dos LEDs da lâmpada LED do fabricante G-Light.



Fonte: Autoria própria.

2.7.1.4. Lâmpada LED City Lumi

A lâmpada LED modelo bulbo do fabricante City Lumi, ilustrada na Figura 2.18, possui tensão nominal de operação 24 V e potência nominal de 9 W. As especificações técnicas da lâmpada estão apresentadas na Tabela 2.14.

Tabela 2.14 - Informações técnicas da lâmpada LED do fabricante City Lumi.

Parâmetro	Valor
Tensão nominal	12/24 V
Corrente nominal	720 mA
Potência nominal	9 W
Fluxo luminoso	800 lm
Eficiência luminosa	88,9 lm/W
Base	E27
Vida útil	25.000 h
Temperatura de operação	-20 - 40 °C
Peso	55 g

Fonte: City Lumi (2022).

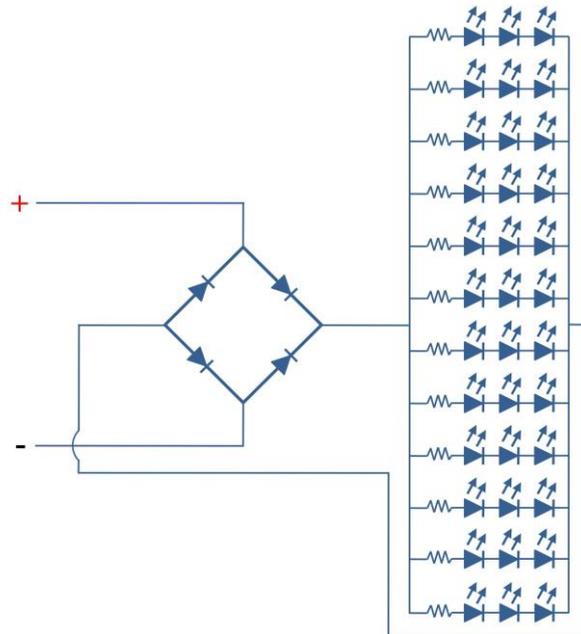
Figura 2.18 - Lâmpada LED do fabricante City Lumi.



Fonte: City Lumi (2022).

A lâmpada é constituída por uma ponte retificadora, circuito integrado KMB24F, possibilitando conectá-la de modo que a rosca/soquete da lâmpada sirva tanto para o polo positivo quanto para o negativo. 3 LEDs são dispostos em série em conjunto de um resistor SMD de 60,4 Ω , sendo ao todo 12 fileiras de LEDs conectados em paralelo, conforme ilustrado na Figura 2.19, dispostos no dissipador ou base de apoio dentro da lâmpada.

Figura 2.19 - Configuração dos LEDs da lâmpada LED do fabricante City Lumi.



Fonte: Autoria própria.

2.7.2. Banco de Carga nº 2 (BC2)

O BC2 consiste em uma carga resistiva, ilustrada na Figura 2.20, capaz de dissipar uma potência de até 242,7 W para uma tensão de 24 Vcc. A carga possui 15 elementos resistivos, cada um com resistência de 35,6 Ω , possibilitando diversas formas de conexões em série e paralelo. Essa carga é normalmente comercializada para ser utilizada como aquecedor de ar, caso suprida por tensão de 220 V rms, sendo fabricada pela IMC (Indústria de Aparelhos Elétricos).

Figura 2.20 - Carga resistiva de alta potência.



Fonte: Autoria própria.

2.7.3. Banco de Carga nº 3 (BC3)

Para o BC3 foi utilizado um inversor isolado (*off-grid*) de onda senoidal pura, do fabricante *Steca*, modelo *Solarix 1100-L60*, ilustrado na Figura 2.21, o qual possui potência nominal de 900 VA e tensão nominal de entrada de 24 V. O inversor fornece uma tensão senoidal na saída com valor nominal de 115 V_{rms} e frequência de 60 Hz. Na Tabela 2.14 apresentam-se as características técnicas do equipamento. Portanto, o emprego do inversor possibilita que a NDCC possa suprir cargas em corrente alternada.

Figura 2.21 - Inversor autônomo de onda senoidal pura, vista frontal (a) e perspectiva (b).



Fonte: Steca (2022).

Tabela 2.15 - Informações técnicas do inversor do fabricante Steca, modelo P110-L60.

Parâmetro	Valor
Modelo	<i>Solarix 1100-L60</i>
Potência de saída	900 VA
Capacidade de sobrecarga, 5 segundos	3000 VA
Tensão de saída	115 V _{rms}
Demanda sem carga	10 W
Frequência de saída	60 Hz
Dimensões (C x L x A)	212 x 395 x 130 mm
Peso	9 kg
Temperatura de operação	-20 - 50 °C
Faixa de tensão de entrada	21 - 32 V _{cc}
Rendimento máximo	94%

Fonte: Steca (2022).

2.7.3.1. Cargas Convencionais Supridas pelo Inversor

O inversor *off-grid* é utilizado com diferentes tipos de cargas e opera com carregamento distinto (0 % a 50 %) no decorrer da realização dos ensaios. Como cargas c.a., utilizou-se um banco de cargas de iluminação composto por dez (10) unidades de lâmpadas fluorescentes compactas, um *datalogger* e uma TV com um conversor digital, como consta na Tabela 2.16. Quando acionados todos os equipamentos, alcança-se uma demanda no lado c.a. e um carregamento do inversor de aproximadamente 418 W e 50 %, respectivamente

Tabela 2.16 - Cargas c.a. utilizadas supridas pelo inversor.

Equipamento	Fabricante	Modelo	Potência
Lâmpada fluorescente compacta	General Electric (GE)	HLX	24 W
Datalogger	NOVUS	FieldLogger	20 VA
TV	LG	32LG30R	150 W
Conversor Digital	Aquário	DTV-7000S	8 W

Fonte: Autoria própria.

O *datalogger* possui tensão de entrada de 127 Vrms com uma potência nominal de até 20 VA, dependendo do modo de operação. A escolha de suprir o *datalogger* por meio da NDCC é justificada devido à necessidade de operação 24 horas do equipamento, visando à aquisição diária dos dados ambientais. Da mesma forma, para o restante das cargas c.a. foram escolhidos tempos de acionamento e desligamento distintos, dependendo do ensaio realizado. As cargas c.a. estão ilustradas na Figura 2.22.

Figura 2.22 - Cargas c.a. lâmpada fluorescente compacta (a), TV (b), *datalogger* (c) e conversor digital (d).



(a)



(b)



Fonte: Autoria própria.

2.8. Rede de Distribuição

A NDCC está localizada na área externa de testes do prédio do GEDAE/UFPA, onde estão dispostos os SGAs e os BCs. A rede é suportada por três postes, compartilhados também com uma microrrede de distribuição em c.a. (MDCA) instalada no Laboratório de Sistemas Híbridos e Microrredes (VERÍSSIMO, 2014).

A NDCC é formada por cabos multiplexados de alumínio com dois condutores (V+) e (V-) trançados envolto de um terceiro cabo nu para sustentação mecânica, conforme apresentado na Figura 2.23, confeccionado pela fabricante nacional Alubar. Na Tabela 2.17 constam algumas características do condutor.

Figura 2.23 - Condutor de alumínio multiplexado da NDCC.



Fonte: Autoria própria.

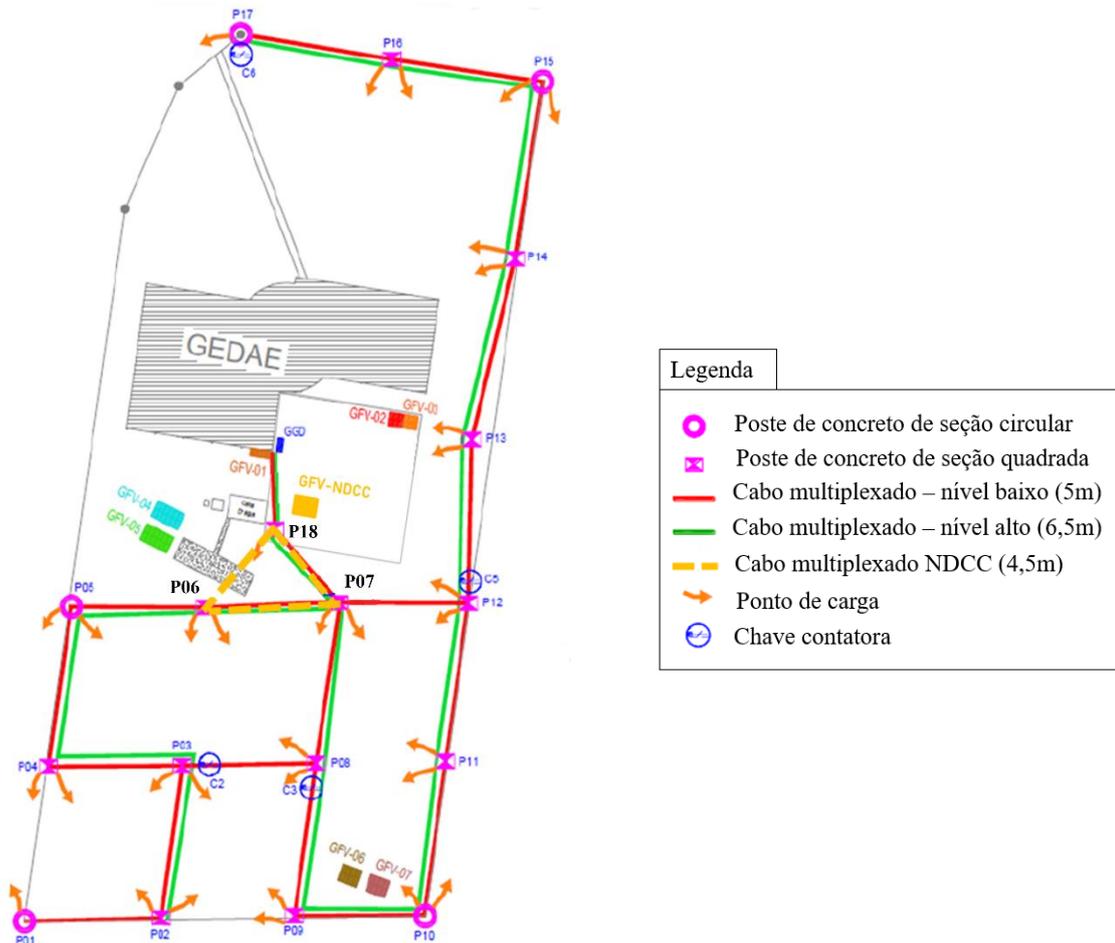
Tabela 2.17 - Características técnicas do condutor cabo de alumínio XLPE 0,6/1 kV da fabricante Alubar.

Parâmetro	Valor
Seção transversal	35 mm ²
Isolação	XLPE
Resistência elétrica em c.c. a 20 °C	0,8037 Ω/km
Coefficiente de variação da resistência por temperatura	0,00403 °C ⁻¹

Fonte: Alubar (2005).

Os postes utilizados para sustentação da NDCC são do tipo duplo T com altura de 6 metros e seção quadrada (250G), os mesmos também fazem a sustentação da MDCA. Na Figura 2.24 identifica-se a localização da NDCC na área de testes do GEDAE/UFPA, entre os postes P18, P07 e P06 da MDCA e próximos ao gerador fotovoltaico da NDCC.

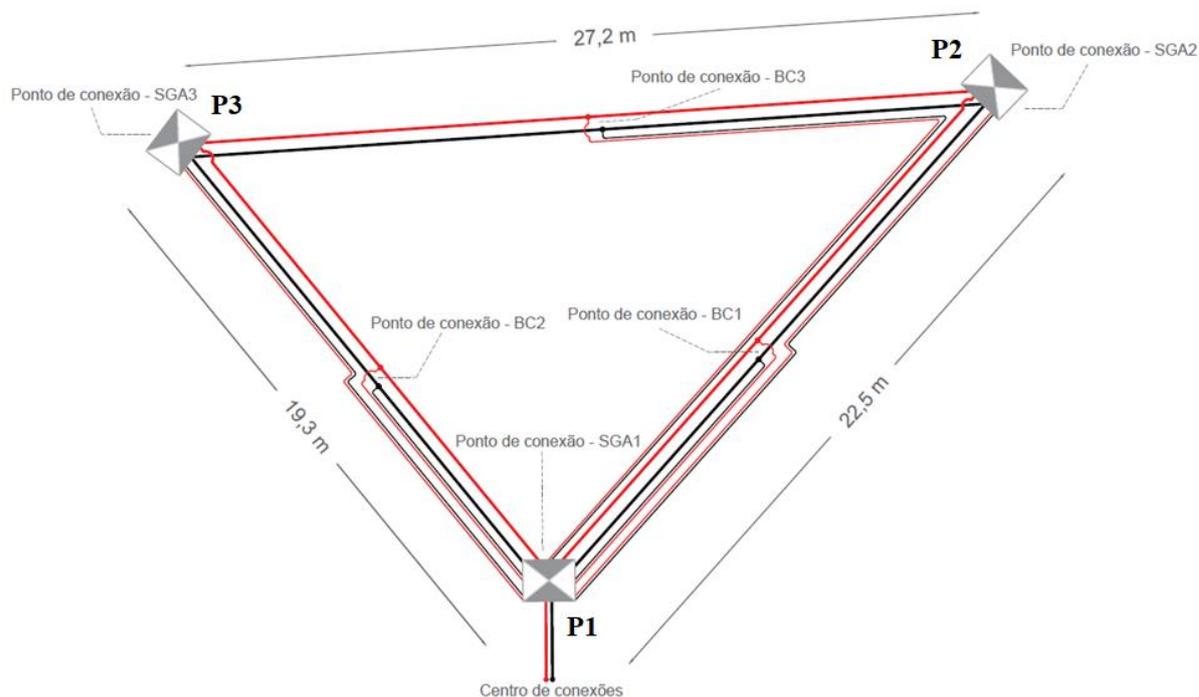
Figura 2.24 - Localização da NDCC na área de testes do GEDAE/UFPA.



Fonte: Adaptado de Albuquerque (2019).

Na Figura 2.25 apresenta-se a estrutura da NDCC e os pontos de conexão dos bancos de cargas (BC) e dos sistemas de geração e armazenamento (SGA) ao longo da rede. Os SGA2 e SGA3 possuem o ponto de conexão com a NDCC nos postes P2 e P3, respectivamente, assim como BC1, BC2 e BC3 estão conectados na metade da distância de cada poste da NDCC. Os componentes de geração, armazenamento e cargas (GFV, BB e BC) estão dispostos no centro de conexões, proporcionando maior flexibilidade para manuseio ou troca em uma eventual falha dos equipamentos.

Figura 2.25 - Esquema da NDCC, com a identificação dos pontos de conexão de cada SGA e BC na rede.



Fonte: Autoria própria.

Na Tabela 2.18 mostra-se a distância do condutor para cada equipamento, localizado no centro de conexões, em relação ao ponto de conexão com a NDCC. Tem-se que os pontos de geração e armazenamento mais próximos de cada banco de carga é BC1 a 34,7 metros do SGA1, BC2 a 34,4 metros do SGA1 e BC3 a 75,5 metros do SGA3.

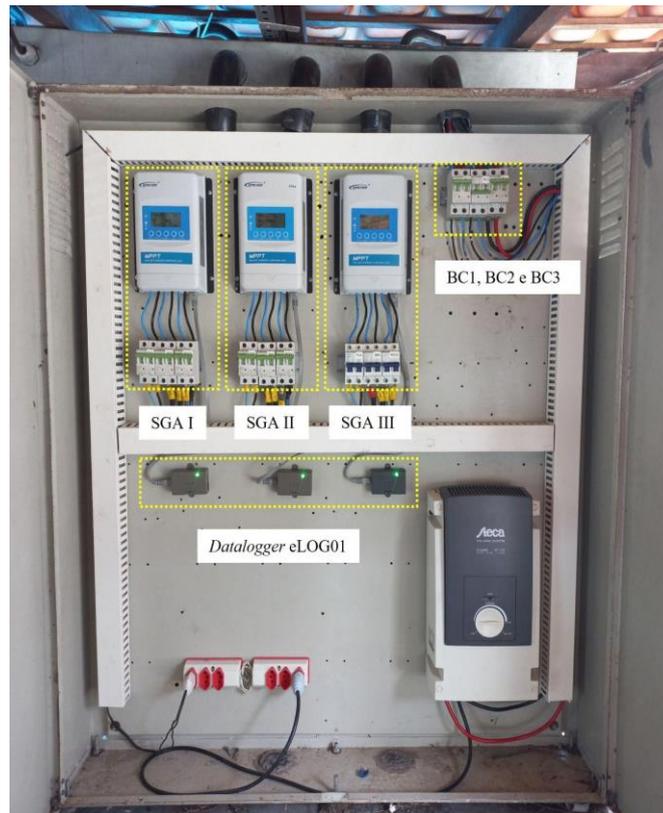
Tabela 2.18 - Distância das cargas e geração em relação à NDCC.

De	Para	Distância (m)	De	Para	Distância (m)
SGA1		6,0	BC1		17,3
SGA2	NDCC	28,7	BC2	NDCC	17,2
SGA3		28,5	BC3		38,3

Fonte: Autoria própria.

Na Figura 2.26 é mostrado o centro de conexões abrigado sob uma estrutura que simula uma cobertura residencial com telhas cerâmicas do tipo *plan*, onde estão instalados os três SGAs que compõem a NDCC. Cada SGA possui um conjunto de disjuntores c.c. responsável pela proteção contra sobrecargas e curto-circuito, estes disjuntores estão inseridos nas conexões do controlador de carga com gerador fotovoltaico, banco de baterias e o barramento c.c. da NDCC, conforme informações técnicas dispostas na Tabela 2.19.

Figura 2.26 - Centro de conexões.



Fonte: Autoria própria.

Tabela 2.19 - Especificações técnicas dos disjuntores c.c. utilizados na proteção do SGA.

SGA	Fabricante	Local	Corrente Nominal	Número de Polos	Tensão de Isolamento
1 e 2	TONGOU	GFV	16 A	2P	1.000 V
		BB	20 A		
		NDCC	20 A		
3	TOMZN	GFV	16 A	2P	440 V
		BB	20 A		
		NDCC	20 A		

Fonte: Adaptado de Torres (2019).

Os bancos de cargas também são conectados ao barramento c.c. por meio de disjuntores c.c. com corrente nominal de 16 A, da fabricante TONGOU. O centro de conexões também acomoda o inversor *off-grid* utilizado no BC3 e o *datalogger*, dispondo ainda de espaço sobressalente para alocação de outros sistemas de medições, monitoração ou futuras alterações na configuração da NDCC.

2.9. Considerações Finais Sobre o Capítulo 2

No presente capítulo apresentou-se as características da NDCC, além de seus componentes e como esses estão conectados, formando a NDCC do GEDAE/UFPA. Para o sistema apresentado destaca-se a sua modularidade, podendo-se incluir novos SGAs ao longo da rede de distribuição, de modo a aumentar a capacidade de geração e armazenamento.

Os conversores eletrônicos, controladores de carga, de interface entre SGAs e a rede de distribuição são componentes importantes na QEE da NDCC, estes conversores possuem a possibilidade de alterar o *setpoint* de tensão de carregamento dos bancos de baterias, nesse caso alterando o nível de tensão, de forma geral, da rede de distribuição, influenciando em parâmetros da QEE.

Os bancos de cargas utilizados são compostos por cargas comerciais e de fácil acesso no mercado local, possibilitando aferir a operação das mesmas e uso em redes de distribuição em corrente contínua.

CAPÍTULO 3 INSTRUMENTAÇÃO EMPREGADA PARA MEDIÇÃO DE GRANDEZAS ELÉTRICAS

Neste capítulo apresenta-se a instrumentação empregada para medições e registro de grandezas elétricas dos SGAs e ao longo da rede de distribuição, para a análise de QEE na NDCC do GEDAE e Ilha das Onças.

Empregam-se no presente trabalho medições de grandezas elétricas pontuais (medições com o osciloscópio digital) e medições envolvendo a variação dos parâmetros elétricos ao longo de um dia (registros obtidos pelo controlador de carga), considerando diferentes situações operacionais informadas no Capítulo 4.

Desta forma, após a aquisição dos dados pelos instrumentos, realizam-se cálculos dos parâmetros elétricos na nanorrede (tensão e corrente RMS, fator de potência, potência aparente, potência ativa e potência não ativa), além do diagnóstico da QEE. Assim, também é importante verificar a confiabilidade dos dados registrados pelo controlador de carga, comparando-se com as medições obtidas por meio do osciloscópio, para a análise de QEE proposta.

3.1. Materiais e Métodos

Para a aquisição dos parâmetros elétricos dos ensaios realizados nesta dissertação, foi utilizado o osciloscópio digital portátil da fabricante Fluke®, modelo 190-204s, com exatidão de $\pm 1\%$ para leitura de sinais com frequência de 0 Hz a 60 Hz e exatidão de $\pm 2,5\%$ para leitura de sinais de 60 Hz a 1 kHz, sob a configuração com acoplamento c.c. e medição *true* RMS, realizando medições considerando as componentes c.c. e c.a., somente a c.c. e somente a c.a. obtendo-se os dados em extensão “.csv” para posterior tratamento e realização dos cálculos de interesse.

O osciloscópio dispõe de uma taxa de amostragem de até 1,25 GS/s, quando utilizado os quatro canais, largura de banda de 200 MHz e pode realizar leituras de tensão de até 1.000 V.

Para os ensaios propostos, optou-se pelo osciloscópio digital Fluke® 190-204s dada a disponibilidade do equipamento, maior taxa de amostragem para as formas de onda de tensão e corrente, bem como a obtenção das componentes contínua e alternada das formas de onda amostradas.

Para a leitura dos valores de tensão c.c. e c.a. foram utilizadas garras de tensão do tipo jacaré modelo VPS410 próprias do osciloscópio digital, com exatidão de $\pm 1\%$, para valores

c.c. até 20 kHz. Para leitura dos valores de corrente c.c. e c.a. foi utilizada a pinça de corrente da fabricante Fluke®, modelo 80i-110s, com medição até 100 A (c.c. ou c.a. pico). Para os ensaios propostos o osciloscópio portátil é configurado como consta na Tabela 3.1, onde a sigla BC corresponde ao banco de cargas. Assim também para todos os ensaios realizados na NDCC, os quais constam no Capítulo 4, utilizou-se essa configuração.

Tabela 3.1 - Configuração dos canais do osciloscópio para obtenção dos dados.

Canal	Parâmetro Elétrico
A	Tensão BC3
B	Corrente BC1, BC2 ou BC3
C	Tensão BC1
D	Tensão BC2

Para a realização dos cálculos dos parâmetros elétricos referentes à potência ativa, não ativa, aparente e fator de potência, em conjunto com os valores de tensão e corrente RMS, foram utilizadas as equações apresentadas a seguir.

O cálculo do valor RMS da tensão e corrente foi realizado por meio da Equação 3.1.

$$X_{\text{rms}} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{k=1}^N X_{(k)}^2} \quad (3.1)$$

Sendo, N é o número de amostras e $X_{(k)}$ é o valor instantâneo de tensão ou corrente.

A potência aparente foi obtida pelo produto entre os valores eficazes de tensão e corrente, como mostra a Equação 3.2.

$$S = V_{\text{rms}} \times I_{\text{rms}} \quad (3.2)$$

A potência ativa é igual ao valor médio da potência instantânea logo, a potência ativa foi obtida pela soma do produto dos valores de tensão e corrente instantâneos, dividida pelo número de amostras coletadas, Equação 3.3.

$$P = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N V_{(k)} \times I_{(k)} \quad (3.3)$$

O fator de potência (FP) é igual à razão da potência ativa pela potência aparente, conforme expresso na Equação 3.4.

$$FP = \frac{P}{S} \quad (3.4)$$

Por fim, o valor de potência não ativa foi calculado pela Equação 3.5, conforme definida no padrão IEEE – Std 1459-2010.

$$Na = \sqrt{S^2 - P^2} \quad (3.5)$$

3.2. Validação de Registros Armazenados pelo Elog0-1-V1-2-1

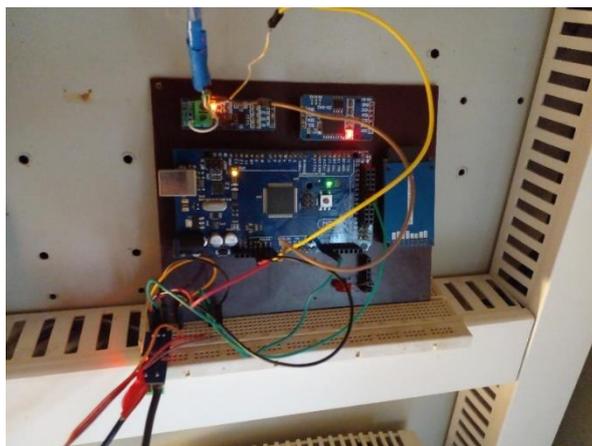
Em um primeiro momento, foi realizada a validação dos dados registrados pelo controlador de carga do fabricante EPEVER, modelo XTRA, e posterior armazenamento no *datalogger*, também, do fabricante EPEVER, modelo Elog01-V1-2-1, sob amostragem de 1 minuto. O osciloscópio digital portátil do fabricante Fluke®, modelo 190-204s, foi utilizado para validar os dados processados e apresentados pelo controlador de carga.

Para armazenamento das medições realizadas pelo controlador de carga empregou-se um protótipo de sistema de monitoração utilizando a plataforma Arduino com amostragem de 1 segundo, desenvolvido como atividade de um projeto de iniciação científica (CABRAL; GALHARDO, 2022), onde na programação e comunicação com o controlador de carga utiliza-se o protocolo do fabricante EPEVER para controladores de carga modelo XTRA, além de utilizar também a porta de comunicação RS485 com conector RJ45, presente no controlador de carga para transmissão de dados e alimentação do circuito.

Na Figura 3.1 apresenta-se uma fotografia dos componentes do protótipo sobre uma placa de circuito impresso.

Desse modo, a aquisição de dados realizada pelo protótipo é a mesma realizada pelo Elog01-V1-2-1, no entanto, sob uma amostragem de 1 segundo. A aferição com amostragem de 1 segundo visou maior exatidão para validação dos dados medidos pelo controlador de carga e posteriormente enviados ao *datalogger*. Desta maneira, calcularam-se os valores de tensão e corrente RMS, além de potência aparente, ativa e não ativa para os dados registrados pelo protótipo Arduino, utilizando-se para isso o período de integração de 2 minutos durante a realização dos ensaios em bancada.

Figura 3.1 - Protótipo Arduino.



Fonte: Autoria própria.

No processo de validação, dois ensaios distintos foram realizados em bancada, sendo, o primeiro com a presença somente do nível c.c. na tensão e corrente da carga e o segundo com a presença de ondulações na tensão e corrente da carga.

Para o primeiro ensaio foi utilizada uma carga eletrônica AC/DC programável, modelo 63803, do fabricante Chroma ATE INC, configurada no modo CC (corrente contínua) demandando uma potência constante de 200 W e corrente máxima de 15 A_{máx} e uma fonte c.c. programável do fabricante Xantrex XDC 100-60, com capacidade de fornecer 100 V, 60 A e 6 kW, configurada a 27,6 V e 20 A_{máx}. Este ensaio é denominado a seguir como “Ensaio com Potência Constante”.

O ensaio com ondulações na tensão e corrente foi realizado utilizando um inversor isolado da fabricante Steca, modelo Solarix PI 1100-L60 (900 VA), com o carregamento de 15% (150 W) suprimindo lâmpadas fluorescentes compacta, conforme constam informações no Apêndice A. Este ensaio é denominado a seguir de “Ensaio com Ondulação de Tensão”.

3.2.1. Ensaio com Potência Constante

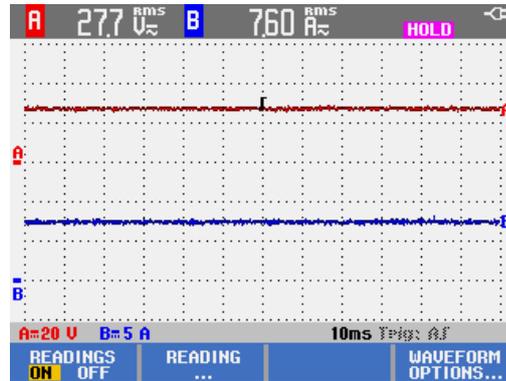
O ensaio com potência constante utilizando o protótipo de aquisição de dados utilizando a plataforma Arduino foi realizado obtendo-se os valores de tensão e corrente registrados pelo controlador de carga na saída para carga, banco de baterias e entrada do gerador fotovoltaico, como consta na Tabela 3.2. Para os barramentos do controlador de carga, sob o ensaio de potência constante, foram registrados valores de corrente e tensão eficaz próximas, com valores máximos registrados para o barramento do gerador fotovoltaico com 0,9 A_{rms}.

Tabela 3.2 - Valores registrados pelo osciloscópio e pelo controlador de carga em diferentes barramentos.

Parâmetro Elétrico	Fluke® 190-204	Controlador de Carga	Desvio (%)
Carga			
Corrente eficaz (I_{rms})	7,59 A _{rms}	7,41 A _{rms}	2,3%
Tensão eficaz (V_{rms})	27,34 V _{rms}	27,44 V _{rms}	~ 0,3%
Potência aparente (S)	207,60 VA	203,24 VA	2,1%
Potência ativa (P)	207,54 W	203,24 W	2,0%
Potência não ativa (Na)	4,48 Var	0,29 Var	93,5%
FP	~ 1,00	1,00	~ 0,0%
Banco de Baterias			
Corrente eficaz (I_{rms})	7,60 A _{rms}	7,41 A _{rms}	2,5%
Tensão eficaz (V_{rms})	27,65 V _{rms}	27,44 V _{rms}	0,7%
Potência aparente (S)	209,99 VA	203,27 VA	3,2%
Potência ativa (P)	209,94 W	203,27 W	3,1%
Potência não ativa (Na)	4,91 Var	0,30 Var	93,8%
FP	~ 1,00	1,00	~ 0,0%
Gerador Fotovoltaico			
Corrente eficaz (I_{rms})	11,31 A _{rms}	10,35 A _{rms}	8,4%
Tensão eficaz (V_{rms})	27,76 V _{rms}	27,44 V _{rms}	1,1%
Potência aparente (S)	314,09 VA	283,99 VA	9,5%
Potência ativa (P)	313,94 W	283,87 W	9,5%
Potência não ativa (Na)	9,81 Var	8,01 Var	18,3%
FP	~ 1,00	~ 1,00	~ 0,0%

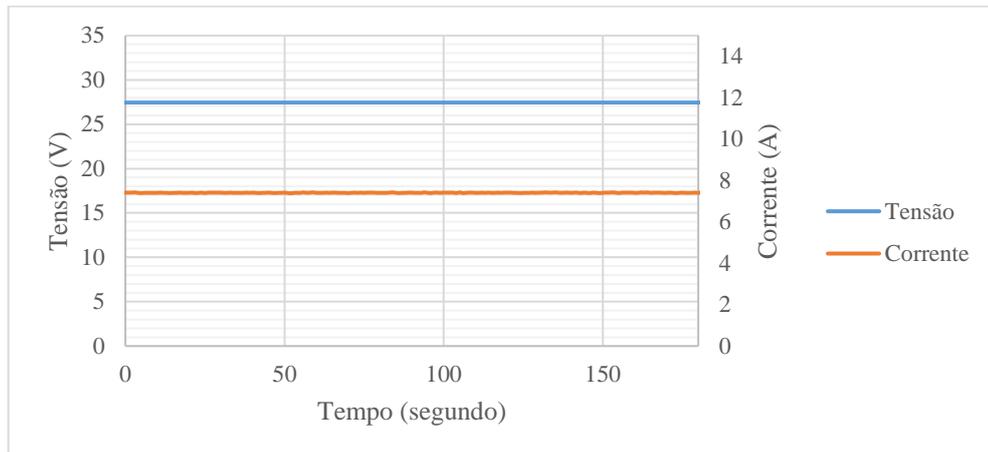
Nas Figuras 3.2 e 3.3 ilustram-se as formas de onda de tensão e corrente obtidas por meio do osciloscópio digital e pelo controlador de carga, respectivamente, correspondente ao barramento da carga. Para Figura 3.2, na parte superior da imagem extraída do osciloscópio também estão indicados os valores RMS das formas de onda considerando a presença das componentes c.a. e c.c. As formas de onda para os demais barramentos constam no Apêndice A.

Figura 3.2 - Forma de onda de tensão e corrente no barramento da carga, com a indicação do valor RMS na parte superior considerando a presença das componentes c.a. e c.c.



Fonte: Captura de tela do osciloscópio digital.

Figura 3.3 - Forma de onda obtida no terminal da carga do controlador.



De forma geral, os desvios, em relação a medição com osciloscópio, nos valores de potência ativa e corrente RMS registrados para os barramentos da carga e banco de baterias apresentaram valores próximos a 2 %. No entanto, para o barramento do gerador fotovoltaico, teve-se diferenças consideráveis, com desvio de 10 % para as potências aparente e ativa. Observou-se também diferença de aproximadamente 1 A (8 % de desvio) para o barramento do gerador fotovoltaico. Nesse caso, destaca-se que o próprio controlador de carga possui uma ação ativa para o barramento do gerador fotovoltaico, tendo em vista que emprega a tecnologia MPPT, onde ocorrem variações na tensão e corrente visando extrair maior potência do gerador.

3.2.2. *Ensaio com Ondulação de Tensão*

Para o ensaio com a presença de ondulação na tensão também foram obtidos os valores de tensão e corrente para o barramento da carga, banco de baterias e gerador fotovoltaico. Na Tabela 3.3 constam os valores obtidos para as medições com o osciloscópio digital e pelo sistema de aquisição (utilizando a plataforma Arduino) em comunicação com o controlador de carga.

Para o barramento da carga foi registrado um valor distinto de corrente rms, de modo que a diferença foi próxima a $2 A_{rms}$. Para o barramento do banco de baterias aferiu-se um valor de corrente com diferença também próxima a $2 A_{rms}$. Para o barramento do gerador fotovoltaico registrou-se uma diferença próxima a $1 A_{rms}$.

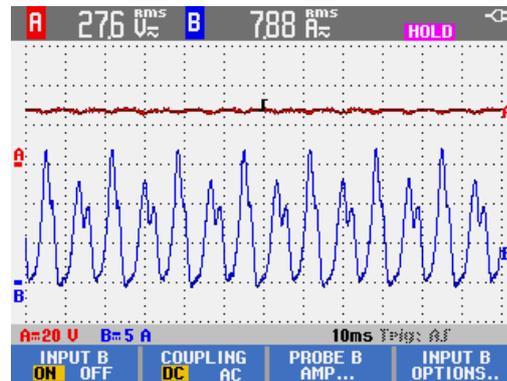
Desse modo, considerando os respectivos valores de corrente e tensão registrados, calculou-se a potência processada pelo controlador de carga. Para o barramento da carga registrou-se uma diferença de 4 W a menos, processada pelo controlador de carga. Do mesmo modo, para o barramento do banco de baterias e gerador fotovoltaico registrou-se uma potência ativa, processada pelo controlador de carga de aproximadamente 5 W e 23 W a menos, respectivamente.

Tabela 3.3 - Valores registrados pelo osciloscópio e pelo controlador de carga em diferentes barramentos.

Parâmetro Elétrico	Fluke® 190-204	Controlador de Carga	Desvio (%)
Carga			
Corrente eficaz (I_{rms})	8,06 A_{rms}	6,10 Arms	24,3%
Tensão eficaz (V_{rms})	27,34 V_{rms}	27,36 Vrms	~0,0%
Potência aparente (S)	220,19 VA	167,01 VA	24,1%
Potência ativa (P)	171,85 W	166,86 W	2,9%
Potência não ativa (Na)	137,67 VAr	6,98 VAr	94,9%
FP	0,78	~1,00	-28,2%
Banco de Baterias			
Corrente eficaz (I_{rms})	7,78 A_{rms}	5,98 Arms	23,1%
Tensão eficaz (V_{rms})	27,57 V_{rms}	27,37 Vrms	0,7%
Potência aparente (S)	214,47 VA	163,61 VA	23,7%
Potência ativa (P)	164,59 W	163,46 W	0,6%
Potência não ativa (Na)	137,50 VAr	7,18 VAr	94,7%
FP	0,77	~1,00	-29,8%
Gerador Fotovoltaico			
Corrente eficaz (I_{rms})	10,77 A_{rms}	9,78 A_{rms}	9,1%
Tensão eficaz (V_{rms})	27,51 V_{rms}	27,35 V_{rms}	0,5%
Potência aparente (S)	296,23 VA	267,52 VA	9,6%
Potência ativa (P)	290,85 W	267,35 W	8,0%
Potência não ativa (Na)	56,22 VAr	9,32 VAr	83,4%
FP	0,98	~1,00	-2,0%

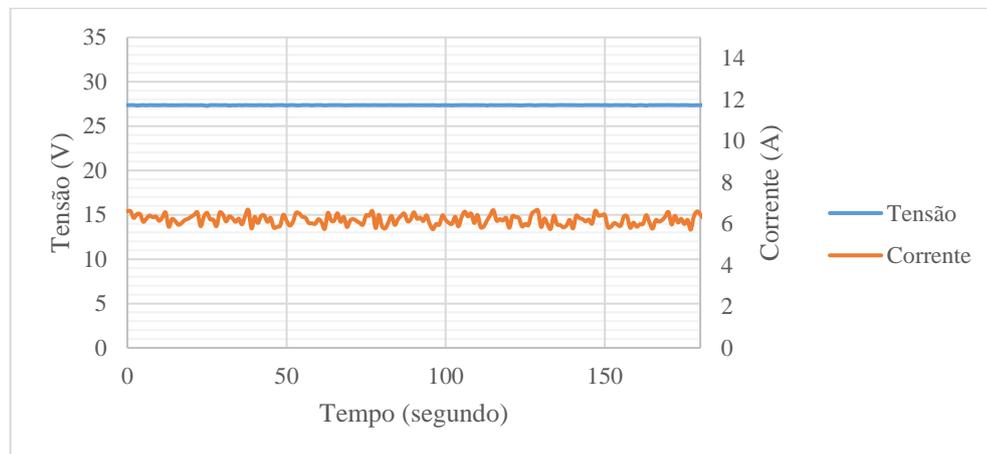
Nas Figuras 3.4 e 3.5 ilustram-se as formas de onda de tensão e corrente obtidas por meio do osciloscópio digital e pelo controlador de carga, respectivamente, correspondente ao barramento da carga. Para Figura 3.4, na parte superior da imagem extraída do osciloscópio também estão indicados os valores RMS das formas de onda considerando a presença das componentes c.a. e c.c. As formas de onda para os demais barramentos constam no Apêndice A.

Figura 3.4 - Forma de onda de tensão e corrente no barramento da carga, com a indicação do valor RMS na parte superior considerando a presença das componentes c.a. e c.c.



Fonte: Captura de tela do osciloscópio digital.

Figura 3.5 - Forma de onda registrada pelo controlador de carga no barramento da carga.



Para o ensaio com ondulação de tensão foram registrados maiores valores de desvio, em relação à medição do osciloscópio, principalmente para corrente RMS. Para o barramento da carga e banco de baterias teve-se um desvio de 24 % e 23 %, respectivamente. Do mesmo modo que o ensaio anterior, para o barramento do gerador fotovoltaico teve-se uma variação no valor de corrente durante a realização do ensaio. Em relação aos barramentos da carga e do banco de baterias, verificou-se o valor de corrente elétrica registrado pelo controlador mais próximo ao nível c.c. registrado pelo osciloscópio digital, conforme apresentado no Apêndice A.

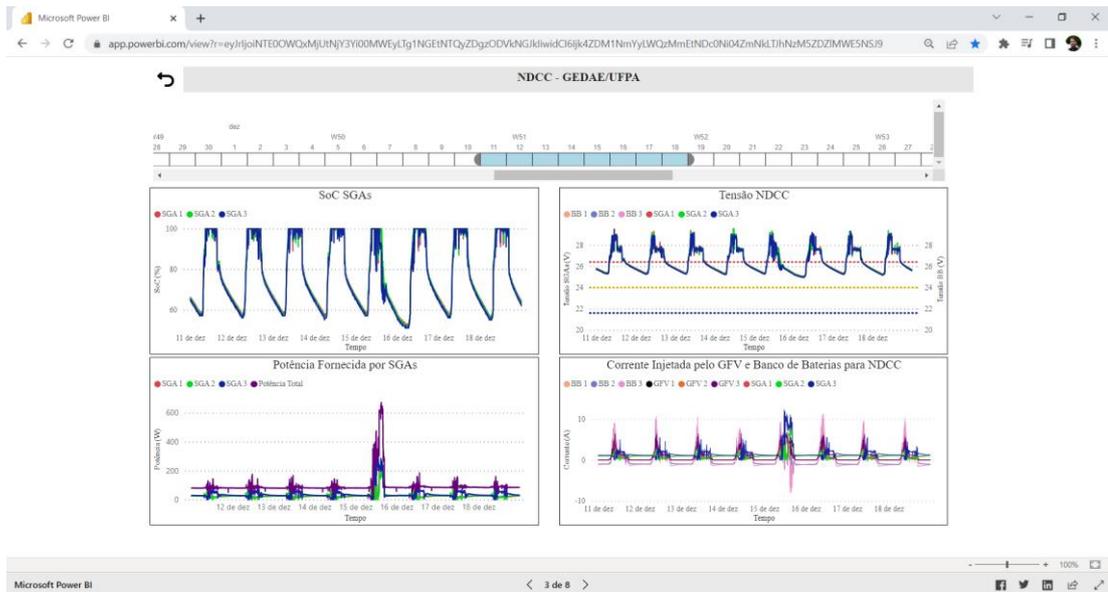
3.2.3. Visualização e Tratamento dos Dados

Para o tratamento e posterior visualização dos dados de operação da NDCC do GEDAE/UFPA foi utilizada a versão gratuita do *software Power BI* da *Microsoft*, o qual

fornece de forma didática e intuitiva a possibilidade de análises gráficas utilizando dados de extensões diversas, como exemplo, “.csv”, “.txt”, dentre outros.

Como resultado, desenvolveu-se uma ferramenta para a visualização da operação da NDCC, consistindo no conjunto de informações dos dados do barramento da geração fotovoltaica, sistema de armazenamento e na saída de cada SGA (rede de distribuição) acompanhados com a data e hora de cada registro, conforme ilustrado na Figura 3.6.

Figura 3.6 - Ferramenta para visualização operacional da NDCC do GEDAE/UFPA.



Fonte: Autoria própria.

3.3. Considerações Finais Sobre o Capítulo 3

Os valores registrados pelo controlador de carga e posteriormente armazenados pelo *datalogger* do fabricante EPEVER não são valores rms de uma dada amostra, sendo, assim, valores médios de uma dada frequência de operação do microcontrolador do controlador de carga. Assim, em ocasiões de maior variação ou ondulações na forma de onda de tensão da rede de distribuição haverá maior erro associado aos valores armazenados. Da mesma forma, para uma forma de onda mais estável, sem variações ou ondulações, haverá uma maior exatidão para os valores registrados pelo controlador de carga e posterior armazenamento pelo *datalogger* conectado.

CAPÍTULO 4 QUALIDADE DA ENERGIA ELÉTRICA EM ENSAIOS REALIZADOS NA NDCC DO GEDAE/UFPA

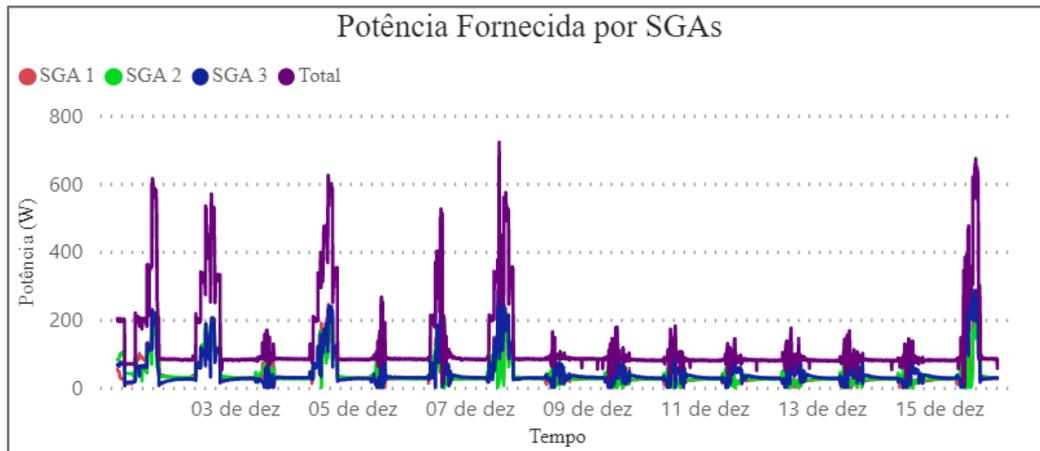
Neste capítulo apresentam-se os ensaios realizados na Nanorrede de Distribuição em Corrente Contínua instalada na área de testes do prédio do GEDAE/UFPA, avaliando a ocorrência de eventos de qualidade de energia elétrica (QEE) a partir dos parâmetros elétricos obtidos na saída de cada SGA e em medições realizadas nos pontos de conexão das cargas, identificando e caracterizando os eventos de QEE com base na recomendação do IEEE Std 1159.

As análises de QEE buscaram avaliar o impacto no acionamento, operação e na saída de carga em cada ponto de conexão, podendo-se identificar eventos relacionados às variações de longa e de curta duração, além de eventos transitórios. Para as cargas utilizadas, as quais estão descritas no Capítulo 2, também foi escolhida uma rotina de operação de modo a agregar um circuito do prédio do GEDAE/UFPA.

4.1. Ensaios da NDCC – GEDAE/UFPA

Os ensaios propostos foram realizados em três dias durante a primeira quinzena do mês de dezembro de 2022 e em um dia no início de fevereiro de 2023. Na Figura 4.1 pode-se identificar os dias de ensaios em dezembro/2022, correspondentes aos períodos com maior demanda da NDCC. Ressalta-se que nesse período a NDCC operou com fornecimento de energia sem interrupções para as cargas conectadas na mesma, tanto durante o dia quanto durante a noite. Assim, neste capítulo apresentam-se os ensaios realizados nos dias 02/12, 04/12 e 07/12, além de um ensaio realizado no dia 06/02/2023.

Figura 4.1 - Período da realização dos ensaios.



Fonte: Captura de tela da ferramenta desenvolvida em Power BI.

Para os ensaios foram utilizadas diferentes cargas, conforme apresentadas na Tabela 4.1 e descritas no Capítulo 2. O painel de LED foi utilizado em duas configurações distintas, com um conversor c.c.-c.c. destinado ao suprimento de cada painel LED individual, denominado neste capítulo de carga C1-1; ou com apenas um conversor c.c.-c.c. suprindo o conjunto de painéis LED, denominado neste capítulo de carga C1-2. Do mesmo modo, utilizou-se a carga com lâmpadas LED do tipo bulbo de três fabricantes distintos, sendo denominadas de C2-1 para o fabricante Ouralux; C2-2 para o fabricante G-Light e C2-3 para o fabricante City Lumi. O BC2 possui apenas uma configuração, sendo uma carga resistiva de valor $2,3 \Omega$.

O banco de cargas BC3, utilizando o inversor isolado (*off-grid*), foi operado inicialmente próximo ao vazio (suprindo apenas o *datalogger*), sendo indicado por “(0)” na Tabela 4.2, e com diferentes carregamentos, conforme indicações “(1)”, “(2)” e “(3)” para o BC3 na Tabela 4.2. Cada carregamento reuniu um grupo de cargas, sendo o primeiro carregamento “(1)” utilizando cinco lâmpadas fluorescentes. Para o segundo carregamento “(2)”, mais cinco lâmpadas fluorescentes foram acionadas, totalizando dez unidades da mesma carga. Por fim, para o último carregamento “(3)” foram utilizadas as dez lâmpadas fluorescentes compactas em conjunto com o suprimento de um circuito para o prédio do GEDAE/UFPA na área da copa.

No Apêndice B são apresentadas as formas de onda e dados de consumo para as três situações ensaiadas de carregamentos do inversor.

Tabela 4.1 - Cargas utilizadas e códigos de referência.

Banco de Carga	Código	Carga
BC1	C1-1	Painéis LED com conversores c.c.-c.c. descentralizados (1)
	C1-2	Painéis LED com conversor c.c.-c.c. centralizado (2)
	C2-1	Lâmpadas LED fabricante (1)
	C2-2	Lâmpadas LED fabricante (2)
	C2-3	Lâmpadas LED fabricante (3)
BC2	C3	Carga resistiva
BC3	C4	Inversor e cargas c.a.

Na Tabela 4.2 constam os horários em que cada carga de seu respectivo banco de cargas foi acionada e posterior saída de operação. No Apêndice C constam os perfis das curvas de carga na saída de cada SGA e o total correspondentes aos ensaios.

Tabela 4.2 - Horários de acionamento de cargas.

Horário	BC1		BC2	BC3	
	C1	C2	C3	C4	
Manhã	0:00 – 8:00	Ligado	Desligado	Desligado	Ligado (0)
	8:00 – 10:00	Ligado	Desligado	Desligado	Ligado (1)
	10:00 – 12:00	Ligado	Desligado	Desligado	Ligado (2)
Tarde	12:00 – 14:00	Desligado	Ligado	Desligado	Ligado (3)
	14:00 – 16:00	Desligado	Ligado	Ligado	Ligado (2)
	16:00 – 18:00	Ligado	Desligado	Desligado	Ligado (2)
Noite	18:00 – 20:00	Ligado	Desligado	Desligado	Ligado (0)
	20:00 – 23:59	Ligado	Desligado	Desligado	Ligado (0)

O BC1 foi utilizado com acionamento das cargas em períodos distintos, nesse caso com as cargas C1 acionadas desde a madrugada até o horário das 12h00, quando tem-se sua saída e posterior acionamento das cargas C2 até o horário das 16h00. Por fim, fez-se o acionamento novamente das cargas C1 até o resto do dia. O BC2 foi acionado apenas no horário das 14h00 às 16h00.

Para o BC3, as cargas c.a. acionadas estiveram distribuídas uma parte dentro do prédio do GEDAE/UFPA na área da copa (TV e conversor digital), outra parte próxima aos SGAs (lâmpadas fluorescentes). Desse modo, tem-se inicialmente o BC3 apenas com inversor operando no modo autoconsumo, no horário da madrugada até às 8h00. Posteriormente, a partir do horário das 8h00 fez-se o acionamento de cinco lâmpadas fluorescentes e às 10h00 mais

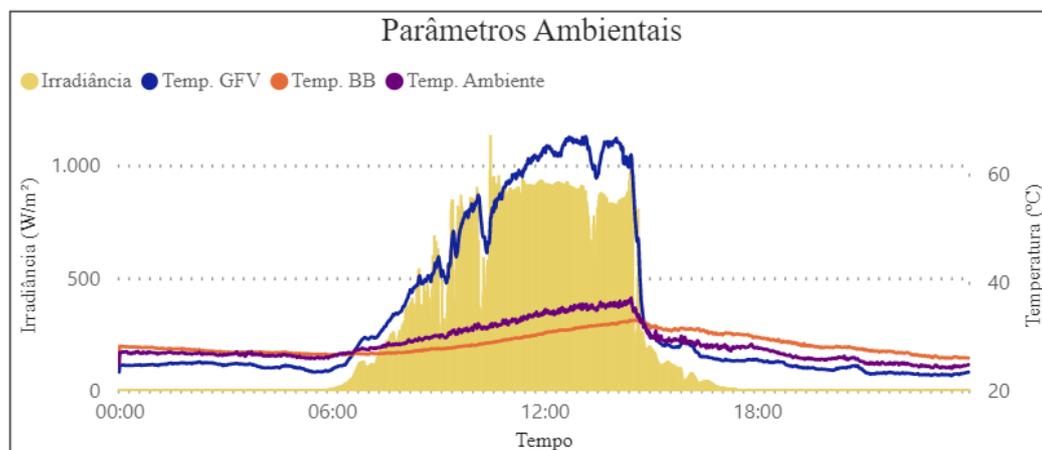
cinco unidades, totalizando dez lâmpadas fluorescentes suprida pelo inversor. No horário das 12h00 teve-se, além das lâmpadas já supridas, o acionamento do circuito da área da copa com TV e conversor digital, até o horário das 14h00. Por fim, teve-se a saída do circuito das lâmpadas fluorescentes às 18h00. A operação da NDCC durante os ensaios pode ser visualizada no Apêndice C.

Como descrito no Capítulo 3, as medições realizadas com o osciloscópio digital tiveram os canais “A”, “C” e “D” para aquisição da grandeza elétrica de tensão do BC3, BC1 e BC2, respectivamente, e o canal “B” para aquisição da grandeza elétrica de corrente, posicionando-se a ponta de prova de corrente em diferentes pontos (BC1, BC2 ou BC3).

4.1.1. Ensaio I

O primeiro ensaio teve como objetivo analisar eventos de QEE na NDCC durante a operação das cargas C2-1 e C1-1 do BC1 em conjunto com as cargas BC2 e BC3. Este ensaio foi realizado no dia 02/12/2022, onde registraram-se os parâmetros ambientais ilustrados na Figura 4.2, verificando-se às 13h00 o valor máximo de 66 °C para a temperatura na parte posterior do módulo fotovoltaico, o valor máximo de temperatura ambiente e temperatura do banco de baterias de 35,5 °C e 32,7 °C, respectivamente, no horário das 14h20. O valor máximo de irradiância global registrado foi de 1.113 W/m², no horário das 10h29. Para o referido dia de ensaio houve 5,3 Horas de Sol Pleno (HSP) no plano do gerador fotovoltaico. Destaca-se para este dia a disponibilidade do recurso solar com valores de irradiância acima de 200 W/m² até o horário das 14h50, indicando um tempo nublado com incidência de chuva pelo horário da tarde.

Figura 4.2 - Parâmetros ambientais do ensaio I.



Fonte: Captura de tela da ferramenta desenvolvida em Power BI.

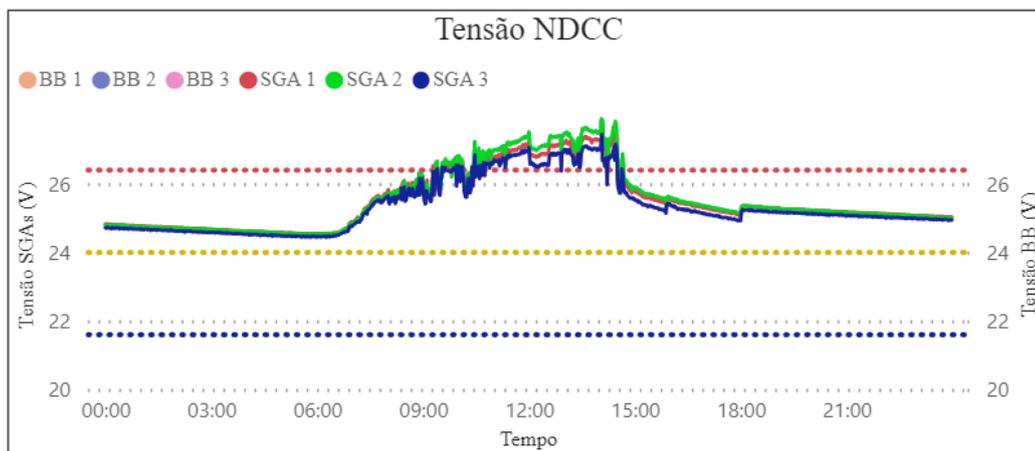
A Figura 4.3 ilustra a tensão da NDCC no ponto de saída dos controladores de carga (terminal de conexão da NDCC), neste caso, próximo aos bancos de baterias, com a indicação (linha tracejada) dos valores de tensão em 21,6 V (0,9 p.u.), 24 V (1 p.u.) e 26,4 V (1,1 p.u.). Antes das 9h17, das 9h25 às 9h30, 10h07 às 10h23 e após as 14h40, os valores de tensão estiveram dentro da faixa de 0,9 a 1,1 p.u., tomando-se como referência a tensão nominal de 24 V.

Conforme a definição da recomendação do IEEE Std 1159 para eventos de longa duração, onde há a variação do valor RMS por um tempo superior a 1 minuto, tem-se que valores RMS de tensão abaixo de 0,9 p.u. são caracterizados como subtensão e acima de 1,1 p.u. são caracterizados como sobretensão.

Para o referido ensaio verificou-se o evento de sobretensão, onde o valor máximo alcançado foi às 14h03, registrando-se valores de tensão de 27,7 V, 27,8 V e 27,4 V na saída dos SGAs 1, 2 e 3, respectivamente. Para este dia teve-se um valor percentual dos registros referentes ao tempo em sobretensão próximo a 20,9 %.

O valor mínimo de tensão na saída dos SGAs foi de 24,5 V (1,02 p.u.) no horário das 6h11.

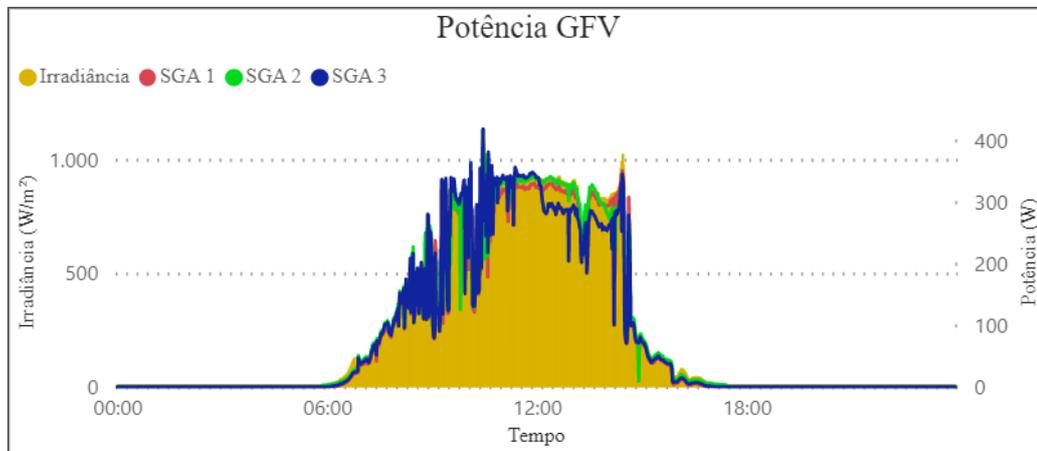
Figura 4.3 - Tensão da NDCC próxima à saída de cada SGA com a indicação (linha tracejada) dos valores de tensão em 21,6 V (0,9 p.u.), 24 V (1 p.u.) e 26,4 V (1,1 p.u.) do ensaio I.



Fonte: Captura de tela da ferramenta desenvolvida em Power BI.

A Figura 4.4 ilustra o perfil de geração dos GFVs em conjunto com o perfil de irradiância global. Pelo perfil de geração, identifica-se a operação do controlador de carga no modo MPPT, isto é, com o seguimento do ponto de máxima potência ao longo de todo o dia com o recurso solar disponível.

Figura 4.4 - Potência fornecida de cada GFV do ensaio I.



Fonte: Captura de tela da ferramenta desenvolvida em Power BI.

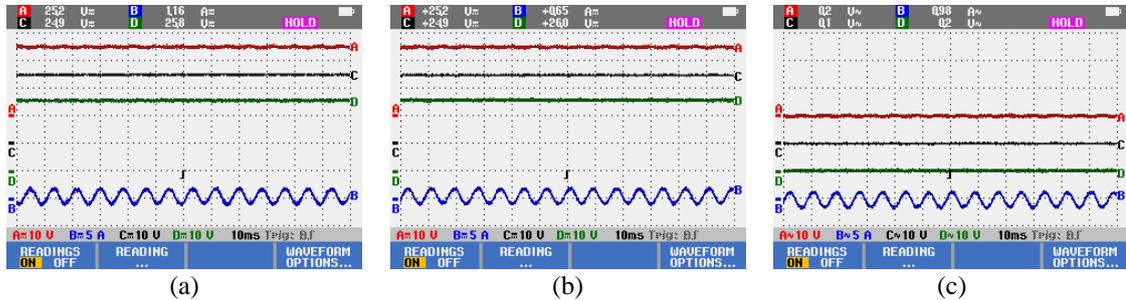
Para as medições realizadas com o osciloscópio digital no ponto de conexão das cargas, verificou-se uma forma de onda de tensão com a presença de ondulação (*ripple*) nos pontos de conexão das cargas na NDCC.

A primeira etapa do ensaio I foi realizada com a operação do BC1, estando em funcionamento as cargas C1-1 desde a madrugada, em conjunto com a operação do BC3. Registraram-se magnitudes distintas de $1,1 V_{p-p}$, $1,5 V_{p-p}$, $1,7 V_{p-p}$ nos pontos de conexão do BC1, BC2 e BC3, respectivamente, como mostrado na Figura 4.5.

Registrou-se para o BC3 um valor de corrente de $2,8 A_{p-p}$ com $1,16 A_{rms}$ e tensão de $25,2 V_{rms}$, resultando em uma demanda de $14 W$ na entrada do inversor. Na Figura 4.5 apresentam-se as formas de onda de tensão e corrente obtidas, por meio do osciloscópio digital, no ponto de conexão do BC3.

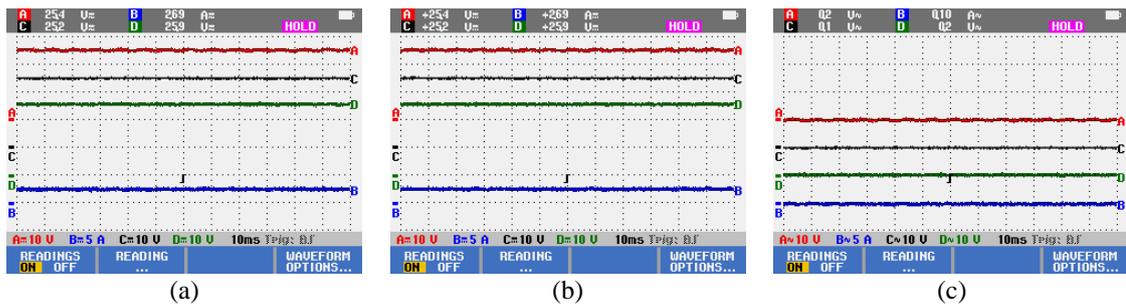
O BC1, utilizando as cargas C1-1, operou normalmente durante todo o período da madrugada até o início da manhã, sem nenhuma falha no funcionamento, com valor de tensão de $25,3 V_{rms}$ e corrente de $2,7 A_{rms}$, demandando uma potência de $68,4 W$. As formas de onda de tensão e correntes obtidas no ponto de conexão do BC1 estão mostradas na Figura 4.6.

Figura 4.5 - Formas de onda de tensão nos pontos de conexão das cargas e corrente no BC3, com a indicação do valor RMS na parte superior considerando a presença: (a) das componentes c.a. e c.c., (b) somente da componente c.c. e (c) somente da componente c.a.



Fonte: Captura de tela do osciloscópio digital.

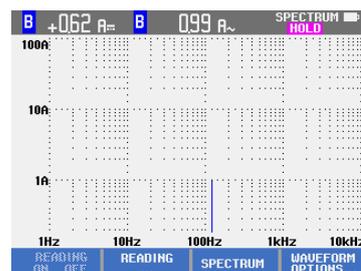
Figura 4.6 - Formas de onda de tensão nos pontos de conexão das cargas e corrente no BC1, com a indicação do valor RMS na parte superior considerando a presença: (a) das componentes c.a. e c.c., (b) somente da componente c.c. e (c) somente da componente c.a.



Fonte: Captura de tela do osciloscópio digital.

Para esta medição, também foi obtido o espectro harmônico de amplitude da corrente e tensão no BC3, aferindo-se componentes espectrais em 120 Hz para a corrente e tensão do BC3, como ilustrado na Figura 4.7. Visto que o inversor opera em 60 Hz, a ondulação de tensão para o lado de corrente contínua ocorre em uma frequência duas vezes maior, ou seja, 120 Hz, sendo esta frequência igual a frequência da potência instantânea no lado c.a.

Figura 4.7 - Espectro de amplitude da corrente para o BC3.



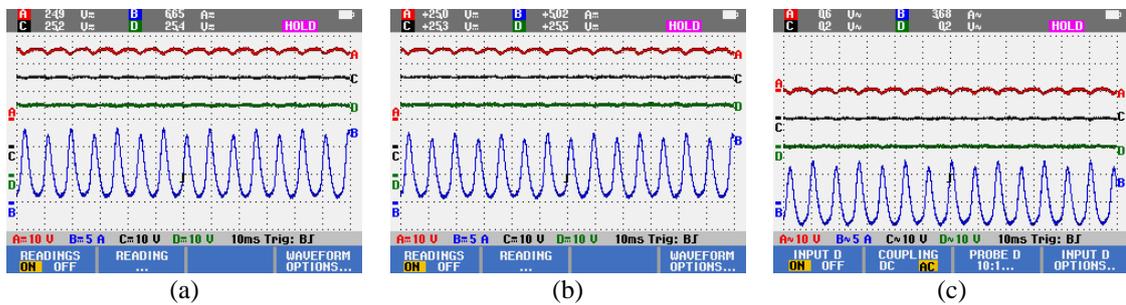
Fonte: Captura de tela do osciloscópio digital.

A partir das 8h00 teve-se o aumento do carregamento do BC3, por meio do acionamento de cargas c.a. supridas pelo inversor, conforme ilustrado na Figura 4.8. Para o BC3 registrou-se, no ponto de conexão, uma potência de 131,5 W com uma tensão e corrente de 24,9 V_{rms} e 6,7 A_{rms}, respectivamente, como ilustrado na Figura 4.8.

Mediu-se uma ondulação na corrente do BC3 de 12,6 A_{p-p} e uma ondulação de tensão nos pontos de conexão, BC1, BC2 e BC3 de 1,3 V_{p-p}, 1,6 V_{p-p}, 2,9 V_{p-p}, respectivamente. Ressalta-se que nesta parte do ensaio somente estavam ligados o BC1 e BC3.

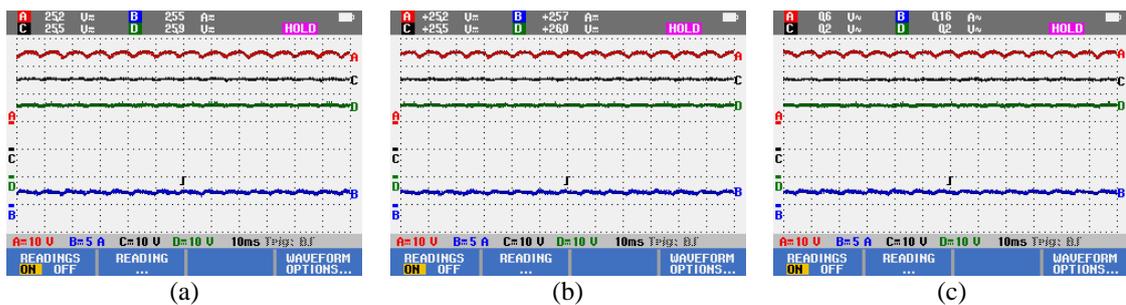
Do mesmo modo, observou-se uma mudança na operação do BC1 com a influência da ondulação de tensão, onde a corrente requisitada passou a ter uma ondulação de 1,2 A_{p-p}. Os valores rms medidos de tensão e corrente no BC1 foram 25,5 V_{rms} e 2,5 A_{rms}, respectivamente, como ilustrado na Figura 4.9. Para esta medição também foram aferidas componentes espectrais em 60 Hz, 180 Hz, 240 Hz e 360 Hz, além da componente em 120 Hz, para a corrente do BC3, conforme mostrado na Figura 4.10.

Figura 4.8 - Formas de onda de tensão nos pontos de conexão das cargas e corrente no BC3, com a indicação do valor RMS na parte superior considerando a presença: (a) das componentes c.a. e c.c., (b) somente da componente c.c. e (c) somente da componente c.a.



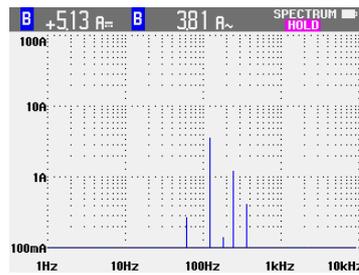
Fonte: Captura de tela do osciloscópio digital.

Figura 4.9 - Formas de onda de tensão nos pontos de conexão das cargas e corrente no BC1, com a indicação do valor RMS na parte superior considerando a presença: (a) das componentes c.a. e c.c., (b) somente da componente c.c. e (c) somente da componente c.a.



Fonte: Captura de tela do osciloscópio digital.

Figura 4.10 - Espectro de amplitude da corrente para o BC3.



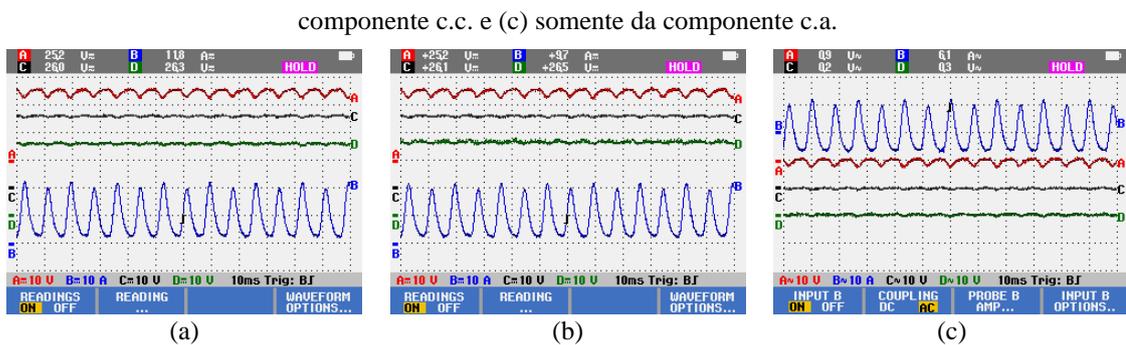
Fonte: Captura de tela do osciloscópio digital.

A partir das 10h00 teve-se o acionamento de mais um grupo de lâmpadas fluorescentes, supridas pelo inversor do BC3, como ilustrado na Figura 4.11. Para o BC3, registrou-se uma potência de 244,2 W com uma tensão e corrente de 25,1 V_{rms} e 11,8 A_{rms}, respectivamente, com uma ondulação de corrente de 20 A_{p-p} e ondulação de tensão nos pontos de conexão BC1, BC2 e BC3 de 1,5 V_{p-p}, 1,7 V_{p-p}, 3,8 V_{p-p}, respectivamente.

Para o BC1, registrou-se um aumento na ondulação de corrente para 1,2 A_{p-p} com uma tensão e corrente de 25,3 V_{rms} e 2,7 A_{rms}, respectivamente, como ilustrado na Figura 4.12.

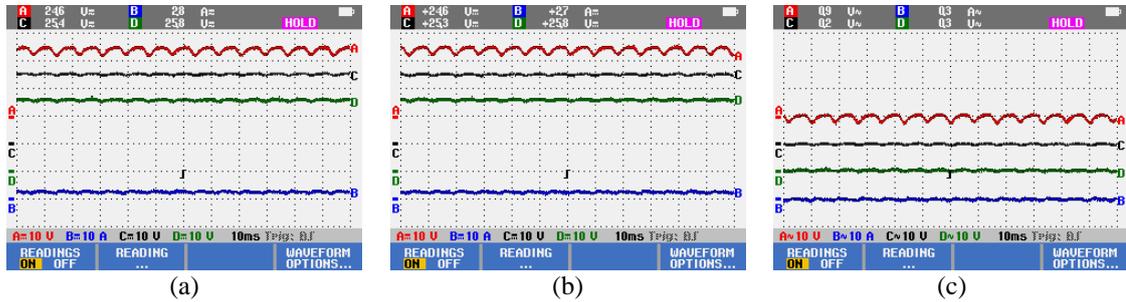
Nesta medição também foram aferidas componentes espectrais em 60 Hz, 120 Hz, 180 Hz, 240 Hz e 360 Hz, para a tensão e corrente do BC3. Para a tensão e corrente do BC1 e tensão do BC2 identificou-se a componente espectral em 120 Hz e com baixa amplitude, como mostrado na Figura 4.13.

Figura 4.11 - Formas de onda de tensão nos pontos de conexão das cargas e corrente no BC3, com a indicação do valor RMS na parte superior considerando a presença:



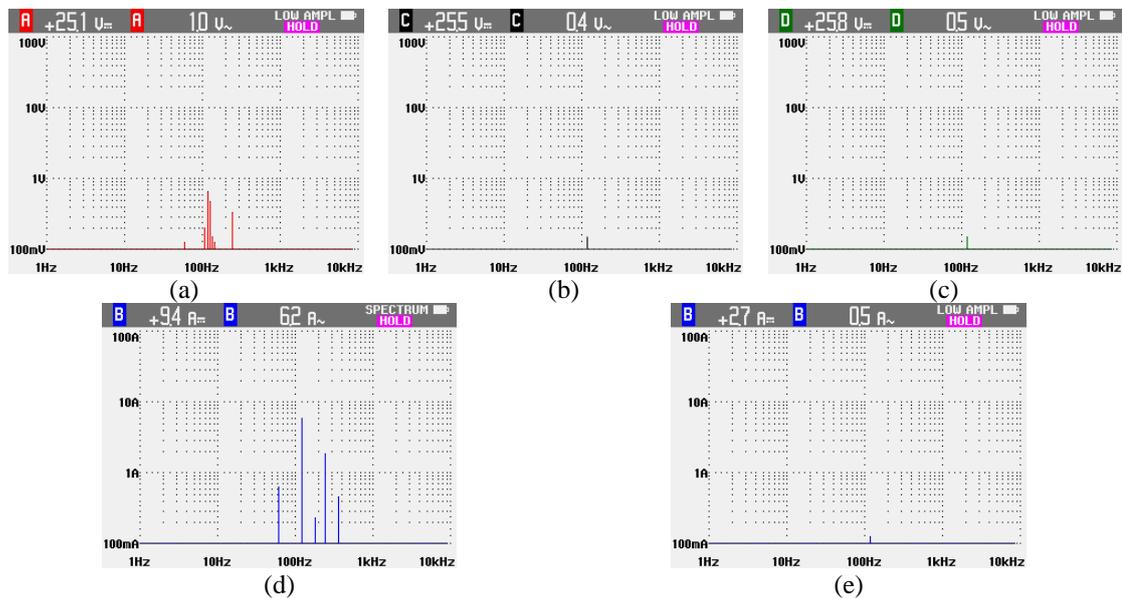
Fonte: Captura de tela do osciloscópio digital.

Figura 4.12 - Formas de onda de tensão nos pontos de conexão das cargas e corrente no BC1, com a indicação do valor RMS na parte superior considerando a presença: (a) das componentes c.a. e c.c., (b) somente da componente c.c. e (c) somente da componente c.a.



Fonte: Captura de tela do osciloscópio digital.

Figura 4.13 - Espectro de amplitude da tensão para o BC3 (a), BC1 (b), BC2 (c) e para corrente no BC3 (d) e BC1 (e).



Fonte: Captura de tela do osciloscópio digital.

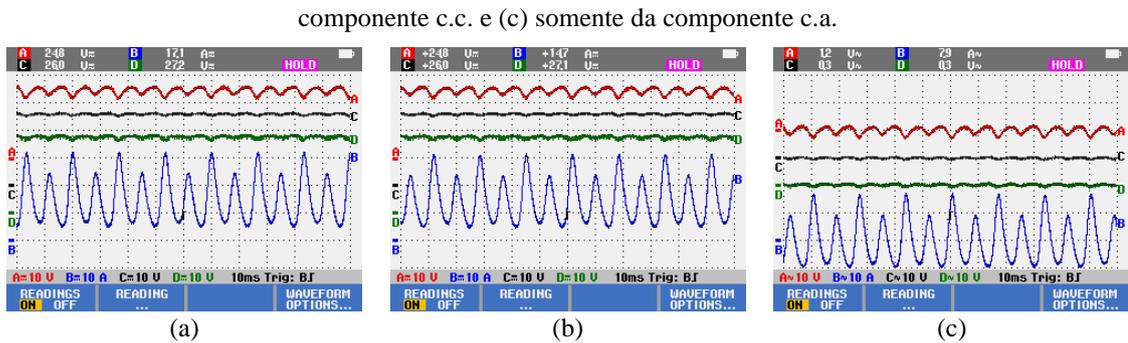
A partir das 12h00 houve a saída das cargas C1-1 e o acionamento das cargas C2-1 do BC1, além do aumento no carregamento do BC3. No BC3 foi registrado um valor de tensão e corrente de $24,8 V_{rms}$ e $17,0 A_{rms}$, respectivamente conforme ilustrado na Figura 4.14, com ondulação de corrente de $27,1 A_{p-p}$ e ondulação de tensão nos pontos de conexão, BC1, BC2 e BC3 de $1,8 V_{p-p}$, $2,2 V_{p-p}$, $5,0 V_{p-p}$, respectivamente.

Após o acionamento das cargas C2-1 foi registrado um valor de tensão e corrente de $25,9 V_{rms}$ e $4,7 A_{rms}$, respectivamente, e uma forma de onda de corrente com o mesmo perfil da forma de onda de tensão. Neste caso, as lâmpadas apresentaram uma ondulação de corrente de $0,8 A_{p-p}$ com pico e vale de corrente coincidindo com os de tensão, conforme mostrado na Figura 4.15. Neste caso, como na composição do circuito da lâmpada há apenas LEDs, resistores e

diodos retificadores, o aumento do nível de tensão implica em um maior valor de corrente suprida.

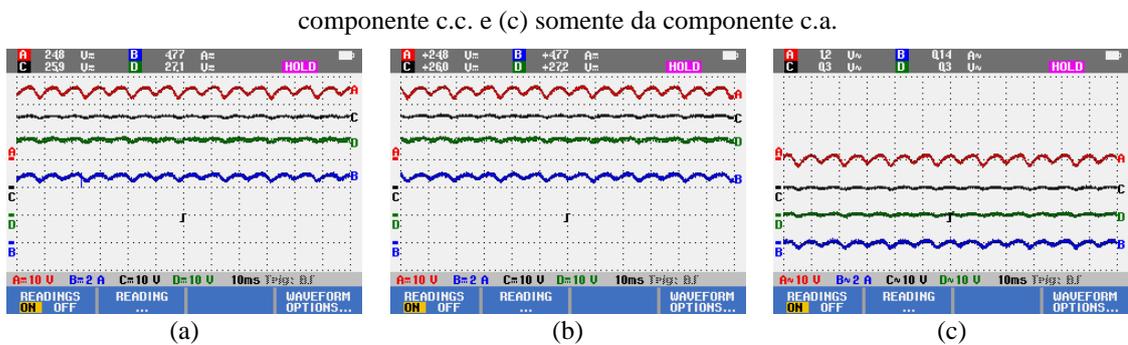
Para esta medição também foram aferidas componentes espectrais com maiores amplitudes em 60 Hz, 120 Hz e 240 Hz para a corrente do BC1, bem como para tensão e corrente do BC3, conforme apresentado na Figura 4.16.

Figura 4.14 - Formas de onda de tensão nos pontos de conexão das cargas e corrente no BC3, com a indicação do valor RMS na parte superior considerando a presença:



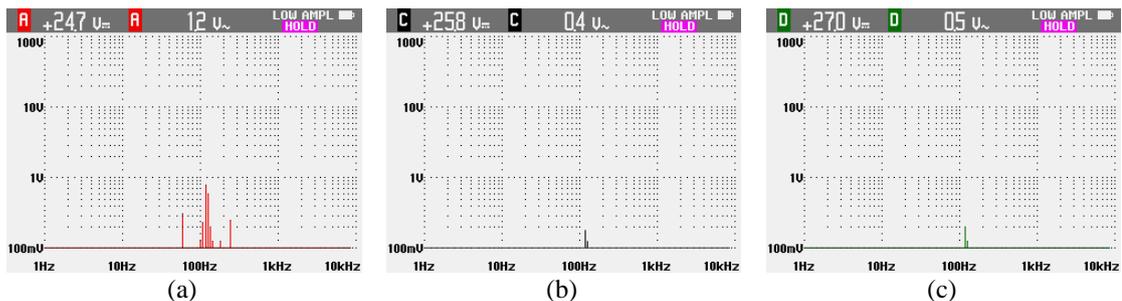
Fonte: Captura de tela do osciloscópio digital.

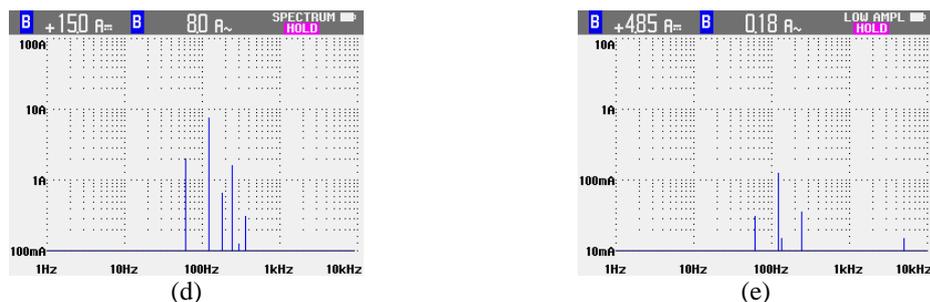
Figura 4.15 - Formas de onda de tensão nos pontos de conexão das cargas e corrente no BC1, com a indicação do valor RMS na parte superior considerando a presença:



Fonte: Captura de tela do osciloscópio digital.

Figura 4.16 - Espectro de amplitude da tensão para o BC3 (a), BC1 (b), BC2 (c) e para corrente no BC3 (d) e BC1 (e).





Fonte: Captura de tela do osciloscópio digital.

Durante o início da operação da carga C2-1 do BC1, foram medidas temperaturas na base da lâmpada observando-se valores superiores a $100\text{ }^{\circ}\text{C}$, conforme mostrado nas fotografias da Figura 4.17, para os valores medidos de $111,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ e $104,0\text{ }^{\circ}\text{C}$.

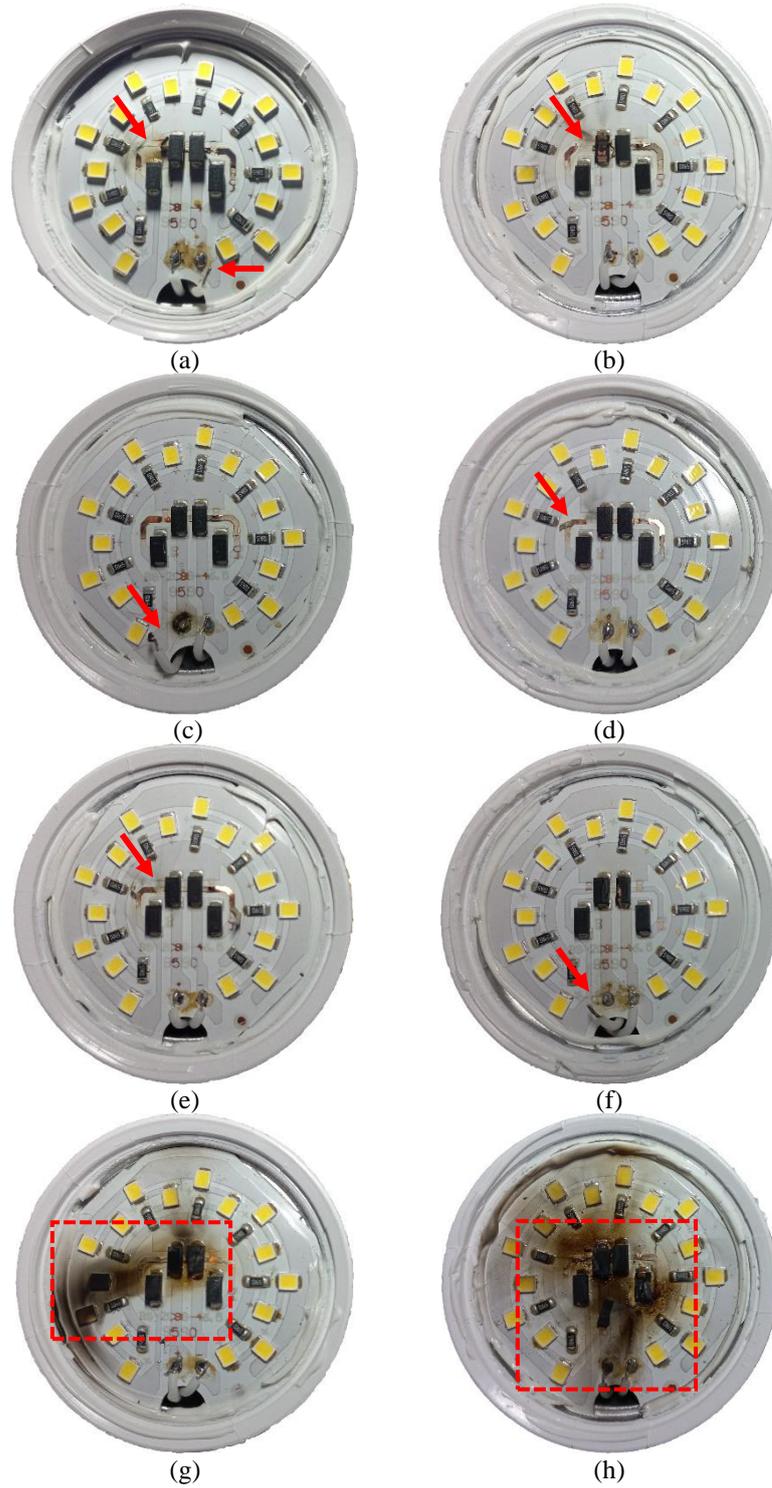
Figura 4.17 - Temperatura na base da lâmpada do BC1 (carga C2-1).



Fonte: autoria própria.

Após meia hora de operação da carga C2-1 do BC1, no horário das 12h30, foi constatada a saída de operação de todas as lâmpadas, onde estavam sendo supridas com valor de tensão de $26,9\text{ V}$, $27,1\text{ V}$ e $26,5\text{ V}$ nos pontos de conexão à rede do SGA 1, 2 e 3, respectivamente. A causa desta avaria esteve no fato do sobreaquecimento resultante da elevação do valor de corrente demanda pela carga, visto que as mesmas operaram sob um valor de tensão maior que 24 V , indicado pela fabricante. De modo geral, foram observados rompimentos das trilhas condutoras de cobre e desconexão do condutor de alimentação referente ao polo positivo no circuito das lâmpadas, além de componentes soltos após derretimento da solda na base de suporte de alumínio, conforme mostrado na Figura 4.18 (a) a (f). Além disso, também observou-se a queima de componentes, como diodos da ponte retificadora, conforme apresentado na Figura 4.18 (g) e (h)

Figura 4.18 - Cargas C2-1 do BC1 após avaria.



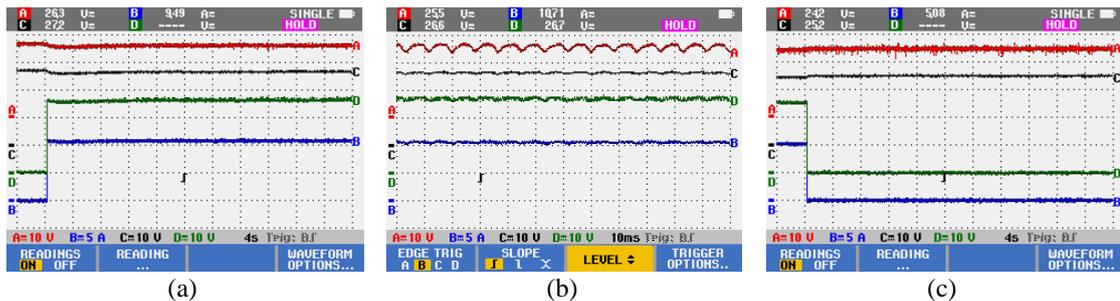
Fonte: autoria própria.

No horário das 14h00, durante o acionamento do BC2 houve uma diminuição no valor eficaz da tensão de 0,5 V e 0,6 V no ponto de conexão do BC1 e BC3, respectivamente, e posterior aumento, durante a saída do BC2, no valor eficaz da tensão de 0,3 V e 0,2 V dos respectivos pontos de conexão do BC1 e BC3. Este evento é causado em decorrência do

acionamento de uma carga demandando aproximadamente 279 W, sendo que nesse curto período há a diminuição do nível de tensão dos bancos de baterias para suprimento da carga acionada.

Para o BC2 foi registrado um valor de tensão e corrente de 26,0 V_{rms} e 10,7 A_{rms}, respectivamente, conforme ilustrado na Figura 4.19.

Figura 4.19 - Forma de onda de tensão e corrente durante o acionamento, operação e saída do BC2.

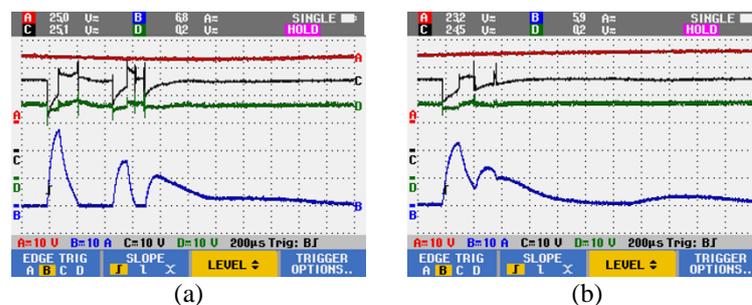


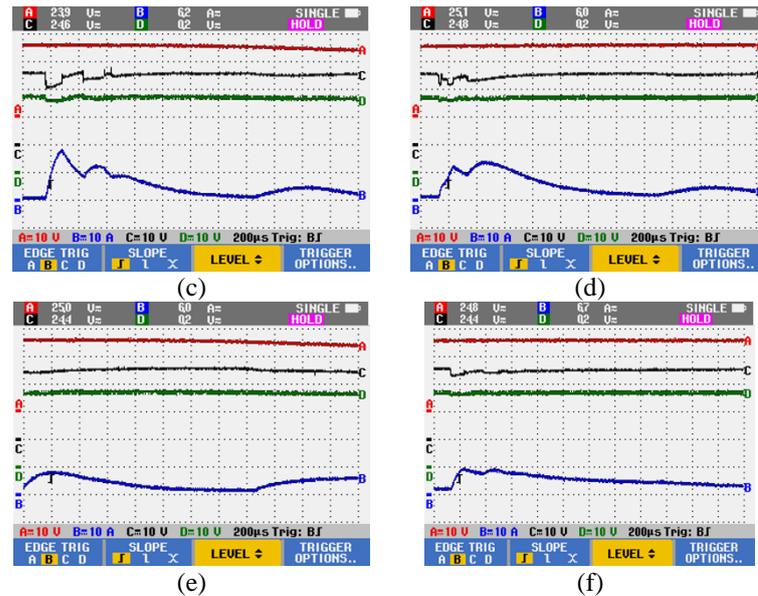
Fonte: Captura de tela do osciloscópio digital.

No horário das 16h00 houve o acionamento novamente das cargas C1-1 do BC1. Nesta parte do ensaio foi possível realizar o registro de eventos transitórios oscilatórios nos pontos de conexões da carga, com maior impacto no ponto de conexão do BC2, onde não havia carga ligada. O evento ocorreu com duração de 2 milissegundos alcançando magnitudes de 9,1 V e 22 V no ponto de conexão do BC1 e BC2, respectivamente, não havendo impacto no ponto de conexão do BC3, como ilustrado na Figura 4.20.

Este evento é resultado da energização de elementos armazenadores de energia, capacitores e indutores, presentes no dispositivo conversor c.c.-c.c.. Nesse caso, o evento transitório oscilatório ocorre sob uma duração da ordem de milissegundos.

Figura 4.20 - Evento transitório oscilatório durante acionamento da carga C1-1 do BC1 desde o primeiro acionamento (a), os seguintes (b), (c), (d), (e) até a última carga acionada (f).





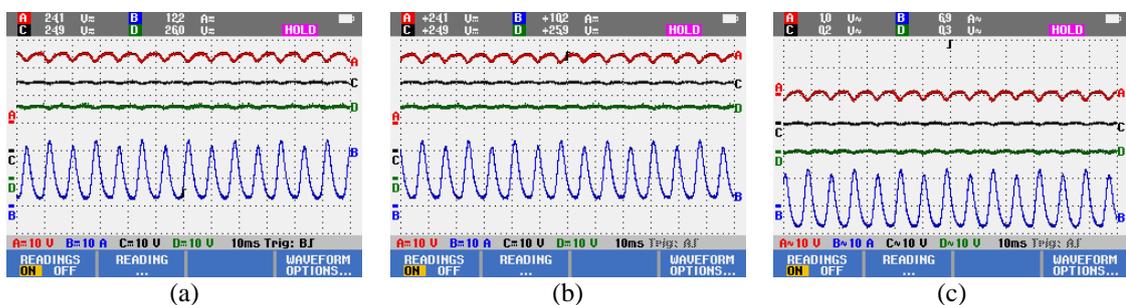
Fonte: Captura de tela do osciloscópio digital.

Para o BC3, no horário das 16h39, foi registrado um valor de tensão e corrente de 24,1 V_{rms} e 12,1 A_{rms} , respectivamente, e para o BC1, 24,9 V_{rms} e 2,6 A_{rms} , respectivamente, como ilustrado nas Figuras 4.21 e 4.22, respectivamente.

Por fim, das 18h00 em diante o BC1 permaneceu ligado com as cargas C1-1 em conjunto com o BC3 utilizando o inversor com carregamento próximo ao vazio. Na Figura 4.23 constam os espectros de amplitude da tensão e corrente em diferentes pontos de conexão das cargas na NDCC.

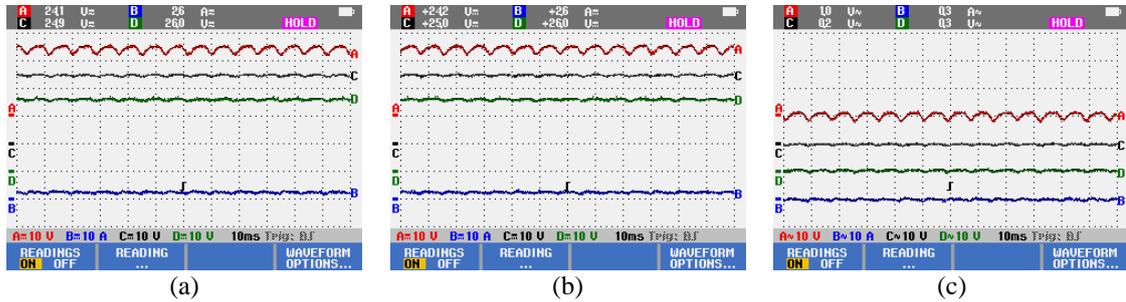
Figura 4.21 - Formas de onda de tensão nos pontos de conexão das cargas e corrente no BC3, com a indicação do valor RMS na parte superior considerando a presença: (a) das componentes c.a. e c.c., (b) somente da

componente c.c. e (c) somente da componente c.a.



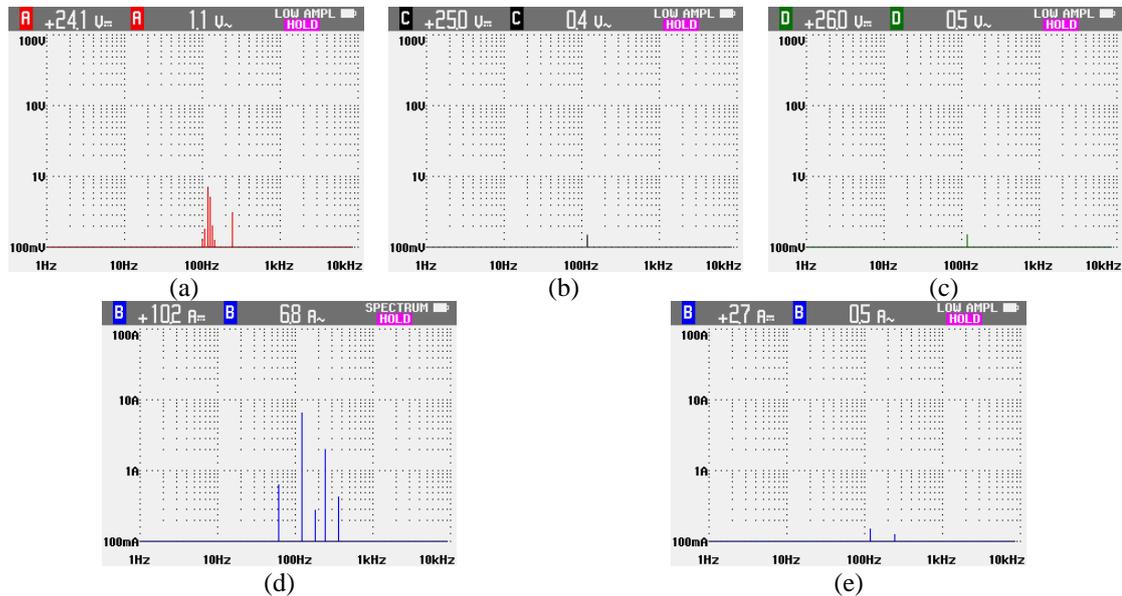
Fonte: Captura de tela do osciloscópio digital.

Figura 4.22 - Formas de onda de tensão nos pontos de conexão das cargas e corrente no BC1, com a indicação do valor RMS na parte superior considerando a presença: (a) das componentes c.a. e c.c., (b) somente da componente c.c. e (c) somente da componente c.a.



Fonte: Captura de tela do osciloscópio digital.

Figura 4.23 - Espectro de amplitude da tensão para o BC3 (a), BC1 (b), BC2 (c) e para corrente no BC3 (d) e BC1 (e).



Fonte: Captura de tela do osciloscópio digital.

Na Tabela 4.3 constam os valores de potência aparente, ativa e não ativa calculadas a partir da forma de onda de tensão e corrente obtidas pelo osciloscópio no ponto de conexão das cargas BC1, BC2 e BC3, em regime. De modo geral, observou-se o aumento da demanda de potência não ativa tanto no ponto de conexão do BC3 quanto nos demais quando houve maior demanda do BC3, isto é, com o aumento do carregamento do inversor.

Nesse contexto, com o aumento da ondulação de tensão ao longo da NDCC, tem-se um aumento da demanda de potência não ativa de outras cargas em operação, como exemplo para o BC1, quando se observa das 6h00 às 10h00.

Destaca-se que foram realizadas medições de formas de onda dentro dos diferentes intervalos do ensaio como são medições pontuais, na realidade, a demanda não é fixa ao longo do intervalo, há um pouco de variação do valor.

Tabela 4.3 - Registro de potência aparente, ativa e não ativa no ponto de conexão de carga do ensaio I.

Horário	Registro de Potência no Ponto de Conexão da Carga					
	BC3			BC1 e BC2*		
	VA	W	Var	VA	W	Var
7:00	28,6	14,7	24,6	67,9	67,9	3,5
8:00	166,9	131,5	102,7	65,2	65,1	4,7
10:00	298,9	244,2	172,4	70,3	69,9	7,1
12:00	423,9	364,1	217,1	123,6	123,5	3,0
14:00	295,9	246,2	173,4	278,6*	278,6*	3,9*
16:00	293,0	236,9	172,5	65,5	65,0	7,5

Na Tabela 4.4 constam os valores de potência ativa registradas pelo controlador de carga, enviadas ao *datalogger*, na saída de cada SGA. Observa-se um valor de potência fornecida maior que medida no ponto de conexão das cargas, chegando a uma diferença máxima de 27 W no horário de 16h00. Ressalta-se que a obtenção destes valores corresponde ao mesmo horário em que houve a medição com osciloscópio digital.

Tabela 4.4 - Registro de potência ativa fornecida pelo controlador de carga na saída de cada SGA do ensaio I.

Horário	Registro de Potência na Saída do SGA (W)			
	SGA1	SGA2	SGA3	Total
7:00	33,3	27,3	24,1	84,7
8:00	71,6	61,4	66,1	199,1
10:00	110,2	97,6	109,0	316,8
12:00	182,3	184,6	158,7	525,6
14:00	198,8	173,1	166,9	538,8
16:00	116,4	100,9	111,0	328,3

Na Tabela 4.5 constam os valores de duração, magnitude e componente espectral que caracterizam um evento transitório oscilatório, conforme definição da recomendação do IEEE Std1159. O evento registrado é do tipo de baixa frequência com componente espectral menor que 5 kHz e duração entre 0,3 e 50 ms. Este evento é resultado do acionamento individual de cada carga (C1-1) do BC1 por meio de chaves, no horário das 16h00. Para este evento não foi registrado impacto considerável para o ponto de conexão de cargas do BC2, sendo os pontos de conexão do BC1 e BC3 que sofreram maior redução no nível de tensão em curta duração (milésimos de segundos).

Tabela 4.5 - Evento transitório oscilatório referente ao ensaio I.

Horário	Transitório		
	Oscilatório		
	Duração (ms)	Magnitude (p.u.)	Componente Espectral (kHz)
16:00	2,00	0,40 – 1,04	3,00

Na Tabela 4.6 constam os valores de ondulação de tensão ao longo do dia, verificando-se maiores magnitudes de tensão pico a pico (p-p) para o ponto de conexão do BC3 no horário de maior carregamento, horário de 12h00. Destacam-se também os valores de tensão pico a pico também nos pontos de conexão do BC1 e BC2, onde o aumento da ondulação de tensão nestes pontos foi influenciado pelo aumento da magnitude da ondulação de tensão no ponto de conexão BC3.

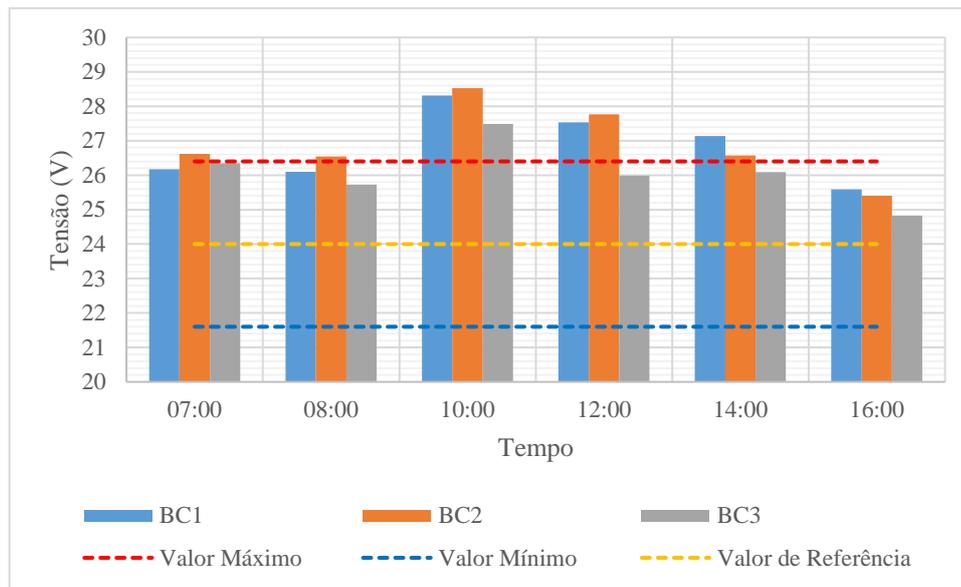
Os valores máximos registrados foram de $5,0 V_{p-p}$ no ponto de conexão do BC3 no horário de 12h00, seguidos dos valores de $1,8 V_{p-p}$ e $2,2 V_{p-p}$ para os pontos BC1 e BC2, respectivamente. Os valores mínimos registrados foram durante o início da manhã até às 8h00, com $1,1 V_{p-p}$, $1,5 V_{p-p}$ e $1,7 V_{p-p}$ para os pontos BC1, BC2 e BC3, respectivamente. A frequência do evento esteve próxima a 120 Hz.

Tabela 4.6 - Ondulação de tensão ao longo do dia na NDCC durante o ensaio I.

Horário	Ondulação de Tensão						
	Tensão RMS (V)			Tensão p-p (V_{p-p})			Frequência (Hz)
	BC1	BC2	BC3	BC1	BC2	BC3	
7:00	24,95	25,12	25,10	1,10	1,50	1,70	119,7
8:00	25,19	24,67	24,88	1,30	1,60	2,90	119,7
10:00	26,01	25,57	25,14	1,50	1,70	3,80	119,7
12:00	25,98	26,48	24,82	1,80	2,20	5,00	119,7
14:00	26,59	26,02	25,52	1,30	1,70	3,60	119,7
16:00	24,93	25,28	24,10	1,60	1,90	3,95	119,7

Na Figura 4.24 apresentam-se os valores de tensão RMS no ponto de conexão dos bancos de cargas BC1, BC2 e BC3, calculados a partir das formas de onda de tensão registradas pelo osciloscópio. De modo geral, observou-se o evento sobretensão apenas para o BC2 no início das 12h00 e para o BC1 no início das 14h00, registrando-se valores de 26,4 V e 26,5, respectivamente. No entanto, quando observa-se os valores nos pontos próximos aos SGAs, ilustrados na Figura 4.3, tem-se o evento de sobretensão no período das 10h30 às 14h30.

Figura 4.24 - Valor de tensão eficaz nos pontos de conexão das cargas do ensaio I.



Os eventos de curta duração, referentes ao afundamento e elevação do valor RMS de tensão, não ocorreram neste ensaio. No horário das 14h00, durante o acionamento e saída do BC2, registraram-se diminuições e aumentos no nível de tensão, porém não correspondentes aos valores delimitados pela IEEE Std 1159 (0,1 p.u. a 0,9 p.u. para afundamento e 1,1 p.u. a 1,8 p.u. para elevação). Isto é, durante o acionamento e saída do BC2 houve variações de tensão abaixo de 0,6 V (0,025 p.u., considerando a tensão nominal de 24 V).

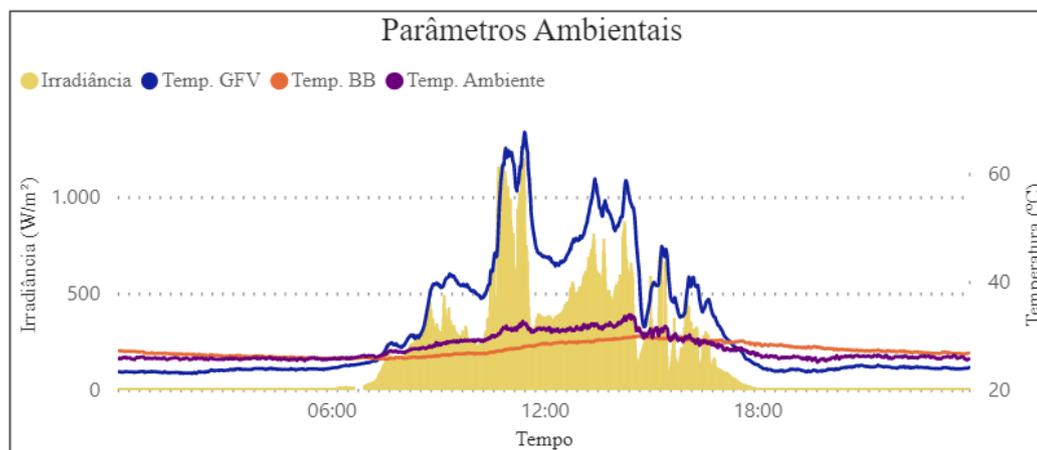
Desse modo, considerando a tensão eficaz nos pontos medidos, inicialmente para o acionamento do BC2 não foi registrado afundamento no nível de tensão nos pontos medidos, visto que os pontos de conexão do BC1 e BC3 estiveram, no instante do acionamento do BC2, com 27,2 V_{rms} e 26,3 V_{rms} , respectivamente. Durante a saída do BC2 também não foi registrado o evento de elevação, visto que os pontos de conexão do BC1 e BC3 estiveram no instante da saída do BC2 com 25,2 V_{rms} e 24,2 V_{rms} , respectivamente.

4.1.2. Ensaio II

O segundo ensaio teve como objetivo analisar eventos de QEE na NDCC durante a operação das cargas C1-1 e C2-2 do BC1 em conjunto com as cargas BC2 e BC3. Este ensaio foi realizado no dia 04/12/2022, onde os parâmetros ambientais registrados estão ilustrados na Figura 4.25, verificando-se no horário das 11h27 a temperatura máxima de 66 °C na parte posterior do módulo fotovoltaico, temperatura ambiente e temperatura do banco de baterias máximas de 33,9 °C às 14h24 e 29,8 °C às 14h39, respectivamente. O valor máximo de

irradiância global registrado foi de 1.200 W/m², no horário de 11h26. Para o referido dia de ensaio houve 3,9 HSP no plano do gerador fotovoltaico. Neste dia, registraram-se diminuições no valor de irradiância em horários das 10h11 e 12h00 para valores abaixo de 500 W/m² por períodos maiores que 1 hora, indicando um tempo nublado ao longo do dia sem ocorrência de chuvas.

Figura 4.25 - Parâmetros ambientais do ensaio II.

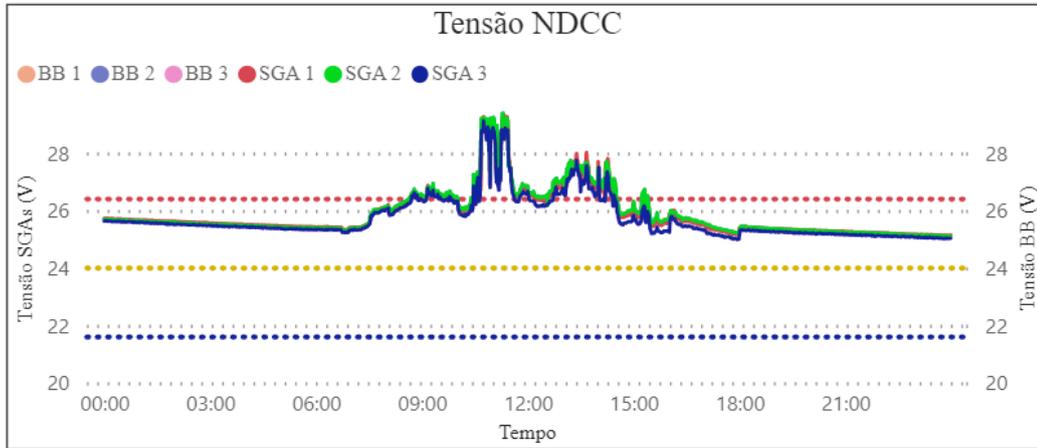


Fonte: Captura de tela da ferramenta desenvolvida em Power BI.

A Figura 4.26 ilustra a tensão da NDCC no ponto de saída dos controladores de carga (terminal de conexão da NDCC). Os valores de tensão registrados na maior parte do tempo estiveram dentro da faixa de 0,9 a 1,1 p.u, com exceção do horário das 8h40 às 9h59, 10h27 às 12h05 e das 12h34 às 14h30, onde foram registrados valores acima de 1,1 p.u. (nesse caso, caracterizando evento de sobretensão conforme definição da recomendação do IEEE Std 1159). O valor máximo de tensão alcançado foi 29,2 V, 29,2 V e 29,1 V para os SGAs 1, 2 e 3, respectivamente.

O valor mínimo de tensão registrado foi 25,3 V para os três SGAs, no horário das 6h51. Para este dia de ensaio, teve-se um valor percentual dos registros referentes ao tempo em sobretensão de 20,3 %.

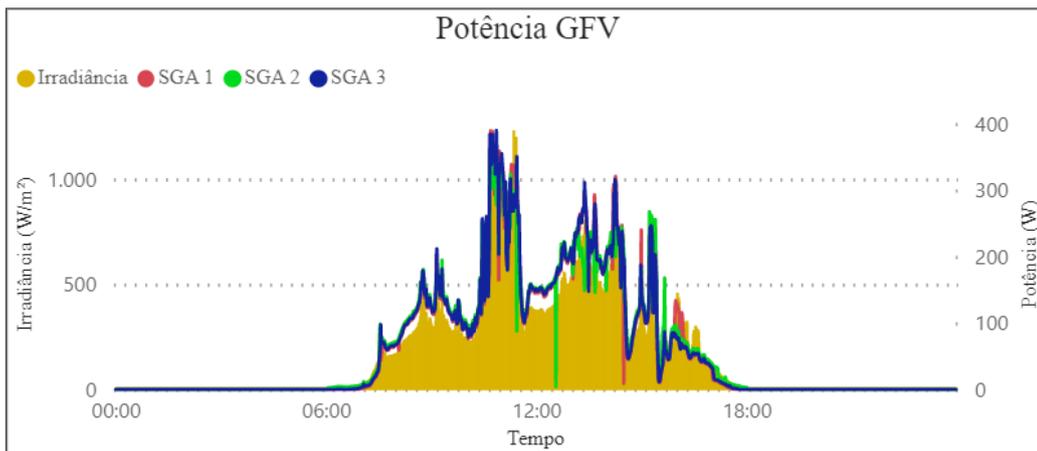
Figura 4.26 - Tensão da NDCC próxima à saída de cada SGA com a indicação (linha tracejada) dos valores de tensão em 21,6 V (0,9 p.u.), 24 V (1 p.u.) e 26,4 V (1,1 p.u.) do ensaio II.



Fonte: Captura de tela da ferramenta desenvolvida em Power BI.

A Figura 4.27 ilustra o perfil de geração dos GFVs em conjunto com o perfil de irradiância global. Pelo perfil de geração dos GFVs, identifica-se a operação do controlador de carga no modo MPPT ao longo de todo o dia com o recurso solar disponível. O máximo valor de potência entregue pelos GFVs ocorreu no horário das 10h45, com valor de 388 W, 302 W e 383 W, para o GFV1, 2 e 3, respectivamente.

Figura 4.27 - Potência fornecida de cada GFV do ensaio II.



Fonte: Captura de tela da ferramenta desenvolvida em Power BI.

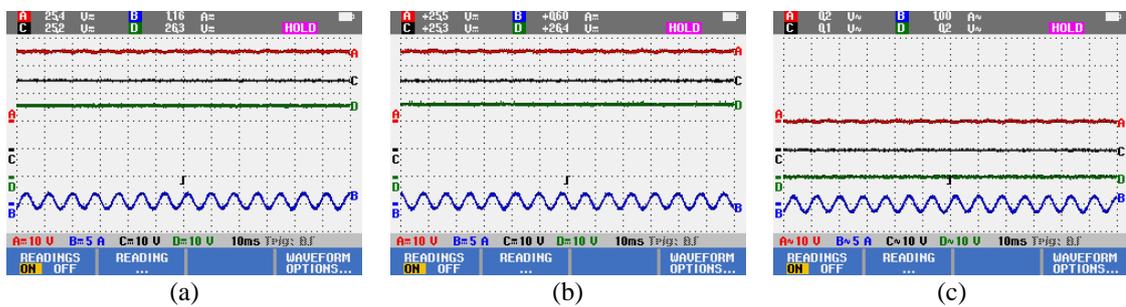
Nas medições realizadas durante o ensaio II nos pontos de conexões das cargas BC1, BC2 e BC3, registrou-se valores próximos aos do ensaio I.

Com a operação desde a madrugada até o início da manhã das cargas C1-1 do BC1 e a operação do BC3 com o inversor próximo ao vazio, como relatado anteriormente, constatou-se a presença de ondulações nas formas de onda de corrente e tensão nos pontos de conexão de carga da NDCC, com magnitudes de $1,1 V_{p-p}$, $1,5 V_{p-p}$, $1,8 V_{p-p}$ nos pontos de conexão do BC1, BC2 e BC3, respectivamente, conforme medições obtidas por meio do osciloscópio digital e ilustradas nas Figuras 4.28 e 4.29.

A corrente de entrada do inversor, correspondente à corrente injetada pela NDCC ao BC3, apresentou um valor de $2,8 A_{p-p}$ e $1,16 A_{rms}$. A tensão RMS registrada no ponto de conexão do BC3 foi de $25,4 V_{rms}$, resultando em um autoconsumo de $15,5 W$ do equipamento.

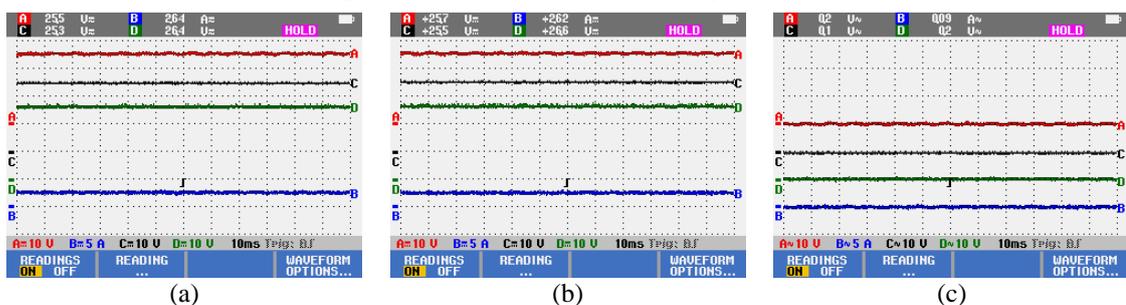
O BC1 operou normalmente durante todo o período da madrugada até o início da manhã, sem nenhuma falha no funcionamento, com valor de tensão de $25,3 V_{rms}$ e corrente de $2,6 A_{rms}$, demandando uma potência de $67,2 W$. Para esta medição foram aferidas componentes espectrais em 120 Hz para a corrente e tensão, como mostrado na Figura 4.30.

Figura 4.28 - Formas de onda de tensão nos pontos de conexão das cargas e corrente no BC3, com a indicação do valor RMS na parte superior considerando a presença: (a) das componentes c.a. e c.c., (b) somente da componente c.c. e (c) somente da componente c.a.



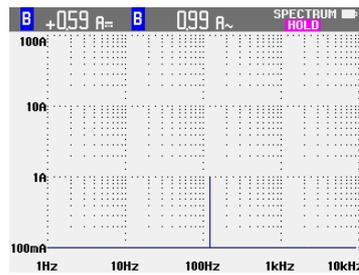
Fonte: Captura de tela do osciloscópio digital.

Figura 4.29 - Formas de onda de tensão nos pontos de conexão das cargas e corrente no BC1, com a indicação do valor RMS na parte superior considerando a presença: (a) das componentes c.a. e c.c., (b) somente da componente c.c. e (c) somente da componente c.a.



Fonte: Captura de tela do osciloscópio digital.

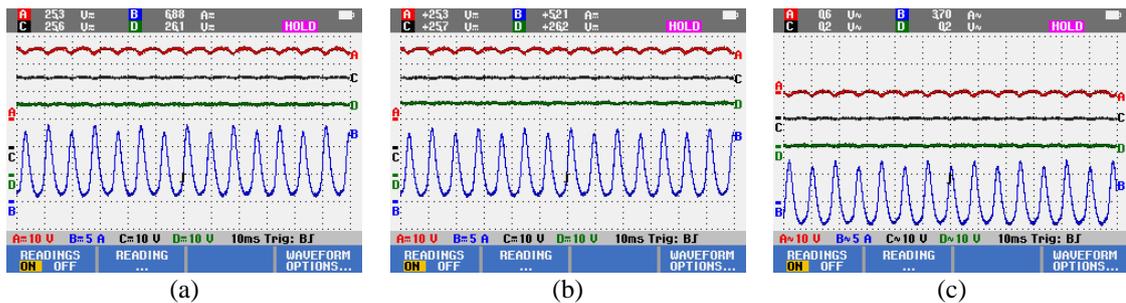
Figura 4.30 - Espectro de amplitude da corrente para o BC3.



Fonte: Captura de tela do osciloscópio digital.

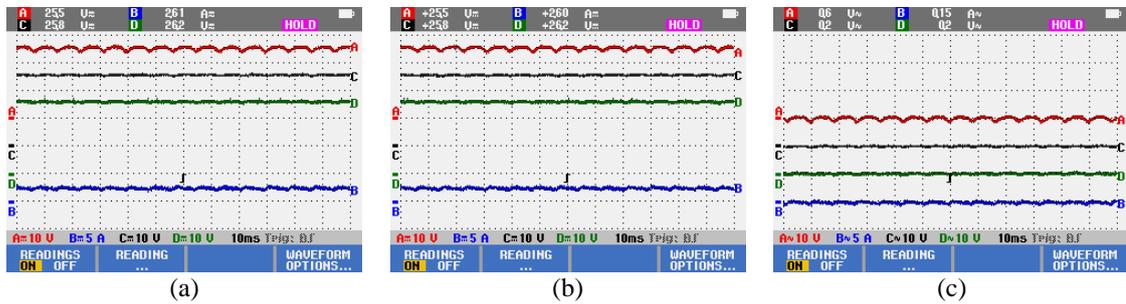
A partir das 8h00 teve-se o aumento do carregamento do BC3. Registrou-se para o BC3 uma potência de 136,7 W, uma tensão de 25,2 V_{rms} e corrente de 6,9 A_{rms}, com 13,1 A_{p-p}, ilustrado na Figura 4.31. A ondulação de tensão registrada nos pontos de conexão do BC1, BC2 e BC3 foi de 1,3 V_{p-p}, 1,7 V_{p-p}, 3,1 V_{p-p}, respectivamente. Do mesmo modo, observou-se uma mudança na operação do BC1 com a presença de ondulação na tensão, onde a corrente requisitada foi de 1,1 A_{p-p} e 2,6 A_{rms}, como verificado na Figura 4.32. A tensão medida no BC1 foi de 25,7 V_{rms}. Para esta medição também foram aferidas, além da componente espectral em 120 Hz, componentes espectrais em 60 Hz, 240 Hz e 360 Hz para a corrente do BC3 e em 240 Hz para a tensão no BC3, como mostrado na Figura 4.33.

Figura 4.31 - Formas de onda de tensão nos pontos de conexão das cargas e corrente no BC3, com a indicação do valor RMS na parte superior considerando a presença: (a) das componentes c.a. e c.c., (b) somente da componente c.c. e (c) somente da componente c.a.



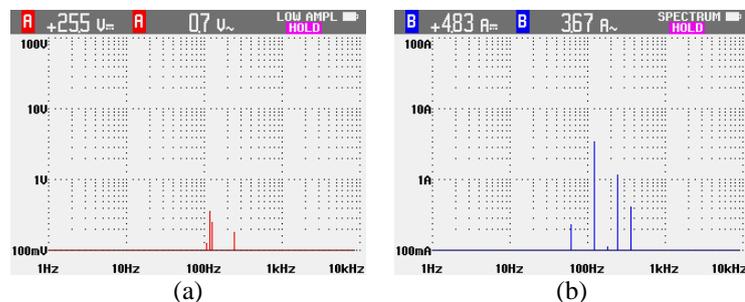
Fonte: Captura de tela do osciloscópio digital.

Figura 4.32 - Formas de onda de tensão nos pontos de conexão das cargas e corrente no BC1, com a indicação do valor RMS na parte superior considerando a presença: (a) das componentes c.a. e c.c., (b) somente da componente c.c. e (c) somente da componente c.a.



Fonte: Captura de tela do osciloscópio digital.

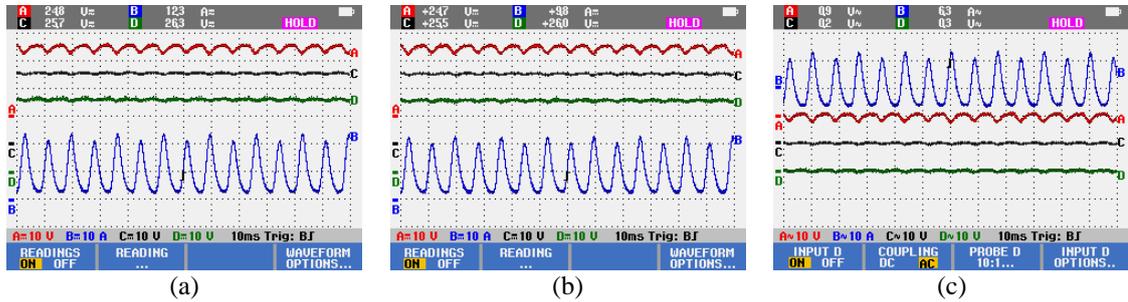
Figura 4.33 - Espectro de amplitude da tensão e corrente para o BC3.



Fonte: Captura de tela do osciloscópio digital.

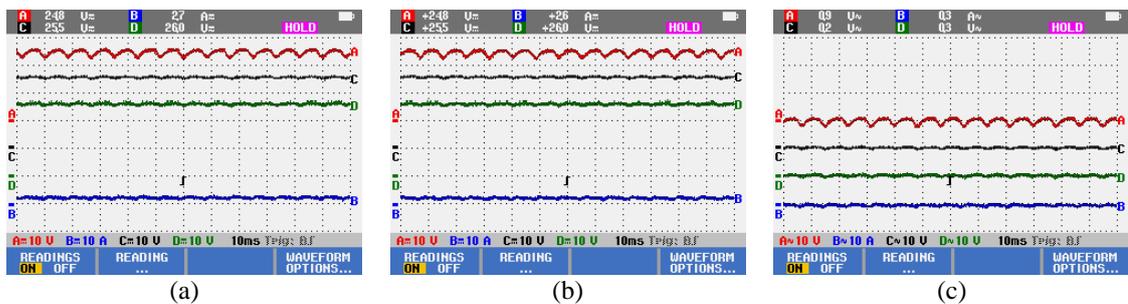
A partir das 10h00 teve-se mais um aumento no carregamento do BC3, registrando uma potência de 250,0 W, tensão de 24,7 V_{rms} e corrente de 12,4 A_{rms} ilustrados na Figura 4.34. Houve o aumento na ondulação da corrente, com o valor de 21,5 A_{p-p} e da ondulação da tensão nos pontos de conexão do BC1, BC2 e BC3, medindo-se os valores de 1,5 V_{p-p}, 2,0 V_{p-p}, 4,0 V_{p-p}, respectivamente. Para o BC1, registrou-se 1,9 A_{p-p}, com uma tensão e corrente de 25,5 V_{rms} e 2,6 A_{rms}, respectivamente, conforme ilustrado na Figura 4.35. Para esta medição também foram aferidas componentes espectrais em 60 Hz, 180 Hz, 240 Hz e 360 Hz para a corrente do BC3 e em 240 Hz para a tensão no BC3, além de 120 Hz para ambas. Os espectros de amplitude da tensão e da corrente nos pontos de conexão dos bancos de carga estão ilustrados na Figura 4.36.

Figura 4.34 - Formas de onda de tensão nos pontos de conexão das cargas e corrente no BC3, com a indicação do valor RMS na parte superior considerando a presença: (a) das componentes c.a. e c.c., (b) somente da componente c.c. e (c) somente da componente c.a.



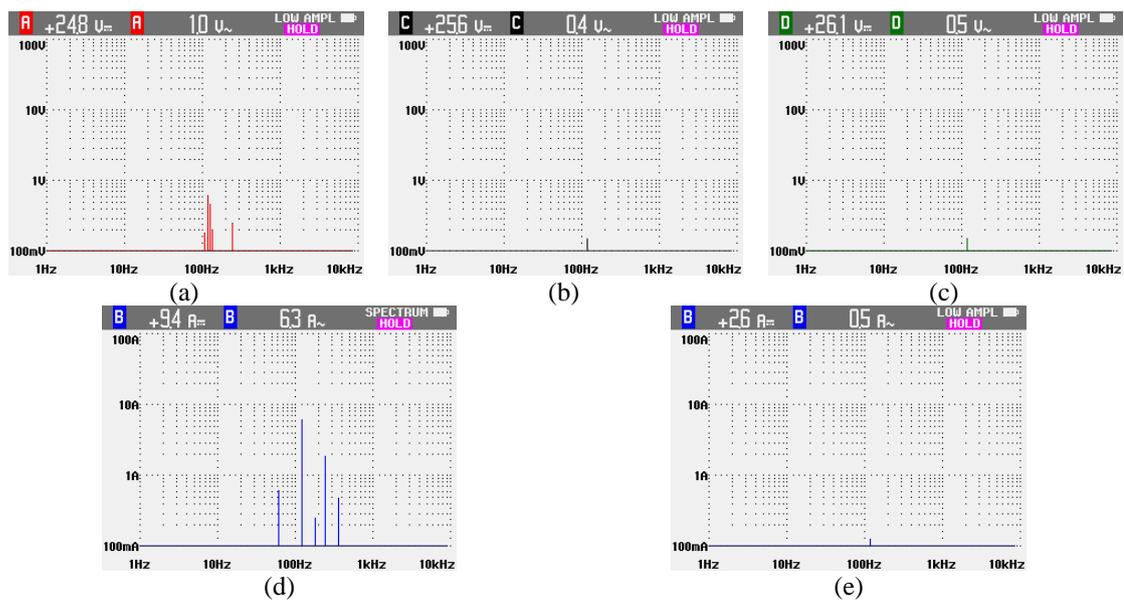
Fonte: Captura de tela do osciloscópio digital.

Figura 4.35 - Forma de onda de tensão e corrente com valor de corrente no BC1, com a indicação do valor RMS na parte superior considerando a presença: (a) das componentes c.a. e c.c., (b) somente da componente c.c. e (c) somente da componente c.a.



Fonte: Captura de tela do osciloscópio digital.

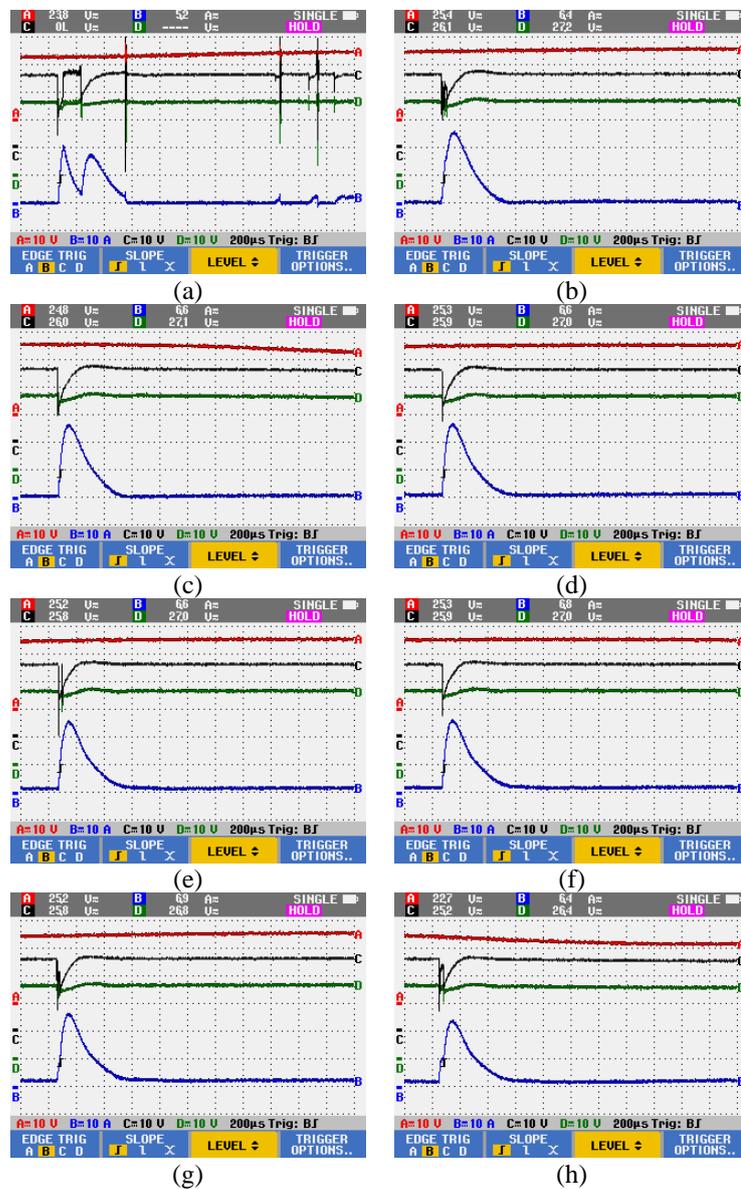
Figura 4.36 - Espectro de amplitude da tensão para o BC3 (a), BC1 (b), BC2 (c) e para corrente no BC3 (d) e BC1 (e).



Fonte: Captura de tela do osciloscópio digital.

Durante o acionamento da carga C2-2 do BC1 no horário das 12h00, registrou-se um evento transitório oscilatório, conforme apresentado na Figura 4.37, resultado da energização do conversor c.c.-c.c. existente no circuito interno da lâmpada. Registram-se valores de corrente de pico de 25 A para o BC1 com diminuições de tensões para 10 V e 19,5 V referentes aos pontos de conexão do BC1 e BC2, respectivamente, num intervalo de 0,2 milissegundos. Da mesma forma que ocorrido no ensaio I, a causa do evento transitório para carga C2-2 do BC1 também é resultado da energização do conversor c.c.-c.c., que possui elementos armazenadores de energia (capacitores e indutores), mas neste caso o conversor é interno à lâmpada de LED.

Figura 4.37 - Evento transitório oscilatório durante acionamento da carga C2-2 do BC1 desde o primeiro acionamento (a), os seguintes (b), (c), (d), (e), (f), (g) até a última carga acionada (h).



Fonte: Captura de tela do osciloscópio digital.

Durante a operação da carga C2-2 foram registradas temperaturas abaixo de 60 °C na base da lâmpada, conforme ilustrado na Figura 4.38.

Figura 4.38 - Temperatura na base da lâmpada, carga C2-2 do BC1.



Fonte: autoria própria.

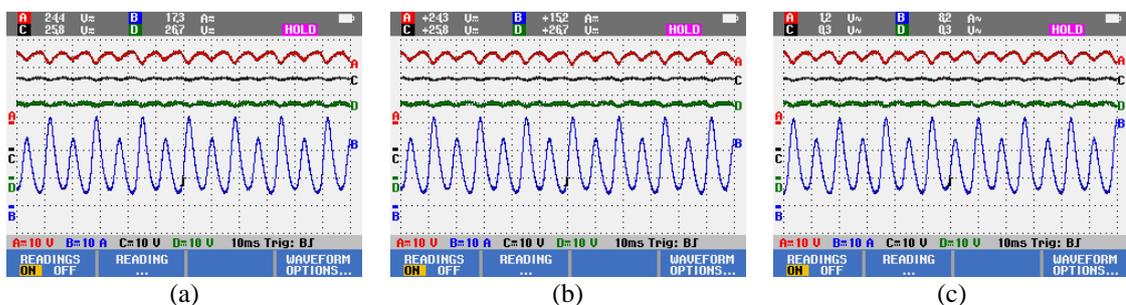
Neste período de ensaio, registrou-se para o BC3 um valor de tensão e corrente de 24,3 V_{rms} e 17,2 A_{rms} , respectivamente, com ondulação de corrente de 28,0 A_{p-p} e ondulação de tensão nos pontos de conexão do BC1, BC2 e BC3 de 1,7 V_{p-p} , 2,0 V_{p-p} , 5,0 V_{p-p} , respectivamente, conforme medições ilustradas na Figura 4.39.

Para o BC1, registrou-se um valor de tensão e corrente de 25,6 V_{rms} e 2,5 A_{rms} , respectivamente, com ondulação de corrente de 2,2 A_{p-p} , conforme apresentado na Figura 4.40.

Para esta medição foram aferidas componentes espectrais em 120 Hz para a corrente e tensão do BC1 e BC3, como verificado na Figura 4.41. Para esta medição foram aferidas componentes espectrais em 60 Hz e 240 Hz para a corrente e tensão do BC3

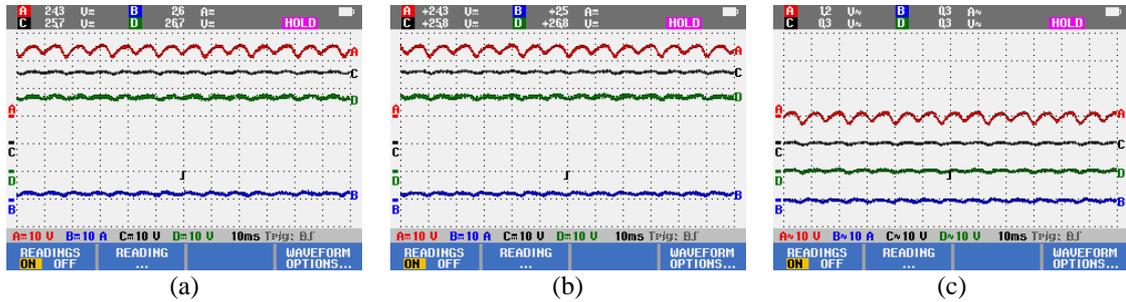
Figura 4.39 - Formas de onda de tensão nos pontos de conexão das cargas e corrente no BC3, com a indicação do valor RMS na parte superior considerando a presença: (a) das componentes c.a. e c.c., (b) somente da

componente c.c. e (c) somente da componente c.a.



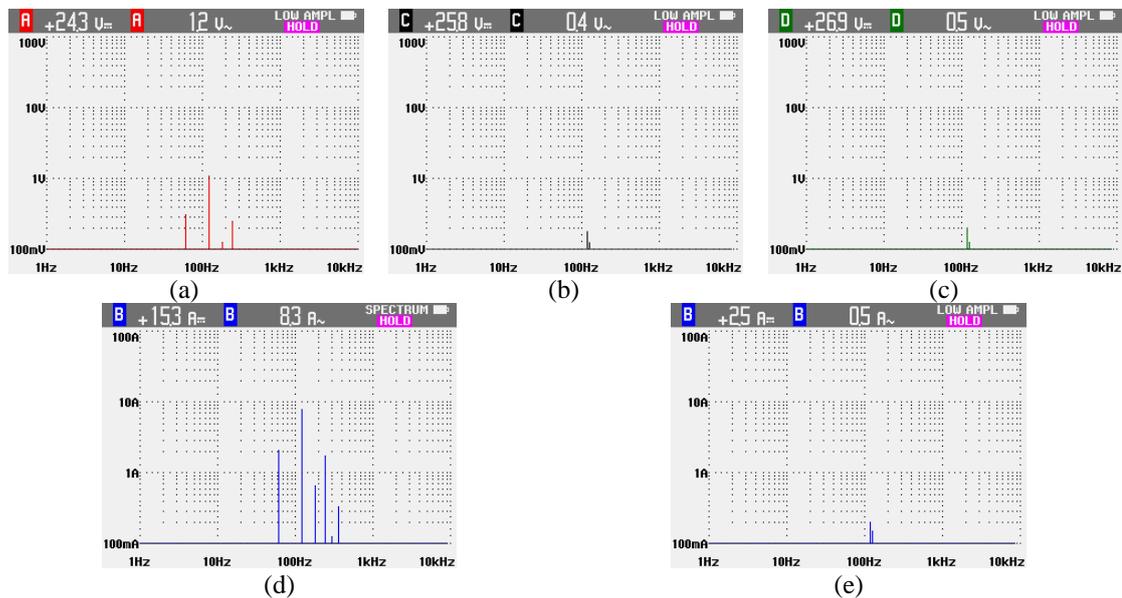
Fonte: Captura de tela do osciloscópio digital.

Figura 4.40 - Formas de onda de tensão nos pontos de conexão das cargas e corrente no BC1, com a indicação do valor RMS na parte superior considerando a presença: (a) das componentes c.a. e c.c., (b) somente da componente c.c. e (c) somente da componente c.a.



Fonte: Captura de tela do osciloscópio digital.

Figura 4.41 - Espectro de amplitude da tensão para o BC3 (a), BC1 (b), BC2 (c) e para corrente no BC3 (d) e BC1 (e).



Fonte: Captura de tela do osciloscópio digital.

No horário das 14h00, durante o acionamento do BC2 houve uma diminuição no valor eficaz da tensão de 1,1 V para o BC1 e 1,2 V para o BC3. Durante a saída do BC2 houve aumento de 0,5 V nos pontos de conexão do BC2 e BC3. Para o BC2 foi registrado um valor de tensão e corrente de 25,6 V_{rms} e 10,5 A_{rms}.

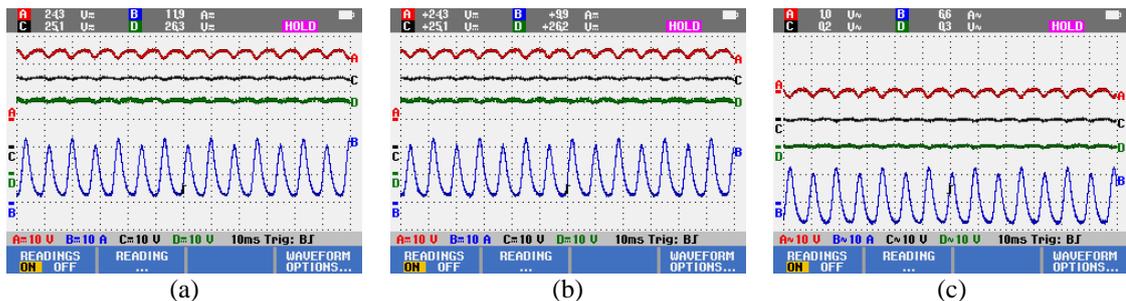
No horário das 16h00 houve o acionamento novamente das cargas C1-1 do BC1, assim como no ensaio I, registrou-se eventos transitórios oscilatórios resultado do acionamento dos conversores c.c.-c.c. da carga C1-1, conforme apresentado no Apêndice D, verificando-se maior impacto no ponto de conexão do BC2, onde não havia carga ligada.

Para o evento oscilatório foi registrada uma corrente de pico de 25 A para o BC1 e um valor de tensão de 11,6 V e 16,2 V para o BC1 e BC2, respectivamente, ocorrendo com a duração de aproximadamente 2 milissegundos.

A Figura 4.43 ilustra novamente a operação do BC1 apenas com as cargas C1-1 em conjunto com o BC3, ilustrado na Figura 4.42, registrando para o BC3 um valor de tensão e corrente de 24,2 V_{rms} e 11,9 A_{rms}, respectivamente, e para o BC1 25,1 V_{rms} e 2,6 A_{rms}, respectivamente, no horário de 16h30.

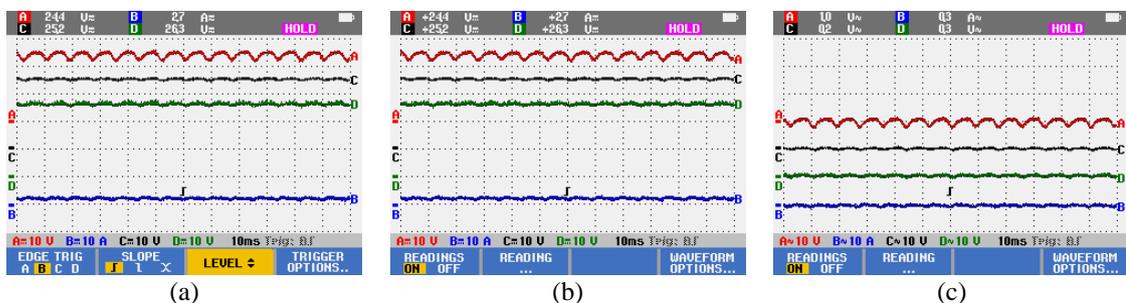
Por fim, das 18h00 em diante o BC1 continuou ligado com as cargas C1-1 em conjunto com o BC3 utilizando o inversor com carregamento próximo ao vazio. A Figura 4.44 ilustra o espectro de amplitude de tensão para todos os pontos de conexão de cargas e para corrente do BC3, mostrando baixas amplitudes devido a diminuição da ondulação de tensão.

Figura 4.42 - Formas de onda de tensão nos pontos de conexão das cargas e corrente no BC3, com a indicação do valor RMS na parte superior considerando a presença: (a) das componentes c.a. e c.c., (b) somente da componente c.c. e (c) somente da componente c.a.



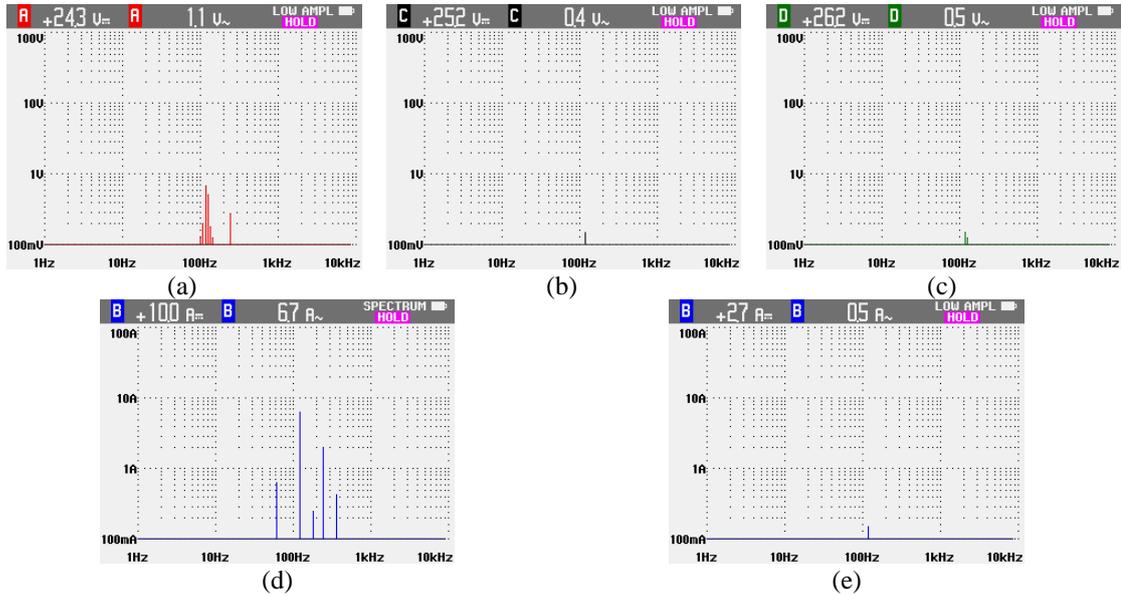
Fonte: Captura de tela do osciloscópio digital.

Figura 4.43 - Formas de onda de tensão nos pontos de conexão das cargas e corrente no BC1, com a indicação do valor RMS na parte superior considerando a presença: (a) das componentes c.a. e c.c., (b) somente da componente c.c. e (c) somente da componente c.a.



Fonte: Captura de tela do osciloscópio digital.

Figura 4.44 - Espectro de amplitude da tensão para o BC3 (a), BC1 (b), BC2 (c) e para corrente no BC3 (d) e BC1 (e).



Fonte: Captura de tela do osciloscópio digital.

Na Tabela 4.7 constam os valores de potência aparente, ativa e não ativa calculadas em cada ponto de conexão das cargas BC1, BC2 e BC3, quando em regime. De modo geral, assim como no ensaio I, observou-se o aumento de potência não ativa tanto no ponto de conexão do BC3 quanto nos demais quando houve maior demanda do BC3, isto é, com o aumento do carregamento do inversor.

Para a carga C2-2 também se observou uma elevação de potência não ativa próxima ao das cargas C1-1. Nesse contexto, com aumento da ondulação de tensão ao longo da NDCC, tem-se um aumento de potência não ativa demandada por outras cargas em operação, como exemplo para o BC1, quando se observa das 6h00 às 10h00.

Tabela 4.7 - Registro de potência aparente, ativa e não ativa no ponto de conexão de carga do ensaio II.

Horário	Registro de Potência no Ponto de Conexão de Carga					
	BC3			BC1 e BC2*		
	VA	W	Var	VA	W	Var
7:00	29,5	15,5	25,1	67,3	67,2	3,2
8:00	174,1	136,7	107,8	67,5	67,3	4,6
10:00	308,0	250,0	179,9	68,4	67,9	7,8
12:00	419,6	359,4	216,5	65,9	65,2	9,6
14:00	308,0	250,0	179,9	65,9; 269,3*	65,2; 269,3*	9,6; 3,7*
16:00	291,1	236,3	170,0	66,9	66,4	7,5

Na Tabela 4.8 constam os valores de potência ativa registradas na saída de cada SGA. Observou-se um valor de potência fornecida maior que a medida no ponto de conexão das cargas em alguns horários, como exemplo às 12h00, com aproximadamente 38 W a mais que a soma registrada no ponto de conexão das cargas.

Tabela 4.8 - Registro de potência ativa fornecida pelo controlador de carga na saída de cada SGA do ensaio II.

Horário	Registro de Potência na Saída do SGA (W)			
	SGA1	SGA2	SGA3	Total
7:00	28,6	28,8	27,0	84,4
8:00	67,0	63,6	64,6	195,2
10:00	102,9	102,4	111,5	316,8
12:00	149,7	142,5	169,9	462,1
14:00	196,1	188,7	210,8	595,6
16:00	113,7	106,4	104,3	324,5

Na Tabela 4.9 constam os valores de duração, magnitude e componente espectral que caracterizam um evento transitório oscilatório, conforme definição da recomendação do IEEE Std1159. Para ambos os acionamentos das cargas com conversores c.c.-c.c., C1-1 às 12h00 e C2-2 às 16h00, o evento registrado pôde ser caracterizado como sendo do tipo de baixa frequência com componente espectral menor que 5 kHz e duração entre 0,3 e 50 ms. Na Tabela 4.9 constam em ambos os horários das 12h00 e 16h00 o evento transitório medido no ponto de conexão do BC1.

Tabela 4.9 - Evento transitório oscilatório referente ao ensaio II.

Horário	Transitório		
	Oscilatório		
	Duração (ms)	Magnitude (p.u.)	Componente Espectral (kHz)
12:00	0,4	0,42 – 1,63	5,00
16:00	2,00	0,48 – 1,57	3,00

Na Tabela 4.10 constam os valores de ondulação de tensão ao longo do dia, o qual mostra maiores magnitudes de tensão pico a pico para o ponto de conexão do BC3 no horário de maior carregamento, 12h00. Destacam-se os valores de tensão pico a pico também nos pontos de conexão do BC1 e BC2, onde o aumento da magnitude foi correspondente ao aumento de magnitude no ponto de conexão BC3, assim como no ensaio anterior.

Os valores máximos registrados foram de 5,0 V_{p-p} no ponto de conexão do BC3 no horário de 12h00, seguidos dos valores de 1,7 V_{p-p} 2,0 V_{p-p} para os pontos BC1 e BC2,

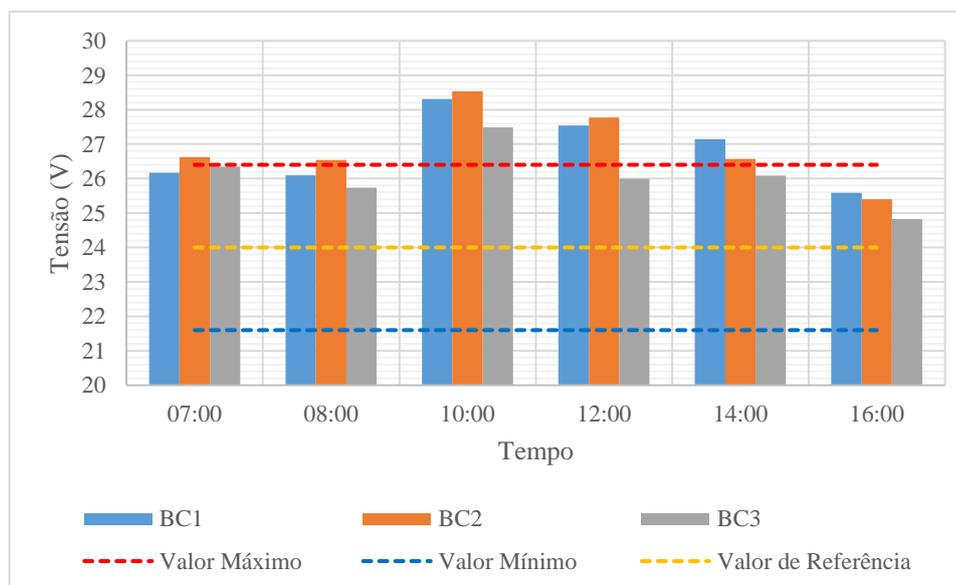
respectivamente. Os valores mínimos registrados durante o início da manhã até às 8h00 foram $1,1 V_{p-p}$, $1,5 V_{p-p}$ e $1,8 V_{p-p}$ para os pontos BC1, BC2 e BC3, respectivamente.

Tabela 4.10 - Ondulação de tensão ao longo do dia na NDCC durante o ensaio II.

Horário	Ondulação de Tensão						Frequência (Hz)
	Tensão RMS (V)			Tensão p-p (V_{p-p})			
	BC1	BC2	BC3	BC1	BC2	BC3	
7:00	25,19	25,61	25,41	1,10	1,50	1,80	119,7
8:00	25,59	25,34	25,25	1,30	1,70	3,10	119,7
10:00	25,68	25,62	24,77	1,50	2,06	4,00	119,7
12:00	25,81	26,01	24,36	1,70	2,00	5,00	119,7
14:00	26,02	25,60	25,15	1,60	1,88	3,70	119,7
16:00	25,09	25,59	24,29	1,63	1,97	3,83	119,7

A Figura 4.45 ilustra os valores de tensão eficaz calculados a partir de medições da forma de onda pelo osciloscópio digital nos pontos de conexão das cargas. De modo geral, não foi registrado evento de sobretensão, estando os valores eficazes de tensão abaixo de 26,4 V (1,1 p.u.), conforme caracterizado pela IEEE Std 1159. Quando se observa os valores registrados nos pontos próximos aos SGAs, ilustrados na Figura 4.26, tem-se o evento de sobretensão no período das 10h20 às 14h30.

Figura 4.45 - Valor de tensão eficaz nos pontos de conexão das cargas do ensaio II.



Para o evento de curta duração, referentes ao afundamento e elevação do valor RMS de tensão, não foi possível caracterizá-los vista baixo impacto da entrada do BC2 na rede. Observou-se no horário das 14h00 durante o acionamento e saída do BC2 diminuições e

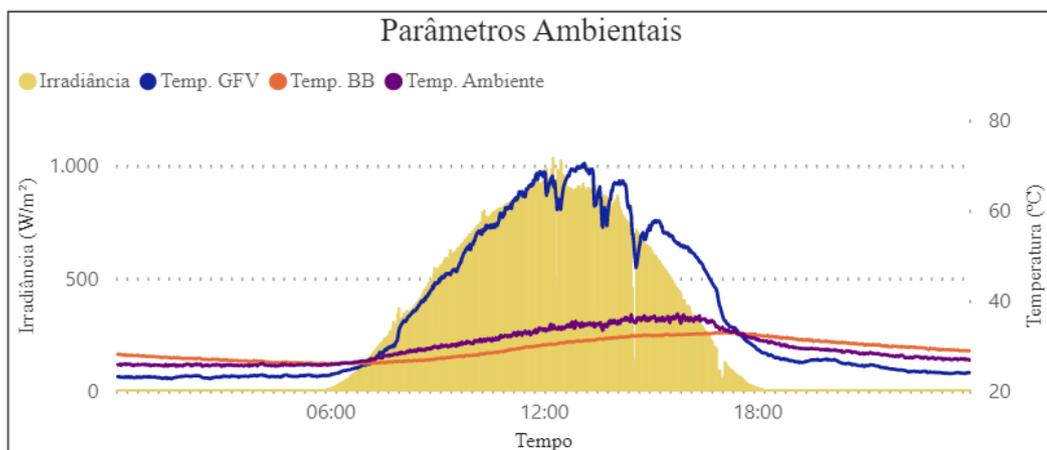
aumentos no nível de tensão inferior ao caracterizado pela IEEE Std 1159, de modo a causar variação de 1,2 V (0,05 p.u.), considerando a tensão nominal de 24 V.

Desse modo, considerando a tensão eficaz nos pontos medidos, inicialmente para o acionamento do BC2 não foi registrado afundamento no nível de tensão, visto que nos pontos de conexão do BC1 e BC3 a tensão esteve com valores de 26,1 V_{rms} e 25,3 V_{rms}, respectivamente. Durante a saída do BC2 também não foi registrado o evento de elevação, visto que os pontos de conexão do BC1 e BC3 estiveram nesse instante, com 25,3 V_{rms} e 24,4 V_{rms}, respectivamente.

4.1.3. Ensaio III

O terceiro ensaio teve como objetivo analisar eventos de QEE na NDCC durante a operação das cargas C1-1 e C2-3 do BC1, BC2 e BC3. O ensaio foi realizado no dia 07/12/2022, onde os parâmetros ambientais registrados estão ilustrados na Figura 4.46, verificando-se no horário das 13h05 a temperatura máxima de 70 °C na parte posterior do módulo fotovoltaico, temperatura ambiente e temperatura do banco de baterias máximas de 37,2 °C às 15h46 e 33,2 °C às 17h19, respectivamente. O valor máximo de irradiância global registrado foi de 1.037 W/m², com pico no horário das 12h16. Para o referido dia de ensaio houve 6,1 HSP no plano do gerador fotovoltaico.

Figura 4.46 - Parâmetros ambientais do ensaio III.

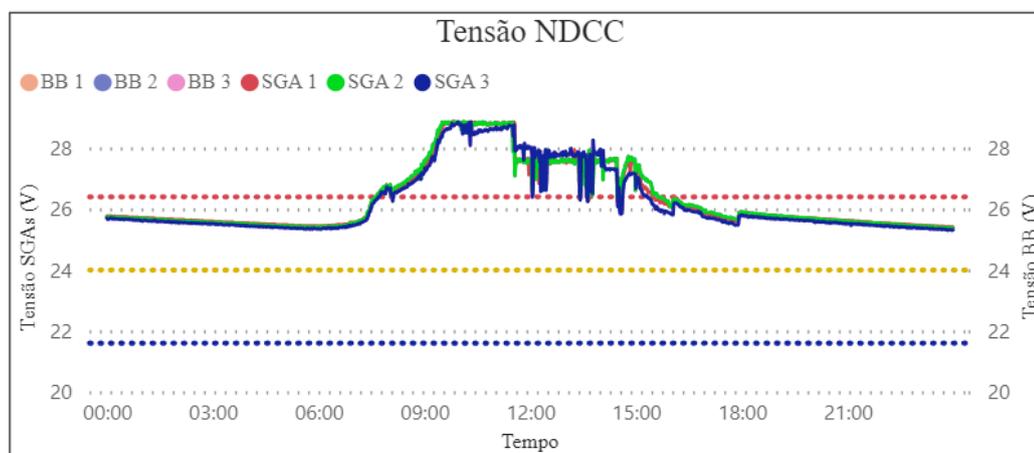


Fonte: Captura de tela da ferramenta desenvolvida em Power BI.

Na Figura 4.47 apresenta-se a variação do nível de tensão na saída dos SGAs registrados por seus respectivos controladores de carga, verificando-se que os valores estiveram acima de

1,1 p.u. das 7h30 às 15h36 alcançando valor máximo de 28,82 V para os SGAs no horário das 10h19. O valor mínimo de 25,3 V foi registrado para os três SGAs no horário das 6h51. É possível observar os diferentes estágios de carregamento dos BBs, com operação do MPPT das 8h00 às 9h33, entrada no estágio de absorção das 9h33 às 11h33 e posterior estágio de flutuação para os BB 1 e 2 até horário das 14h27. Para este dia teve-se um valor percentual dos registros referente ao tempo em sobretensão de 33,7 %.

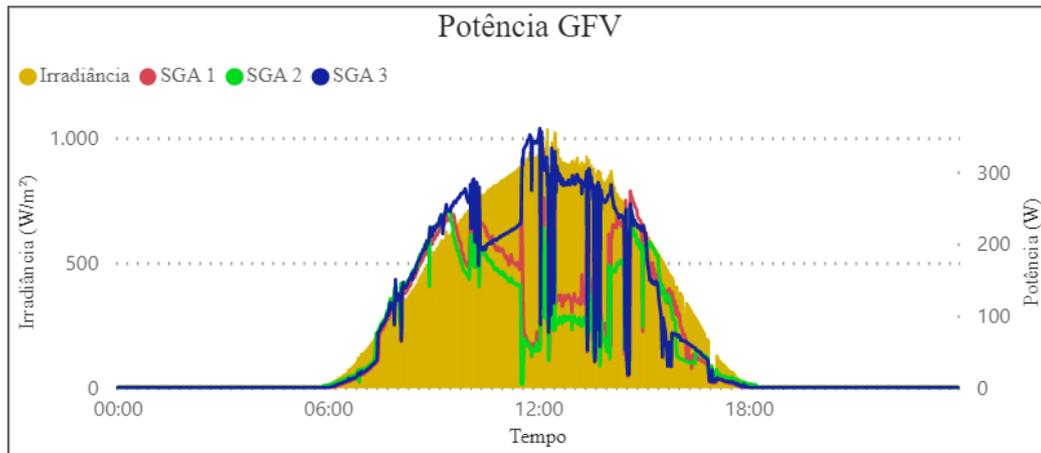
Figura 4.47 - Tensão da NDCC próxima à saída de cada SGA com a indicação (linha tracejada) dos valores de tensão em 21,6 V (0,9 p.u.), 24 V (1 p.u.) e 26,4 V (1,1 p.u.) do ensaio III.



Fonte: Captura de tela da ferramenta desenvolvida em Power BI.

A Figura 4.48 ilustra o perfil de geração dos GFVs em conjunto com o perfil de irradiância global. O perfil de geração do SGA 3 teve início de limitação da geração por alcançar o modo de carregamento absorção do banco de baterias das 9h56 às 10h19 e posterior operação normal com melhor aproveitamento do recurso disponível. Para os SGAs 1 e 2, houve limitação da geração também por alcançar o modo de carregamento absorção do banco de baterias das 9h30 às 11h30. Esta mudança de estágios de carregamento ocorre quando o nível de tensão dos bancos de baterias alcança 28,8 V, passando do modo MPPT para o estágio de absorção.

Figura 4.48 - Irradiância global e potência fornecida por cada GFV no ensaio III.

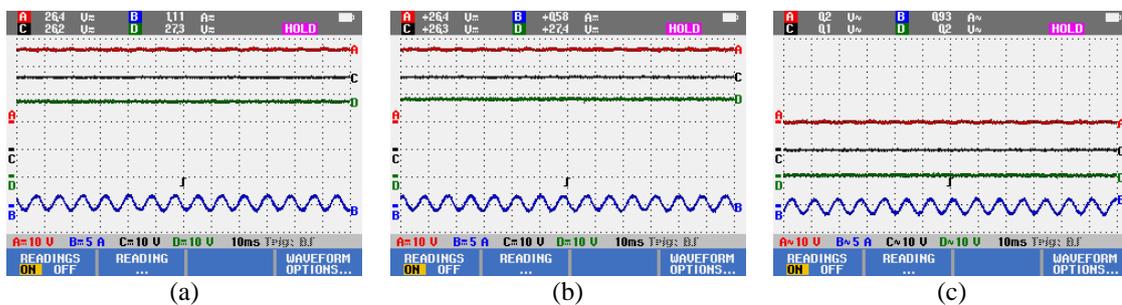


Fonte: Captura de tela da ferramenta desenvolvida em Power BI.

Para o terceiro ensaio, assim como nos anteriores, a Figura 4.49 ilustra o registro de ondulação na tensão nos pontos de conexão de carga na NDCC apresentando magnitudes distintas de $1,2 V_{p-p}$, $1,5 V_{p-p}$, $1,7 V_{p-p}$ nos pontos de conexão do BC1, BC2 e BC3, respectivamente. A corrente de entrada, lado c.c., do BC3 obteve um valor de $2,8 A_{p-p}$ e $1,1 A_{rms}$, registrando-se a tensão de $26,3 V_{rms}$ e uma demanda de $15,3 W$.

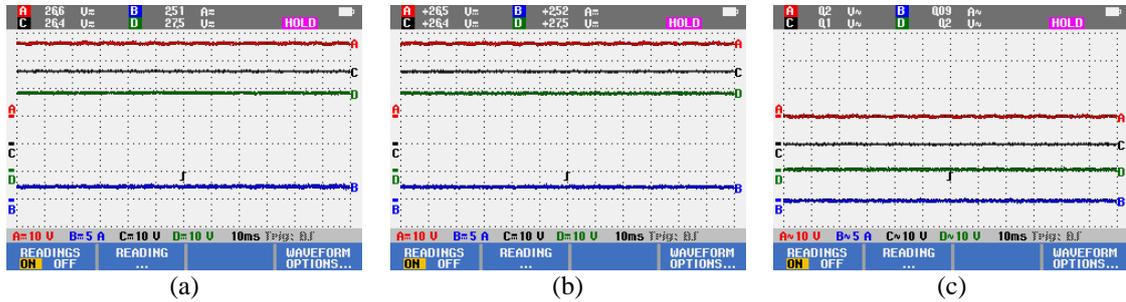
O BC1 com acionamento das cargas C1-1 operou normalmente durante todo o período da madrugada até o início da manhã sem nenhuma falha, com valor de tensão de $26,4 V_{rms}$, corrente de $2,5 A_{rms}$ e potência ativa de $67,0 W$, como ilustrado na Figura 4.50. Para esta medição foram aferidas componentes espectrais em 120 Hz para a corrente e tensão do BC3, conforme apresentado na Figura 4.51.

Figura 4.49 - Formas de onda de tensão nos pontos de conexão das cargas e corrente no BC3, com a indicação do valor RMS na parte superior considerando a presença: (a) das componentes c.a. e c.c., (b) somente da componente c.c. e (c) somente da componente c.a.



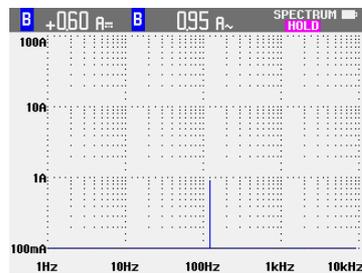
Fonte: Captura de tela do osciloscópio digital.

Figura 4.50 - Formas de onda de tensão nos pontos de conexão das cargas e corrente no BC1, com a indicação do valor RMS na parte superior considerando a presença: (a) das componentes c.a. e c.c., (b) somente da componente c.c. e (c) somente da componente c.a.



Fonte: Captura de tela do osciloscópio digital.

Figura 4.51 - Espectro de amplitude da corrente para o BC3.

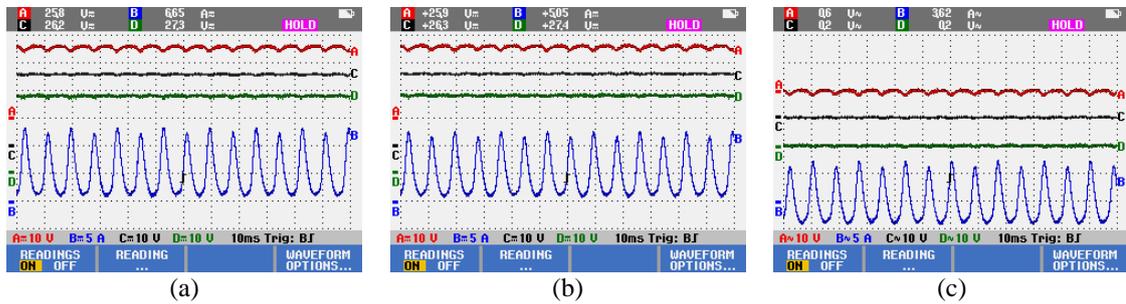


Fonte: Captura de tela do osciloscópio digital.

Semelhante aos ensaios anteriores, a partir das 8h00 procedeu-se com o aumento do carregamento do BC3, registrando-se uma potência ativa de 137,7 W, tensão de 25,7 V_{rms} e corrente de 6,7 A_{rms} ilustrados na Figura 4.52.

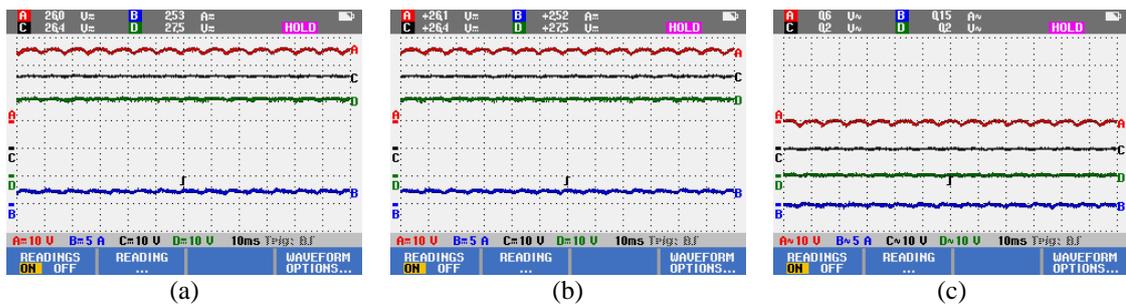
Verifica-se uma ondulação de corrente de 12,4 A_{p-p} no BC3 e ondulação de tensão nos pontos de conexão do BC1, BC2 e BC3 de 1,4 V_{p-p}, 1,7 V_{p-p}, 2,8 V_{p-p}, respectivamente. Do mesmo modo, observou-se uma mudança na operação do BC1 com a influência da ondulação de tensão, onde a corrente requisitada passou a possuir um valor de 1,1 A_{p-p}. A tensão e corrente registradas no BC1 foram de 26,3 V_{rms} e 2,5 A_{rms}, respectivamente, como mostrado na Figura 4.53. Para esta medição foram aferidas componentes espectrais em 60 Hz, 240 Hz e 360 Hz para a corrente e 240 Hz para tensão, além de 120 Hz para ambas, conforme apresentado na Figura 4.54.

Figura 4.52 - Formas de onda de tensão nos pontos de conexão das cargas e corrente no BC3, com a indicação do valor RMS na parte superior considerando a presença: (a) das componentes c.a. e c.c., (b) somente da componente c.c. e (c) somente da componente c.a.



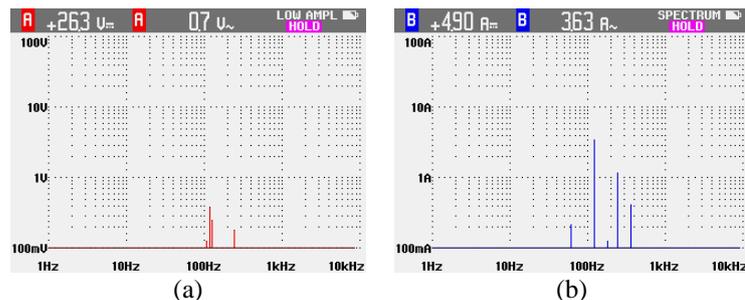
Fonte: Captura de tela do osciloscópio digital.

Figura 4.53 - Formas de onda de tensão nos pontos de conexão das cargas e corrente no BC1, com a indicação do valor RMS na parte superior considerando a presença: (a) das componentes c.a. e c.c., (b) somente da componente c.c. e (c) somente da componente c.a.



Fonte: Captura de tela do osciloscópio digital.

Figura 4.54 - Espectro de amplitude da tensão e corrente para o BC3.

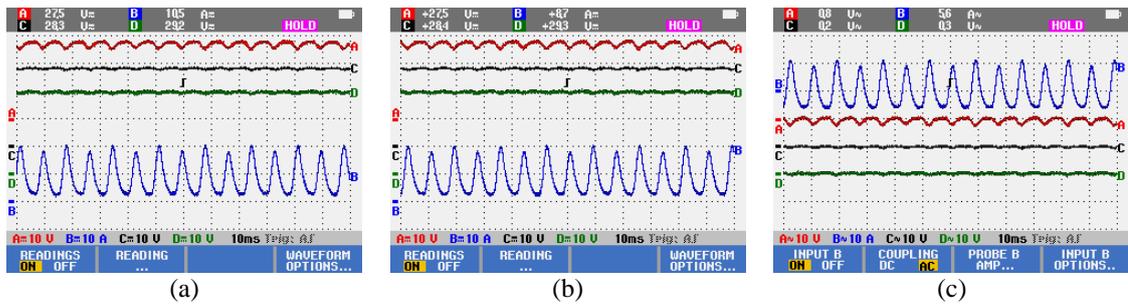


Fonte: Captura de tela do osciloscópio digital.

No horário das 10h00 manteve-se a operação do BC1 e aumentou-se o carregamento para o BC3. Registrou-se no BC3 uma potência de 242,1 W, tensão de 27,4 V_{rms} e corrente de 10,6 A_{rms} ilustrados na Figura 4.55. A ondulação na corrente do BC3 aumentou, registrando-se o valor de 18,4 A_{p-p}. Da mesma forma houve aumento da ondulação de tensão nos pontos de conexão do BC1, BC2 e BC3, registrando-se os valores de 1,6 V_{p-p}, 1,9 V_{p-p}, 3,5 V_{p-p}. Para o BC1, também registrou-se um aumento na ondulação de corrente para 1,9 A_{p-p}, medindo-se a

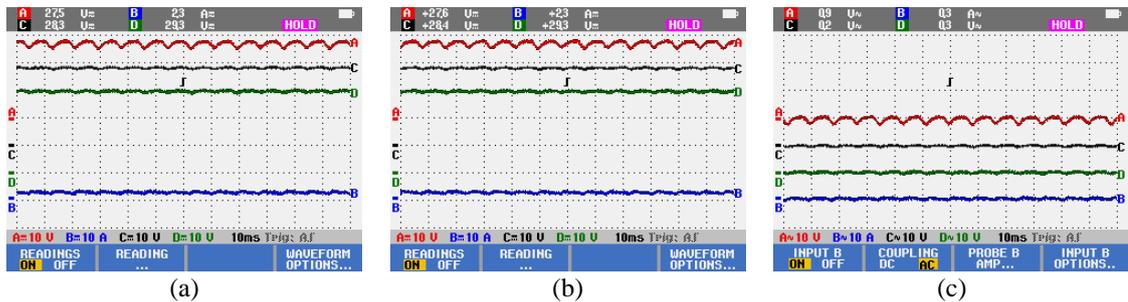
tensão de 28,3 V_{rms} e corrente 2,3 A_{rms}, conforme registros apresentados na Figura 4.56 utilizando o osciloscópio digital.

Figura 4.55 - Formas de onda de tensão nos pontos de conexão das cargas e corrente no BC3, com a indicação do valor RMS na parte superior considerando a presença: (a) das componentes c.a. e c.c., (b) somente da componente c.c. e (c) somente da componente c.a.



Fonte: Captura de tela do osciloscópio digital.

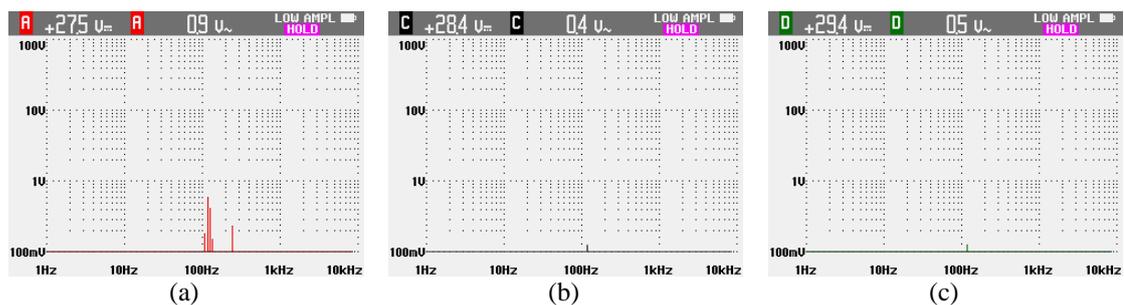
Figura 4.56 - Formas de onda de tensão nos pontos de conexão das cargas e corrente no BC1, com a indicação do valor RMS na parte superior considerando a presença: (a) das componentes c.a. e c.c., (b) somente da componente c.c. e (c) somente da componente c.a.

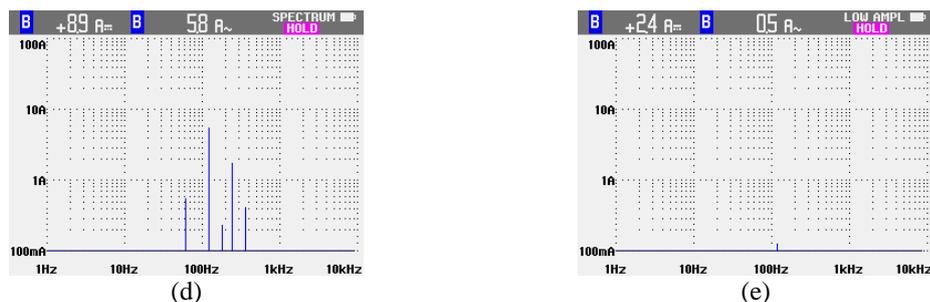


Fonte: Captura de tela do osciloscópio digital.

Para esta medição foram aferidas componentes espectrais em 60 Hz e 240 Hz para a corrente, 240 Hz para tensão do BC3 e 120 Hz para corrente do BC1, conforme mostrado na Figura 4.57.

Figura 4.57 - Espectro de amplitude da tensão para o BC3 (a), BC1 (b), BC2 (c) e para corrente no BC3 (d) e BC1 (e).

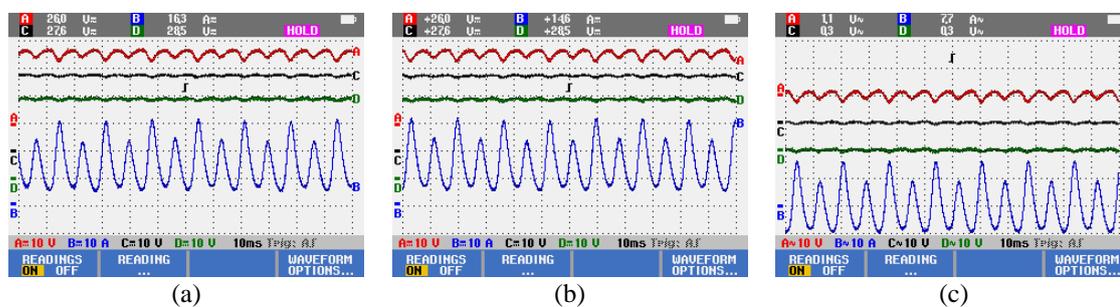




Fonte: Captura de tela do osciloscópio digital.

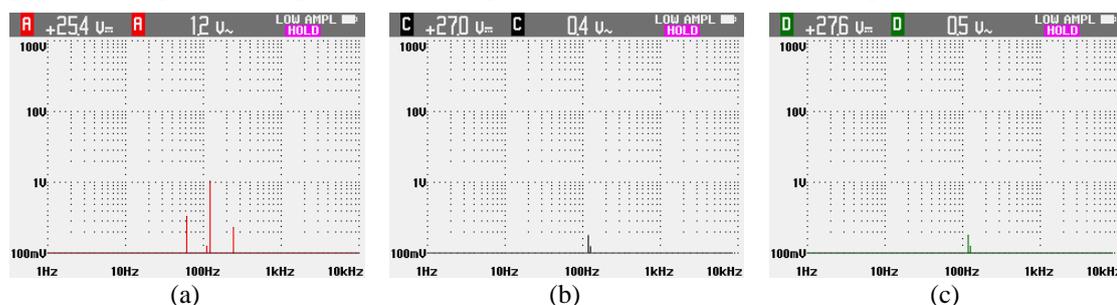
A partir das 12h00 houve a saída das cargas C1-1 do BC1 e posterior acionamento das cargas C2-3 do BC1, além do aumento no carregamento do inversor (referente ao BC3). No BC3 foi registrado um valor de tensão e corrente de $27,4 V_{rms}$ e $10,6 A_{rms}$, respectivamente, com $26,4 A_{p-p}$ e ondulação de tensão nos pontos de conexão do BC1, BC2 e BC3 de $1,7 V_{p-p}$, $1,9 V_{p-p}$, $4,8 V_{p-p}$, respectivamente, ilustrados na Figura 4.58. Também foram verificados componentes espectrais com amplitudes maiores para a tensão e corrente do BC3, como também para a tensão nos demais pontos de conexões do BC1 e BC2, conforme ilustrado na Figura 4.59.

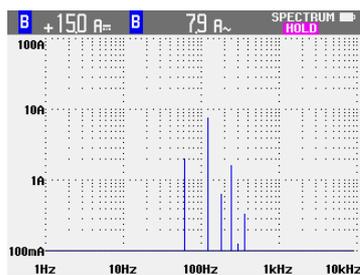
Figura 4.58 - Formas de onda de tensão nos pontos de conexão das cargas e corrente no BC3, com a indicação do valor RMS na parte superior considerando a presença: (a) das componentes c.a. e c.c., (b) somente da componente c.c. e (c) somente da componente c.a.



Fonte: Captura de tela do osciloscópio digital.

Figura 4.59 - Espectro de amplitude da tensão para o BC3 (a), BC1 (b), BC2 (c) e para corrente no BC3 (d).





(d)

Fonte: Captura de tela do osciloscópio digital.

No instante logo após o acionamento da carga C2-3 do BC1, constatou-se a queima de todas as lâmpadas acionadas. Para todas as lâmpadas que compõem as cargas C2-3 verificou-se a desconexão do CI da ponte retificadora (descrito no Capítulo 2) da base de suporte de alumínio, ocasionando a avaria da lâmpada, conforme ilustrado na Figura 4.60. Observou-se que os LEDs que compõem a lâmpada não sofreram danos de queima. Da mesma forma que ocorrido na carga C2-1, teve-se a queima da carga C2-3 devido ao aumento do nível de tensão, ocasionando a elevação do nível de corrente e o sobreaquecimento da lâmpada, visto que a mesma é composta apenas por LEDs, resistores e ponte retificadora.

Figura 4.60 - Carga C2-3 do BC1 após avaria.



Fonte: Autoria própria.

Semelhante aos ensaios anteriores, I e II, no horário das 14h00 durante o acionamento do BC2 houve uma diminuição de 0,6 V e 0,5 V no valor eficaz da tensão para o BC1 e BC3, respectivamente, e posterior aumento de 0,5 V e 0,4 V para o BC1 e BC3, respectivamente, após a saída do BC2. Para o BC2 foi registrado um valor de tensão e corrente de 26,5 V_{rms} e 11,1 A_{rms}, respectivamente, como apresentado no Apêndice D.

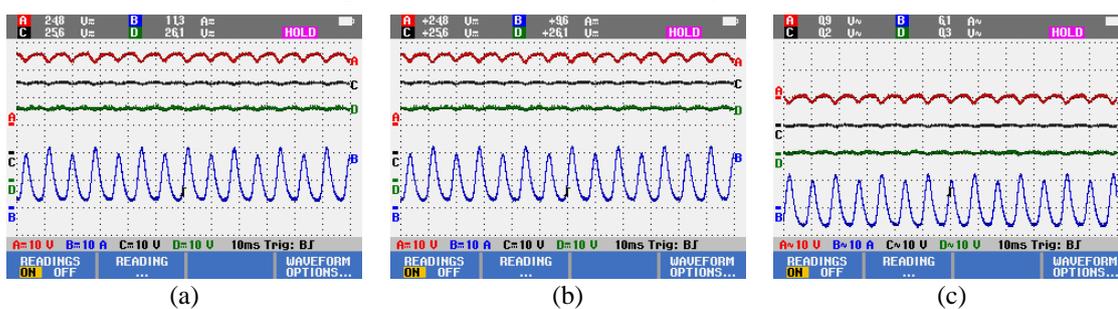
Com o acionamento novamente das cargas C1-1 do BC1 no horário de 16h00, tem-se o evento transitório oscilatório, assim como ocorrido para os ensaios I e II. O evento ocorreu com duração aproximada de 2 milissegundos, registrando-se as magnitudes de afundamento de

tensão de 17,7 V e 23,1 V no ponto de conexão do BC1 e BC2, respectivamente, conforme consta no Apêndice D.

Por fim, obteve-se para o BC3 um valor de tensão e corrente de 24,8 V_{rms} e 11,2 A_{rms}, respectivamente, e para o BC1, 25,7 V_{rms} e 2,6 A_{rms}, respectivamente, no horário de 16h30, conforme apresentado nas Figuras 4.61 e 4.62, respectivamente. Por fim, novamente a partir de 18h00 em diante o BC1 continuou ligado com as cargas C1-1 em conjunto com o BC3 utilizando o inversor em um menor carregamento. Na Figura 4.63 ilustra-se o espectro de amplitude de tensão nos pontos de conexão das cargas e o espectro de amplitude da corrente do BC1 e BC3.

Figura 4.61 - Formas de onda de tensão nos pontos de conexão das cargas e corrente no BC3, com a indicação do valor RMS na parte superior considerando a presença:

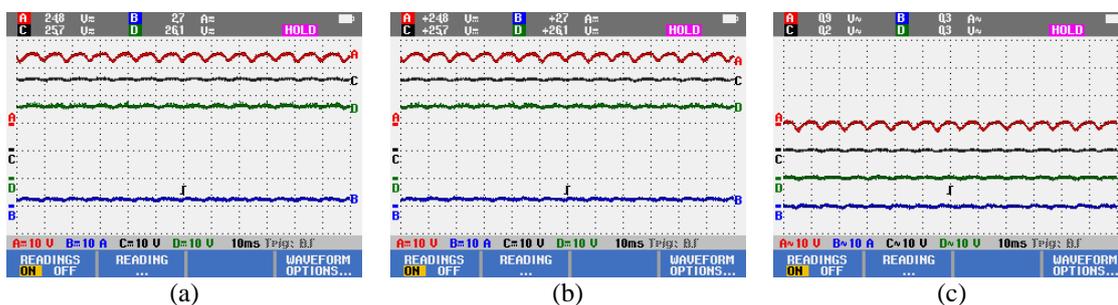
(a) das componentes c.a. e c.c., (b) somente da



Fonte: Captura de tela do osciloscópio digital.

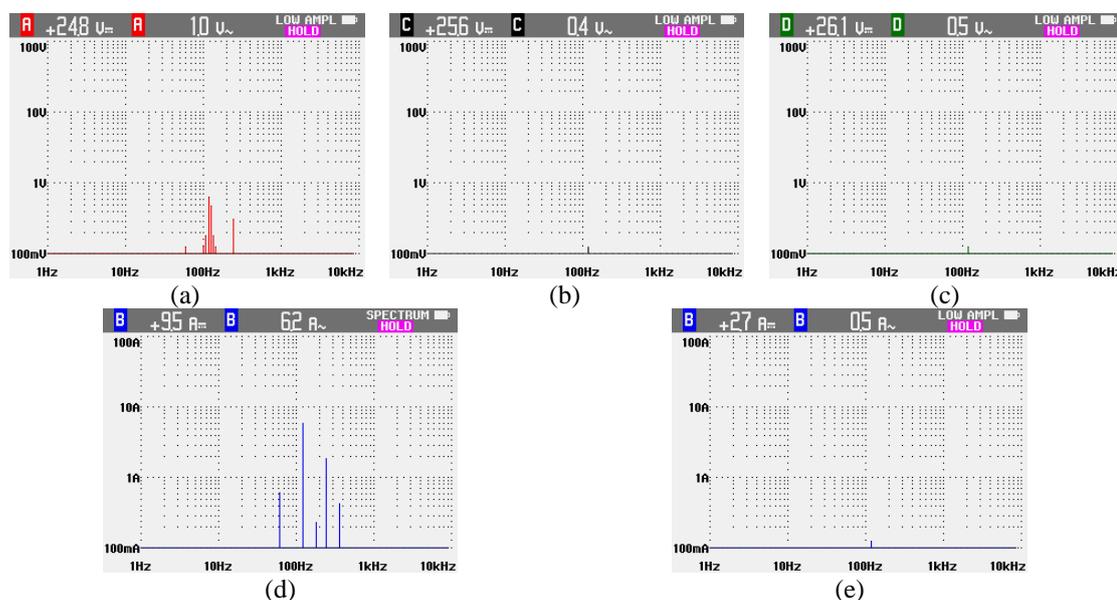
Figura 4.62 - Formas de onda de tensão nos pontos de conexão das cargas e corrente no BC1, com a indicação do valor RMS na parte superior considerando a presença:

(a) das componentes c.a. e c.c., (b) somente da



Fonte: Captura de tela do osciloscópio digital.

Figura 4.63 - Espectro de amplitude da tensão para o BC3 (a), BC1 (b), BC2 (c) e para corrente no BC3 (d) e BC1 (e).



Fonte: Captura de tela do osciloscópio digital.

Na Tabela 4.11 constam os valores de potência aparente, ativa e não ativa calculadas a partir das formas de onda registradas pelo osciloscópio no ponto de conexão das cargas BC1, BC2 e BC3, em regime. De modo geral, assim como nos ensaios I e II, observou-se o aumento de potência não ativa tanto no ponto de conexão do BC3 quanto nos demais quando houve maior demanda do BC3, isto é, com o aumento do carregamento do inversor. Neste contexto, com o aumento da ondulação na tensão ao longo da NDCC, tem-se um aumento de potência não ativa de outras cargas em operação, como exemplo para o BC1, quando se observa das 6h00 às 10h00.

Tabela 4.11 - Registro de potência aparente, ativa e não ativa no ponto de conexão de carga do ensaio III.

Horário	Registro de Potência no Ponto de Conexão de Carga					
	BC3			BC1 e BC2*		
	VA	W	Var	VA	W	Var
7:00	29,00	15,30	24,60	67,10	67,00	3,70
8:00	164,00	129,80	100,30	66,50	66,30	4,80
10:00	293,70	242,10	166,30	66,30	65,80	8,50
12:00	419,10	361,70	211,60	-	-	-
14:00	280,50	230,30	165,20	295,40*	295,40*	4,00*
16:00	279,50	228,30	161,20	68,90	68,40	7,70

Na Tabela 4.12 constam os valores de potência ativa registradas na saída de cada SGA. Observou-se um valor de potência fornecida maior que medida no ponto de conexão das cargas,

como exemplo às 12h00, com aproximadamente 36 W a mais que a soma registrada no ponto de conexão das cargas.

Tabela 4.12 - Registro de potência ativa fornecida pelo controlador de carga na saída de cada SGA do ensaio III.

Horário	Registro de Potência na Saída do SGA (W)			
	SGA1	SGA2	SGA3	Total
7:00	28,10	28,10	30,00	86,20
8:00	63,00	66,40	70,80	200,20
10:00	137,40	102,30	83,50	323,20
12:00	91,31	54,21	251,57	397,09
14:00	205,70	142,70	206,90	555,30
16:00	100,70	96,20	126,20	323,10

Na Tabela 4.13 constam os valores de duração, magnitude e componente espectral que caracterizam um evento transitório oscilatório, conforme definição da recomendação do IEEE Std1159. O evento registrado é do tipo de baixa frequência, com componente espectral menor que 5 kHz e duração entre 0,3 e 50 ms. Este evento é resultado do acionamento das cargas C1-1 do BC1 no horário das 16h00.

Tabela 4.13 - Evento transitório oscilatório referente do ensaio III.

Horário	Transitório		
	Oscilatório		
	Duração (ms)	Magnitude (p.u.)	Componente Espectral (kHz)
16:00	2,00	0,48 – 1,57	3,00

Na Tabela 4.14 constam os valores de ondulação de tensão ao longo do dia, o qual mostra maiores magnitudes de tensão pico a pico para o ponto de conexão do BC3 no horário de maior carregamento, 12h00. Concatenado a isto, destacam-se os valores de tensão pico a pico também para os pontos de conexão do BC1 e BC2, onde o aumento da magnitude foi correspondente ao aumento da magnitude no ponto de conexão BC3.

Os valores máximos registrados foram de $4,8 V_{p-p}$ para o ponto BC3 no horário das 12h00, seguidos dos valores de $1,7 V_{p-p}$ e $1,9 V_{p-p}$ para os pontos BC1 e BC2, respectivamente. Os valores mínimos registrados foram durante o início da manhã até às 8h00 com $1,2 V_{p-p}$, $1,5 V_{p-p}$ e $1,7 V_{p-p}$ para os pontos BC1, BC2 e BC3, respectivamente.

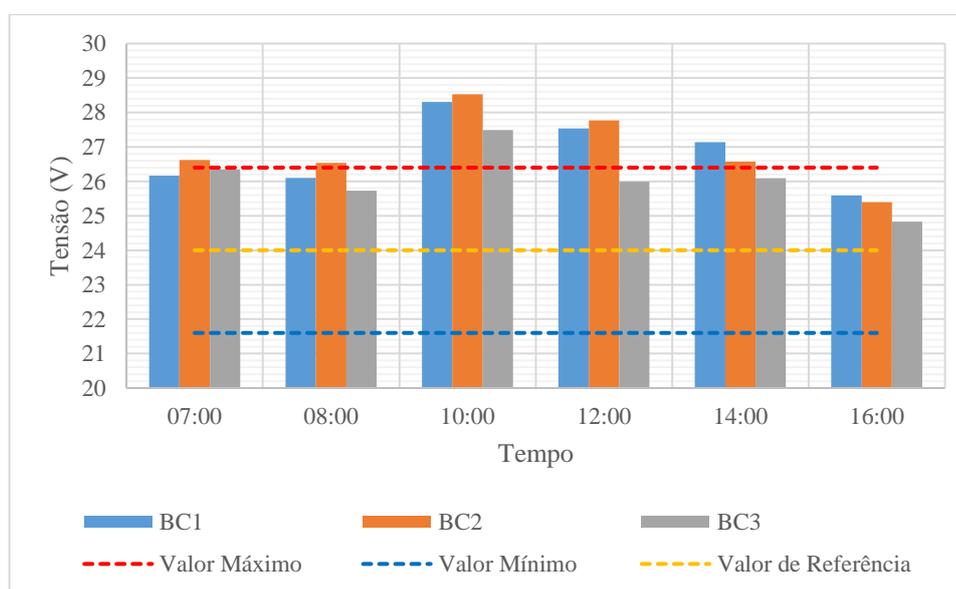
Tabela 4.14 - Ondulação de tensão ao longo do dia na NDCC durante o ensaio III.

Horário	Ondulação de Tensão						Frequência (Hz)
	Tensão RMS (V)			Tensão p-p (V_{p-p})			
	BC1	BC2	BC3	BC1	BC2	BC3	
7:00	26,17	26,62	26,35	1,21	1,50	1,70	119,7
8:00	26,10	26,54	25,73	1,40	1,71	2,88	119,7
10:00	28,31	28,53	27,49	1,64	1,97	3,56	119,7
12:00	27,54	27,77	25,99	1,74	1,98	4,82	119,7
14:00	27,14	26,57	26,09	1,53	1,84	3,74	119,7
16:00	25,59	25,40	24,83	1,67	1,91	3,91	119,7

A Figura 4.64 ilustra os valores de tensão eficaz medidos por meio do osciloscópio digital nos pontos de conexão das cargas. No ensaio III, registrou-se o evento de sobretensão às 8h00 para o BC 2, às 10h00 para os pontos de conexão dos três BCs, às 12h00 e às 14h00 apenas para o BC 1 e 2.

Quando observado nos pontos próximos aos SGAs, com a variação do nível de tensão ilustrada na Figura 4.47, verifica-se o evento de sobretensão no período das 7h36 às 15h31.

Figura 4.64 - Valor de tensão eficaz nos pontos de conexão das cargas do ensaio III.



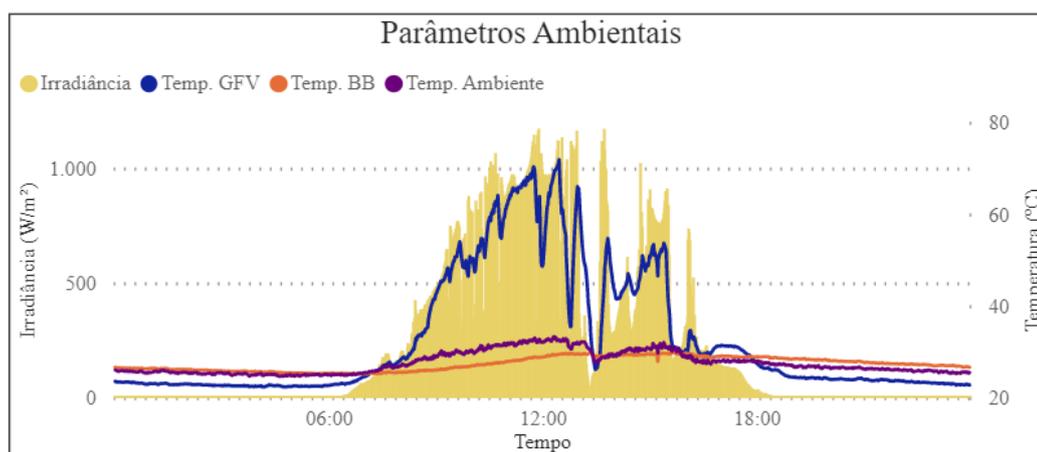
Para o evento de curta duração, referentes ao afundamento e elevação do valor RMS de tensão, não foi possível caracterizá-los vista baixo impacto da entrada do BC2 nada rede. Observou-se no horário das 14h00 durante o acionamento e saída do BC2 diminuições e aumentos no nível de tensão, inferiores ao caracterizado pela IEEE Std 1159, causando impactos de valor 0,6 V (0,025 p.u.), considerando a tensão nominal de 24 V.

Desse modo, considerando a tensão eficaz nos pontos medidos, inicialmente para o acionamento do BC2 não foi registrado afundamento no nível de tensão, visto que os pontos BC1 e BC2 estiveram com 27,1 V_{rms} e 26,0 V_{rms}, respectivamente. Durante a saída do BC2 também não foi registrado evento de elevação, visto que os mesmos estiveram nesse instante, com 26,0 V_{rms} e 25,0 V_{rms} para os pontos de conexão do BC1 e BC3, respectivamente.

4.1.4. Ensaio IV

O quarto ensaio teve como objetivo analisar eventos de QEE na NDCC durante a operação das cargas C1-2 e C2-2 do BC1 em conjunto com as demais cargas do BC2 e BC3. Este ensaio foi realizado no dia 06/02/2023, onde os parâmetros ambientais registrados estão ilustrados na Figura 4.65, verificando-se no horário das 12h27 a temperatura máxima de 70 °C na parte posterior do módulo, temperatura ambiente e temperatura do banco de baterias máximas de 33,2 °C e 29,5 °C, no horário das 12h16 e das 13h23, respectivamente. O valor máximo de irradiância global registrado foi de 1.172 W/m² às 11h52. Para o referido dia de ensaio houve 5,3 HSP no plano do gerador fotovoltaico. Destaca-se que, para este dia de ensaio, no período das 13h00 às 13h36 houve a ocorrência de chuva e o tempo permaneceu nublado por maior parte do horário da tarde.

Figura 4.65 - Parâmetros ambientais do ensaio IV.

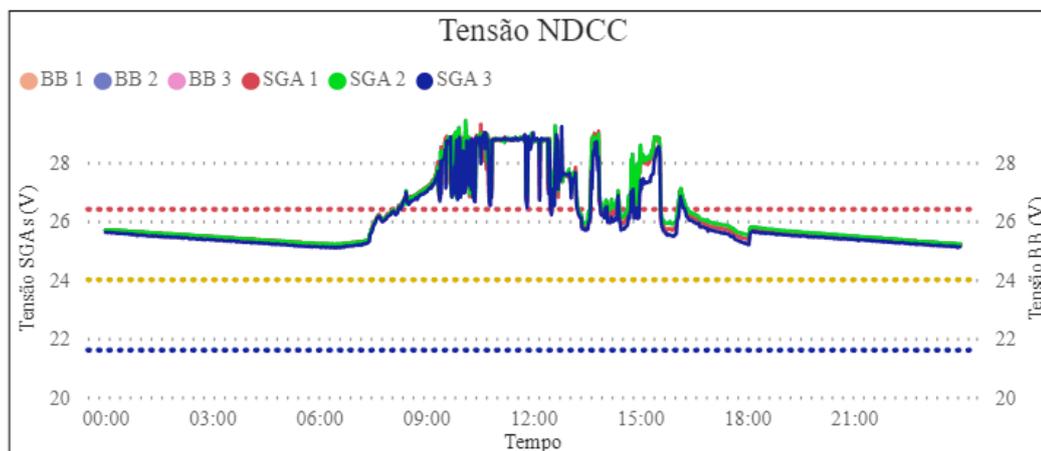


Fonte: Captura de tela da ferramenta desenvolvida em Power BI.

Na Figura 4.66 apresenta-se a variação do nível de tensão da NDCC no ponto de saída dos controladores de carga, nesse caso, próximo aos SGAs. Os valores de tensão registrados estiveram acima de 1,1 p.u. das 8h13 às 13h15, 13h36 às 13h54, 14h40 às 15h34 e 16h04 às

16h16, alcançando o valor máximo de 28,8 V para os SGAs 1, 2 e 3 no horário 10h06. O valor mínimo de 25,2 V foi registrado para os três SGAs no horário das 6h30. É possível observar os diferentes estágios de carregamento dos BBs. Para este dia teve-se um valor percentual dos registros referente ao tempo em sobretensão de 26,8 %.

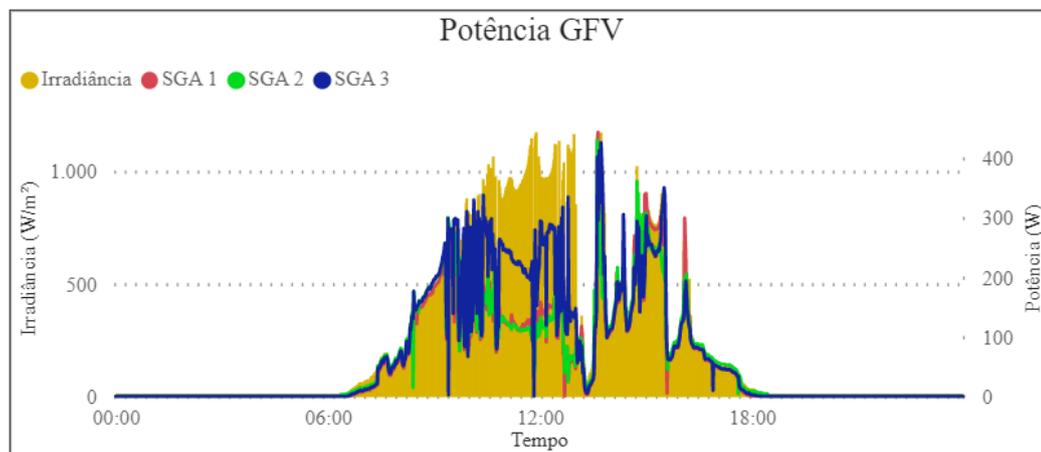
Figura 4.66 - Tensão da NDCC próxima à saída de cada SGA com a indicação (linha tracejada) dos valores de tensão em 21,6 V (0,9 p.u.), 24 V (1 p.u.) e 26,4 V (1,1 p.u.) do ensaio IV.



Fonte: Captura de tela da ferramenta desenvolvida em Power BI.

Na Figura 4.67 apresenta-se o perfil de geração dos GFVs em conjunto com o perfil de irradiância global. O SGA 3 teve início de limitação da geração por nível de tensão alto do banco de baterias às 10h24, possuindo um aumento na geração às 12h00 e posterior operação com melhor aproveitamento do recurso disponível. Para os SGAs 1 e 2 houve limitação da geração por nível de tensão alto do banco de baterias das 9h30 às 13h08.

Figura 4.67 - Potência fornecida de cada GFV do ensaio IV.



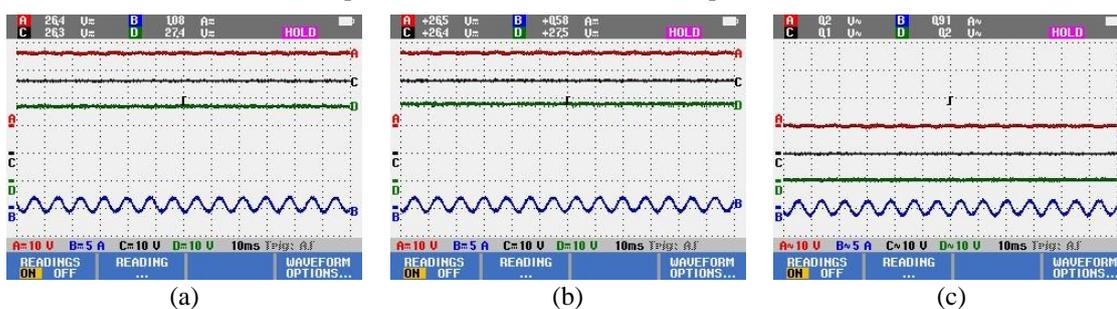
Fonte: Captura de tela da ferramenta desenvolvida em Power BI.

Na Figura 4.69 apresenta-se a parte do ensaio realizada com a operação das cargas C1-2 do BC1 (seis painéis de LED utilizando um conversor c.c.-c.c. centralizado) e do BC3 com o inversor suprindo apenas o *datalogger*. O funcionamento destas cargas ocorreu desde a madrugada até o início da manhã.

Constatou-se uma forma de onda com a presença de ondulação na corrente e na tensão nos pontos de conexão de carga da NDCC, apresentando magnitudes distintas de $1,2 V_{p-p}$, $1,5 V_{p-p}$, $1,6 V_{p-p}$ nos pontos de conexão do BC1, BC2 e BC3, respectivamente. A corrente de entrada, lado c.c., do BC3 apresentou um valor de $2,8 A_{p-p}$, com valor de corrente para suprimento do inversor a vazio de $1,07 A_{rms}$ e tensão de $26,4 V_{rms}$, resultando em uma demanda de $14,6 W$. Na Figura 4.68 apresentam-se as formas de onda de tensão nos pontos de conexão das cargas e corrente no BC3.

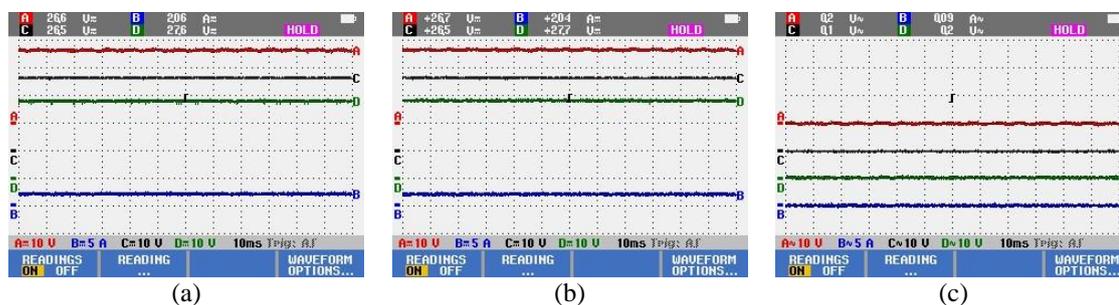
O BC1 com acionamento das cargas C1-2 operou normalmente durante todo o período da madrugada até o início da manhã sem nenhuma falha, com valor de tensão de $26,51 V_{rms}$, corrente de $2,0 A_{rms}$ e potência ativa de $55,0 W$. Assim como nos ensaios anteriores, a Figura 4.70 ilustra a componente espectral em $120 Hz$ na corrente do BC3.

Figura 4.68 - Formas de onda de tensão nos pontos de conexão das cargas e corrente no BC3, com a indicação do valor RMS na parte superior considerando a presença: (a) das componentes c.a. e c.c., (b) somente da componente c.c. e (c) somente da componente c.a.



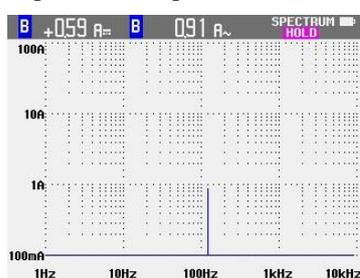
Fonte: Captura de tela do osciloscópio digital.

Figura 4.69 - Formas de onda de tensão nos pontos de conexão das cargas e corrente no BC1, com a indicação do valor RMS na parte superior considerando a presença: (a) das componentes c.a. e c.c., (b) somente da componente c.c. e (c) somente da componente c.a.



Fonte: Captura de tela do osciloscópio digital.

Figura 4.70 - Espectro de amplitude de corrente para o BC3.

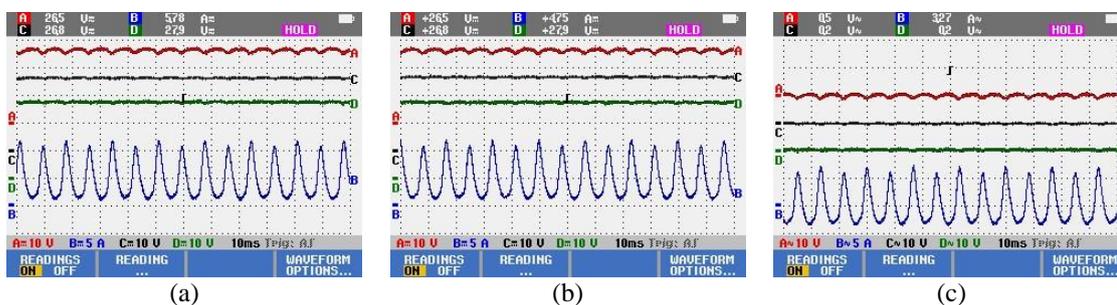


Fonte: Captura de tela do osciloscópio digital.

A partir das 8h00 teve-se o aumento do carregamento do BC3. Registrando-se para o BC3 uma potência de 125,9 W, tensão de 26,4 V_{rms} e corrente de 5,9 A_{rms}, como ilustrado na Figura 4.71. Houve o aumento da ondulação de corrente para 10,7 A_{p-p} e identificou-se a presença de ondulação de tensão nos pontos de conexão do BC1, BC2 e BC3, com valores de 1,3 V_{p-p}, 1,7 V_{p-p}, 2,6 V_{p-p}, respectivamente. Do mesmo modo, observou-se uma mudança na operação do BC1 com a influência da ondulação de tensão, onde a corrente requisitada passou a possuir uma ondulação de 0,9 A_{p-p}. A tensão e corrente registradas no BC1 foram de 26,9 V_{rms} e 2,0 A_{rms}, respectivamente, conforme mostrado na Figura 4.72.

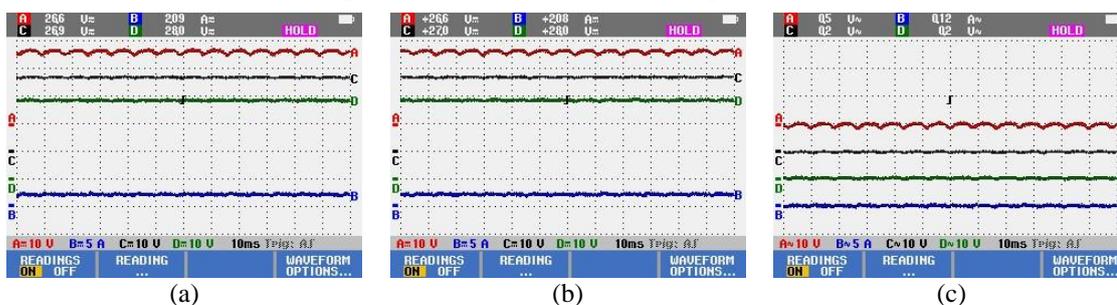
Da mesma forma que nos ensaios anteriores, o espectro de amplitude para a corrente e tensão no BC3 apresentaram componentes espectrais em 120 Hz e 240 Hz, além de componentes em 60 Hz e 360 Hz para a corrente, como ilustrado na Figura 4.73.

Figura 4.71 - Formas de onda de tensão nos pontos de conexão das cargas e corrente no BC3, com a indicação do valor RMS na parte superior considerando a presença: (a) das componentes c.a. e c.c., (b) somente da componente c.c. e (c) somente da componente c.a.



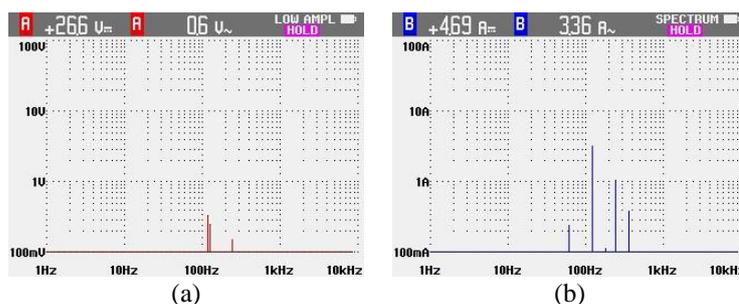
Fonte: Captura de tela do osciloscópio digital.

Figura 4.72 - Formas de onda de tensão nos pontos de conexão das cargas e corrente no BC1, com a indicação do valor RMS na parte superior considerando a presença: (a) das componentes c.a. e c.c., (b) somente da componente c.c. e (c) somente da componente c.a.



Fonte: Captura de tela do osciloscópio digital.

Figura 4.73 – Espectro de amplitude da tensão e corrente para o BC3.

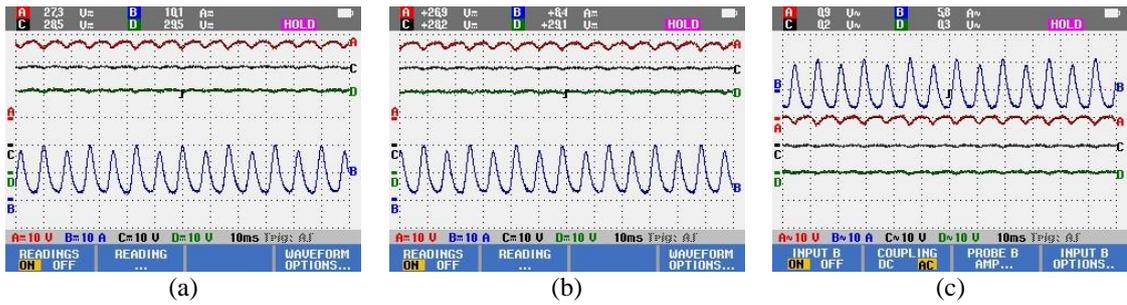


Fonte: Captura de tela do osciloscópio digital.

A partir das 10h00 manteve-se a operação do BC1 e aumentou-se o carregamento do BC3. Registrou-se no BC3 uma potência de 230 W, tensão de 27,6 V_{rms} e corrente de 10,2 A_{rms}, respectivamente, ilustrado na Figura 4.74. A ondulação de corrente aumentou para 17,6 A_{p-p} e da mesma forma, houve o aumento na ondulação de tensão nos pontos de conexão do BC1, BC2 e BC3, registrando-se os valores de 1,4 V_{p-p}, 1,7 V_{p-p}, 3,4 V_{p-p}, respectivamente. Para o BC1, também registrou-se 1,6 A_{p-p}, medindo-se uma tensão de 26,6 V_{rms} e corrente de 2,1 A_{rms},

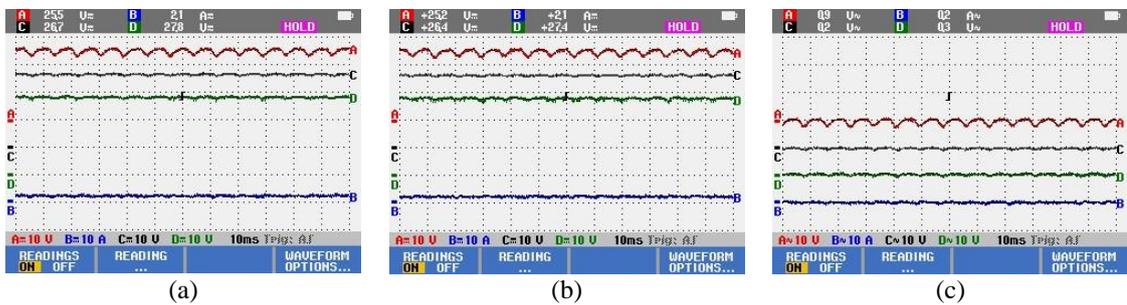
conforme registros apresentados na Figura 4.75. Na Figura 4.76 mostram-se os espectros de amplitude da tensão nos diferentes pontos de conexão das cargas e o espectro de amplitude da corrente do BC3.

Figura 4.74 - Formas de onda de tensão nos pontos de conexão das cargas e corrente no BC3, com a indicação do valor RMS na parte superior considerando a presença: (a) das componentes c.a. e c.c., (b) somente da componente c.c. e (c) somente da componente c.a.



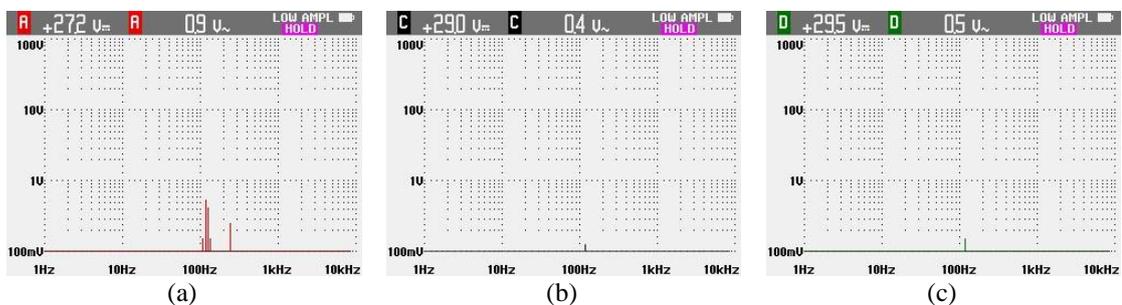
Fonte: Captura de tela do osciloscópio digital.

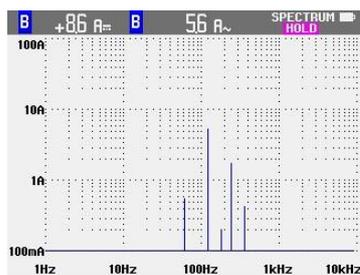
Figura 4.75 - Formas de onda de tensão nos pontos de conexão das cargas e corrente no BC1, com a indicação do valor RMS na parte superior considerando a presença: (a) das componentes c.a. e c.c., (b) somente da componente c.c. e (c) somente da componente c.a.



Fonte: Captura de tela do osciloscópio digital.

Figura 4.76 - Espectro de amplitude da tensão para o BC3 (a), BC1 (b), BC2 (c) e para corrente no BC3 (d).





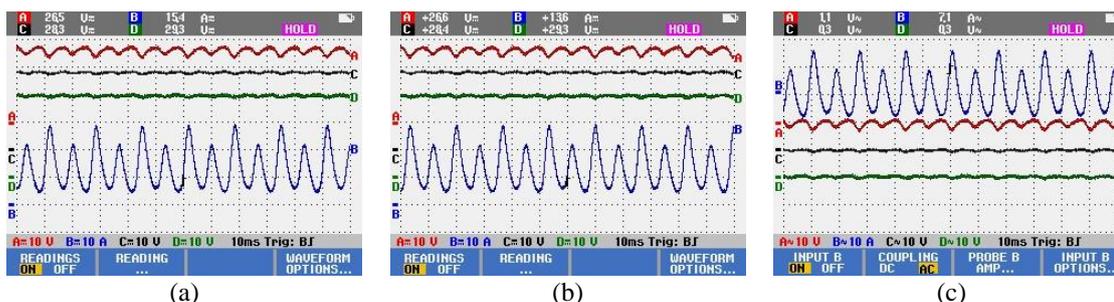
(d)

Fonte: Captura de tela do osciloscópio digital.

No horário das 12h00 houve a saída das cargas C1-2 e foram acionadas individualmente as cargas C2-2 onde registrou-se novamente assim como no ensaio II, evento transitório oscilatório, resultado da energização do conversor c.c.-c.c. existente no circuito interno da lâmpada. Para este evento transitório oscilatório foram registrados valores de corrente de pico de 27,0 A e impactos no nível da tensão para 7,6 V e 22,3 V nos pontos de conexão do BC1 e BC2, respectivamente, em um intervalo de aproximadamente 0,2 milissegundos, conforme ilustrado no Apêndice D.

No horário de 12h00 houve também o aumento no carregamento do BC3. No BC3 foi registrado um valor de tensão e corrente de 26,4 V_{rms} e 15,3 A_{rms} , respectivamente, com 24,6 A_{p-p} , como ilustrado na Figura 4.77. Também registrou-se uma ondulação de tensão nos pontos de conexão do BC1, BC2 e BC3, com valores de 1,7 V_{p-p} 2,0 V_{p-p} 4,5 V_{p-p} , respectivamente. Para o BC1 foi registrado um valor de tensão e corrente de 28,3 V_{rms} e 2,3 A_{rms} , respectivamente, com 2,0 A_{p-p} , como verificado na Figura 4.78. Para esta medição também foram aferidas componentes espectrais em 60 Hz, 180 Hz, 240 Hz e 360 Hz, além da componente em 120 Hz, para a corrente do BC3 e apenas 120 Hz para o BC1, conforme mostrado na Figura 4.79 (d) e (e).

Figura 4.77 - Formas de onda de tensão nos pontos de conexão das cargas e corrente no BC3, com a indicação do valor RMS na parte superior considerando a presença: (a) das componentes c.a. e c.c., (b) somente da componente c.c. e (c) somente da componente c.a.



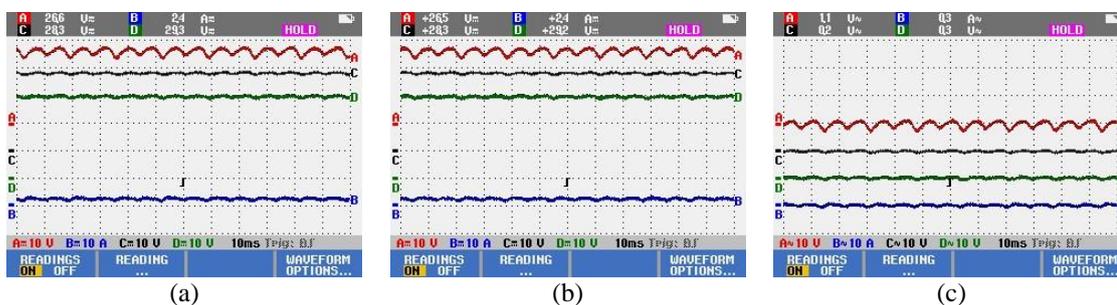
(a)

(b)

(c)

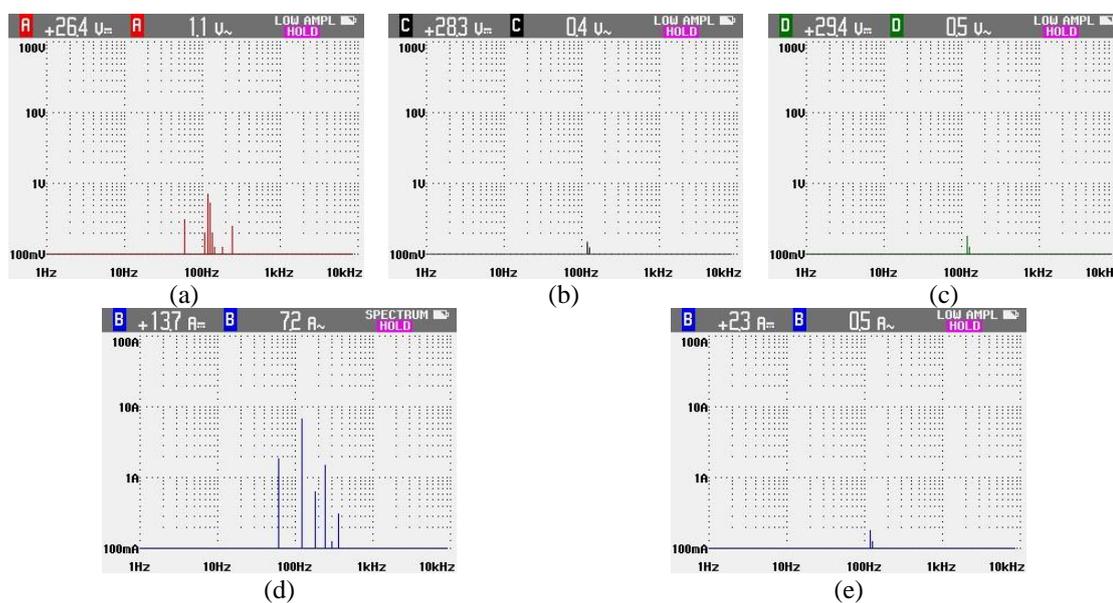
Fonte: Captura de tela do osciloscópio digital.

Figura 4.78 - Formas de onda de tensão nos pontos de conexão das cargas e corrente no BC1, com a indicação do valor RMS na parte superior considerando a presença: (a) das componentes c.a. e c.c., (b) somente da componente c.c. e (c) somente da componente c.a.



Fonte: Captura de tela do osciloscópio digital.

Figura 4.79 - Espectro de amplitude da tensão para o BC3 (a), BC1 (b), BC2 (c) e para corrente no BC3 (d) e BC1 (e).



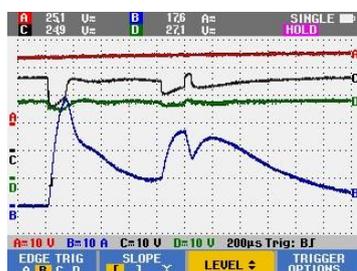
Fonte: Captura de tela do osciloscópio digital.

No horário das 14h00, durante o acionamento do BC2, assim como nos ensaios anteriores I, II e III, houve uma diminuição de 0,6 V e 0,8 V no valor eficaz da tensão para o BC1 e BC3, respectivamente, e posterior aumento de 0,6 V e 0,5 V para o BC1 e BC3, respectivamente, após a saída do BC2. Para o BC2 foi registrado um valor de tensão e corrente de 25,0 V_{rms} e 10,3 A_{rms}, respectivamente, conforme consta no Apêndice D.

No horário das 16h00 houve o acionamento novamente das cargas C1-2 do BC1 onde foram registrados eventos transitórios oscilatórios nos pontos de conexões de carga, com maior impacto para o ponto BC2, conforme ilustrado na Figura 4.80. Para o evento foi registrado uma corrente de pico de 39,2 A e um vale na tensão de 15,6 V e 23,3 V para o BC1 e BC2, respectivamente. O evento ocorreu com duração aproximada de 2 milissegundos. Este

comportamento possui a mesma causa dos eventos transitórios oscilatórios registrados nos ensaios I, II e III para as cargas C1-1 e C2-2.

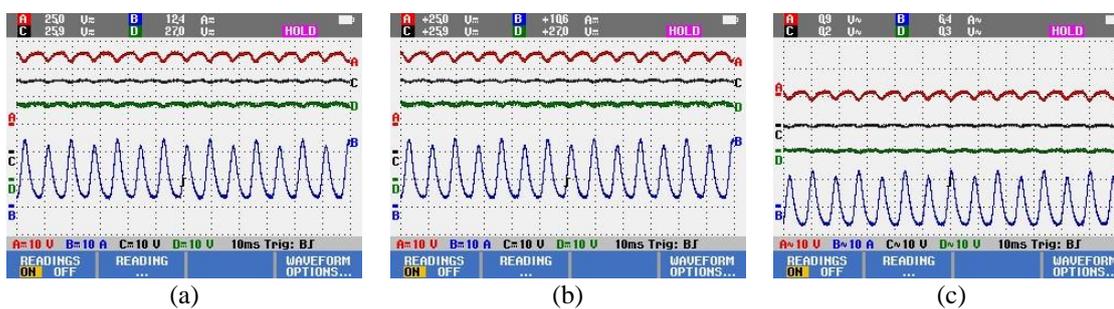
Figura 4.80 - Evento transitório oscilatório durante acionamento da carga C1-2 do BC1.



Fonte: Captura de tela do osciloscópio digital.

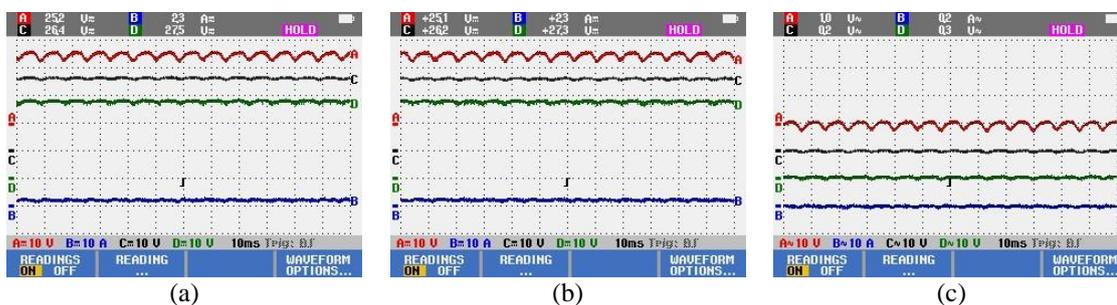
No horário de 16h00 teve-se o BC3 com um valor de tensão e corrente de $24,9 V_{rms}$ e $12,5 A_{rms}$, respectivamente, e para o BC1 $26,3 V_{rms}$ e $2,3 A_{rms}$, respectivamente, como ilustrado nas Figuras 4.81 e 4.82, respectivamente. Durante todo o ensaio as componentes espectrais para forma de onda de corrente do BC1 carga C1-2 são de baixa amplitude. Por fim, novamente no horário de 18h00 em diante, o BC1 permaneceu apenas com as cargas C1-2, como ilustrado na Figura 4.82, em conjunto com o BC3 utilizando o inversor em um menor carregamento. Na Figura 4.83 mostram-se os espectros de amplitude da tensão em diferentes pontos de conexão das cargas e o espectro de amplitude da corrente do BC3.

Figura 4.81 - Formas de onda de tensão nos pontos de conexão das cargas e corrente no BC3, com a indicação do valor RMS na parte superior considerando a presença: (a) das componentes c.a. e c.c., (b) somente da componente c.c. e (c) somente da componente c.a.



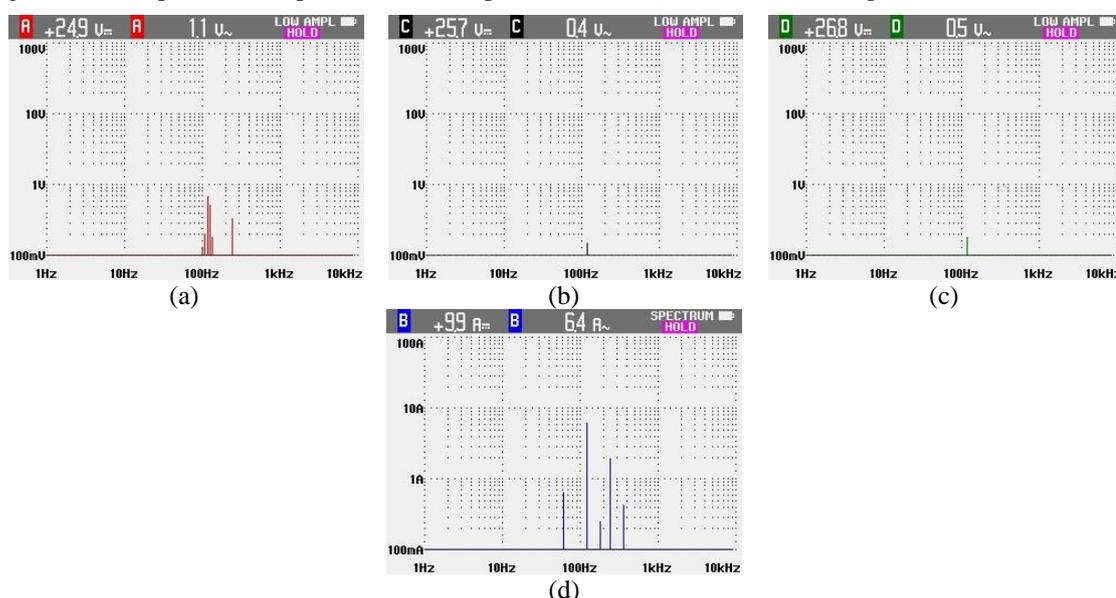
Fonte: Captura de tela do osciloscópio digital.

Figura 4.82 - Formas de onda de tensão nos pontos de conexão das cargas e corrente no BC1, com a indicação do valor RMS na parte superior considerando a presença: (a) das componentes c.a. e c.c., (b) somente da componente c.c. e (c) somente da componente c.a.



Fonte: Captura de tela do osciloscópio digital.

Figura 4.83 - Espectro de amplitude da tensão para o BC3 (a), BC1 (b), BC2 (c) e para corrente no BC3 (d).



Fonte: Captura de tela do osciloscópio digital.

Na Tabela 4.15 constam os valores de potência aparente, ativa e não ativa no ponto de conexão das cargas BC1, BC2 e BC3, em regime. De modo geral, assim como nos ensaios anteriores, observou-se o aumento da demanda de potência não ativa com o aumento da ondulação na tensão.

Destaca-se um menor valor de potência demandada pelo BC1 utilizando as cargas C1-2. Nesse sentido, mesmo a diferença entre a carga C1-1 e C1-2 seja apenas a estratégia de utilização do conversor c.c.-c.c. (centralizado ou não) empregado para os suprimentos das mesmas cargas, descritas no Capítulo 2, o valor de potência processada pela carga C1-2 é aproximadamente 10 W menor em relação à carga C1-1.

Tabela 4.15 - Registro de potência aparente, ativa e não ativa no ponto de conexão de carga do ensaio IV.

Horário	Registro de Potência no Ponto de Conexão de Carga					
	BC3			BC1 e BC2*		
	VA	W	Var	VA	W	Var
7:00	28,15	14,69	24,02	55,15	55,06	3,24
8:00	156,21	125,91	92,46	56,20	56,06	3,98
10:00	278,31	230,02	156,69	56,55	56,10	7,14
12:00	405,26	351,49	201,71	67,54	66,84	9,69
14:00	293,02	240,81	166,96	69,01	68,59	7,56
16:00	312,56	255,80	179,61	259,09*	259,04*	3,66*

Na Tabela 4.16 constam os valores de potência ativa registradas na saída de cada SGA. Observou-se um valor de potência fornecida maior que medida no ponto de conexão das cargas, como exemplo às 12h00, com diferença de 48 W acima do valor registrado no ponto de conexão das cargas.

Tabela 4.16 - Registro de potência ativa fornecida pelo controlador de carga na saída de cada SGA do ensaio IV.

Horário	Registro de Potência na Saída do SGA (W)			
	SGA1	SGA2	SGA3	Total
7:00	23,90	20,16	29,82	73,88
8:00	62,62	50,18	72,70	185,50
10:00	102,44	74,95	126,10	303,49
12:00	131,36	92,49	241,17	465,02
14:00	178,61	171,47	237,10	587,18
16:00	116,32	104,13	102,55	323,00

Na Tabela 4.17 constam os valores de duração, magnitude e componente espectral que caracterizam um evento transitório oscilatório, conforme definição da recomendação do IEEE Std1159. O evento registrado é do tipo de baixa frequência, com componente espectral menor que 5 kHz e duração entre 0,3 e 50 ms. Os eventos transitórios oscilatórios registrados foram resultados do acionamento das cargas C2-2 do BC1 no horário das 12h00 e da carga C1-2 do BC1 no horário das 16h00.

Tabela 4.17 - Evento transitório oscilatório referente ao ensaio IV.

Horário	Transitório		
	Oscilatório		
	Duração (ms)	Magnitude (p.u.)	Componente Espectral (kHz)
12:00	0,4	0,42 – 1,63	5,00
16:00	2,00	0,65 – 1,17	3,00

Na Tabela 4.18 constam os valores de ondulação de tensão ao longo do dia, o qual mostra maiores magnitudes de tensão pico a pico para o ponto de conexão do BC3 no horário de maior carregamento, 12h00. Concatenado a isto, destacam-se os valores de tensão pico a pico também para os pontos de conexão do BC1 e BC2, onde o aumento da magnitude foi correspondente ao aumento na magnitude no ponto de conexão BC3.

Os valores máximos registrados foram de $4,5 V_{p-p}$ para o ponto BC3 no horário das 12h00, seguidos dos valores de $1,7 V_{p-p}$ e $2,0 V_{p-p}$ para os pontos BC1 e BC2, respectivamente. Os valores mínimos registrados foram durante o início da manhã até às 8h00 com $1,2 V_{p-p}$, $1,5 V_{p-p}$ e $1,6 V_{p-p}$ para os pontos BC1, BC2 e BC3, respectivamente.

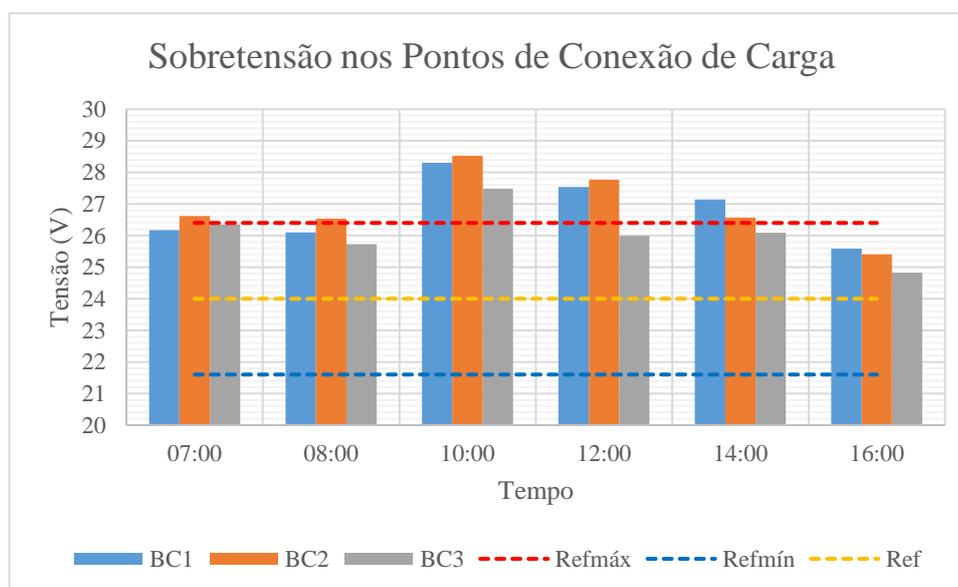
Tabela 4.18 - Ondulação de tensão ao longo do dia na NDCC durante o ensaio IV.

Horário	Ondulação de Tensão						Frequência (Hz)
	Tensão RMS (V)			Tensão p-p (V_{p-p})			
	BC1	BC2	BC3	BC1	BC2	BC3	
7:00	26,30	26,60	26,42	1,29	1,56	1,64	119,7
8:00	26,85	27,19	26,49	1,30	1,76	2,62	119,7
10:00	28,48	28,77	27,29	1,41	1,78	3,45	119,7
12:00	28,30	28,56	26,49	1,72	2,03	4,50	119,7
14:00	25,44	25,03	24,33	1,60	1,93	3,85	119,7
16:00	25,88	26,30	24,92	1,63	1,95	4,01	119,7

A Figura 4.84 ilustra os valores de tensão eficaz medidos por meio do osciloscópio digital nos pontos de conexão das cargas. No ensaio IV, registram-se eventos sobretensão nos pontos de conexão de cargas nos horários das 8h00, 10h00 e 12h00 para os três pontos, isto é, valores de tensão RMS acima de 1,1 p.u., referente à definição de sobretensão, conforme a recomendação do IEEE Std 1159.

Quando analisado os pontos de tensão próximo aos SGAs, avaliando-se os registros dos controladores de carga, tem-se a classificação de sobretensão nos horários ilustrados na Figura 4.66.

Figura 4.84 - Valor de tensão eficaz nos pontos de conexão das cargas do ensaio IV.



Para o evento de curta duração, referentes ao afundamento e elevação do valor RMS de tensão, não foi possível caracterizá-los, em virtude da baixa variação na tensão durante a entrada do BC2 na rede. Observou-se no horário das 14h00 durante o acionamento e saída do BC2 diminuições e aumentos no nível de tensão, inferiores ao caracterizado pela IEEE Std 1159, de modo a causar variações de 0,8 V (0,033 p.u.), considerando a tensão nominal de 24 V.

Assim, considerando tensão eficaz nos pontos medidos, inicialmente para o acionamento do BC2 não foi registrado afundamento no nível de tensão, visto que a tensão RMS nos pontos medidos esteve com 26,5 V_{rms} e 24,3 V_{rms} para o BC1 e BC3, respectivamente. Durante a saída do BC2 também não foi registrado evento de elevação, visto que os pontos de conexão BC1 e BC3 estiveram com 25,5 V_{rms} e 24,7 V_{rms} , respectivamente.

4.2. Considerações Finais Sobre o Capítulo 4

Este capítulo apresentou diversos eventos de QEE registrados em uma nanorrede de distribuição em corrente contínua sob diferentes condições de operação devido à variação do recurso solar, impactando no nível de tensão dos bancos de baterias. Destaca-se ainda o impacto nas demais cargas conectadas à nanorrede.

Os eventos de QEE aferidos foram sobretensão, transitório oscilatório e de ondulações (*ripple*) de tensão, observados em todos os ensaios realizados, com diferentes níveis de tensão na NDCC.

Entre as componentes espectrais da tensão com a presença de ondulação, destaca-se as maiores amplitudes em frequência próxima a 120 Hz (dobro da frequência fundamental no lado c.a.), além de componentes com frequência de 60 Hz, 240 Hz e 360 Hz, apresentando diferentes magnitudes para todos os pontos de conexão da NDCC.

Destaca-se que para a carga C1-2 aferiu-se apenas a componente de 120 Hz, diferentemente da carga C1-1, que em outros momentos possuiu componentes em 60 Hz. Uma das causas deste evento refere-se devido à comutação dos transistores do inversor para fornecer uma forma de onda alternada, para o lado c.a. do sistema. Mas a presença da ondulação depende da topologia do inversor, da estratégia de controle, da demanda de potência no lado de corrente alternada, entre outros.

A magnitude do evento de ondulação de tensão foi verificada na NDCC com diferentes valores, em virtude da proximidade com a carga originária do evento e da magnitude do evento ocasionado pelo aumento do carregamento da carga originária.

O evento de ondulação de tensão para as cargas conectadas à NDCC ocasionou aumento de potência não ativa demandada por estas cargas. Durante a operação das demais cargas conectadas à NDCC não foram observadas avarias ou diminuição da luminosidade das lâmpadas percebidas a olho nu, durante a ocorrência do aumento da magnitude da ondulação de tensão ao longo da rede. No entanto, em especial para as cargas C2-1 e C2-3, visto que não possuem nenhum regulador de tensão com os LEDs, tem-se um aumento na luminosidade quando se tem um aumento no nível de tensão.

Ademais, destaca-se que os impactos da ondulação de tensão podem abranger: degradação da eficiência do sistema; aumento da temperatura dos componentes eletrônicos; interferência eletromagnética em outros equipamentos e sistemas; e redução da vida útil dos componentes. Além disso, pode afetar negativamente a precisão de medidores e sensores e causar distorções em sinais de saída (STRZABALA; WCISLIK, 2018).

O evento transitório oscilatório, resultado do acionamento de conversores c.c.-c.c. na NDCC, apresentou diminuições e aumentos na magnitude da tensão durante um curto período, na faixa de milissegundos, em diferentes pontos da rede, possuindo maior impacto no ponto de conexão do conversor (BC1) e no outro ponto de medição mais próximo a ele (BC2). Este evento poderia influenciar o desempenho de equipamentos sensíveis às variações de tensão na rede ou instrumentos de medições, conectados à NDCC.

Ressalta-se também a significativa magnitude de corrente de pico requisitada pelos conversores c.c.-c.c. utilizados, evento denominado, corrente de *inrush*, para o qual pode-se ter a suavização ou mitigação por meio de estratégias de pré-carga ou *soft-start*. Desse modo, torna-

se importante a utilização de conversores que possuam proteções ou estratégias pré-carga durante seu acionamento, atenuando efeitos nocivos ao barramento em que está conectado.

Os impactos na magnitude da tensão, nos pontos de conexão de cargas da NDCC, proveniente da entrada do BC2 foi observado resultando em diminuições e aumentos de tensão por durações próximas a 1 minuto e com baixas magnitudes, não podendo ser classificados como afundamentos e elevações de tensão, devido ao valor de tensão medido em p.u. ser diferente ao valor delimitado pela recomendação do IEEE Std 1159.

Além disso, destacam-se também diminuições e aumentos no nível de tensão, resultado da diminuição da irradiância global sobre o plano do gerador fotovoltaico com a presença de nuvens, visto que a tensão da rede é definida pela tensão dos bancos de baterias, logo, durante uma diminuição no fornecimento de energia para os bancos de baterias tem-se uma redução do nível de tensão.

O evento de longa duração sobretensão foi verificado durante todos os ensaios realizados. Tanto no ponto de conexão das cargas quanto próximo aos SGAs, estando acima de 1,1 p.u. acima do tempo de 1 minuto, quando em alguns momentos no ponto de conexão das cargas. Destaca-se maior ocorrência em horários de maior irradiância, quando se tem a operação dos GFVs para carregamento dos bancos de baterias e atendimento das cargas. Observa-se que o evento de sobretensão pode ser mitigado com ações que busquem controlar o nível de tensão da rede para suprimento das cargas.

Por fim, devido ao evento de sobretensão na NDCC, as cargas que sofreram avaria parcial ou total foram as cargas C2-1 e C2-3 acionadas no BC1, apesar dos fabricantes indicarem o uso destas para sistemas com energia solar fotovoltaica *off-grid*, com tensão nominal de 24 V, verificou-se a operação inadequada das referidas cargas na NDCC. A utilização de conversores c.c.-c.c. se mostram importantes para estas cargas, em vista da maior estabilidade da tensão de suprimento de saída, evitando sobrecorrente e maior aquecimento interno da carga.

CAPÍTULO 5 VERIFICAÇÃO DO EVENTO INTERRUPÇÃO EM UMA NDCC LOCALIZADA EM ILHA DAS ONÇAS/PA

Neste capítulo apresentam-se dois estudos de caso a partir dos registros de operação de uma Nanorrede de Distribuição em Corrente Contínua (NDCC) localizada na Ilha das Onças no município de Barcarena, próximo à região metropolitana de Belém, estado do Pará. Para esta nanorrede, afere-se e caracteriza-se o evento de QEE de interrupção, destacando sua causa e duração.

Escolheu-se o sistema implantado na Ilha das Onças para os estudos de caso, por representar uma situação real de eventuais ocorrências de eventos de interrupção e o posterior restabelecimento no fornecimento de energia elétrica para a NDCC, em vez da realização de ensaios para detecção e registro deste evento na NDCC do GEDAE/UFPA.

5.1. Descrição da NDCC – Ilha das Onças

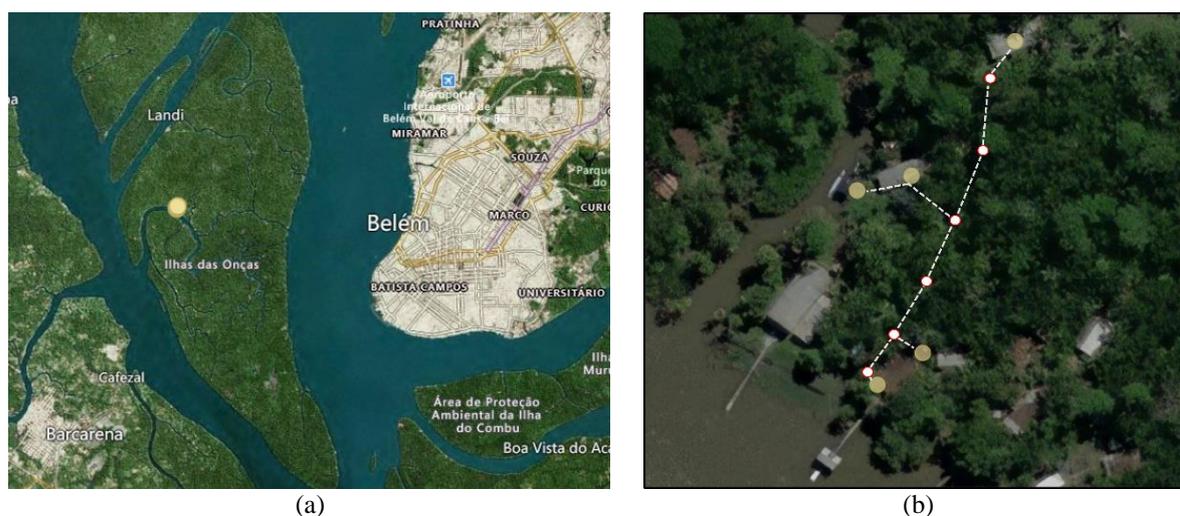
A NDCC, localizada na Ilha das Onças, foi concebida e instalada pelo Grupo de Estudos e Desenvolvimento de Alternativas Energéticas da Universidade Federal do Pará (GEDAE/UFPA). A nanorrede foi projetada para propiciar a escalabilidade do sistema, aumentando sua capacidade de geração e armazenamento de forma modular conforme são instalados novos subsistemas.

Durante a operação apresentada neste capítulo, a NDCC empregou cinco SGAs, atendendo cinco residências ribeirinhas e uma estação de recarga.

Na Figura 5.1(a), indica-se a localização em um mapa do sistema da NDCC Ilha das Onças, bem como, na Figura 5.1(b), a localização de cada um dos subsistemas representados pelo círculo amarelo, em conjunto com a extensão do sistema de distribuição, representado pelo círculo branco (correspondentes aos postes) e pelos traços brancos (correspondentes à rede de distribuição).

Destaca-se que nesta localidade tem-se apenas a operação da NDCC e não há disponibilidade de suprimento de energia por meio de uma rede de distribuição convencional (em c.a.).

Figura 5.1 - Localização da NDCC.



Fonte: Autoria própria.

A NDCC na Ilha das Onças é classificada como unipolar com tensão nominal de 24 V, possuindo apenas um condutor positivo (+) e um negativo (-). A arquitetura empregada na NDCC é radial e isolada, isto é, não possui um *link* com a rede c.a. convencional ou qualquer outra minirrede/microrrede em corrente alternada. O sistema possui apenas o controle realizado pelos conversores de potência, de interface com a rede elétrica, na gestão do fluxo de potência entre geração, armazenamento e carga, nesse caso, não havendo comunicação entre subsistemas ou controle do fluxo de potência entre os subsistemas instalados.

A rede de distribuição é constituída por cinco Geradores Fotovoltaicos (GFVs) distribuídos, instalados em cada residência, além de uma estação de recarga para um protótipo de embarcação elétrica tipo rabeta. Cada subsistema, além da geração, possui armazenamento por meio de Bancos de Baterias (BBs) e possui uma interface de controle entre gerador fotovoltaico, baterias e rede de distribuição, formada por meio de um controlador de carga com a tecnologia MPPT, do fabricante EPEVER modelo XTRA 3210N e TRACER, para a estação de recarga.

Cada subsistema conta também com um registrador de dados *datalogger*, também do fabricante EPEVER, modelo eLOG01-V1-2-1, onde é feito, registro, sob amostragem de 1 minuto, da operação de cada subsistema por meio da monitoração de parâmetros elétricos de tensão, corrente e potência dos GFVs, BBs e carga (saída do controlador), possibilitando diagnósticos energéticos, visando à realização de manutenções preventivas e corretivas nos equipamentos do sistema quando os mesmos apresentam eventuais falhas.

De modo geral, nos subsistemas tem-se um banco de baterias com duas unidades conectadas em série, formando um banco de baterias de 24 V e capacidade 220 Ah, com

exceção do subsistema denominado “Sr. João (Cozinha)”, o qual contém um banco de baterias formado por quatro unidades, sendo uma conexão em paralelo de duas baterias em série.

Durante a presente análise a NDCC era constituída com uma capacidade de armazenamento de aproximadamente 26,2 kWh, conforme apresentado na Tabela 5.1.

Tabela 5.1 - Armazenamento em banco de baterias em cada subsistema.

Subsistema	Quantidade	Fabricante	Capacidade da bateria (Ah)	Total (Ah)
Sr. João - Cozinha	4	Outback	106	212
Sr. João - Sala	2	Moura	220	220
Estação de Recarga	2	Tudor	220	220
Sr. Raul	2	Tudor	220	220
Sr. Bruno	2	Tudor	220	220
Total	12	-	-	1.092

Os GFVs são dispostos em cada subsistema compondo uma capacidade de geração total de 4,1 kWp, como consta na Tabela 5.2. Destaca-se que os geradores que compõem os subsistemas possuem orientações de acordo com a orientação do telhado de cada residência, portanto, estão dispostos com diferentes orientações.

Tabela 5.2 - Sistemas de GFVs em cada subsistema.

Subsistema	Quantidade	Fabricante	Potência (Wp)	Total (Wp)
Sr. João - Cozinha	2	Soyang	315	630
Sr. João - Sala	2	BYD	330	660
Sr. Raul	2	JYPCO	250	500
Sr. Bruno	2	BYD	330	660
Estação de Recarga	4	OSDA	400	1.600
Total	12	-	-	4.050

Para NDCC na Ilha das Onças há a presença de cargas c.c. e de cargas c.a., sendo estas supridas com a utilização de um inversor, como exemplo, os aparelhos de TV utilizados no local. No âmbito das cargas supridas diretamente por corrente contínua, destaca-se a utilização de cargas vendidas para esse propósito, como, exemplo, lâmpadas de LED, quanto à utilização de cargas adaptadas para operarem em corrente contínua, como, exemplo, batedeira de açaí.

Nas Tabelas 5.3 e 5.4 identificam-se as cargas utilizadas na NDCC. As cargas c.a. supridas por inversor constam na Tabela 5.3, contando com aparelhos de TV, além da existência de pontos de tomada de uso geral (TUG) para carregamento de celular, dentre outras utilidades.

Na Tabela 5.4 constam as cargas c.c. supridas diretamente pela NDCC. Ressalta-se que as lâmpadas supridas diretamente pela NDCC possuem internamente um regulador de tensão, seja vindo de fábrica ou por meio de adaptações realizadas pela equipe do projeto.

Tabela 5.3 - Cargas c.a. utilizadas em cada subsistema.

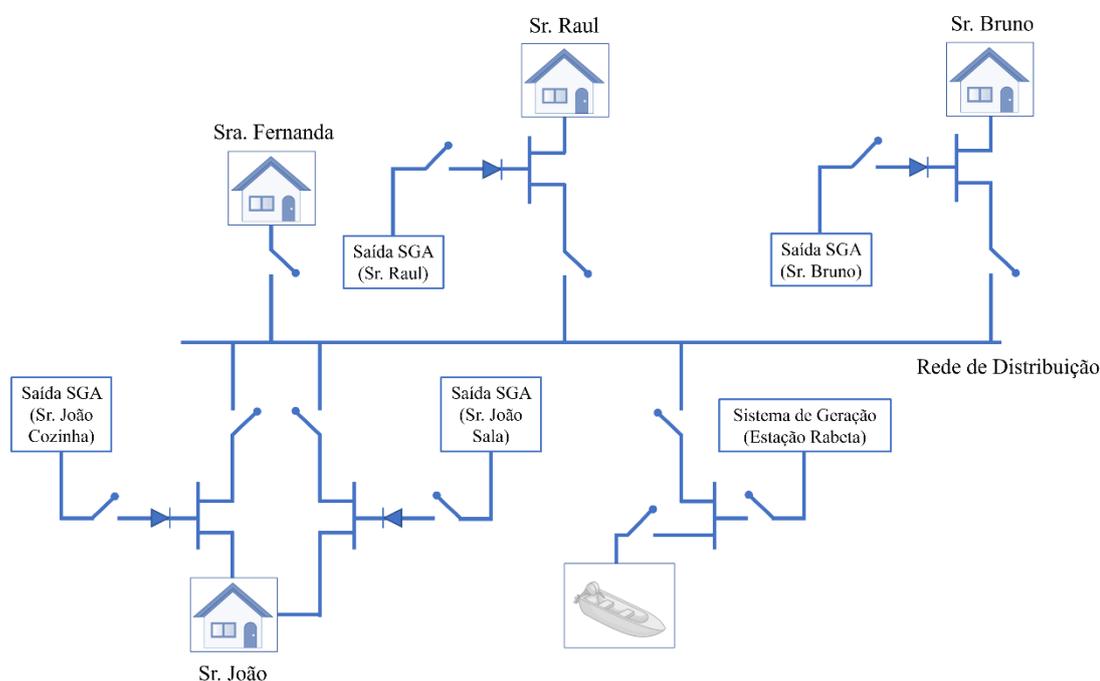
Edificação	Quantidade	Carga	Potência (W)	Total (W)
Sra. Fernanda e Sr. João	1	Máquina de costurar	90	90
	1	Televisão 32”	100	100
	1	Roteador de internet	30	30
	1	TUG	100	100
Sr. Raul	1	Televisão 32”	100	100
	1	TUG	100	100
Sr. Bruno	1	Televisão 52”	275	275
	1	TUG	100	100
Potência Instalada	-	-	-	895

Tabela 5.4 - Cargas c.c. utilizadas em cada subsistema.

Edificação	Quantidade	Carga	Potência (W)	Total (W)
Sra. Fernanda e Sr. João	1	Batedeira de açaí	400	400
	5	Lâmpadas	9	45
	1	Tomada USB	15	15
	1	Geladeira	80	80
	1	Refrigerador	70	70
Sr. Raul	6	Lâmpadas	9	54
Sr. Bruno	6	Lâmpadas	9	54
	1	Tomada USB	15	15
	1	Refletor	20	20
Estação de Recarga	1	Lâmpadas	9	9
Potência Instalada	-	-	-	762

Na Figura 5.2 tem-se um diagrama simplificado da estrutura da NDCC empregada na Ilha das Onças, servindo de auxílio para o entendimento dos estudos de casos a seguir, relacionados às desconexões das saídas de SGAs.

Figura 5.2 - Estrutura da NDCC na Ilha das Onças.



Fonte: Autoria própria.

5.2. Operação da NDCC – Ilha das Onças

O período analisado ocorreu durante a primeira quinzena do mês de abril de 2022, conforme ilustrado na Figura 5.3. Houve a ocorrência da desconexão automática da saída para a rede, pelo controlador de carga de determinados subsistemas, nos dias 22/04 e 23/04 e nos dias 27/04 e 28/04.

Destaca-se esta ocorrência em dois modos distintos, sendo o primeiro caso uma interrupção no fornecimento de energia elétrica de alguns SGA, isto é, com a desconexão da rede por apenas parte dos subsistemas. No entanto, devido à configuração da NDCC, onde a rede elétrica de distribuição permanece energizada pelos demais subsistemas, não houve a interrupção no fornecimento de energia elétrica para as cargas ou residências.

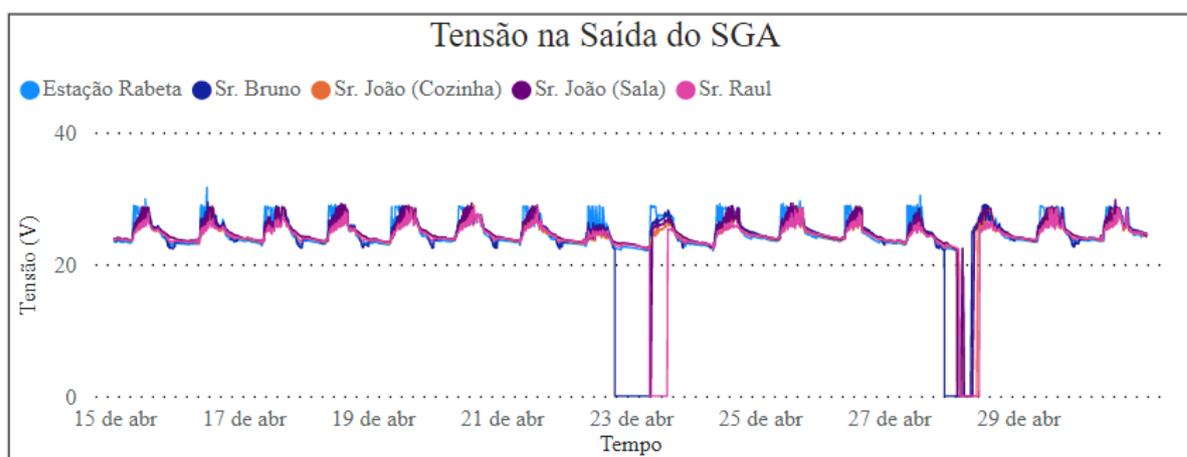
No segundo caso, há uma perda total de tensão na rede elétrica de distribuição com a saída ou desconexão de todos os subsistemas.

Destaca-se que para os controladores de carga de cada subsistema tem-se a programação *default* (padrão) de fábrica para a utilização de baterias de chumbo ácido do tipo selada (conforme consta na Tabela 2.2 do Capítulo 2), com a desconexão do barramento da carga por baixa tensão no banco de baterias (*Low Voltage Disconnect*) quando a tensão alcança o valor

de 22,2 V. A desconexão do barramento da carga por alta tensão no banco de baterias (*High Voltage Disconnect*) ocorre quando a tensão alcança o valor de 32,0 V (neste caso, antes da desconexão há o evento de sobretensão na NDCC, conforme definido no capítulo anterior).

Do mesmo modo, tem-se a reconexão do barramento da carga após o corte por baixa tensão (*Low Voltage Reconnect*) quando o valor de tensão no banco alcança o valor de 25,2 V, e a reconexão após corte por alta tensão (*High Voltage Reconnect*) quando o valor de tensão no banco alcança o valor de 30,0 V.

Figura 5.3 - Tensão na saída do controlador de cada SGA para a NDCC, durante o período de operação em análise.



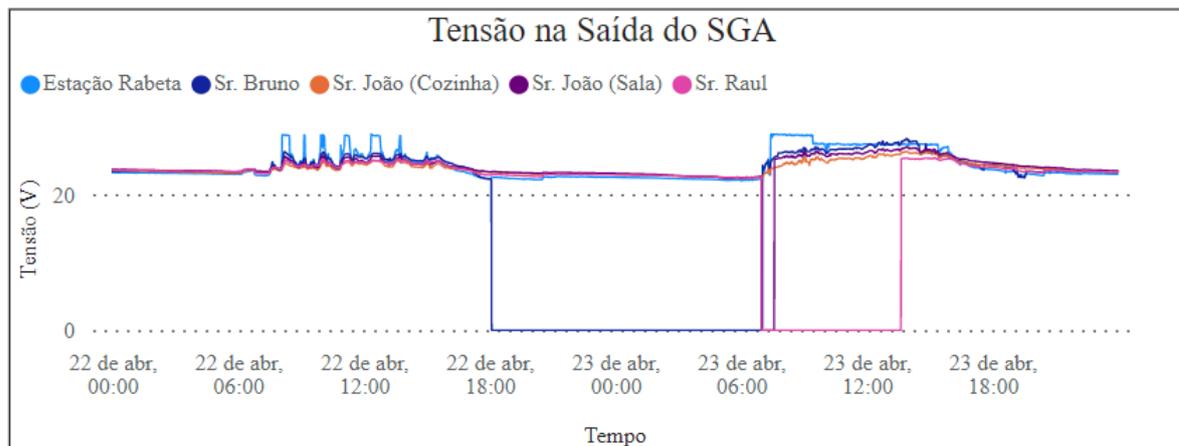
Fonte: Captura de tela da ferramenta desenvolvida em Power BI.

5.2.1. Desconexão de Parte dos SGAs (22/04/2022 e 23/04/2022)

Nos dias de 22/04/2022 e 23/04/2022 ocorreu inicialmente a saída do subsistema do Sr. Bruno no horário das 18h04 do dia 22/04/2022, quando no mesmo registrou-se o valor de tensão no banco de baterias de 22,2 V, reconectando novamente à rede às 7h02 do dia 23/04/2022.

Do mesmo modo, os subsistemas do Sr. João (Sala) e do Sr. Raul desconectaram-se da rede no horário das 6h59 no dia 22/04/2022, pois a tensão em cada banco de baterias atingiu o valor de 22,2 V e, posteriormente, apenas o subsistema Sr. João (Sala) reconectou-se na rede no horário das 7h35 do mesmo dia. Por fim, o subsistema do Sr. Raul reconectou-se, por último, no horário das 13h38 do mesmo dia, com valor de tensão de 25,2 V, como ilustrado na Figura 5.4.

Figura 5.4 - Tensão na saída do controlador de cada SGA para a NDCC, nos dias de 22/04/2022 e 23/04/2022.



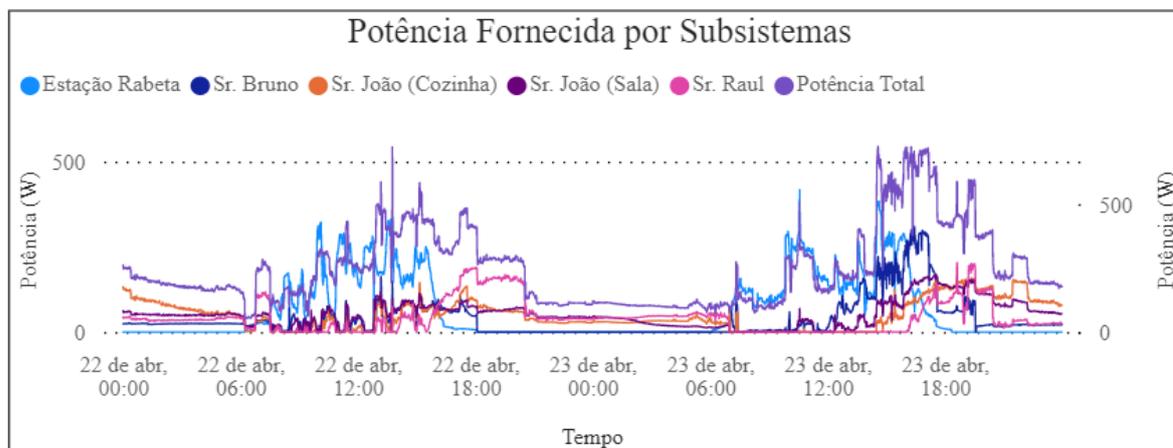
Fonte: Captura de tela da ferramenta desenvolvida em Power BI.

Ao longo do período de desconexão dos subsistemas indicados anteriormente, os subsistemas Estação Rabeta e Sr. João (Cozinha), continuaram a operar normalmente sem nenhuma falha. Destaca-se também que apesar do registro de saída de alguns subsistemas, referentes à respectiva residência em que estão instalados, as cargas dessa residência permaneceram em operação normal, pois foram supridas pela NDCC com o fornecimento de energia elétrica proveniente dos outros subsistemas operantes.

A Figura 5.4 ilustra a potência ativa fornecida por cada subsistema ao suprimento da NDCC durante os dias analisados, 22/04/2022 e 23/04/2022. Assim, tem-se a curva de carga para cada subsistema, resultando em uma curva de carga total da NDCC, ilustrado na Figura 5.5 na cor roxa.

Em vista da nanorrede possuir em sua maior parte a conexão de cargas residenciais, tem-se um perfil de curva de carga com maior demanda nos horários vespertino e noturno. Para os dias contidos no presente estudo de caso, registrou-se o pico de demanda de 583,4 W no dia 22/04/2022 no horário das 15h00 e 712,2 W no dia 23/04/2022 no horário das 17h00.

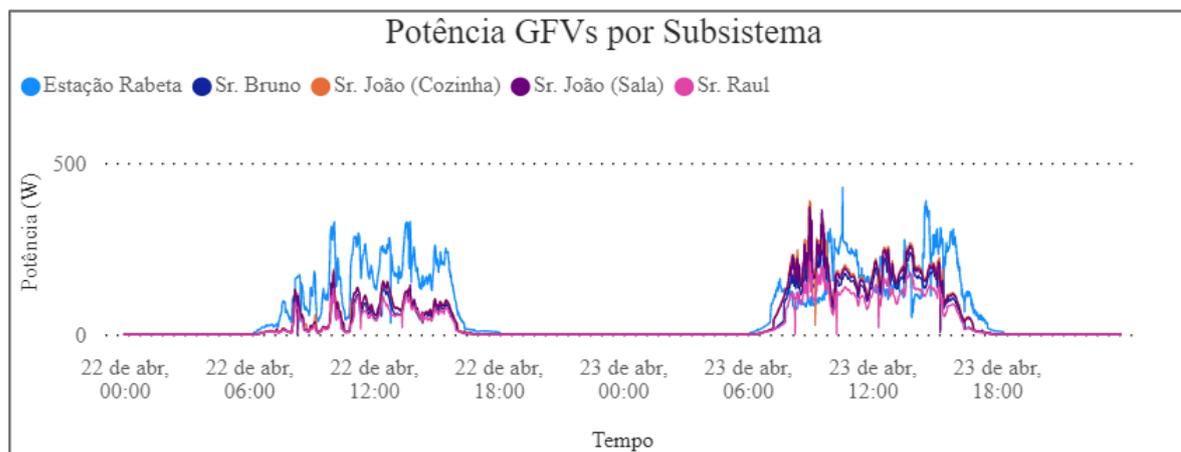
Figura 5.5 - Potência fornecida por cada subsistema ao suprimento da NDCC.



Fonte: Captura de tela da ferramenta desenvolvida em Power BI.

A Figura 5.6 ilustra a geração, por meio dos GFV de cada subsistema. Nesse caso, é possível observar um menor valor de geração para o dia 22/04/2022 referente ao dia 23/04/2022.

Figura 5.6 - Geração por subsistema.



Fonte: Captura de tela da ferramenta desenvolvida em Power BI.

Na Tabela 5.5 constam as informações de tempo em que os SGA de cada subsistemas ficaram desconectados à rede principal. Para este caso não foi caracterizado evento de interrupção sustentada, visto que os subsistemas remanescentes continuaram o fornecimento de energia às cargas conectadas à NDCC.

Nesse caso, apenas para os SGA dos subsistemas Sr. Bruno, Sr. João (Sala) e Sr. Raul houve a interrupção no fornecimento de energia, mas o suprimento de energia para as

residências do Sr. Bruno, Sr. João e Sr. Raul continuou por meio da NDCC, visto que havia outros subsistemas conectados na rede.

Tabela 5.5 - Evento de desconexão do SGA entre os dias 22/04/2022 e 23/04/2022.

Subsistema	Interrupção por SGA	
	Duração (min.)	Magnitude (V)
Estação Rabeta	-	-
Sr. Bruno	778	0
Sr. João (Cozinha)	-	-
Sr. João (Sala)	36	0
Sr. Raul	399	0

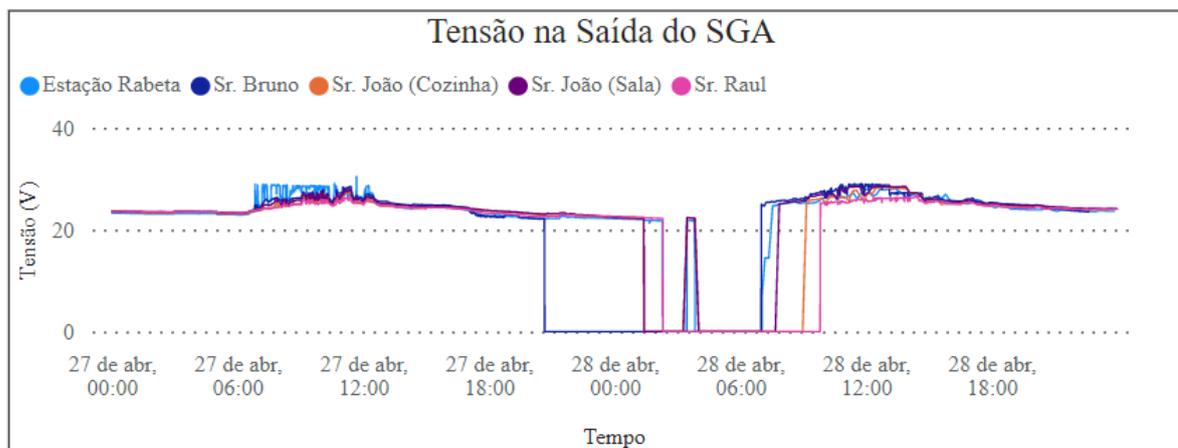
5.2.2. Desconexão dos SGA e Evento de Interrupção na Rede Elétrica (27/04/2022 e 28/01/2022)

A Figura 5.7 ilustra o evento de interrupção ocorrido entre os dias 27/04/2022 e 28/04/2022, o qual procedeu-se inicialmente com a saída do subsistema do Sr. Bruno no horário das 20h39 do dia 27/04/2022, seguido da saída dos subsistemas Sr. João (Sala) e (Cozinha) no horário das 1h27 do dia 28/04/2022. Por último, registrou-se a saída dos subsistemas Sr. Raul e Estação Rabeta no horário das 2h19 do dia 28/04/2022, desse modo, todos os subsistemas saíram da rede não realizando o suprimento das cargas durante a madrugada do dia 28/04/2022, totalizando um tempo de 69 minutos.

Durante ainda o período da madrugada, teve-se a reconexão e posterior saída, novamente, do subsistema Sr. João (Sala), Sr. João (Cozinha) e Estação Rabeta no horário das 3h28 às 3h50 do dia 28/04/2022. No início da manhã do dia 28/04/2022 no horário das 7h01 teve-se a reconexão do subsistema Sr. Bruno e Estação Rabeta, seguido da reconexão dos subsistemas Sr. João (Sala), Sr. João (Cozinha) e Sr. Raul nos horários de 7h52, 9h10 e 9h50, respectivamente. Reitera-se que para as saídas e posteriores reconexões os valores alcançados de tensão do banco de baterias também foram 22,2 V e 25,2 V, respectivamente.

Destaca-se que o controlador de carga do subsistema da Estação Rabeta possui a tensão da NDCC como referência para ativar os seus estágios ou modos de operação. Nesse caso, não havendo tensão na NDCC esse subsistema é desconectado automaticamente.

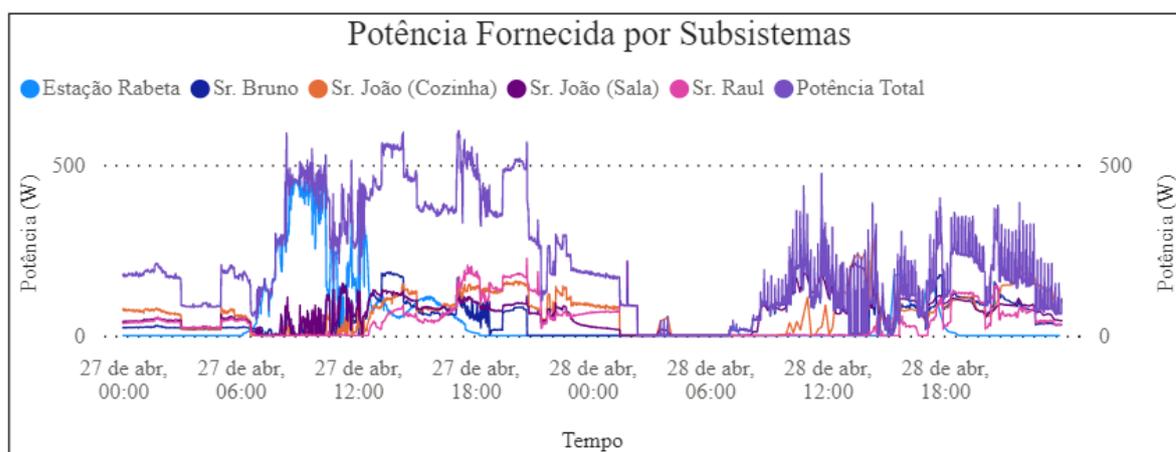
Figura 5.7 - Tensão da NDCC próximo ao SGA nos dias de 27/04/2022 a 28/04/2022.



Fonte: Captura de tela da ferramenta desenvolvida em Power BI.

A Figura 4.8 ilustra a potência fornecida por subsistema nos dias em análise. Para o dia 28/04/2022 observou-se a desconfiguração do tempo de amostragem de 1 minuto para 10 minutos, configuração padrão de fábrica, dos controladores de carga dos subsistemas Sr. João (Cozinha) e Estação Rabeta. Este evento dificulta a avaliação da tensão da NDCC, pois perde-se a sensibilidade das variações de tensão do sistema. A cada ocorrência deste tipo é feita a reconfiguração do sistema de aquisição de dados do referido subsistema.

Figura 5.8 - Potência fornecida por cada subsistema ao suprimento da NDCC.



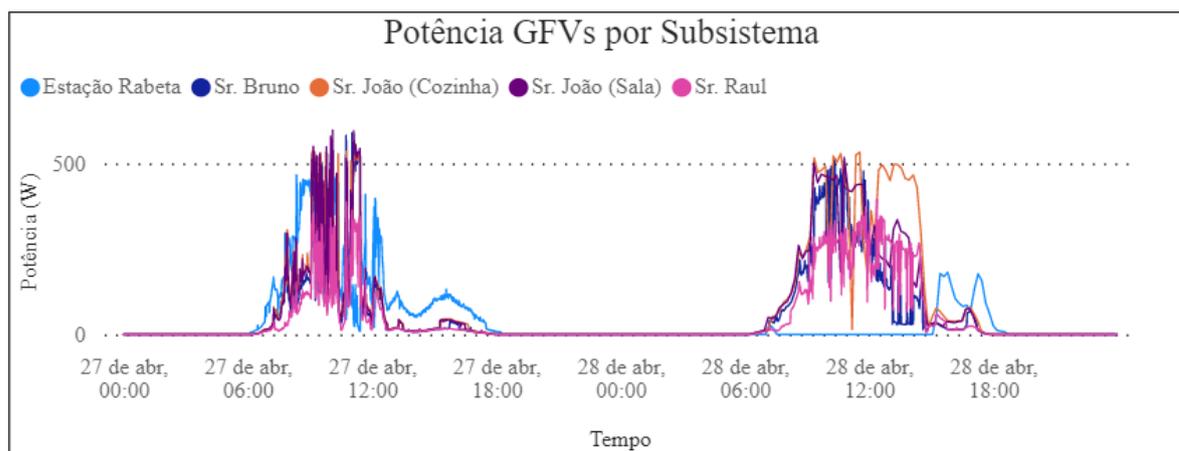
Fonte: Captura de tela da ferramenta desenvolvida em Power BI.

Na Figura 5.9 ilustra-se a geração por meio dos GFV para ambos os dias. No dia 28/04/2022, destaca-se que o subsistema Estação Rabeta voltou a gerar apenas após a reinicialização do controlador de carga no horário das 15h10. Como o subsistema Estação

Rabeta possui a tensão da NDCC como referência, havendo a perda desta tensão, o controlador acusa erro e necessita ser reiniciado.

Assim, verifica-se a importância da operação de todos os subsistemas na NDCC, proporcionando também um nível adequado de tensão ao longo da rede de distribuição, impactando diretamente na qualidade do suprimento da energia elétrica.

Figura 5.9 - Geração por subsistema.



Fonte: Captura de tela da ferramenta desenvolvida em Power BI.

Nas Tabelas 5.6 e 5.7 constam os parâmetros que caracterizam o evento de interrupção com base na definição da recomendação do IEEE Std 1159, com valor RMS do nível de tensão em zero e com tempo de duração do evento acima de 1 minuto.

De modo geral, tem-se para este segundo caso um evento de interrupção para todos os subsistemas, com a ausência completa do fornecimento de energia elétrica para a NDCC durante o período da madrugada do dia 28/04/2022. Caracteriza-se, portanto, o evento observado como uma interrupção sustentada quando houve a perda completa de tensão na NDCC.

A desconexão dos SGA ocorreu com maior duração para o subsistema do Sr. Bruno (622 minutos) e menor duração para o subsistema Sr. João (Sala), com duração de 363 minutos.

Tabela 5.6 - Evento de desconexão do SGA entre os dias 27/04/2022 e 28/04/2022.

Subsistema	Interrupção por SGA	
	Duração (min.)	Magnitude (V)
Estação Rabeta	260	0
Sr. Bruno	622	
Sr. João (Cozinha)	441	
Sr. João (Sala)	363	
Sr. Raul	470	

Tabela 5.7 - Evento de interrupção sustentada na rede elétrica entre os dias 27/04/2022 e 28/04/2022.

Subsistema	Evento de Longa Duração Interrupção Sustentada	
	Duração (min.)	Magnitude (V)
Estação Rabeta	69	0
Sr. Bruno		
Sr. João (Cozinha)		
Sr. João (Sala)		
Sr. Raul		

5.3. Comentários Sobre o Evento Interrupção Aferido na NDCC de Ilha das Onças

O evento de interrupção analisado neste capítulo pode ser caracterizado como um evento de interrupção sustentada, conforme definição presente na recomendação IEEE Std 1159, sendo que este tipo de interrupção ou descontinuidade no fornecimento de energia elétrica apresenta duração acima de 1 minuto.

Algumas características típicas de uma interrupção, descritas pela IEEE Std 1159 incluem uma queda de tensão, interrompendo o fornecimento de energia elétrica para a rede. Portanto, destaca-se que para esta estrutura de rede com geração e armazenamento distribuídos na Ilha das Onças, ao contrário de uma estrutura de rede convencional com geração centralizada, a ocorrência de desconexão de um dado subsistema não causa a interrupção no fornecimento de energia elétrica para as cargas daquele subsistema, visto que outros subsistemas poderão atender a demanda. Nesse caso, a saída de um subsistema ocasiona, consequentemente, uma redução no nível de tensão da rede no ponto próximo ao subsistema desconectado.

Para o evento observado em ambos os casos, tem-se como causa o corte do controlador de carga por baixa tensão nos bancos de baterias (em 22,2 V ou 0,92 p.u.).

É interessante destacar que as cargas adaptadas com a utilização de conversores c.c.-c.c. e que são empregadas na NDCC em Ilha das Onças, como exemplo, lâmpadas de LED,

roteador de *internet* adaptado, dentre outros, mantêm o funcionamento, apesar da desconexão do subsistema local. No entanto, cargas como inversores utilizados para suprimento de cargas convencionais em c.a., como exemplo, aparelhos de TV, têm um impacto no funcionamento, devido à diminuição do nível de tensão na entrada do inversor. Para o inversor, geralmente, tem-se a interrupção da operação do equipamento, visto que ele necessita de um valor mínimo de tensão c.c. para operação.

Contudo, algumas cargas em c.c. também são afetadas pela variação do nível de tensão, como, exemplo, os motores c.c. com o acoplamento direto à rede, presentes nas residências conectadas na NDCC na Ilha das Onças. Para a diminuição do nível de tensão da NDCC, tem-se uma diminuição na rotação do motor.

O evento de interrupção sustentada nos subsistemas apresentados tende a ocorrer com maior frequência em períodos de baixo recurso solar, como em estações chuvosas, visto que para os casos apresentados neste capítulo o evento decorreu devido ao nível de tensão baixo nos bancos de baterias, ocasionando a desconexão do barramento de carga do controlador do subsistema.

Uma forma de mitigar as interrupções sustentadas, porém não recomendada, está na programação de alguns dos controladores de carga, diminuindo-se o valor configurado de tensão para a desconexão do barramento de carga por baixa tensão do banco de baterias do subsistema. No entanto, para este último caso, o próprio banco de baterias submetido a esta mudança no *setup* poderia sofrer maior dano, reduzindo sua vida útil devido à operação com uma maior profundidade de descarga. Além disso, haveria impacto no nível de tensão da rede de distribuição.

Desse modo, uma forma mais relevante de mitigar as desconexões dos subsistemas para a rede, caracterizadas como interrupções sustentadas, está no aumento da capacidade do banco de baterias dos subsistemas, a fim de suprir o consumo local ou mesmo das cargas em outras residências, por exemplo, próximas ao dado subsistema, sem com que o banco de baterias atinja o nível de tensão para o controlador de carga realizar a desconexão automática de sua saída para a carga.

CONCLUSÕES

Este trabalho compreendeu uma análise de eventos de QEE presentes em sistemas supridos em corrente contínua, tomando-se como avaliação experimental a detecção de eventos de QEE em duas nanorredes de distribuição em corrente contínua, localizadas no GEDAE/UFPA em Belém-PA e na Ilha das Onças em Barcarena-PA.

Como ainda não há normativas com limites para indicadores de QEE para estes tipos de sistemas, buscou-se caracterizar e classificar os eventos utilizando como referência o padrão IEEE – Std 1159. A presença de eventos de QEE no lado de corrente contínua ocorreu sob distintas condições operacionais a respeito da variação do recurso solar, nos ensaios realizados na NDCC do GEDAE/UFPA e para um dado estudo de caso na NDCC de Ilha das Onças.

No desenvolvimento do presente trabalho, os bancos de cargas acionados nos ensaios realizados na NDCC do GEDAE/UFPA, puderam empregar equipamentos comerciais e de naturezas distintas, sendo compostos por lâmpadas, inversor e carga resistiva, assim também, pôde-se utilizar componentes com diferentes demandas entre cada banco de carga.

As aferições dos eventos de QEE, para a NDCC do GEDAE/UFPA, mostraram a presença de variações de longa duração, como sobretensão em todos os ensaios realizados, tanto no ponto de conexão das cargas quanto no ponto de conexão à rede na saída de cada SGA.

Em horários com recurso solar disponível, registraram-se eventos de sobretensão em alguns momentos. Em horários com a indisponibilidade da geração fotovoltaica, o nível de tensão nos pontos de conexão das cargas e SGAs estiveram abaixo de 1,1 p.u., sendo que tensões RMS acima deste valor são consideradas como sobretensão, conforme IEEE Std 1159. O aumento de tensão na NDCC é esperado, visto que não há mecanismos de controle para regulação do nível de tensão da rede elétrica. Desse modo, a tensão na NDCC é tida como bastante dinâmica, dependendo, principalmente, do nível de tensão dos bancos de baterias.

Os eventos transitórios registrados durante os ensaios na NDCC do GEDAE/UFPA foram aferidos devido ao acionamento de conversores c.c.-c.c. de cargas do BC1, os quais mostraram elevadas magnitudes, principalmente para o ponto de conexão da rede em que a carga foi acionada, mas o evento ocorreu durante curto intervalo, não causando impactos na operação das demais cargas acionadas.

Um evento de QEE não definido no padrão IEEE – Std 1159 e verificado nos ensaios realizados foi a ondulação (*ripple*) de tensão. A presença de ondulação na corrente e tensão trouxe maior ineficiência na operação da NDCC, com aumento de potência não ativa circulante na rede quanto maior a magnitude da ondulação.

Para NDCC da Ilha das Onças foram aferidos eventos de longa duração, caracterizados como interrupção sustentada. Para a desconexão de parte dos subsistemas não houve impacto no suprimento de cargas com conversores c.c.-c.c., porém se verificou maior impacto para cargas como inversor, devido à diminuição do nível de tensão. Para a ocorrência de desconexão de todos os subsistemas, teve-se de fato a interrupção no fornecimento de energia para as cargas conectadas à rede.

Por fim, considerando os resultados apresentados neste trabalho com a ocorrência de eventos de qualidade de energia, pode-se atentar para a busca de mecanismos para mitigação de seus efeitos, a fim de que não haja a queima ou mau funcionamento de componentes presentes na NDCC.

Ademais, enfatiza-se que as aplicações de redes em corrente contínua de pequeno porte apresentam-se como vantajosas em localidades isoladas, como comunidades ribeirinhas ou afastadas de grandes centros urbanos, em virtude da eficiência e da disponibilidade energética associadas ao suprimento.

Como propostas de trabalhos futuros, podem-se citar:

- Mitigação do evento de QEE sobretensão na NDCC, empregando conversores c.c.-c.c. para a regulação da tensão da rede;
- Avaliação de uma metodologia para pré-carga ou *soft-start* de conversores c.c.-c.c. empregados nas cargas e avaliação experimental do impacto na rede elétrica;
- Avaliação de QEE em MDCC instaladas com configurações distintas e de maiores dimensões;
- Avaliação de indicadores de QEE utilizando diferentes normas e padrões, além de proposição de indicadores de QEE apropriados para MDCC;
- Realização de análises de QEE em MDCC interligada com MDCA, nesse caso, empregando microrredes denominadas de híbridas.

REFERÊNCIAS

Agência Nacional de Energia Elétrica – ANEEL **Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no sistema elétrico nacional**. PRODIST. Módulo 8 – Qualidade da Energia Elétrica. 2011.

Agência Nacional de Energia Elétrica – ANEEL **Geração**. Brasília, DF: Disponível em: <https://www.gov.br/aneel/pt-br/centrais-de-conteudos/136geração136os-e-indicadores/136geração>. Acesso em: 19 de Janeiro de 2022.

ARAÚJO, L. F. **Desenvolvimento de Ferramentas Laboratoriais para Ensaios Automatizados de Inversores Autônomos**. Trabalho de Conclusão de Curso (TCC). (2019). Belém, Pará, Brasil: UFPA.

AUGUSTINE, S.; MISHRA M. K.; LAKSHMINARASAMMA, N. **Adaptive Droop Control Strategy for Load Sharing and Circulating Current Minimization in Low-Voltage Standalone DC Microgrid**. In IEEE Transactions on Sustainable Energy, vol. 6, no. 1, pp. 132-141, Jan. 2015, doi: 10.1109/TSTE.2014.2360628.

BARROS, J.; APRÁIZ, M.; DIEGO, R.I. **Power Quality in DC Distribution Networks**. Energies 2019, 12, 848. <https://doi.org/10.3390/em12050848>.

CABRAL, F. E.; GALHARDO, M. A. B. **Avaliação de Desempenho Operacional da Geração e Armazenamento Distribuídos em uma Nanorrede em Corrente Contínua**. Relatório Parcial de Pesquisa. Universidade Federal do Pará. Pará, 2022.

CAMILO, J. L.; INÁCIO, J. Y. O.; RIDER, M. J.; POMILIO, J. A.; SILVA, L. C. P.; BENTO, R. G. **Objetivos e Desafios do Projeto de P&D MERGE: Microgrids for Efficient, Reliable and Greener Energy**. In Anais do Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos 2020. Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos – SBSE2020. Sbabra. <https://doi.org/10.48011/sbse.v1i1.2313>.

CCSA. YD/T 2378-2011: **Technical Requirements and Test Methods for Lead-Acid Batteries Used in Communication**. China Communications Standards Association, 2011.

CCSA. YD/T 2556-2013: **Technical Requirements and Test Methods for Solar Photovoltaic Power Supply Equipment for Communication Base Stations**. China Communications Standards Association, 2013.

CCSA. YD/T 3091-2016: **Technical Requirements and Test Methods for Power Supply Equipment of Communication Network**. China Communications Standards Association, 2016.

EMERGE ALLIANCE **An open industry association. Leader in promoting the greater use of DC and hybrid AC/DC microgrids & power systems**. <https://www.emergealliance.org/about/vision/>. Acesso em 20 de Fevereiro de 2023.

Empresa de Pesquisa Energética – EPE **O mercado fotovoltaico brasileiro está amadurecendo mais rápido que o esperado**. <https://www.epe.gov.br/pt/imprensa/epe-na-midia/o-mercado-fotovoltaico-brasileiro-esta-amadurecendo-mais-rapido-que-o-esperado>
Acesso em: 01 de Fevereiro de 2023.

ETSI. ETSI EN 300 132-3-1: **Electromagnetic compatibility and Radio spectrum Matters (ERM); Land Mobile Service; Radio equipment with an internal or external RF connector intended primarily for analogue speech; Part 3-1: Harmonized EN covering essential requirements of article 3.2 of Directive 2014/53/EU; Sub-part 3: Technical characteristics and methods of measurement**. European Telecommunications Standards Institute, 2018.

IEEE. **IEEE Recommended Practice for 1 kV to 35 kV Medium-Voltage DC Power Systems on Ships** in IEEE Std 1709-2018 (Revision of IEEE Std 1709-2010), vol., no., pp.1-54, 7 Dec. 2018, doi: 10.1109/IEEESTD.2018.8569023.

IEEE. **IEEE Recommended Practice for the Design of DC Auxiliary Power Systems for Generating Systems**. IEEE Std 946-2004 (Revision of IEEE Std 946-1992). Pp. 1-40. 8 Junho 2005. DOI: 10.1109/IEEESTD.2005.96206.

IEEE. **IEEE Recommended Practice for the Design of DC Power Systems for Stationary Applications**. IEEE Std 946-2020 (Revision of IEEE Std 946-2004). Pp. 1-74. 23 Setembro 2020. DOI: 10.1109/IEEEESTD.2020.9206101.

IEEE. **IEEE Standard for DC Microgrids for Rural and Remote Electricity Access Applications**. IEEE Std 2030.10-2021. Pp. 1-47. 15 Dez. 2021. DOI: 10.1109/IEEEESTD.2021.9646866.

IEEE. **IEEE Standard for Interconnection and Interoperability of Distributed Energy Resources with Associated Electric Power Systems Interfaces**. IEEE Std 1547-2018 (Revision of IEEE Std 1547-2003). Pp. 1-138. 6 Abril 2018. DOI: 10.1109/IEEEESTD.2018.8332112.

IEEE. **IEEE Standard Definitions for the Measurement of Electric Power Quantities Under Sinusoidal, Nonsinusoidal, Balanced, or Unbalanced Conditions**. In IEEE Std 1459-2010 (Revision of IEEE Std 1459-2000), vol., no., pp.1-50, 19 March 2010, doi: 10.1109/IEEEESTD.2010.5439063.

INAMORI, J.; HOSHI, H.; TANAKA, T.; BABASAKI T.; HIROSE, K. **380-VDC power distribution system for 4-MW-scale cloud facility**. 2014 IEEE 36th International Telecommunications Energy Conference (INTELEC), 2014, pp. 1-8, doi: 10.1109/INTLEC.2014.6972218.

IRENA. **Quality Infrastructure for Smart Mini-grids**. Abu Dhabi: International Renewable Energy Agency, 2020.

ITU-T. ITU-T L.1200: **Environmental Impact Reduction (EIR) for Mobile Devices**. International Telecommunication Union, May. 2012.

ITU-T. ITU-T L.1201: **Energy Efficiency for Telecommunication Network Equipment**. International Telecommunication Union, Mar. 2014.

ITU-T. ITU-T L.1202: **Energy Efficiency Metrics and Measurement for TSG Equipment**. International Telecommunication Union, Apr. 2015.

JITHIN, K.; HARIDEV, P. P.; MAYADEVI, N.; KUMAR R. H.; MINI, V. P. **A Review on Challenges in DC Microgrid Planning and Implementation.** In Journal of Modern Power Systems and Clean Energy, doi: 10.35833/MPCE.2022.000053.

JOHNSON, K. E. A. **Direct Current as an Integrating Platform for ZNE Buildings with Evs and Storage: DC Direct Systems – A Bridge to a Low Carbon Future?** Lawrence Berkeley National Laboratory. 2016. <https://doi.org/10.7941/S9Z03B>.

KUMAR, D.; ZARE F.; GHOSH, A. **DC Microgrid Technology: System Architectures, AC Grid Interfaces, Grounding Schemes, Power Quality, Communication Networks, Applications, and Standardizations Aspects** in IEEE Access, vol. 5, pp. 12230-12256, 2017, doi: 10.1109/ACCESS.2017.2705914.

LEE, J.; SON, S.; OH-Y. E.; KIM T. H.; KIM, J. Y. **Load monitoring effects and characteristics of DC home** 2018 IEEE International Conference on Consumer Electronics (ICCE), 2018, pp. 1-2, doi: 10.1109/ICCE.2018.8326286.

MANITO, A. R. A. **Modelagem do controle e avaliação de sistemas híbridos de geração e minirredes de distribuição de energia elétrica.** 2018. Tese (Doutorado em Energia) – Instituto de Energia e Meio Ambiente, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2018. Doi:10.11606/T.106.2018.tde-01082018-093141. Acesso em: 03 agosto de 2022.

MISHRA, M.; PATNAIK, B.; BISWAL, M.; HASAN, S.; BANSAL, R. C. **A systematic review on DC-microgrid protection and grounding techniques: Issues, challenges and future perspective.** In Applied Energy (Vol. 313, p. 118810). (2022). Elsevier BV. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2022.118810>.

OPIYO, N. N. **A comparison of DC- versus AC-based minigrids for cost-effective electrification of rural developing communities.** In Energy Reports (Vol. 5, pp. 398–408). (2019). Elsevier BV. <https://doi.org/10.1016/j.egy.2019.04.001>.

PIKA ENERGY. **Fabricação de Semicondutores de Energia Renovável.** <http://www.pika-energy.com/>. Acesso em 20 de Fevereiro de 2023

RODRIGUEZ-DIAZ, E. F.; CHEN, J. C.; VASQUEZ, J. M.; GUERRERO, R.; BURGOS; BOROYEVICH, D. **Voltage-Level Selection of Future Two-Level LVDC Distribution Grids: A Compromise Between Grid Compatibility, Safety, and Efficiency** in IEEE Electrification Magazine, vol. 4, no. 2, pp. 20-28, June 2016, doi: 10.1109/MELE.2016.2543979.

STRZABALA, P.; WCISLIK, M. **Impact of the Ripple Output Voltage of the Bridge Rectifier on the Equivalent Parameters of the AC Circuit in Continuous Mode**. 2018 Progress in Applied Electrical Engineering (PAEE), Koscielisko, Poland, 2018, pp. 1-7, doi: 10.1109/PAEE.2018.8441138.

UNIÃO EUROPEIA. **Diretiva 2006/95/EC do Parlamento Europeu e do Conselho de 12 de dezembro de 2006 Relativa à Harmonização das Legislações dos Estados-Membros no Domínio do Material Elétrico Destinado a ser Utilizado Dentro de Certos Limites de Tensão**. 2006. Disponível em: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/PT/TXT/?uri=CELEX:32006L0095>. Acesso em: 18 fev. 2023.

VAN DEN BROECK, G.; STUYTS, J.; DRIESEN, J. **A Critical Review of Power Quality Standards and Definitions Applied to DC Microgrids**. Appl. Energy 2018, 229, 281–288.

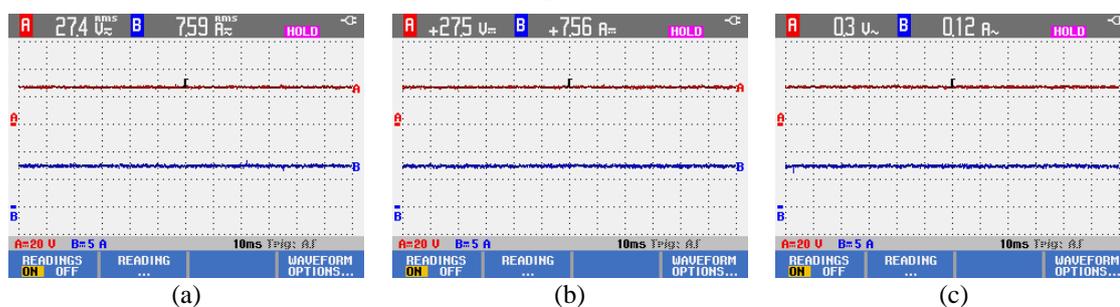
WANG, H.; TIAN, J. YAN, J. WANG F. ZHUO, F. **Definition and influencing factors of power quality in DC microgrids**. 2021 IEEE 4th International Electrical and Energy Conference (CIEEC), 2021, pp. 1-5, doi: 10.1109/CIEEC50170.2021.9510638.

WHAITE, S.; GRAINGER, B.; KWASINSKI, A. **Power Quality in DC Power Distribution Systems and Microgrids**. Energies 2015, 8, 4378-4399. <https://doi.org/10.3390/em8054378>.

APÊNDICE A – ENSAIOS PARA COMPARAÇÕES DE REGISTROS ENTRE OSCILOSCÓPIO DIGITAL E CONTROLADOR DE CARGA

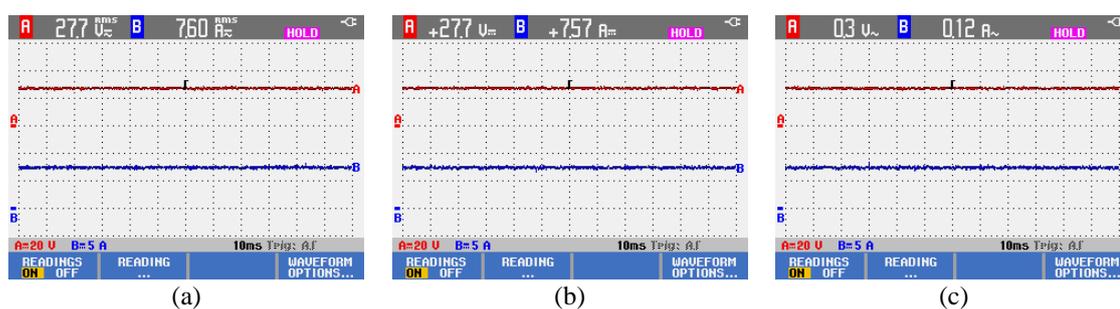
Nas Figuras A1, A.2 e A.3 mostram-se, para o ensaio de potência constante, as formas de onda de tensão e corrente obtidas utilizando o osciloscópio digital com cálculo do valor RMS na parte superior considerando a presença das componentes c.a. e c.c., somente a componente c.c. e somente a componente c.a., respectivamente, para o barramento do banco de baterias, carga e do gerador fotovoltaico.

Figura A.1 - Forma de onda de tensão e corrente no banco de baterias, com a indicação do valor RMS na parte superior considerando a presença: (a) das componentes c.a. e c.c., (b) somente da componente c.c. e (c) somente da componente c.a.



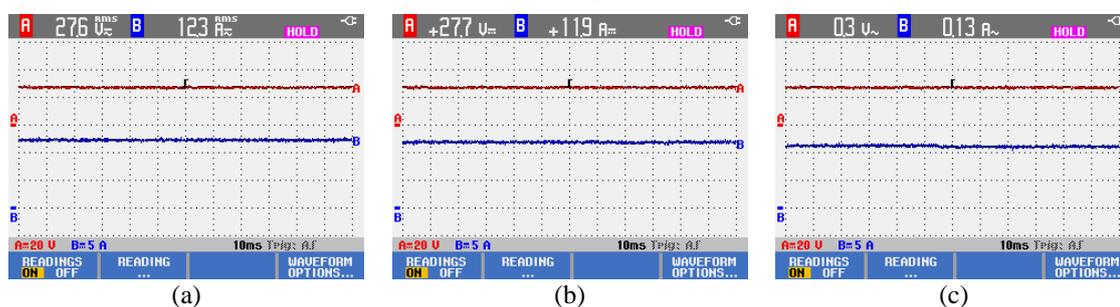
Fonte: Captura de tela do osciloscópio digital.

Figura A.2 - Forma de onda de tensão e corrente na carga, com a indicação do valor RMS na parte superior considerando a presença: (a) das componentes c.a. e c.c., (b) somente da componente c.c. e (c) somente da componente c.a.



Fonte: Captura de tela do osciloscópio digital.

Figura A.3 - Forma de onda de tensão e corrente no gerador fotovoltaico, com a indicação do valor RMS na parte superior considerando a presença: (a) das componentes c.a. e c.c., (b) somente da componente c.c. e (c) somente da componente c.a.



Fonte: Captura de tela do osciloscópio digital.

Nas Figura A.5, A.6 e A.7 mostram-se o gráfico dos valores obtidos a cada segundo pelo protótipo utilizando a plataforma Arduino, referentes as medidas de tensão e corrente para a carga, o banco de baterias e o gerador fotovoltaico, respectivamente.

Figura A.5 - Forma de onda obtida no terminal da carga do controlador.

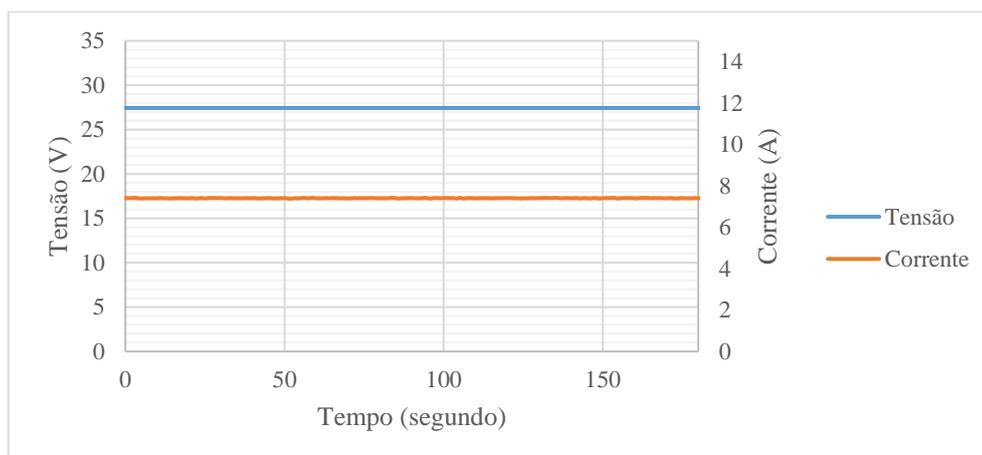


Figura A.6 - Forma de onda obtida no terminal do banco de baterias do controlador.

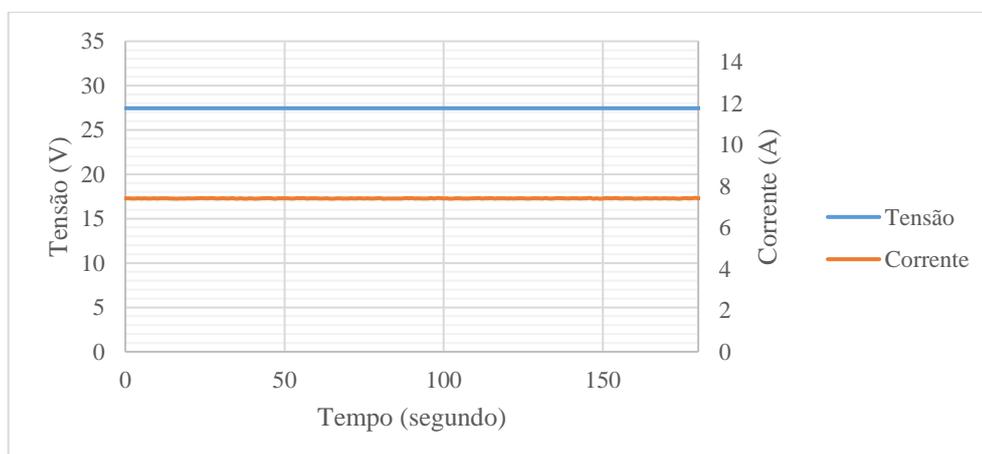
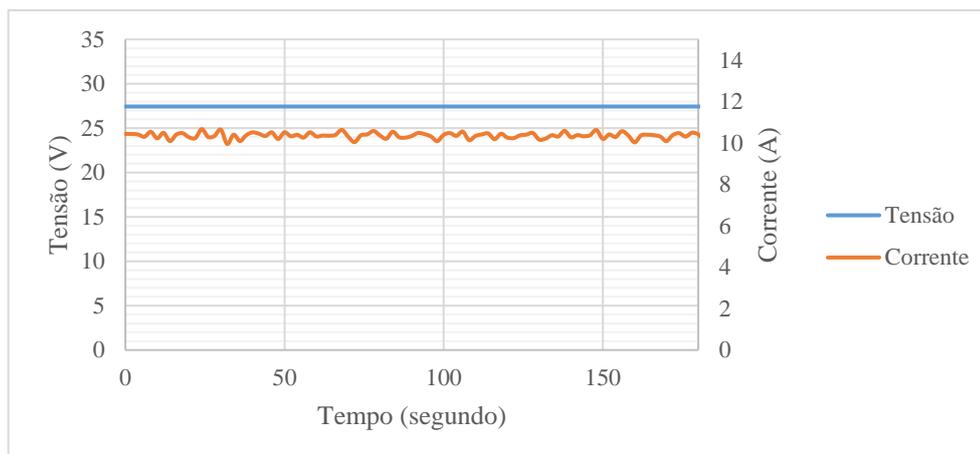


Figura A.7 - Forma de onda obtida no terminal do gerador fotovoltaico do controlador.

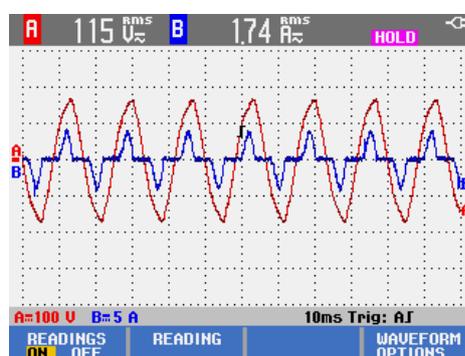


Na Tabela A.1 constam os parâmetros elétricos medidos na saída do inversor para o ensaio considerando a presença de ondulação (*ripple*) de tensão no lado c.c. Na Figura A.8 apresenta-se a forma de onda da tensão de suprimento pelo inversor e da corrente da carga empregada.

Tabela A.1 - Parâmetros elétricos da carga durante ensaio com ondulação de tensão.

Parâmetro Elétrico	Carga
Corrente eficaz (I_{rms})	1,75 A_{rms}
Tensão eficaz (V_{rms})	114,22 V_{rms}
Potência aparente (S)	200,19 VA
Potência ativa (P)	149,92 W
Potência não ativa (Na)	132,51 VAr
FP	0,75

Figura A.8 - Forma de onda de tensão e corrente da carga.

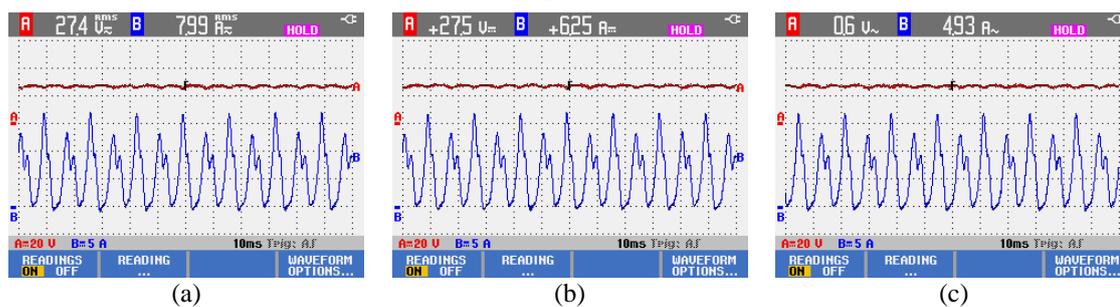


Fonte: Captura de tela do osciloscópio digital.

Nas Figura A.9, A.10 e A.11 ilustram-se para o ensaio de ondulação de tensão, as formas de onda de tensão e corrente obtidas utilizando o osciloscópio digital com cálculo do valor RMS

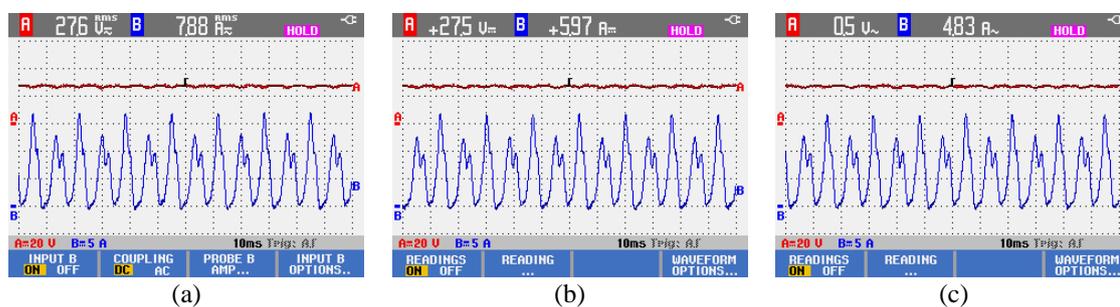
na parte superior considerando a presença das componentes c.a. e c.c., somente a componente c.c. e somente a componente c.a., respectivamente, para o barramento do banco de baterias, carga e do gerador fotovoltaico.

Figura A.9 - Forma de onda de tensão e corrente no banco de baterias, com a indicação do valor RMS na parte superior considerando a presença: (a) das componentes c.a. e c.c., (b) somente da componente c.c. e (c) somente da componente c.a.



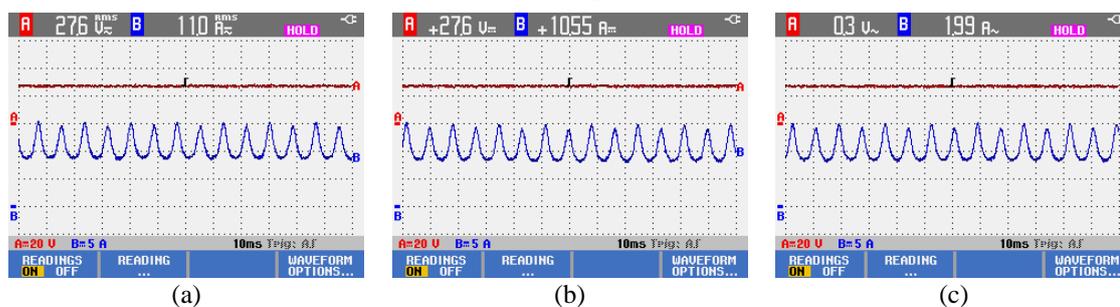
Fonte: Captura de tela do osciloscópio digital.

Figura A.10 - Forma de onda de tensão e corrente na carga, com a indicação do valor RMS na parte superior considerando a presença: (a) das componentes c.a. e c.c., (b) somente da componente c.c. e (c) somente da componente c.a.



Fonte: Captura de tela do osciloscópio digital.

Figura A.11 - Forma de onda de tensão e corrente no gerador fotovoltaico, com a indicação do valor RMS na parte superior considerando a presença: (a) das componentes c.a. e c.c., (b) somente da componente c.c. e (c) somente da componente c.a.



Fonte: Captura de tela do osciloscópio digital.

Nas Figura A.12, A.13 e A.14 mostram-se o gráfico dos valores obtidos a cada segundo pelo protótipo utilizando a plataforma Arduino, referentes as medidas de tensão e corrente para a carga, o banco de baterias e o gerador fotovoltaico, respectivamente.

Figura A.12 - Forma de onda registrada pelo controlador de carga no barramento da carga.

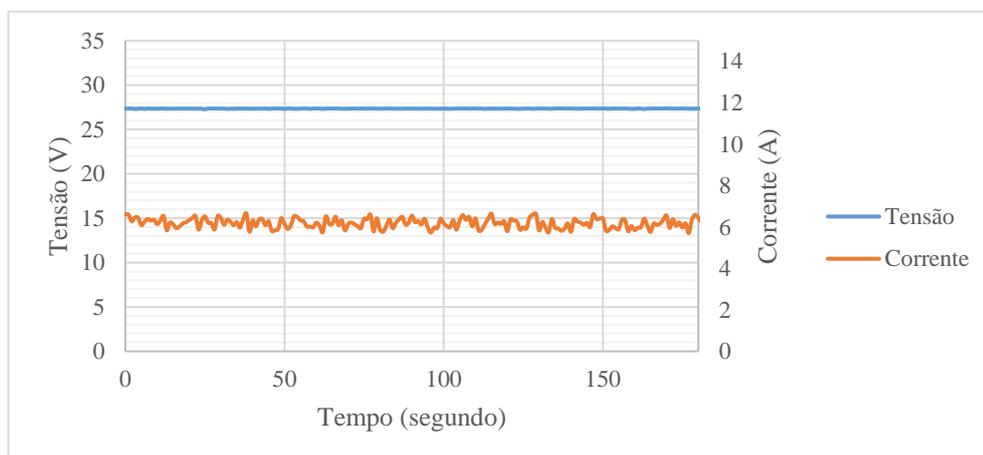


Figura A.13 - Forma de onda registrada pelo controlador de carga no barramento do banco de baterias.

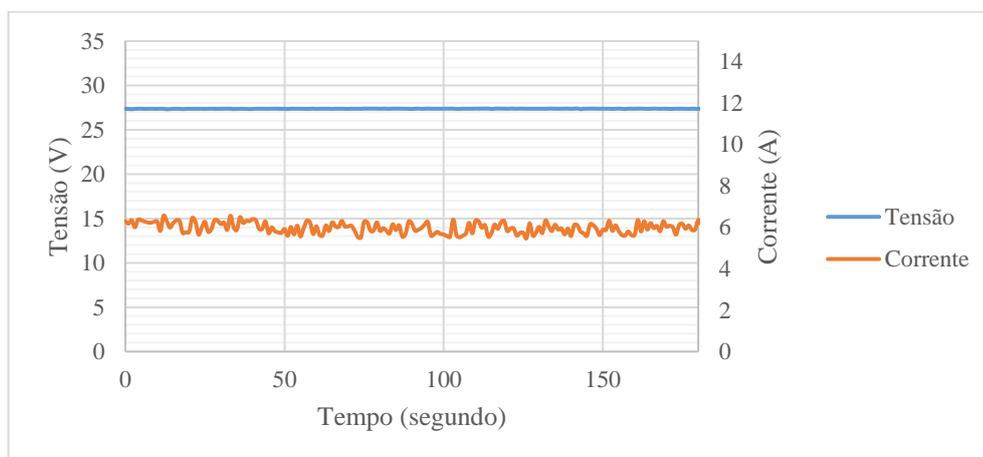
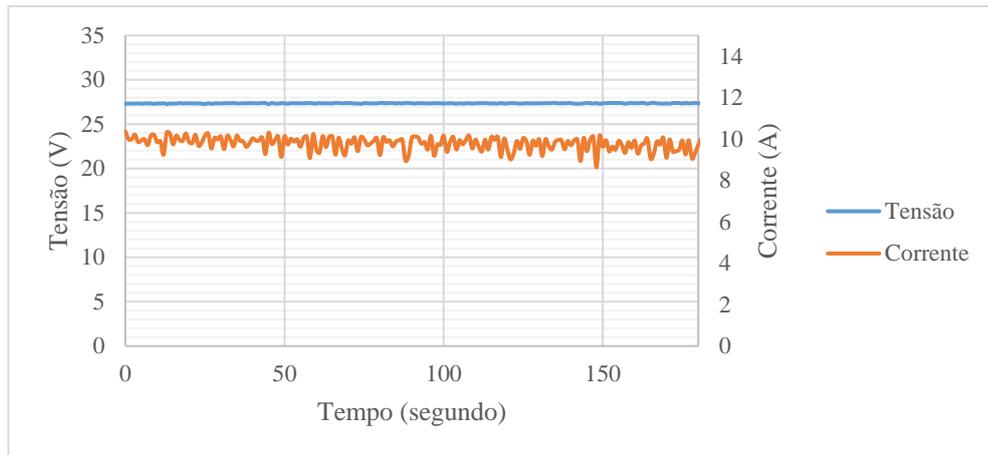


Figura A.14 - Forma de onda registrada pelo controlador de carga no barramento do gerador fotovoltaico.

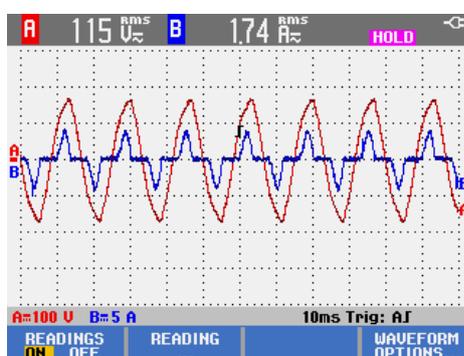


APÊNDICE B – CARREGAMENTO DO INVERSOR PARA OS ENSAIOS NA NDCC DO GEDAE/UFPA

Tabela B.1 – Parâmetros elétricos das configurações de carga utilizada para o BC3 durante os ensaios.

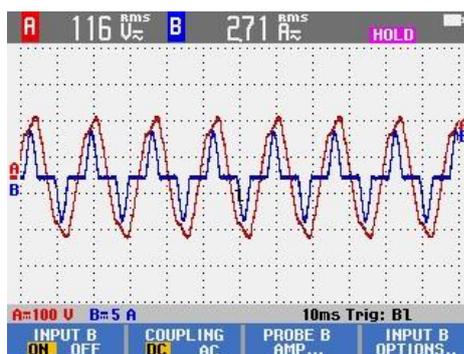
Parâmetro Elétrico	Carregamento 1	Carregamento 2	Carregamento 3
Corrente eficaz (I_{rms})	1,75 A _{rms}	2,76 A _{rms}	3,52 A _{rms}
Tensão eficaz (V_{rms})	114,22 V _{rms}	115,66 V _{rms}	112,08 V _{rms}
Potência aparente (S)	200,19 VA	319,23 VA	394,04 VA
Potência ativa (P)	149,92 W	236,02 W	335,98 W
Potência não ativa (Na)	132,51 VAr	214,95 VAr	205,86 VAr
FP	0,75	0,74	0,85

Figura B.1 - Forma de onda no lado c.a. referente ao carregamento 1.



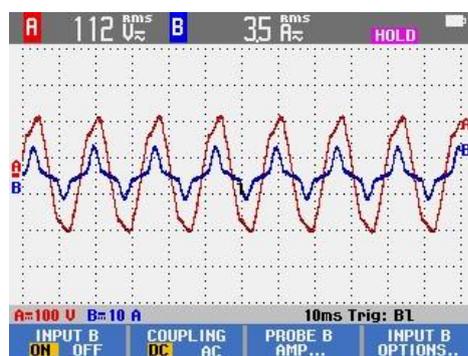
Fonte: Captura de tela do osciloscópio digital.

Figura B.2 - Forma de onda no lado c.a. referente ao carregamento 2.



Fonte: Captura de tela do osciloscópio digital.

Figura B.3 - Forma de onda no lado c.a. referente ao carregamento 3.



Fonte: Captura de tela do osciloscópio digital.

APÊNDICE C – OPERAÇÃO DOS SGA DURANTE OS ENSAIOS NA NDCC DO GEDAE/UFPA

Para o ensaio I (realizado em 02/12/2022), a Figura C.1 ilustra os valores de potência ativa obtidos pelo registrador de dados do controlador de carga, fornecida por cada SGA para o suprimento da NDCC ao longo do dia. De modo geral, houve uma contribuição semelhante dos SGA da madrugada até às 7h00, no período do início do dia com 30 W, 28,8 W e 25 W, referente à contribuição dos SGA 1, 2 e 3, respectivamente.

No início das 8h00 houve contribuição dos SGA, com 70,9 W, 63,4 W e 63,1 W referente aos SGA 1, 2 e 3, respectivamente.

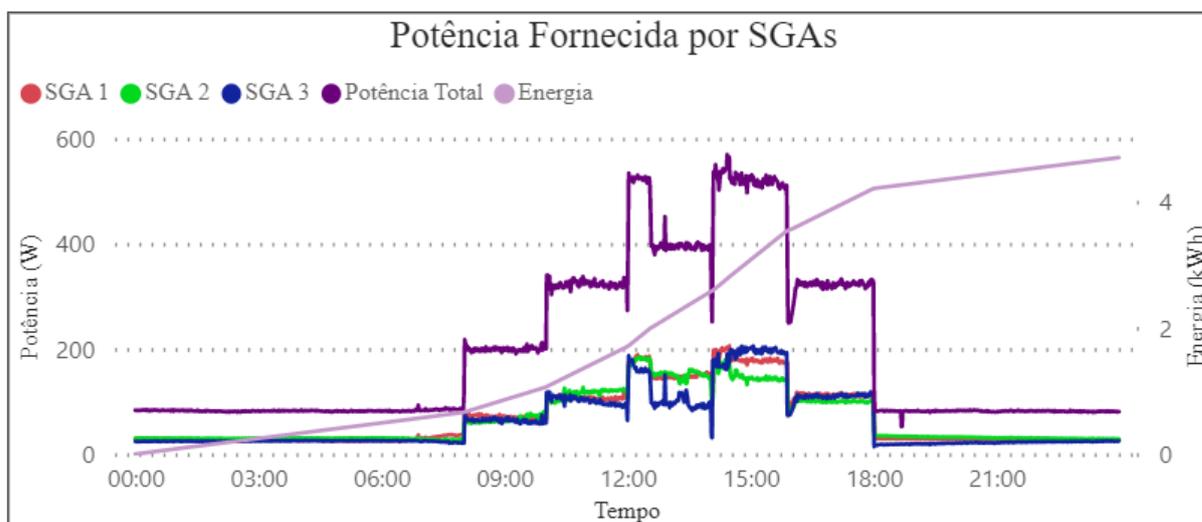
No horário das 10h00 registrou-se valores de 106 W, 116,3 W e 106 W de contribuição dos respectivos SGA 1, 2 e 3.

No horário de 12h00 registrou-se um valor de potência de 173,5 W, 168,9 W e 179 W, referente à contribuição dos SGA 1, 2 e 3, respectivamente. Às 12h32 houve uma queda no total de potência injetada para rede de 130 W, o qual impactou mais na contribuição do SGA 3 com uma diminuição de 66 W.

No horário das 15h00 registrou-se uma contribuição de potência de cada SGA mais distinta com 177 W, 142 W e 200 W para os SGA 1, 2 e 3, respectivamente.

Por fim, no horário de 17h00 registrou-se uma contribuição de 111,3 W, 99,8 W e 107 W para os SGA 1, 2 e 3, respectivamente. Ao final do dia teve-se um valor de energia fornecida para NDCC de 4,7 kWh.

Figura C.1 - Potência fornecida por cada SGA para o suprimento da NDCC no ensaio I.



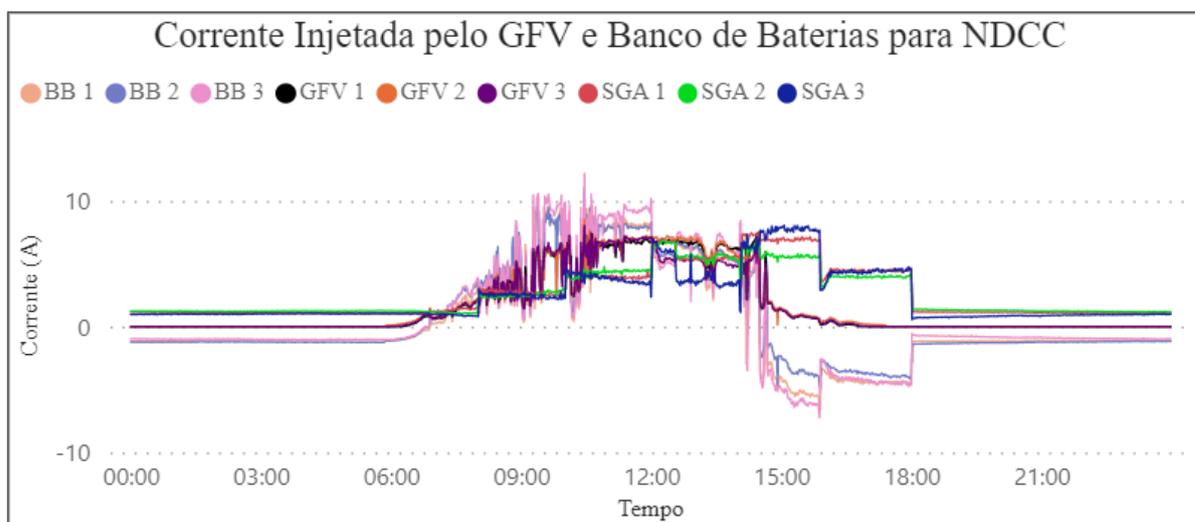
Fonte: Captura de tela da ferramenta desenvolvida em Power BI.

A Figura C.2 ilustra os valores de corrente fornecida pelo Gerador Fotovoltaico (GFV), Banco de Baterias (BB) e injetada para NDCC por cada SGA. Em horários de indisponibilidade do recurso solar, tem-se sempre valores negativos de corrente para os bancos de baterias, indicando que os mesmos injetam corrente na NDCC para suprimento da carga. Em horários com disponibilidade do recurso solar os bancos de baterias podem ser carregados ou mesmo contribuem com o suprimento das cargas, caso haja demanda mais elevada que os GFV não consigam suprir.

A Figura C.2 ilustra uma condição de operação na qual houve suprimento das cargas pelos bancos de baterias durante a noite, madrugada e início da manhã, com valores injetados próximos de 1,05 A, 1,25 A e 1,02 A para o BB 1, 2 e 3, respectivamente.

A partir das 6h55 houve o suprimento da NDCC por parte dos GFV, tanto para atendimento das cargas quanto para carregamento dos bancos de baterias, até o horário das 14h30, onde novamente teve a maior parte do atendimento da NDCC pelos bancos de baterias, alcançando valores de 5,5 A, 3,8 A e 6,2, referentes aos BB 1, 2 e 3, respectivamente.

Figura C.2 - Corrente injetada pelos GFVs e BBs para NDCC do ensaio I.



Fonte: Captura de tela da ferramenta desenvolvida em Power BI.

Para o ensaio II (realizado em 04/12/2022), na Figura C.3 mostram-se os gráficos de potência ativa obtidos pelo registrador de dados do controlador de carga, fornecida por cada SGA para o suprimento da NDCC ao longo do segundo dia de ensaios. Para este dia, de modo geral, houve uma contribuição semelhante dos SGA no período da madrugada e início do dia,

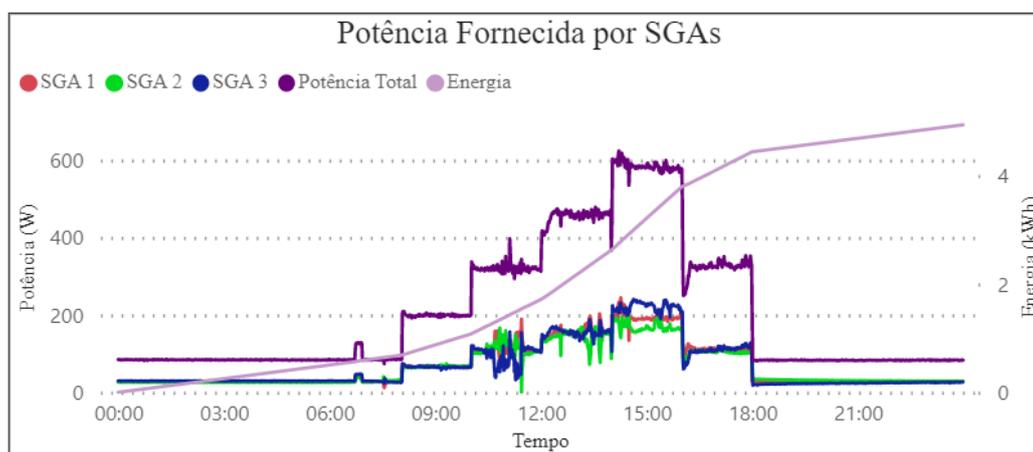
até o horário das 7h00, com 28,0 W, 28,1 W e 28,0 W referente aos SGA 1, 2 e 3, respectivamente.

No horário das 8h00 tem-se uma contribuição dos SGA, nesse caso, com 64,0 W, 66,0 W e 67,1 W para os SGA 1, 2 e 3, respectivamente. Das 10h00 às 12h00 registrou-se uma maior variação na contribuição de cada SGA, ao suprimento da rede, principalmente para o SGA3.

No horário das 12h00 às 14h00 houve uma contribuição semelhante dos SGA às cargas, com 155,2 W, 156,6 W e 151,4 W para o SGA 1, 2 e 3, respectivamente.

No horário das 15h00 houve o pico de demanda de 616 W na curva de carga, com contribuição distinta por SGA, registrando-se 233,3W, 184,1 W e 206,0 W para os SGA 1, 2 e 3, respectivamente. Ao final do dia teve-se um valor de energia fornecida de 4,9 kWh.

Figura C.3 - Potência fornecida por cada SGA ao suprimento da NDCC do ensaio II.

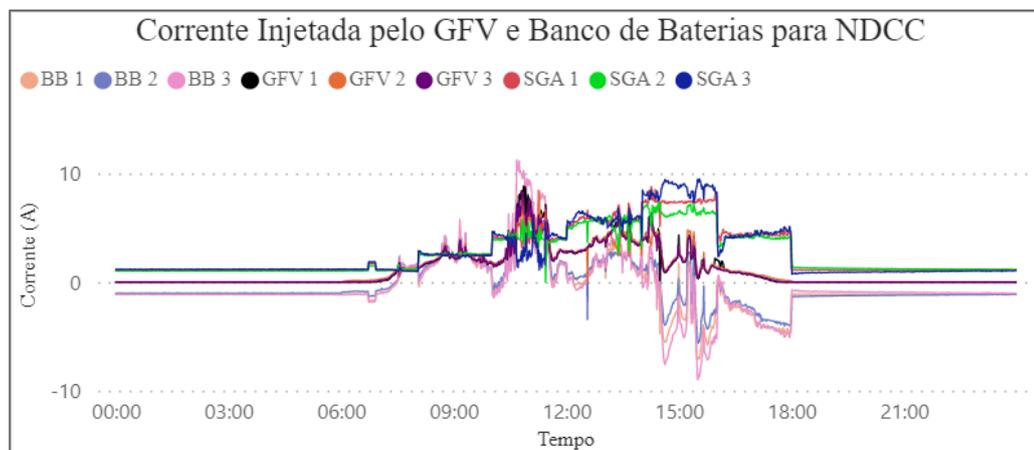


Fonte: Captura de tela da ferramenta desenvolvida em Power BI.

A Figura C.4 ilustra os valores de corrente fornecida pelo Gerador Fotovoltaico (GFV), Banco de Baterias (BB) e injetada para NDCC por cada SGA. Em horários de indisponibilidade do recurso solar, houve o atendimento da rede por parte dos bancos de baterias, alcançando valores máximos de 8,6 A para o BB3 no horário de 15h30.

Durante o período da madrugada e noite registrou-se uma contribuição semelhante dos bancos de baterias, verificando-se os valores de 1,1 A, 1,0 A e 1,1 A para BB1, BB2 e BB3, respectivamente, no horário das 3h20. Durante o dia, nos horários 10h11, 12h23 e a partir de 14h00 houve, também, a maior parte do atendimento pelos bancos de baterias.

Figura C.4 - Corrente injetada pelos GFVs e BBs para NDCC do ensaio II.



Fonte: Captura de tela da ferramenta desenvolvida em Power BI.

Para o ensaio III (realizado em 07/12/2022), do mesmo modo que os ensaios anteriores, na Figura C.5 mostram-se os gráficos de potência ativa de cada SGA e total, verificando-se uma contribuição semelhante dos SGA ao suprimento da rede elétrica no período da madrugada e início do dia, até o horário das 7h00, com 28,1 W, 28,3 W e 28,2 W na saída dos SGA 1, 2 e 3, respectivamente.

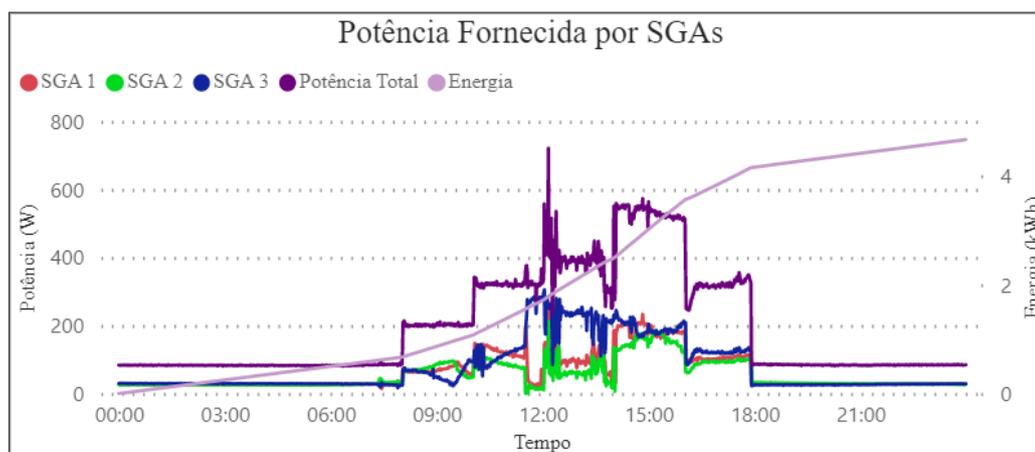
A partir das 8h00 houve uma diminuição gradual da contribuição do SGA 3, o mesmo ocorreu mais tarde para os demais SGA. O menor valor de geração registrado ocorreu às 9h30 com 80,9 W, 96,2 W e 22,6 W, referentes aos SGA 1, 2 e 3, respectivamente.

A partir das 10h00 o SGA 3 teve um aumento gradual na contribuição de potência injetada na rede, alcançando às 11h34 com valor de 276,7 W. Neste horário registrou-se o valor de 82,9 W para o SGA 1 e não houve nenhuma contribuição do SGA 2.

No horário das 12h00 houve uma maior contribuição do SGA 3 às cargas, com 127,6 W, 105,2 W e 174,1 W para o SGA 1, 2 e 3, respectivamente.

A partir das 14h00 teve-se uma contribuição gradual dos SGA, registrando-se 202,3 W, 154,2 W e 191,0 W às 15h00 e 105,4 W, 91,3 W e 119,0 W às 17h00 para os SGA 1, 2 e 3, respectivamente. Ao final do dia foi constatado uma energia fornecida de 4,6 kWh.

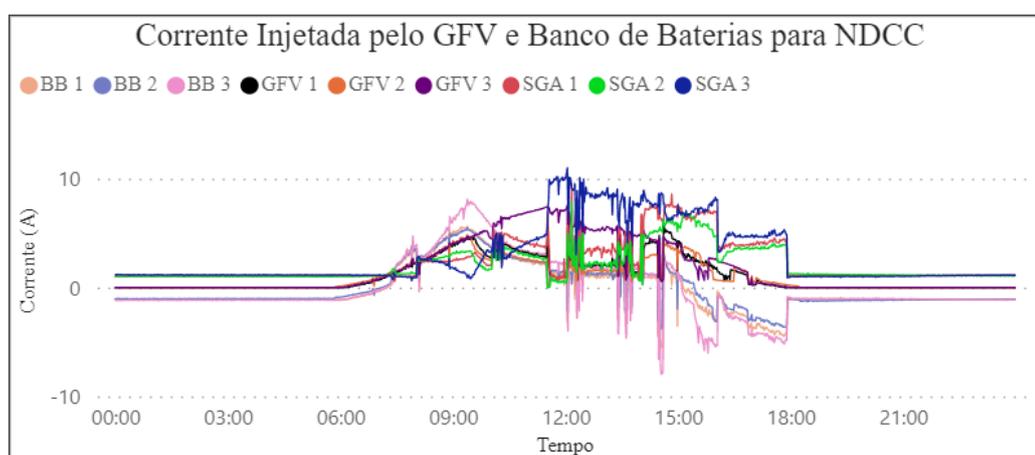
Figura C.5 - Potência fornecida por cada SGA ao suprimento da NDCC do ensaio III.



Fonte: Captura de tela da ferramenta desenvolvida em Power BI.

Na Figura C.6 é possível identificar o atendimento da rede pelos bancos de baterias, com valores de 1,1 A, 1,0 A e 1,1 A para BB 1, 2 e 3, respectivamente. No horário a partir das 6h00 houve atendimento da NDCC pelos GFV, além do carregamento dos bancos de baterias até por volta das 15h08. Nesse meio tempo houve contribuições rápidas dos bancos de baterias, no horário de 12h03, 12h19, 13h24 13h38 e 14h36.

Figura C.6 - Corrente injetada pelos GFV e BB para NDCC do ensaio III.



Fonte: Captura de tela da ferramenta desenvolvida em Power BI.

No ensaio IV (realizado em 06/02/2023), registram-se os valores de potência ativa fornecida por cada SGA para o suprimento da rede ao longo do dia, os dados foram obtidos por meio do registrador de dados do controlador de carga. Na Figura C.7 apresenta-se o perfil de variação de potência ativa (na saída de cada SGA e total).

Registrou-se, assim como nos ensaios anteriores, uma contribuição semelhante dos SGA, da madrugada até às 7h00, com 24,2 W, 28,8 W e 19,1 W para os SGA 1, 2 e 3, respectivamente. No horário das 9h00 teve-se uma maior contribuição do SGA 3, com 76,4 W, e registram-se os valores de 54,1 W e 53,2 W para os o SGA 1 e 2, respectivamente.

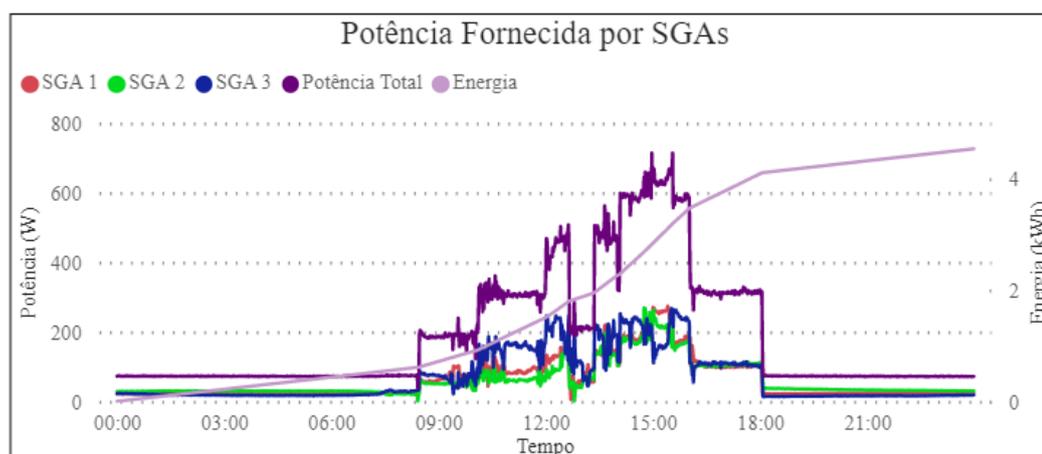
No horário das 10h00 registrou-se maior contribuição do SGA 3, com 169,3 W, os valores de potência ativa medidos para os SGA 1 e 2 foram 101,3 W e 58 W, respectivamente. No horário das 12h00 registrou-se um valor de potência ativa de 246,1 W, 131,9 W e 93,4 W, referente às contribuições ao atendimento da NDCC pelos SGA 1, 2 e 3, respectivamente.

Às 12h38 houve uma queda de 300 W no total de potência ativa injetada para a rede, resultado em uma falha na conexão de uma parte das cargas do BC3, posteriormente elas foram acionadas novamente.

A partir das 14h00 observou-se uma maior variação na potência total injetada na rede, em decorrência da variação de irradiância global, pois com uma maior variação na tensão da rede há o impacto no consumo de energia do BC2, que é uma carga puramente resistiva.

Por fim, no horário a partir das 16h00 registrou-se uma contribuição, novamente mais equilibrada entre os SGA, com o fornecimento de 103,3 W, 110,8 W e 113 W pelos SGA 1, 2 e 3, respectivamente. Ao final do dia constatou-se um valor de energia ativa fornecida para NDCC de 4,5 kWh.

Figura C.7 - Potência fornecida por cada SGA ao suprimento da NDCC do ensaio IV.

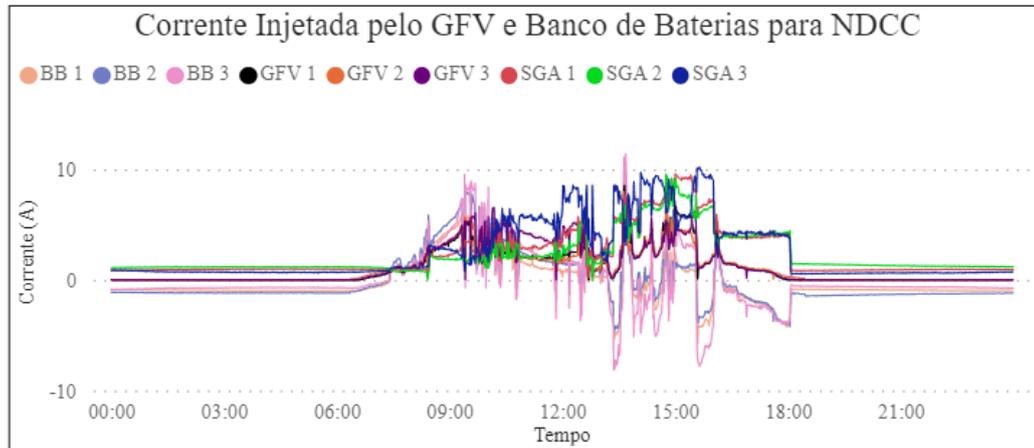


Fonte: Captura de tela da ferramenta desenvolvida em Power BI.

Na Figura C.8 ilustra-se o perfil de variação de corrente injetada pelos GFV e BB. Para este dia, em horários a partir das 13h00 foi observada maior contribuição dos bancos de baterias

ao suprimento da rede, alcançando no horário das 15h39 os valores de 1,2 A 3,4 A e 7,8 A, para os bancos de baterias 1, 2 e 4, respectivamente.

Figura C.8 - Corrente injetada pelos GFV e BB para NDCC do ensaio IV.

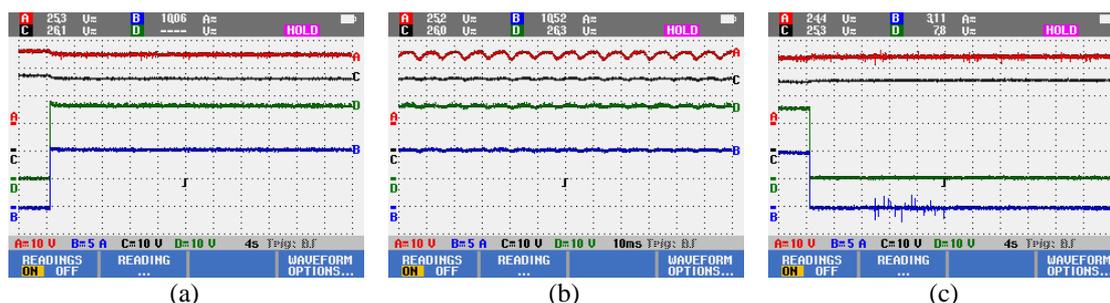


Fonte: Captura de tela da ferramenta desenvolvida em Power BI.

APÊNDICE D – REGISTRO DE FORMAS DE ONDA E MEDIÇÃO DE VALOR RMS PELO OSCILOSCÓPIO DURANTE OS ENSAIOS NA NDCC DO GEDAE/UFPA

Na Figura E.1 ilustra-se a forma de onda de tensão e corrente durante o acionamento e operação do BC2 no horário de 14h00 para o ensaio II.

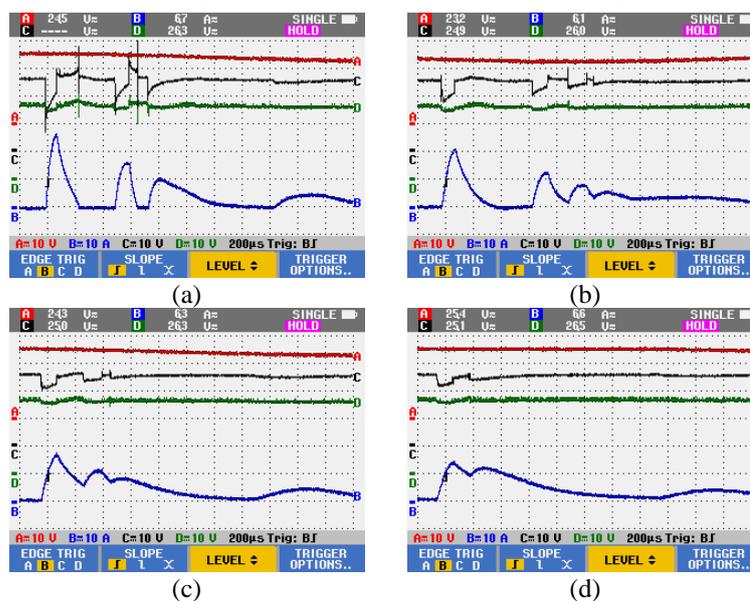
Figura E.1 - Forma de onda de tensão e corrente durante o acionamento, operação e saída do BC2.

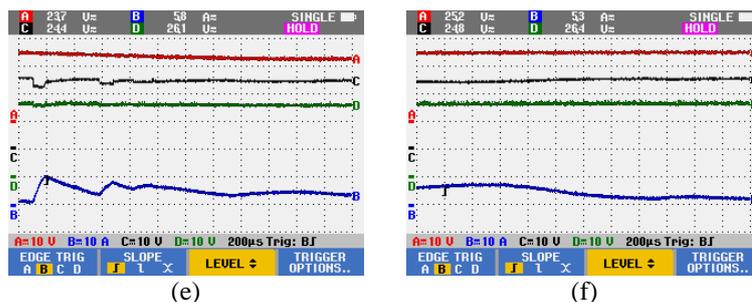


Fonte: Captura de tela do osciloscópio digital.

A Figura E.2 ilustra a forma de onda de tensão e corrente durante o acionamento da carga C1-1 do BC1 no horário de 16h00 para o ensaio II.

Figura E.2 - Evento transitório oscilatório durante acionamento da carga C1 do BC1 desde o primeiro acionamento (a) sequentes (b), (c), (d), (e) até a última carga acionada (f).

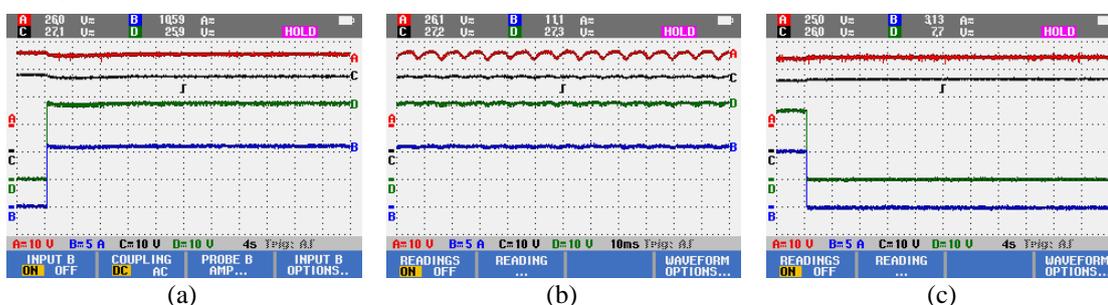




(e) (f)
Fonte: Captura de tela do osciloscópio digital.

Na Figura E.3 ilustra-se a forma de onda de tensão e corrente durante o acionamento e operação do BC2 no horário de 14h00 para o ensaio III.

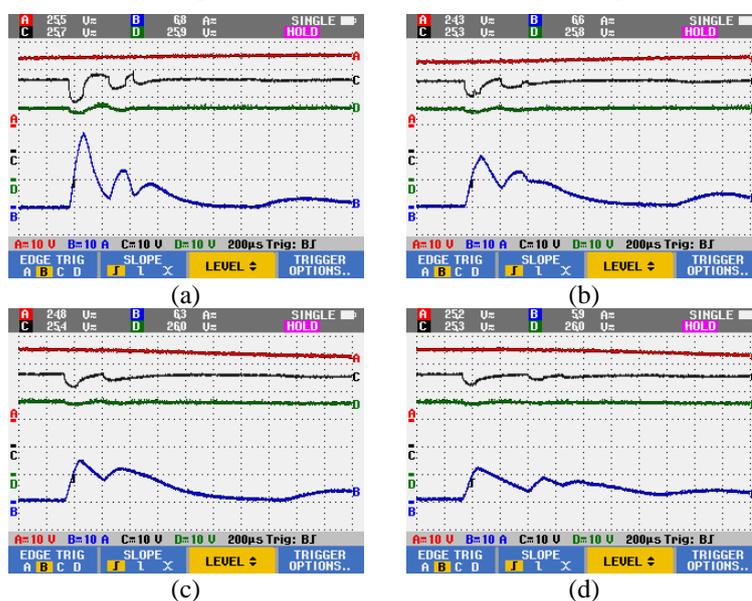
Figura E.3 - Forma de onda de tensão e corrente durante o acionamento, operação e saída do BC2.



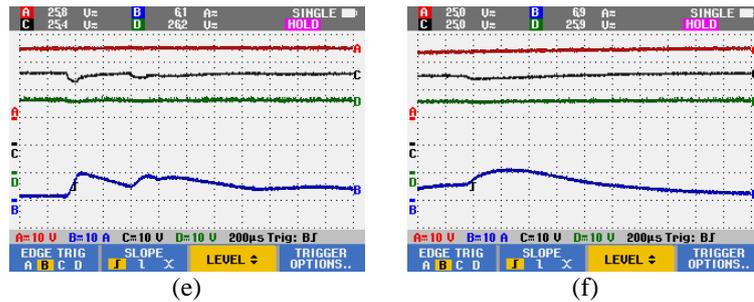
(a) (b) (c)
Fonte: Captura de tela do osciloscópio digital.

A Figura E.4 ilustra a forma de onda de tensão e corrente durante o acionamento da carga C1-1 do BC1 no horário de 16h00 para o ensaio III.

Figura E.4 - Evento transitório oscilatório durante acionamento da carga C1-1 do BC1 desde o primeiro acionamento (a) sequentes (b), (c), (d), (e) até a última carga acionada (f).



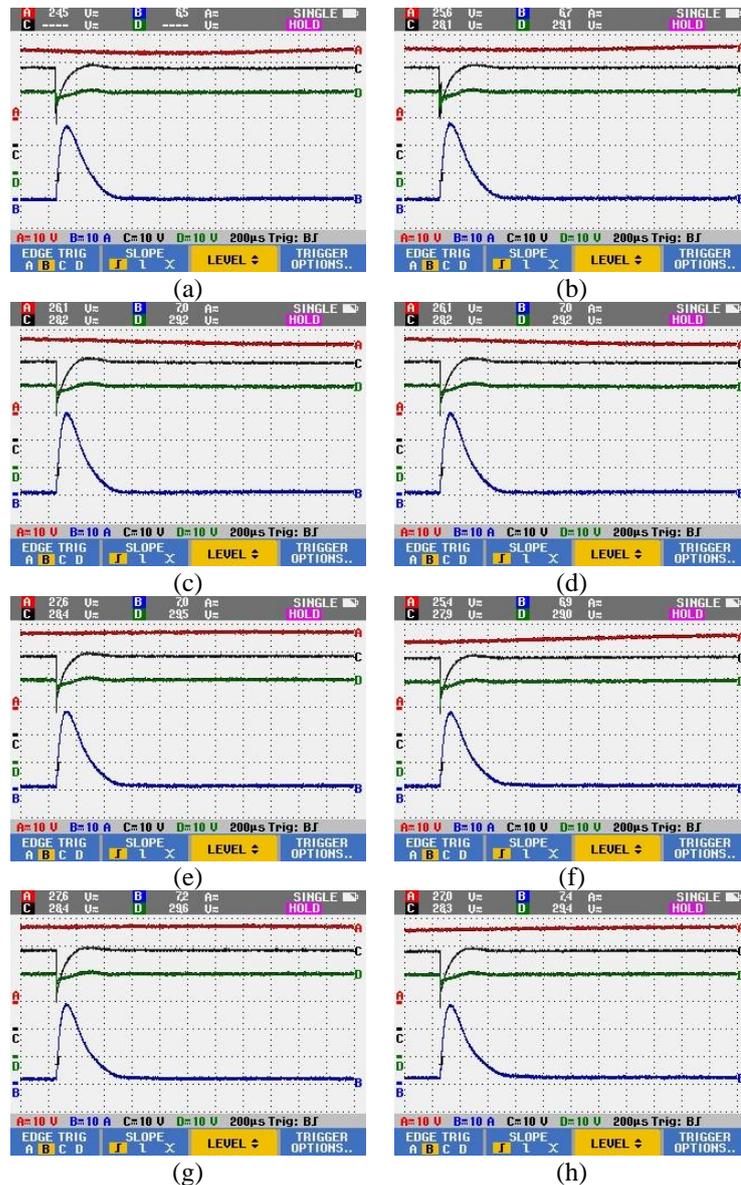
(a) (b) (c) (d)



(e) (f)
 Fonte: Captura de tela do osciloscópio digital.

A Figura E.5 ilustra a forma de onda de tensão e corrente durante o acionamento da carga C2-2 do BC1 no horário de 12h00 para o ensaio IV.

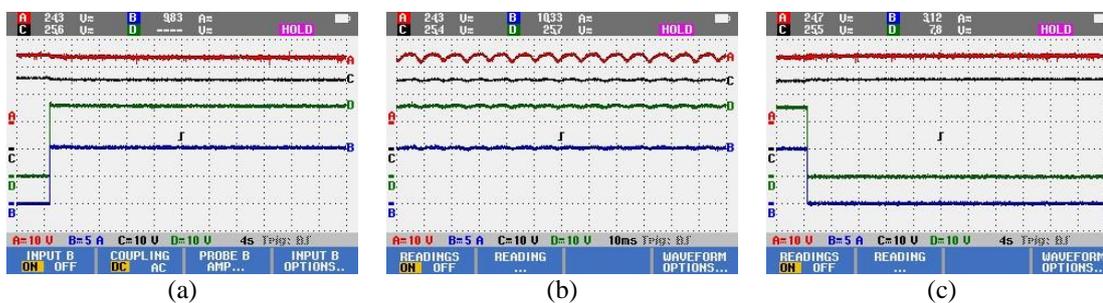
Figura E.5 - Evento transitório oscilatório durante acionamento da carga C2-2 do BC1 desde o primeiro acionamento (a) sequentes (b), (c), (d), (e), (f), (g) até a última carga acionada (h).



(a) (b) (c) (d) (e) (f) (g) (h)
 Fonte: Captura de tela do osciloscópio digital.

Na Figura E.6 ilustra-se o a forma de onda de tensão e corrente durante o acionamento e operação do BC2 no horário de 14h00 para o ensaio IV.

Figura E.6 - Forma de onda de tensão e corrente durante o acionamento, operação e saída do BC2.



Fonte: Captura de tela do osciloscópio digital.