



UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
INSTITUTO DE TECNOLOGIA
FACULDADE DE ENGENHARIAS ELÉTRICA E BIOMÉDICA
TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

ARTHUR CORREA DA FONSECA

**QUALIDADE DA ENERGIA ELÉTRICA EM UMA NANORREDE DE
DISTRIBUIÇÃO EM CORRENTE CONTÍNUA**

BELÉM – PA
2021

ARTHUR CORREA DA FONSECA

**QUALIDADE DA ENERGIA ELÉTRICA EM UMA NANORREDE DE
DISTRIBUIÇÃO EM CORRENTE CONTÍNUA**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao curso de Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Pará, como requisito parcial para a obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Dr. Marcos André Barros Galhardo.

Coorientadora: Eng.^a Luana Oliveira de Albuquerque.

BELÉM – PA
2021

ARTHUR CORREA DA FONSECA

**QUALIDADE DA ENERGIA ELÉTRICA EM UMA NANORREDE DE
DISTRIBUIÇÃO EM CORRENTE CONTÍNUA**

Monografia apresentada como requisito para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Elétrica pela Faculdade de Engenharias Elétrica e Biomédica do Instituto de Tecnologia da Universidade Federal Pará, submetida à apreciação da banca examinadora composta pelos seguintes membros:

Orientador:

Prof. Dr. Marcos André Barros Galhardo
FEEB/ITEC/UFPA

Coorientadora:

Eng.^a Luana Oliveira de Albuquerque
GEDAE/UFPA

Examinador:

Prof. Dr. Wilson Negrão Macêdo
ITEC/UFPA

Examinador:

Me. Eng. Pedro Ferreira Torres
IEE/USP

Belém, Pará

19 de fevereiro de 2021

AGRADECIMENTOS

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

Agradeço à minha mãe Márcia Maria Corrêa da Fonseca e pai José Raimundo da Fonseca por sempre proporcionar 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, Marcos André Barros Galhardo e coorientadora Luana de Oliveira Albuquerque, por toda convivência, ensinamentos e o auxílio durante a realização deste trabalho.

Aos meus colegas do GEDAE/UFPA, Victor Alves, Dheison Martins, Yan Silva, Lucas Bulhosa, Pedro Torres, Orlando Silva, Ivan Parijós, Leonam Araújo, 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.

*“This isn’t right.
This isn’t even wrong”
(Wolfgang Pauli)*

RESUMO

Este trabalho apresenta um estudo sobre eventos de qualidade de energia elétrica em uma nanorede 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. Os eventos 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. Nesse contexto, apresentam-se as características da NDCC e os bancos de cargas propostos para ensaios, desde a etapa de idealização até posterior utilização, além dos instrumentos utilizados para medições e aquisições de dados. Os ensaios propostos buscam evidenciar alguns eventos de qualidade de energia, descritos na IEEE - Std 1159, mas em distribuição em corrente contínua, destacando-se a influência da qualidade de energia na tensão do barramento c.c. e na operação de demais cargas conectadas à rede. Entre os eventos de qualidade de energia elétrica identificados, salienta-se a presença de sobretensão na NDCC, eventos transitórios durante a conexão de conversores c.c./c.c. e variações de tensão de curta duração com a saída de cargas. Diante aos ensaios realizados também se pôde avaliar alguns aspectos relacionados à eficiência energética, conforme configuração de cargas empregadas, considerando-se a utilização de conversor c.c./c.a. para suprimento de cargas de iluminação e o suprimento destas cargas apenas com estágio c.c./c.c., após a exclusão do estágio de inversão e retificação.

Palavras-chave: Distribuição em corrente contínua, Qualidade de energia, Eficiência energética.

LISTA DE FIGURAS

CAPÍTULO 1

Figura 1.1 - Elementos que constituem uma MDCC.	22
Figura 1.2 - Microrrede unipolar.	24
Figura 1.3 - Microrrede bipolar.	24
Figura 1.4 - Arquitetura radial da MDCC.	25
Figura 1.5 - Arquitetura anel da MDCC.	26
Figura 1.6 - Arquitetura da MDCC malhada (a) e zonal (b).	27
Figura 1.7 - Sistema de aterramento em uma situação de curto-circuito entre polo – neutro com resistência RG (a) e direto (b).	29
Figura 1.8 - Estruturas do controle: centralizado (a), descentralizado (b) e distribuído. (c). ...	30
Figura 1.9 - Representação dos estágios internos de certas cargas.	32
Figura 1.10 - Corrente de inrush na entrada do conversor c.c.	38

CAPÍTULO 2

Figura 2.1 - Diagrama unifilar da NDCC.	41
Figura 2.2 - Controlador de carga SCCM20-100R.	42
Figura 2.3 - Controlador de carga XTRA 2210N.	43
Figura 2.4 - Disposição de cada GFV no telhado.	45
Figura 2.5 - Bateria de chumbo ácido.	45
Figura 2.6 - Esquema de conexão do banco de baterias.	46
Figura 2.7 - Modelagem 3D do banco de carga nº 1 vista frontal.	48
Figura 2.8 - Configuração do banco de carga nº 1.	49
Figura 2.9 - Modelagem 3D do painel de conexões, vista frontal.	50
Figura 2.10 - Modelagem 3D da caixa de conexões e dos componentes, vista frontal (a) e (c), lateral (b) e (d), respectivamente.	51
Figura 2.11 - BC1 vista frontal (a), painel de conexões (b), caixa de montagem (c) e luminárias (d).	52
Figura 2.12 - Barra de LED do BC1.	53
Figura 2.13 - Circuito representativo da barra de LED.	53
Figura 2.14 - Figura 2.14 – Painel LED <i>SLIM</i> do BC1 vista frontal (a) e costas (b).	54
Figura 2.15 - Circuito representativo da luminária de LEDs do BC1.	55
Figura 2.16 - <i>Driver</i> de fábrica do painel LED (a) e estrutura de proteção (b).	55
Figura 2.17 - Conversor c.c./c.c. boost descentralizado (a) e centralizado (b).	56
Figura 2.18 - Carga resistiva de alta potência.	57
Figura 2.19 - Inversor autônomo de onda senoidal pura.	57
Figura 2.20 - Condutor de alumínio multiplexado da NDCC.	58
Figura 2.21 - Localização da NDCC do laboratório GEDAE/UFPA.	59
Figura 2.22 - Esquema da NDCC, com a identificação dos pontos de conexão de cada SGA e BC na rede.	60
Figura 2.23 - Centro de conexões.	61

CAPÍTULO 3

Figura 3.1 - Osciloscópio digital portátil FLUKE (a), garras de tensão do tipo jacaré (b), garra de corrente MINIPA (c) e garra de corrente FLUKE (d).	64
Figura 3.2 - Bancos de cargas acomodados em campo (a) e junção do BC3 com <i>drivers</i> do ensaio 3 (b).	64
Figura 3.3 - Procedimento de ação para o ensaio 1.	65
Figura 3.4 - Barra com avaria em alguns LEDs.	66
Figura 3.5 - Cabos para conexão das luminárias ao conversor c.c./c.c. centralizado.....	67
Figura 3.6 - Disposição das pontas de provas de tensão e garras de corrente.	69
Figura 3.7 - Evento transitório oscilatório resultante da entrada do conversor c.c./c.c. centralizado no barramento c.c. da NDCC com geração fotovoltaica presente.	70
Figura 3.8 - Evento transitório oscilatório resultante da entrada do conversor c.c./c.c. centralizado no barramento c.c. da NDCC sem geração fotovoltaica, apenas com os bancos de baterias.....	70
Figura 3.9 - Realização do subensaio 1.1, ilustrando medições de tensão e corrente.	72
Figura 3.10 - Realização do subensaio 1.2, ilustrando medições de tensão e corrente.	73
Figura 3.11 - Realização do subensaio 1.3, ilustrando medições de tensão e corrente.	74
Figura 3.12 - Realização do subensaio 1.4, ilustrando medições de tensão e corrente.	74
Figura 3.13 - Evento transitório oscilatório resultante da entrada do conversor c.c./c.c. descentralizado no barramento c.c. da NDCC com geração fotovoltaica presente.	76
Figura 3.14 - Evento transitório oscilatório resultante da entrada do conversor c.c./c.c. descentralizado no barramento c.c. da NDCC sem geração fotovoltaica presente, apenas com os bancos de baterias.	77
Figura 3.15 - Realização do subensaio 1.9, ilustrando medições de tensão e corrente.	78
Figura 3.16 - Realização do subensaio 1.10, ilustrando medições de tensão e corrente.	79
Figura 3.17 - Realização do subensaio 1.11, ilustrando medições de tensão e corrente.	79
Figura 3.18 - Realização do subensaio 1.12, ilustrando medições de tensão e corrente.	80
Figura 3.19 - Disposição das pontas de provas de tensão e garras de corrente no quadro elétrico do centro de conexões.	83
Figura 3.20 - Forma de onda da tensão e corrente (pico a pico) da carga linear.	83
Figura 3.21 - Forma de onda da tensão e corrente (pico a pico) da carga não linear.	85
Figura 3.22 - Forma de onda da corrente com ripple no ponto próximo ao BC3 (a), ponto P1 (b), P2 (c) e P3 (d) do subensaio 2.1 com carga linear.....	88
Figura 3.23 - Forma de onda da corrente com ripple no ponto próximo ao BC3 (a), ponto P1 (b), P2 (c) e P3 (d) do subensaio 2.2 com carga linear.....	89
Figura 3.24 - Forma de onda da corrente com ripple no ponto próximo ao BC3 (a), ponto P1 (b), P2 (c) e P3 (d) do subensaio 2.3 com carga linear.....	91
Figura 3.25 - Forma de onda da corrente com ripple no ponto próximo ao BC3 (a), ponto P1 (b), P2 (c) e P3 (d) do subensaios 2.4 com carga linear.	92
Figura 3.26 - Variação na corrente injetada na rede, resultado da mudança na irradiância incidente no gerador componente do SGA 1.....	93
Figura 3.27 - Forma de onda da corrente com ripple no ponto próximo ao BC3 (a), ponto P1 (b), P2 (c) e P3 (d) do subensaio 2.5 com carga não linear.	94
Figura 3.28 - Variação na corrente injetada na rede, resultado do sombreamento do gerador componente do SGA 3.....	95

Figura 3.29 - Forma de onda da corrente com ripple no ponto próximo ao BC3 (a), ponto P1 (b), P2 (c) e P3 (d) do subensaio 2.6 com carga não linear.	96
Figura 3.30 - Forma de onda da corrente com ripple no ponto próximo ao BC3 (a), ponto P1 (b), P2 (c) e P3 (d) do subensaio 2.7 com carga não linear.	98
Figura 3.31 - Forma de onda da corrente com ripple no ponto próximo ao BC3 (a), ponto P1 (b), P2 (c) e P3 (d) do subensaio 2.8 com carga não linear.	99
Figura 3.32 - Disposição das pontas de provas de tensão e garras de corrente.	102
Figura 3.33 - Eficiência do inversor suprindo os LEDs de 1 a 6.	104
Figura 3.34 - Disposição das pontas de provas de tensão e garras de corrente.	105
Figura 3.35 - Eficiência do conversor c.c./c.c. suprindo os LEDs de 1 a 6.	105
Figura 3.36 - Disposição das pontas de provas de tensão e garras de corrente.	106

LISTA DE TABELAS

CAPÍTULO 1

Tabela 1.1 - Exemplo de classificação a respeito do nível de tensão da rede de distribuição c.c. e possíveis aplicações.	23
Tabela 1.2 - Eventos de qualidade de energia em sistemas de corrente contínua.	33
Tabela 1.3 - Classificação dos eventos transitórios.	36
Tabela 1.4 - Classificação da variação de tensão de curta duração.	37
Tabela 1.5 - Classificação da variação de tensão – longa duração.	37

CAPÍTULO 2

Tabela 2.1 - Especificações técnicas do controlador de carga SCCM20-100R.	42
Tabela 2.2 - Especificações técnicas do controlador de carga XTRA 2210N.	43
Tabela 2.3 - Características técnicas nas STC do módulo FV.	44
Tabela 2.4 - Características térmicas do módulo FV.	44
Tabela 2.5 - Características técnicas nas STC de cada GFV.	44
Tabela 2.6 - Característica de cada banco de carga.	46
Tabela 2.7 - Características técnicas do conversor c.c./c.c. <i>boost</i>	56
Tabela 2.8 - Características técnicas do inversor utilizado.	58
Tabela 2.9 - Características técnicas do condutor cabo de alumínio XLPE 0,6/1 kV da fabricante Alubar.	58
Tabela 2.10 - Distância das cargas e geração em relação à NDCC.	60
Tabela 2.11 - Especificações técnicas dos disjuntores c.c. utilizados na proteção do SGA.	60

CAPÍTULO 3

Tabela 3.1 – Premissa utilizada para os ensaios 1 e 2.	62
Tabela 3.2 - Especificações elétricas, quanto ao erro de leitura, das pinças de corrente utilizadas.	63
Tabela 3.3 – Resumo dos subensaio referente ao ensaio 1.	68
Tabela 3.4 - Parâmetros elétricos do evento transitório oscilatório para o conversor c.c./c.c. centralizado.	71
Tabela 3.5 - Tensão do barramento c.c. da NDCC durante os subensaios com conversor c.c./c.c. centralizado com BC2 configurado em 2,37 Ω	71
Tabela 3.6 - Tensão do barramento c.c. da NDCC durante os subensaios com conversor c.c./c.c. centralizado com BC2 configurado em 5,08 Ω	75
Tabela 3.7 - Parâmetros elétricos do evento transitório oscilatório para o conversor c.c./c.c. descentralizado.	77
Tabela 3.8 - Tensão do barramento c.c. da NDCC durante os subensaios com conversor c.c./c.c. descentralizado com BC2 configurado em 2,37 Ω	77
Tabela 3.9 - Tensão do barramento c.c. da NDCC durante os subensaios com conversor c.c./c.c. centralizado com BC2 configurado em 5,08 Ω	80
Tabela 3.10 - Potência aparente, ativa e não ativa da carga linear.	84
Tabela 3.11 - Potência aparente, ativa e não ativa da carga não linear.	85
Tabela 3.12 – Resumo dos subensaios referente ao ensaio 2.	85

Tabela 3.13 - Parâmetros elétricos do subensaio 2.1 em pontos distintos da NDCC, com inversor em BC3 suprindo carga linear.	87
Tabela 3.14 - Parâmetros elétricos do subensaio 2.2 em pontos distintos da NDCC, com inversor em BC3 suprindo com carga linear.	87
Tabela 3.15 - Parâmetros elétricos do subensaio 2.3 em pontos distintos da NDCC, com inversor em BC3 suprindo com carga linear.	90
Tabela 3.16 - Parâmetros elétricos do subensaio 2.4 em pontos distintos da NDCC, com inversor em BC3 suprindo com carga linear.	90
Tabela 3.17 - Parâmetros elétricos do subensaio 2.5 em pontos distintos da NDCC, com o inversor em BC3 suprindo carga não linear.	93
Tabela 3.18 - Parâmetros elétricos do subensaio 2.6 em pontos distintos da NDCC, com inversor em BC3 suprindo carga não linear.	95
Tabela 3.19 - Parâmetros elétricos do subensaio 2.7 em pontos distintos da NDCC, com inversor em BC3 suprindo com carga não linear.	97
Tabela 3.20 - Parâmetros elétricos do subensaio 2.8 em pontos distintos da NDCC, com inversor em BC3 suprindo com carga não linear.	97
Tabela 3.21 - Eficiência individual de cada <i>driver</i>	103
Tabela 3.22 - Eficiência total envolvendo inversor e os seis <i>drivers</i>	104
Tabela 3.23 - Eficiência individual cada conversor c.c./c.c.	107

ABREVIATURAS E SIGLAS

ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
BB	Banco de Baterias
BC	Banco de Carga
c.a.	Corrente Alternada
c.c.	Corrente Contínua
CC	Controlador de Carga
CCC	Carga de Corrente Constante
CPC	Carga de Potência Constante
CRC	Carga de Resistência Constante
FP	Fator de Potência
GD	Geração Distribuída
GEDAE	Grupo de Estudos e Desenvolvimento de Alternativas Energéticas
GFV	Gerador Fotovoltaico
HVDC	<i>High-Voltage Direct Current</i> (Corrente Contínua em Alta Tensão)
IEC	<i>International Electrotechnical Commission</i> (Comissão Eletrotécnica Internacional)
IEEE	<i>Institute of Electrical and Electronics Engineers</i> (Instituto de Engenheiros Eletricistas e Eletrônicos)
IMC	Industria de Aparelhos Elétricos
LED	<i>Light Emitting Diode</i> (Diodo Emissor de Luz)
MDCC	Microrrede de Distribuição em Corrente Contínua
MPPT	<i>Maximum Power Point Tracking</i> (Seguidor do Ponto de Máxima Potência)
Na	Potência Não Ativa
NBR	Norma Técnica Brasileira
NDCC	Nanorrede de Distribuição em Corrente Contínua
P	Potência Ativa
p.u.	<i>Per unit</i> (por unidade)
PWM	<i>Pulse Width Modulation</i> (Modulação por Largura de Pulso)
QEE	Qualidade da Energia Elétrica
R_G	Resistência de Aterramento
S	Potência Aparente
SGA	Sistema de Geração e Armazenamento

SMD	<i>Surface Mounting Devices</i> (Componente Montado em Superfície)
STC	<i>Standard Test Conditions</i> (Condições Padrão para Testes)
VB	<i>Voltage Balancer</i> (Regulador de Tensão)
VFD	<i>Variable Frequency Drive</i> (Inversor de Frequência)
η	Eficiência

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO	17
CAPÍTULO 1 SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO EM CORRENTE CONTÍNUA EM BAIXA TENSÃO.....	20
1.1 Distribuição de Energia Elétrica.....	20
1.2 Microrrede de Distribuição em Corrente Contínua (MDCC)	21
1.3 Topologias	23
1.3.1 Polaridade da tensão	23
1.3.2 Arquitetura.....	25
1.4 Aterramento.....	28
1.4.1 Isolado da terra	28
1.4.2 Aterrado com resistência	28
1.4.3 Aterramento direto	29
1.5 Controle em MDCC	29
1.6 Cargas supridas em corrente contínua.....	30
1.6.1 Cargas de resistência constante (CRC)	31
1.6.2 Cargas de corrente constante (CCC)	31
1.6.3 Cargas de potência constante (CPC)	31
1.6.4 Estágios internos das cargas	32
1.7 Qualidade de energia elétrica (QEE) em sistemas de corrente contínua.....	32
1.7.1 Eventos transitórios	36
1.7.2 Variações de longa e curta duração na tensão	36
1.7.3 Desequilíbrio de tensão em sistema bipolar	38
1.7.4 Distorção na forma de onda.....	38
1.7.5 Flutuações na tensão do barramento c.c.	39
1.8 Considerações finais.....	39
CAPÍTULO 2 NANORREDE DE DISTRIBUIÇÃO EM CORRENTE CONTÍNUA IMPLANTADA NO GEDAE/UFPA	40

2.1	Sistema de geração e armazenamento (SGA)	40
2.1.1	Controlador de carga (CC)	41
2.1.2	Gerador fotovoltaico (GFV)	43
2.1.3	Banco de baterias (BB).....	45
2.2	Banco de cargas (BC).....	46
2.2.1	Banco de carga nº 1	47
2.2.2	Banco de carga nº 2	57
2.2.3	Banco de carga nº 3	57
2.3	Rede de distribuição	58
2.4	Considerações finais.....	61
CAPÍTULO 3 VERIFICAÇÃO E AVALIAÇÃO DOS FENÔMENOS DE QUALIDADE DE ENERGIA ELÉTRICA NA NDCC		62
3.1	Materiais e Métodos	62
3.2	Impacto no ponto de conexão de um banco de cargas de iluminação LED durante a entrada e saída de carga de alta demanda de corrente	65
3.2.1	Resultados	69
3.2.2	Comentários sobre o ensaio 1	81
3.3	Análise da tensão e corrente em diferentes pontos de medição na NDCC, com a utilização de um inversor para suprimento de cargas c.a.	82
3.3.1	Resultados	86
3.3.2	Comentários sobre o ensaio 2.....	100
3.4	Avaliação da eficiência do suprimento com diferentes conversores para luminárias LED	100
3.4.1	Resultados	101
3.4.2	Comentários sobre o ensaio 3.....	107
CONCLUSÃO		109
REFEÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS		111
APÊNDICE I		117

APÊNDICE II 119

INTRODUÇÃO

Em uma sociedade, a qualidade de vida está relacionada à utilização de energia, em suas várias formas, para realização de diversas atividades, seja em processos industriais, comerciais ou residenciais, concedendo ao indivíduo maior conforto, segurança e bem-estar. Deste modo, tem-se um consumo cada vez maior de energia, em específico da energia elétrica, visto que a população mundial permanece em crescimento. No Brasil, por exemplo, projeta-se em dez anos um aumento de 43% no consumo total de eletricidade alcançando o valor de 756 TWh, com crescimento médio de 3,7% a.a. entre 2020 a 2030 (EPE, 2020). Considerando também os impactos econômicos, dentre outros, causados pela pandemia global de Covid-19, torna-se um desafio para o país a retomada de investimentos para o setor elétrico, exigindo a modernização e a diversificação da matriz energética concatenada com a transição energética, que vem ocorrendo em muitos países, para fontes renováveis e com redes de distribuição de energia mais resilientes e inteligentes.

De forma geral, o sistema elétrico brasileiro é baseado principalmente em um fluxo unidirecional de energia que tem origem nos grandes centros geradores, a exemplo, hidrelétricas ou termelétricas, até o consumidor final, seja esse, residencial, comercial ou industrial. No entanto, a partir da publicação da Resolução Normativa nº 482/2012 pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), e sua posterior atualização, que dispõe de micro e minigeração distribuída (GD), tem-se observado um novo segmento de distribuição de energia onde se tem o agente denominado prossumidor, responsável pelo seu consumo e geração de energia elétrica, seja total ou parcial (NOVAES, 2018). Nesse contexto, como aspectos negativos observa-se um novo paradigma onde grandes variações de potência injetadas na rede convencional podem provocar flutuações de tensão locais, influenciar em procedimentos de proteções e promover o carregamento indesejado da rede de distribuição.

Dadas essas circunstâncias, observa-se, como agente mitigador, a aplicação de microrredes (do inglês, *microgrids*) configurando unidades consumidoras em pequenos sistemas elétricos que podem operar de forma autônoma ou interligados, formados por fontes de geração distribuída, cargas e armazenamento. Uma microrrede possibilita a suavização do comportamento variável de fontes renováveis, a exemplo, solar fotovoltaica, considerando a utilização de armazenamento por meio de bancos de baterias como componentes que podem suprir a demanda de cargas em horários em que não há disponibilidade da geração. Além disso, a possibilidade de desconexão da rede convencional em uma situação de falha ou faltas,

promovendo uma melhor gestão da energia disponível, aumentando a qualidade da energia (OLIVEIRA, 2016).

Segundo Schönberger (2006), a aplicação de geração distribuída em ambientes residenciais e comerciais com potência instalada inferior a 25 kW, é dita na literatura como nanorrede. Neste cenário, a operação de nanorredes em corrente contínua, constitui-se como uma alternativa eficiente e promissora em contrapartida a corrente alternada, haja vista, a maior inserção de geração distribuída com energia solar fotovoltaica, além de cargas, a exemplo, veículos elétricos e iluminação LED com geração e consumo, respectivamente, em corrente contínua, possibilitando a exclusão de estágios de conversão.

Desse modo, o Grupo de Estudos e Desenvolvimento de Alternativas Energéticas da Universidade Federal do Pará (GEDAE/UFPA) dispõe de infraestrutura laboratorial para realização de estudos experimentais envolvendo qualidade de energia elétrica e eficiência em sistemas de distribuição de corrente contínua em baixa tensão, onde há instalada na área externa de sua edificação uma nanorrede de distribuição em corrente contínua.

Assim, o presente trabalho objetiva apresentar um estudo sobre a qualidade de energia e eficiência energética de uma nanorrede em corrente contínua, adotando-se configurações distintas de cargas para os ensaios na nanorrede presente no GEDAE e classificando os eventos observados com base na norma ou recomendação americana IEEE - Std 1159 de 2019.

O presente trabalho está estruturado da seguinte forma:

No capítulo 1, apresentam-se as características que contemplam uma nanorrede de distribuição em corrente contínua, mostrando a arquitetura, polaridades da tensão, estratégias de controle e formas de aterramento, entre outras características. Além disso, apresenta-se a norma ou recomendação IEEE - Std 1159, destacando os eventos descritos na mesma.

No capítulo 2, apresenta-se a NDCC construída nas dependências do prédio do GEDAE, além dos componentes que a compõem. Os bancos de cargas idealizados e construídos são mostrados, evidenciando suas características e finalidades.

No capítulo 3 descreve-se a metodologia empregada para realização de três ensaios propostos, além de discutir os resultados obtidos durante as medições envolvendo: a avaliação do impacto no ponto de conexão de um banco de cargas de iluminação LED durante a entrada e saída de carga de alta demanda de corrente; a análise da tensão e corrente em diferentes

pontos de medição na NDCC, com a utilização de um inversor para suprimento de cargas c.a.; e a avaliação da eficiência do suprimento com diferentes conversores para luminárias LED.

Ao fim do trabalho, conclusões e sugestões de trabalhos futuros são comentados, visando o aprofundamento do trabalho desenvolvido.

CAPÍTULO 1 SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO EM CORRENTE CONTÍNUA EM BAIXA TENSÃO

Este capítulo apresenta uma breve fundamentação teórica acerca de microrredes de distribuição em corrente contínua (MDCC) e os principais eventos que podem afetar a qualidade de energia nessa forma de distribuição de energia elétrica.

1.1 Distribuição de Energia Elétrica

O final do século XIX foi marcado por uma disputa acirrada acerca da forma de distribuição de energia elétrica que viria a ser mais utilizada. De um lado, Thomas Edison, com a empresa *Edison Electric Light Company*, idealizador do sistema de geração, distribuição e cargas em corrente contínua (c.c.), do outro, Nikola Tesla e George Westinghouse apresentando um sistema de distribuição em corrente alternada (c.a.) (MASTERS, 2004). Nos anos iniciais, a distribuição de energia elétrica nos Estados Unidos foi marcada pela operação em corrente contínua, tendo como cargas basicamente lâmpadas incandescentes (resistivas) e motores c.c. (HUGHES, 1993).

No entanto, o sistema de distribuição de energia elétrica em corrente contínua, proposto por Edison, estava associado a uma série de desvantagens, por exemplo: a impossibilidade de trabalhar, eficientemente, em níveis diferentes de tensão na mesma rede; queda significativa de tensão nos condutores, de modo que a unidade geradora necessitava estar próxima às cargas atendidas; elevada perda por efeito *joule* (diretamente proporcional ao quadrado da intensidade da corrente elétrica) na linha de distribuição.

Assim, a ideia do sistema de distribuição em c.a. veio para sanar com diversos problemas associados à distribuição c.c.: a utilização de transformadores possibilitando a elevação e abaixamento da tensão de forma mais eficiente na rede de distribuição e transmissão de energia elétrica em três fases com tensões elevadas, reduzindo, assim, perdas nos condutores e facilitando a distribuição das unidades geradoras. Além disso, a invenção do motor de indução c.a., por Tesla, foi um divisor de águas na “guerra das correntes”, devido sua alta eficiência. É interessante destacar também o crescente papel dos combustíveis fósseis (carvão e gás natural) como fontes de energia nas unidades geradoras centralizadas da época (KUMAR *et al.*, 2017).

Naquele tempo, a disponibilidade tecnológica e superioridade técnica do sistema c.a. foram fundamentais para torná-lo padrão nos sistemas de distribuição de energia elétrica do mundo, como é visto até hoje. No decorrer do tempo, com a crescente demanda por energia elétrica, em conjunto com as preocupações ambientais envolvendo a emissão de gases de efeito

estufa na atmosfera e o esgotamento de recursos energéticos baseados em combustíveis fósseis, ligados a sistemas convencionais de geração de energia elétrica, observa-se um cenário oposto ao passado (KUMAR *et al.*, 2017).

Em especial, a evolução da eletrônica de potência, com dispositivos, por exemplo, fontes chaveadas e sistemas de iluminação a LED aplicados em prédios residenciais e comerciais, apresentam uma maior eficiência nos estágios internos se suprido por distribuição em corrente contínua (ELSAYED *et al.*, 2015), tendo em vista que os mesmos operam internamente em c.c., portanto, faz-se possível a exclusão de estágios de retificação (c.a./c.c.). É notável também no decorrer do tempo a produção de conversores eletrônicos mais eficientes, dependendo da sua topologia e estratégia de controle adotada (GORJI *et al.*, 2019), fornecendo eficiências de conversão c.c./c.c. próximas a 99% (JITARU, 2014).

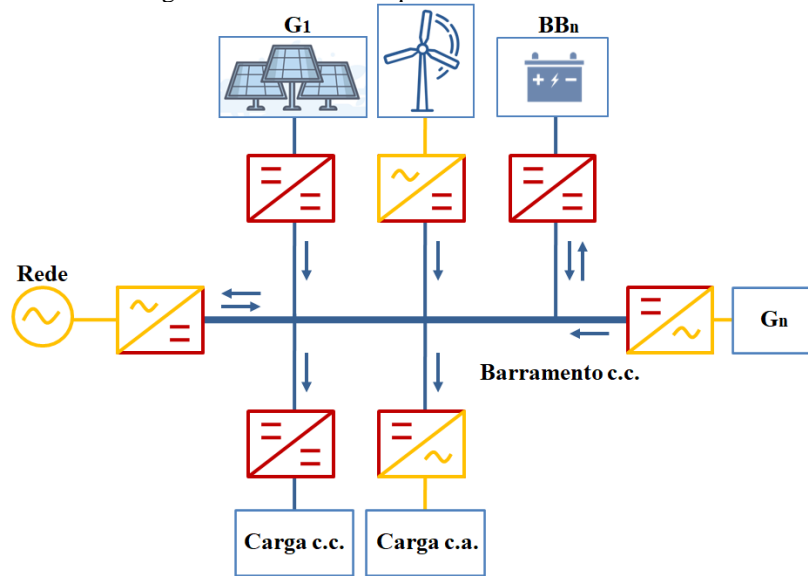
Além disso, a geração e armazenamento de energia elétrica, cada vez mais presente em prédios residenciais, por meio de sistemas fotovoltaicos e baterias, respectivamente, destacam-se por operarem em c.c., facilitando uma rede de distribuição nessa topologia (THOMAS, 2010) com a exclusão do estágio de conversão (c.c./c.a.). Nesse sentido, a utilização de sistemas de distribuição em corrente contínua não surge como um substituto ao modelo c.a., mas como uma forma de melhoria à qualidade de energia elétrica, confiabilidade e, principalmente, eficiência do sistema.

Microrredes (MDCC) e nanorredes (NDCC) em corrente contínua de distribuição surgem nos tempos atuais como topologias a essa forma de distribuição. Operando em baixa tensão e com a utilização de fontes renováveis de energia, esse sistema pode ser entendido como vantajoso, tanto tecnicamente quanto economicamente. Aspectos como: aumento na eficiência global, maior robustez e confiabilidade, simplificação de estratégias de controle e gerenciamento, dentre outros, são essenciais para essa vantagem técnico-econômica (TORRES, 2019).

1.2 Microrrede de Distribuição em Corrente Contínua (MDCC)

De forma geral, os componentes que constituem uma MDCC podem ser observados na ilustração da Figura 1.1.

Figura 1.1 - Elementos que constituem uma MDCC.



Fonte: Autoria própria.

Em uma MDCC, pode haver diversos geradores operando em paralelo como é o caso de (G1), (G2) e (Gn) em conjunto da rede elétrica de distribuição convencional, a MDCC pode operar em dois modos: conectada à rede e isolada da rede (operação *off-grid* ou “ilhada”) (WUNDER *et al.*, 2015). MDCCs empregam na geração, em grande maioria, fontes de energias renováveis, principalmente solar fotovoltaica (G1), eólica (G2) (RAWAT; SATHANS, 2018) além de sistemas de armazenamento como baterias (BBn) ou supercapacitores.

No exemplo da Figura 1.1, pode-se empregar um gerador em corrente alternada a diesel (Gn) para a função de *backup*, operando quando as demais fontes não tiverem a sua geração suficiente para atender às cargas (TORRES, 2019). A conversão dos estágios c.c./c.c., c.c./c.a. e c.a./c.c. ocorrem por meio de conversores de potência, equipamentos importantes para o controle do fluxo de potência, indicado por setas na Figura 1.1, e adequação ao nível de tensão do barramento c.c., seja ele de extra-baixa tensão, por exemplo, em aplicações com tensão nominal de 24 Vcc ou 12 Vcc para suprimento de equipamentos de escritório, eletrificação rural, equipamentos de TI ou controladores industriais, como também são encontradas residências *off-grid* com MDCC em 48 Vcc (MOUSSA *et al.*, 2019).

Em baixa tensão, por exemplo, existem aplicações com tensão nominal do barramento de 380 Vcc até 450 Vcc, para alimentação de *datacenters* ou iluminação de edifícios de escritórios (WUNDER *et al.*, 2015). Assim, as cargas necessitam, em sua maioria, de uma interface com o barramento c.c. para adequação ao nível de tensão em que trabalham.

É interessante ainda destacar estudos que mostram uma eficiência significativa no consumo de energia elétrica com cargas c.c., como é comentado em Gerber *et al.*, (2019). Nesse sentido, fica claro que dependendo do nível de tensão da rede, diversas aplicações tornam-se interessantes (DUAN *et al.*, 2020). Na Tabela 1.1, apresentada em Duan *et al.*, (2020), mostra-se uma classificação e algumas aplicações para os níveis de tensão em redes de distribuição em corrente contínua, em cidades na China. O valor do nível de tensão da rede de distribuição c.c. ainda não está consolidado em uma norma padrão internacional, no entanto, alguns trabalhos da academia chegam à classificação seguindo premissas técnicas, considerando ainda as cargas como residenciais de pequeno porte, comerciais de médio porte ou superior.

Tabela 1.1 - Exemplo de classificação a respeito do nível de tensão da rede de distribuição c.c. e possíveis aplicações.

Classificação do nível de tensão c.c.	Tensão (V)	Possíveis aplicações
Extra-baixa	< 380	Sistemas de iluminação a LED, USB (do inglês, <i>Universal Serial Bus</i>) e pequenos dispositivos eletrônicos, equipamentos de comunicação, <i>datacenters</i> .
Baixa	$\geq 380 - < 600$	<i>Datacenters</i> , veículos elétricos, rede de fornecimento de energia elétrica para navios,
Média	$\geq 600 - < 49.000$	Parques industriais e comerciais
Alta	≥ 49.000	Redes de distribuição de energia elétrica a longas distâncias (HVDC, do inglês <i>High-voltage Direct Current</i>).

Fonte: Adaptado de Duan *et al.*, (2020).

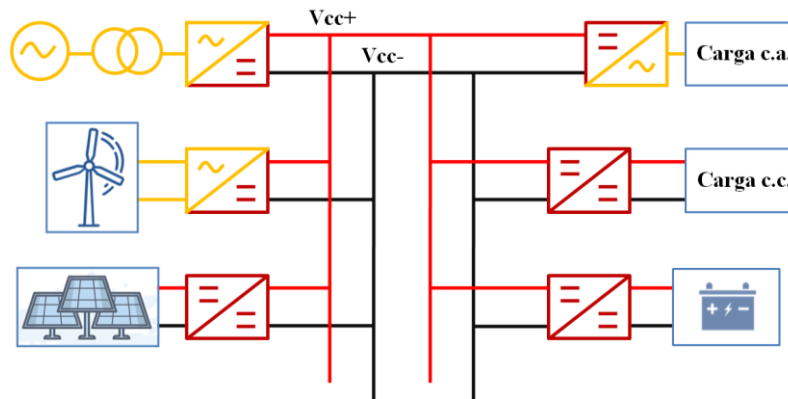
1.3 Topologias

A polaridade e arquitetura da MDCC são características importantes a serem abordadas. Assim, os subtópicos seguintes comentam a respeito das topologias de uma MDCC.

1.3.1 Polaridade da tensão

Em uma MDCC a potência no barramento c.c. pode ser transmitida de duas formas diferentes, sendo essas, unipolar e bipolar, cada uma dessas para aplicações distintas e interessantes caso a caso. A Figura 1.2 ilustra uma MDCC do tipo unipolar.

Figura 1.2 - Microrrede unipolar.

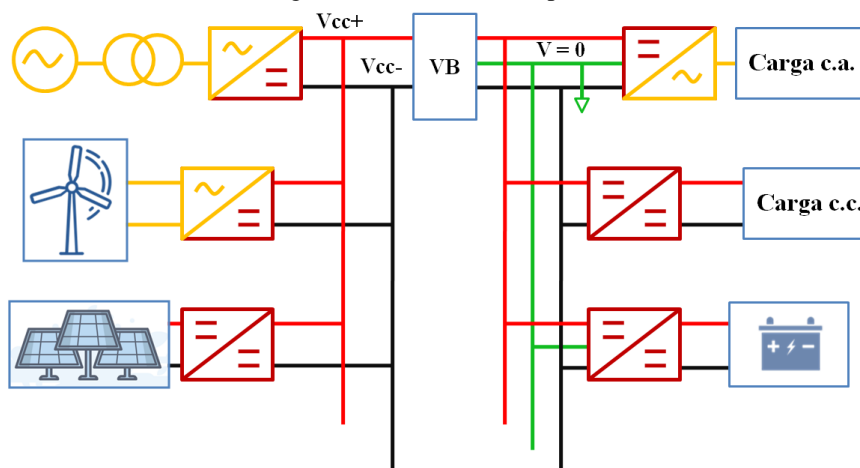


Fonte: Autoria própria.

Em uma MDCC unipolar as fontes e cargas estão conectadas entre os condutores do polo positivo (V_{cc+}) e negativo (V_{cc-}) do barramento c.c., a energia elétrica é transmitida em apenas um nível de tensão. Por apresentar estrutura mais simples, essa configuração possui aplicação interessante para localidades isoladas em sistemas de pequeno porte (RAWAT; SATHANS, 2018). Esta configuração não apresenta redundância e em caso de contingência em um dos condutores, ou polo do barramento, todo o sistema é afetado.

Na configuração bipolar existem três condutores no barramento c.c., esses são polo positivo (V_{cc+}), polo negativo (V_{cc-}) e neutro, como ilustrado na Figura 1.3. Na MDCC bipolar é possível obter três níveis de tensão: V_{cc+} , V_{cc-} e $2V_{cc}$, possibilitando uma gama de aplicações e adição de cargas mais pesadas no sistema. É interessante observar que no caso de uma falha em algum dos condutores, ainda é possível obter energia elétrica pelos outros dois condutores e conversores suplementares, aumentando assim a confiabilidade e acessibilidade do sistema.

Figura 1.3 - Microrrede bipolar.



Fonte: Autoria própria.

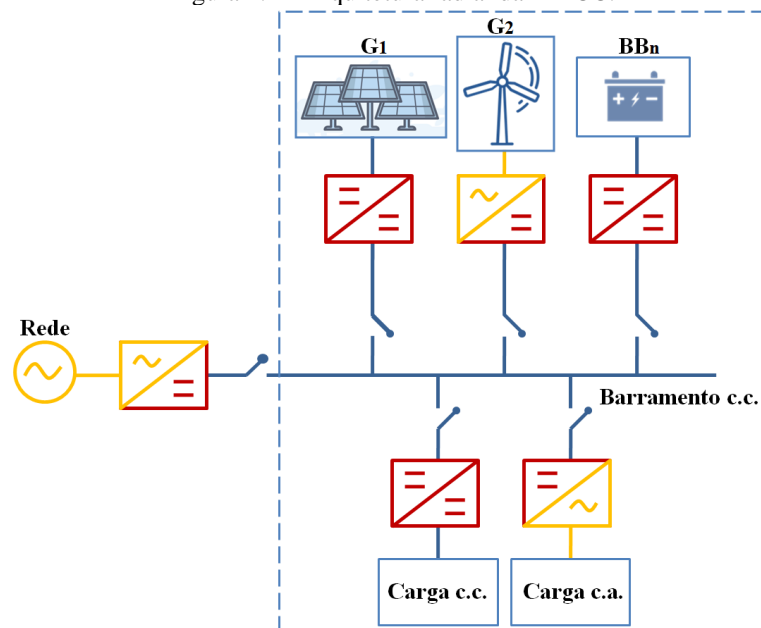
Os diferentes níveis de tensão oferecem flexibilidades ao usuário para conexão de diferentes cargas a serem supridas, no entanto, ao mesmo tempo isso pode causar um desequilíbrio, ou assimetria entre as tensões V_{cc+} e V_{cc-} , em determinadas condições de operações, como exemplo: elevada injeção de potência no polo positivo ou em condição de falta, como a perda de um subsistema de geração (TORRES, 2019). Dessa forma, um circuito para balanceamento, do inglês *voltage balancer* (VB), é de fundamental importância nessa configuração, como comenta Kakigano *et al.*, (2007), composto por um conversor de potência que realiza o ajuste do nível de tensão entre V_{cc+} e neutro e entre V_{cc-} e neutro.

1.3.2 Arquitetura

A arquitetura diz respeito a como as cargas estão dispostas ao longo do barramento c.c. principal e a eventual conexão deste com a rede c.a. A MDCC pode estar configurada basicamente na arquitetura radial ou em anel.

Na Figura 1.4 ilustra-se uma MDCC arquitetada de forma radial. Nesse caso, a potência é transmitida em somente um caminho e distribuída em ramos para suprimento das cargas. Essa arquitetura é propícia para uma conexão próxima entre geração e carga ocasionando, conseqüentemente, a redução de perdas nos condutores. O barramento c.c. pode ser do tipo unipolar ou bipolar, podendo ser aplicada, por exemplo, em ambientes residenciais. No entanto, tal arquitetura não possui flexibilidade durante condições de falta.

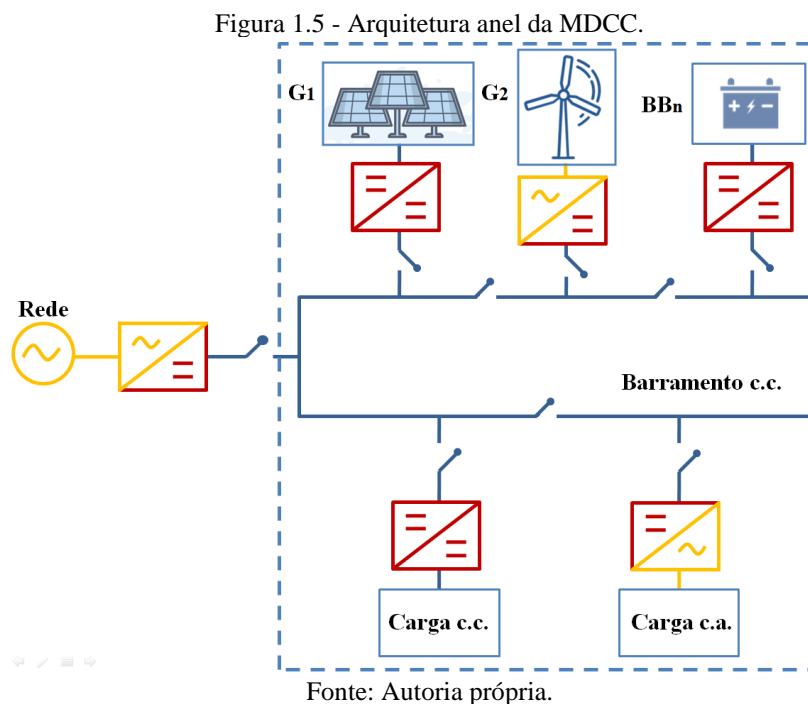
Figura 1.4 - Arquitetura radial da MDCC.



Fonte: Autoria própria.

Na Figura 1.5 a MDCC está configurada em uma arquitetura em anel ou *loop*. Tal arquitetura possui maior flexibilidade em situação de falha ou falta no barramento c.c., uma vez que a potência transmitida, seja pelas fontes c.c. ou c.a., possui dois caminhos. Esta configuração pode ser usada em ambientes urbanos e industriais, e possui um custo de implantação maior se comparado com a configuração anterior.

O sistema de distribuição configurado em anel é mais confiável se comparado à configuração radial, no entanto, ambos os sistemas de MDCC apresentados possuem apenas um único ponto de conexão com a rede c.a. Dessa forma, é possível comentar sobre mais duas configurações que visam acabar com problemas que viriam a ser ocasionados no caso de uma falha no único conversor c.a./c.c. da MDCC.

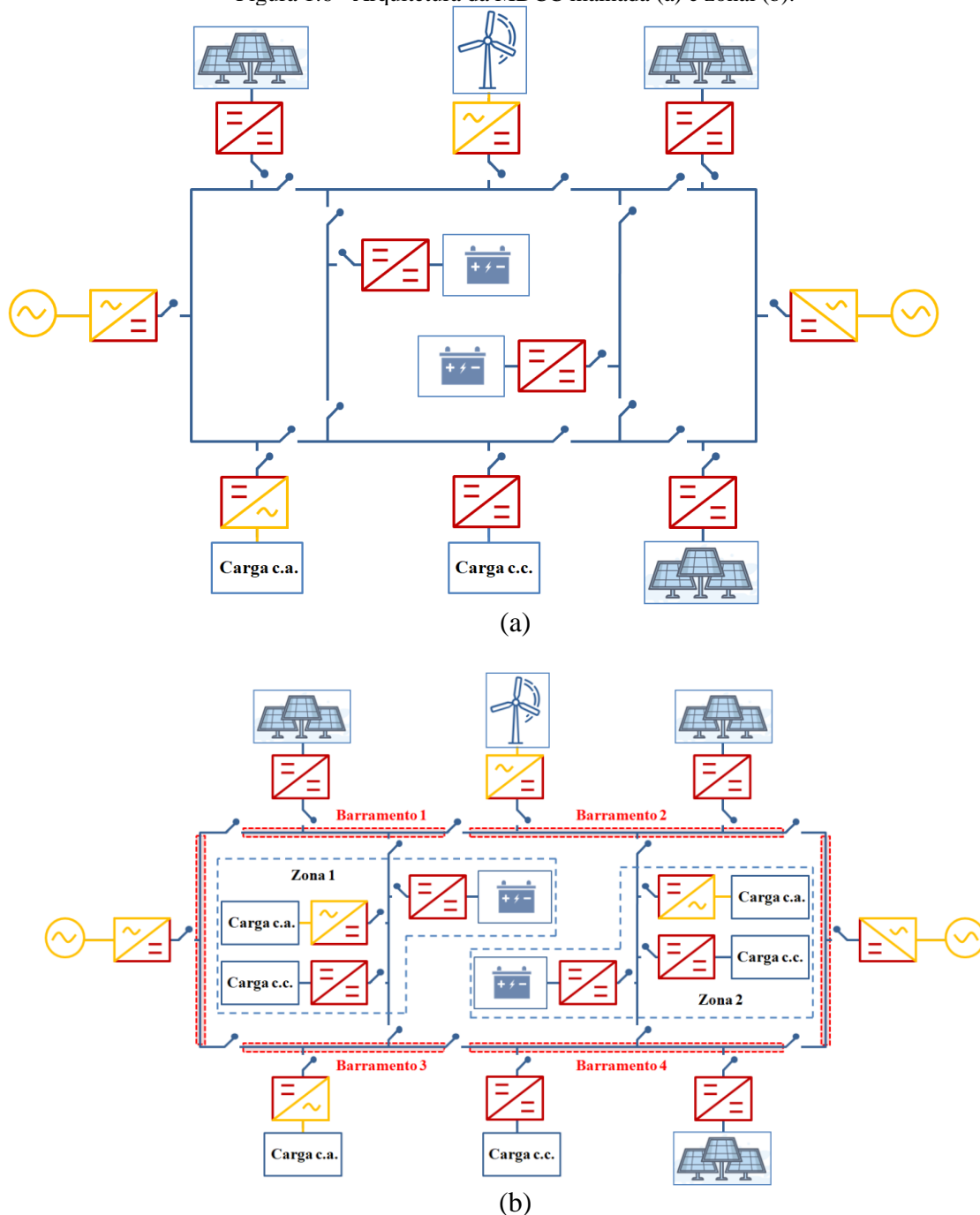


As redes interconectadas podem ser do tipo malhada (multiterminal) ou zonal, conforme ilustrado na Figura 1.6(a) e (b).

Na arquitetura malhada, Figura 1.6(a), é possível observar mais de um ponto de conexão com a rede c.a., esses estão distribuídos ao longo da MDCC. Normalmente, esta configuração é encontrada em sistemas de transmissão em corrente contínua de alta tensão (HVDC, do inglês *high-voltage direct current*), por exemplo, em parques eólicos *offshore* (HAILESELASSIE; UHLEN, 2013), distribuídos em grandes malhas que realizam a distribuição de energia elétrica até os centros urbanos e industriais.

Na configuração zonal, Figura 1.6(b), o sistema de distribuição é dividido em zonas, onde cada zona está conectada a dois barramentos c.c. redundantes (barramento 1 com 3 e barramento 3 com 4), como é comentado em Kwasinski (2011). Essa arquitetura pode ser entendida como um conjunto de MDCC em cascata (KUMAR *et al.*, 2017). Essa arquitetura possui a melhor confiabilidade, em comparação das comentadas anteriormente, visto que existem inúmeras possibilidades para suprimento das cargas, em casos de falta, com comutação das chaves.

Figura 1.6 - Arquitetura da MDCC malhada (a) e zonal (b).



Fonte: Adaptado de Kumar *et al.*, 2017.

1.4 Aterramento

Um aterramento adequado em sistemas de distribuição em corrente contínua em baixa tensão é importante, assim como em qualquer outro sistema, pois proporciona maior segurança e confiabilidade durante eventos transitórios e na estabilidade do nível de tensão do barramento. De forma geral, é possível apresentar três configurações em relação ao aterramento em uma MDCC, sendo esses: isolado da terra (ou sem aterramento), aterrado com resistência e aterramento direto (FARHADI; MOHAMMED, 2017). Se porventura a MDCC tenha um *link* com o barramento c.a., é interessante destacar a importância de definir inicialmente o aterramento do lado c.a., para enfim propor o aterramento c.c., visto que em MDCC, por exemplo, capacitores de filtro de modo comum (componentes de um filtro de EMI) presentes em conversores de potência, podem fornecer um caminho para correntes de falta afetando a operação da MDCC.

1.4.1 Isolado da terra

No que diz respeito às outras configurações de aterramento, esta possui maior continuidade de suprimento, tendo em vista que o sistema ainda pode operar por um tempo no caso de uma falha, por exemplo, se um dos polos estiver em contato com a terra. O sistema c.c. sem aterramento reduz substancialmente a corrente de fuga com o solo e conseqüentemente reduz os efeitos corrosivos.

No entanto, esta configuração pode comprometer o funcionamento de certos equipamentos, principalmente equipamentos de medição, no aparecimento de ruídos que causariam seu mau funcionamento. Além disso, a ausência de aterramento também exige que os equipamentos possuam um nível de isolamento compatível com a tensão polo – terra. No Brasil, mesmo não havendo normas específicas para redes de distribuição em corrente contínua, a NBR 5410 prevê o uso de sistemas de extra-baixa tensão eletricamente isolados da terra com tensão máxima em corrente contínua de 120 V.

1.4.2 Aterrado com resistência

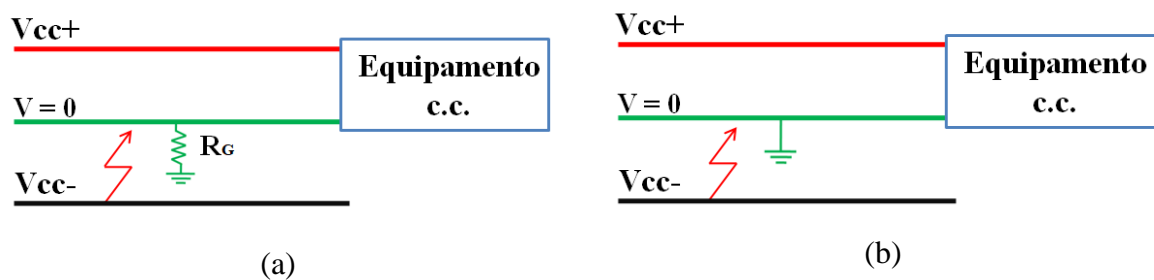
O aterramento indireto com resistência, mostrado na Figura 1.7(a), pode ser uma alternativa para melhorar a detecção de faltas da MDCC. No caso de uma MDCC bipolar, o condutor neutro é aterrado por meio de uma resistência de aterramento, R_G . É interessante destacar que o aterramento no polo negativo pode potencializar os efeitos de corrosão, dado o fluxo de elétrons no eletrodo de aterramento (TORRES, 2019).

A resistência R_G pode ser pensada da seguinte forma: R_G elevada reduz a potência dissipada, no entanto compromete a operação durante um transitório de faltas; R_G pequena melhora o desempenho da proteção em caso de faltas.

1.4.3 Aterramento direto

Nesta configuração, um dos polos, ou condutor neutro no caso de uma rede bipolar, deve estar diretamente aterrado, como pode ser visto na Figura 1.7(b). Esta configuração pode apresentar o menor nível de continuidade do suprimento comparada às configurações anteriores, já que uma falta à terra do polo não aterrado equivale a um curto-circuito polo – polo ou terra – polo. Levando em consideração a qualidade de energia no estado transitório, esta configuração oferece amplitudes de corrente e tensão transitórias mais severas, em caso de curto.

Figura 1.7 - Sistema de aterramento em uma situação de curto-circuito entre polo – neutro com resistência R_G (a) e direto (b).



Fonte: Adaptado de Torres (2019).

1.5 Controle em MDCC

Em uma MDCC tem-se a necessidade de um gerenciamento, ou estratégia de controle, de modo a manter o sistema e a interação dos seus componentes de forma estável. Entre os parâmetros mais importantes a serem observados estão: a estabilidade na tensão do barramento e o gerenciamento do fluxo de potência entre fontes, dispositivos de armazenamento e cargas (TAHIM, 2015). De acordo com o nível de comunicação entre controladores de uma MDCC, o controle em uma MDCC, basicamente, pode ser centralizado, descentralizado ou distribuído (WUNDER *et al.*, 2015).

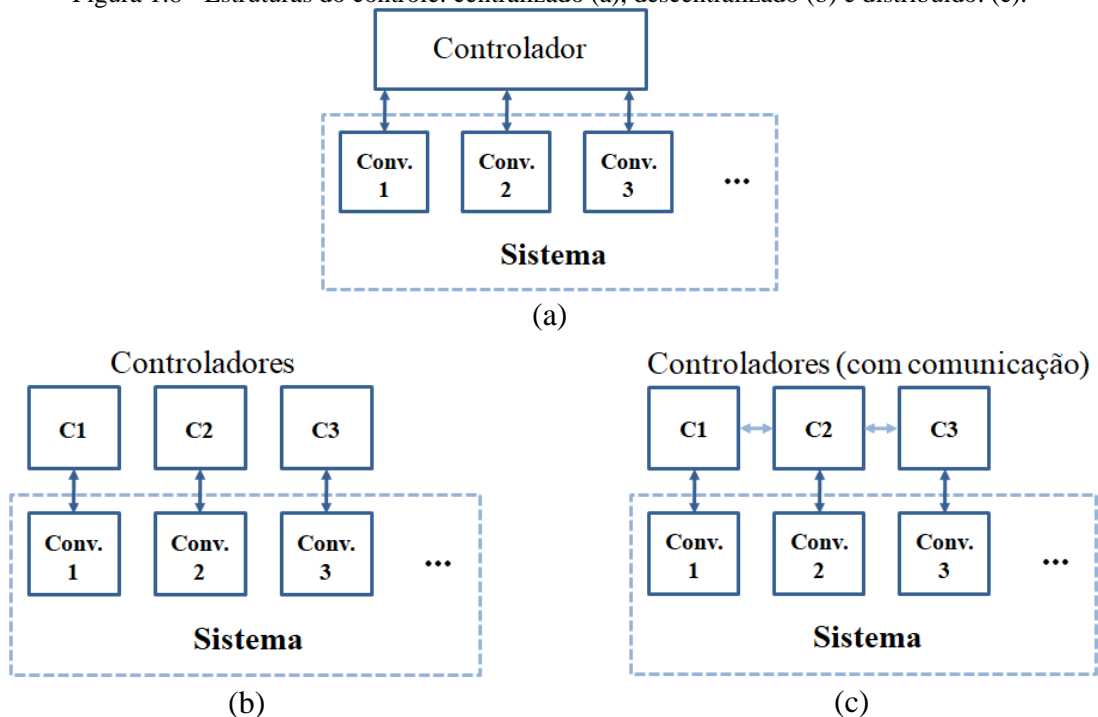
No controle centralizado, apresentado na Fig. 1.8(a), um único controlador (central) realiza o processamento dos dados, de modo a proporcionar elevada observabilidade e controlabilidade, além de possuir uma estrutura mais simples. No entanto, esse modo de controle possui baixa flexibilidade para a MDCC. Nesse sentido, uma falha no sistema mestre

pode acabar por ocasionar o desligamento total da MDCC. Essa estratégia de controle é mais comum em sistemas de pequeno porte onde há poucas variáveis de controle (TORRES, 2019).

No controle descentralizado, apresentado na Fig. 1.8(b), cada fonte possui seu controlador, armazenando e gerindo os seus dados de forma independente, apresentando maior flexibilidade no controle da rede. No entanto, a observabilidade e controlabilidade do sistema são reduzidas, visto que, cada controlador atua de forma isolada sem uma comunicação entre si. Para um exemplo de controle descentralizado pode-se comentar do controle por curva de *droop*, o qual determina a potência entregue por cada GD em uma MDCC (TORRES, 2019).

O controle distribuído, ilustrado na Fig. 1.8(c), está pautado na comunicação dos diversos controladores dos conversores em um sistema. O compartilhamento de variáveis de interesse entre os controladores acontece de forma a favorecer tomadas de decisões que sejam positivas à MDCC. Nesse sentido, de contrapartida ao controle centralizado, a perda de um controlador não causará impacto significativo no sistema de controle.

Figura 1.8 - Estruturas do controle: centralizado (a), descentralizado (b) e distribuído. (c).



Fonte: Adaptado de Torres (2019).

1.6 Cargas supridas em corrente contínua

Como se sabe, nos últimos anos é vista uma utilização cada vez mais crescente de equipamentos que operam internamente em corrente contínua (GERBER *et al.*, 2019), por exemplo: fontes chaveadas, iluminação a LED (do inglês, *Light Emitting Diode*) e inversores de frequência (VFDs, do inglês, *Variable Frequency Drives*) para acionamento de motores,

controlando sua potência e velocidade. Esses equipamentos fazem uso de um retificador para interface com o lado c.a. e, eliminando esse estágio (conversor) aumenta-se a eficiência do sistema (MOIA, 2016).

Além disso, com a geração distribuída pode-se ter uma rede estruturada que opera intrinsecamente em corrente contínua. Do mesmo modo, a distribuição de energia em c.c. configura-se vantajosa em vários aspectos, sejam eles técnicos, com o aumento na eficiência do sistema, por exemplo, em *datacenters* em torno de 7% a 28% (ALLEE; TSCHUDI, 2012), tendo em vista a diminuição no estágio de conversão c.c./c.a.; ou puramente econômico na redução de componentes que atuam na interface c.c./c.a.

Nesse sentido, é possível destacar três topologias de cargas que são supridas em uma rede de distribuição de corrente contínua, quais sejam: cargas de resistência constante (CRC), cargas de corrente constante (CCC) e cargas de potência constante (CPC).

1.6.1 Cargas de resistência constante (CRC)

Esse tipo de carga drena uma corrente que é diretamente proporcional à tensão nos terminais, Equação 1.1. Nessa categoria podem ser incluídos: aquecedores e lâmpadas incandescentes (TAHIM, 2015).

$$R_{\text{carga}} = \frac{V_{\text{cc}}}{I_{\text{carga}}} \quad (1.1)$$

Onde,

R_{carga} , é o valor da resistência da carga.

V_{cc} , é a tensão de suprimento da carga.

I_{carga} , é a corrente da carga.

1.6.2 Cargas de corrente constante (CCC)

Esses tipos de cargas drenam essencialmente o mesmo valor de corrente para diferentes níveis de tensão de entrada. Como exemplo: alguns motores (TAHIM, 2015).

1.6.3 Cargas de potência constante (CPC)

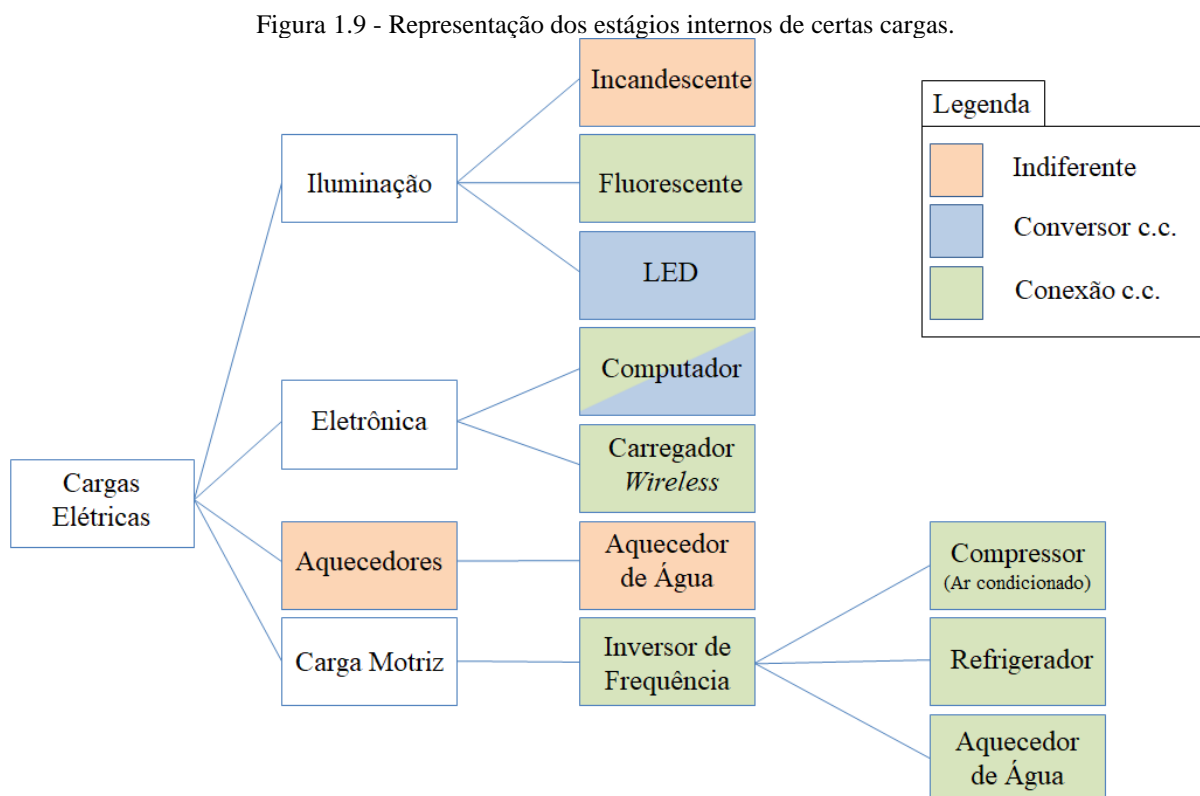
Esses tipos de cargas drenam uma corrente que é inversamente proporcional à tensão de entrada nos terminais. Como exemplo: cargas alimentadas por meio de conversores estáticos c.c./c.c. e alguns motores (TAHIM, 2015).

1.6.4 Estágios internos das cargas

Na Figura 1.9 há exemplos de cargas e seus respectivos estágios internos de compatibilidade com o nível c.c. Cargas com conexão c.c. (na cor verde) possuem um estágio interno que possibilita a conexão com barramento c.c. de forma direta. Nesse sentido, submetendo um equipamento com essa configuração a uma MDCC, o próprio não necessita do estágio de conversão da tensão de entrada ou retificação, possibilitando uma maior eficiência elétrica.

Cargas com conversor c.c./c.c. (na cor azul). Essas cargas em seu estágio interno requerem um conversor c.c./c.c. para adequação da tensão de saída. Como exemplo têm-se lâmpadas a LED supridas diretamente com tensão c.c. (GERBER *et al.*, 2019).

Cargas indiferentes (na cor laranja) podem ser conectadas diretamente a um barramento c.c. ou c.a., incluem aquecedores de água, lâmpadas incandescentes, entre outros.



Fonte: Adaptado de Gerber *et al.*, (2019).

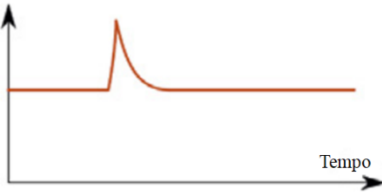
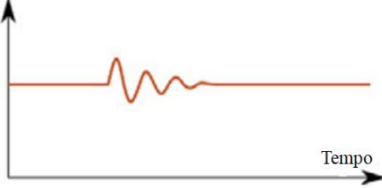
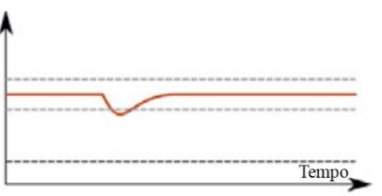
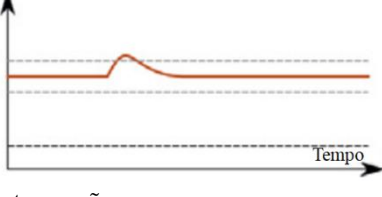

1.7 Qualidade de energia elétrica (QEE) em sistemas de corrente contínua

Eventos relacionados à qualidade de energia elétrica podem ser classificados como transitórios, de curta duração e de longa duração (regime permanente), sendo referentes à tensão de uma MDCC. 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 essa rede.

Na Tabela 1.2 apresentam-se eventos de qualidade de energia relevantes a serem observados, evidenciando sua categoria, causas e possíveis consequências com base na recomendação IEEE (*Institute of Electrical and Electronic Engineers*) – *Recommendation Practice for Monitoring Electric Power Quality - Std 1159*, que estabelece valores de tensão ou corrente (em p.u.), tempo de ocorrência do evento, limites ou valores de referência os quais devem ser tomados como base para o desenvolvimento do estudo ou classificação do evento (VAN DEN BROECK; STUYTS; DRIESEN, 2018).

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

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 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

Subtensão

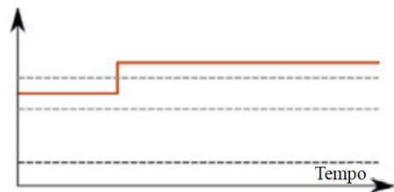


– Magnitude.

– Má regulação da tensão do sistema.
– Sobrecarga.

– Aumento nas perdas.
– Instabilidade na tensão.

Sobretensão



– Magnitude.

– Má regulação da tensão do sistema.

– Sobrecarga em equipamentos.

Interrupção sustentada



– Magnitude.

– Falta.

– Desligamento do equipamento.

Desequilíbrio

Tensão

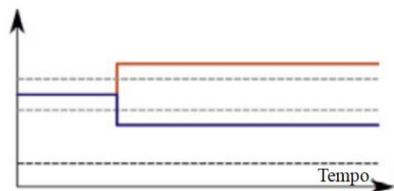


– Magnitude.

– Cargas unipolares.
– Falta no polo-neutro.

– Subtensão ou sobretensão entre polo-neutro.

Corrente



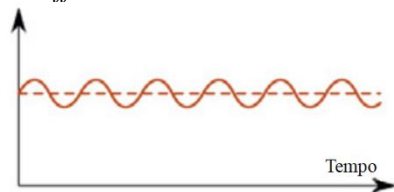
– Magnitude.

– Cargas unipolares.

– Sobrecarga no condutor neutro.
– Tensão desbalanceada
– Aumento nas perdas.

Distorções na forma de onda

AC offset



– Magnitude.

– Falhas na interconexão c.a. e c.c.
– Acoplamento eletromagnético.

– Aumento nas perdas devido correntes reativas
– Decaimento e aumento na tensão.

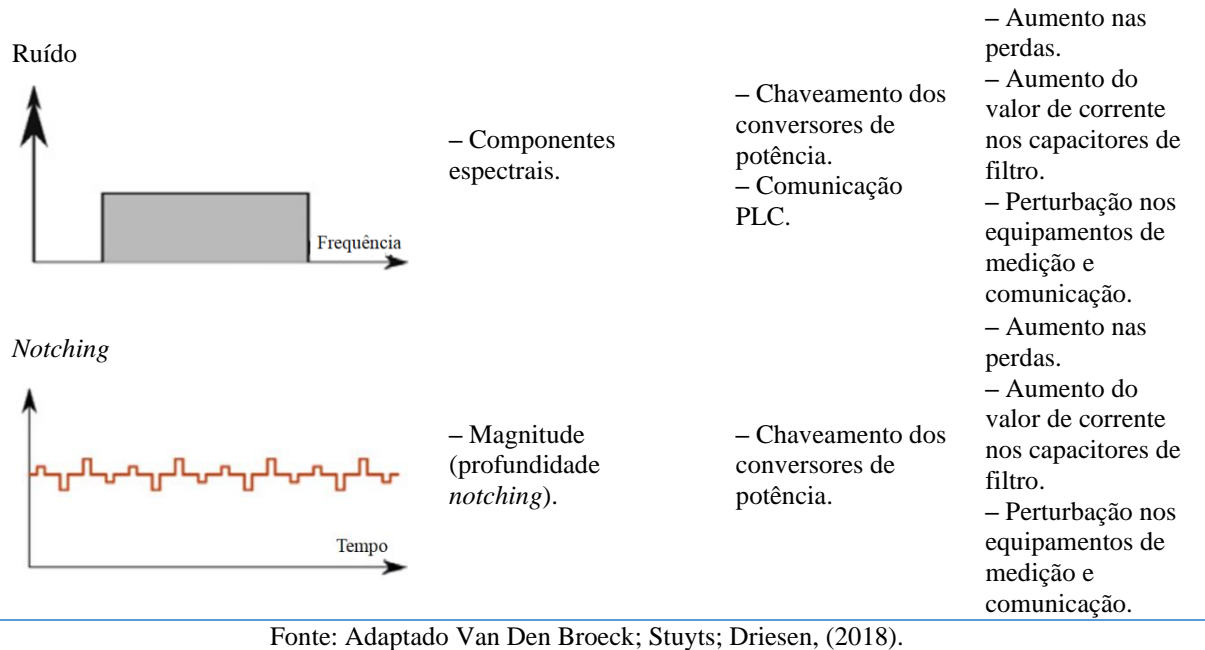
Componentes espúrias (Harmônicos)



– Componentes espectrais.

– Chaveamento dos conversores de potência.

– Aumento nas perdas.
– Aumento do valor de corrente nos capacitores de filtro.
– Perturbação nos equipamentos de medição e comunicação.



Além da norma americana IEEE - Std1159, é possível destacar outras normas internacionais, na Europa a norma *Voltage Disturbances Standard EN 50160 – Voltage Characteristics in Public Distribution System* dispõe de alguns pontos relevantes ao estudo de qualidade de energia em c.c., análogos a IEEE - Std1159, apresentando parâmetros sobre eventos transitórios, variações de longa e curta duração, além de assimetrias no nível de tensão. A *International Electrotechnical Commission. IEC 61000: Electromagnetic compatibility (EMC) - Part 4-30: testing and measurement techniques - Power quality measurement methods* não faz distinção entre a qualidade de energia c.c. e c.a., afirmando que a qualidade de energia abrange características da eletricidade em um determinado ponto em um sistema elétrico, avaliados com base em um conjunto de parâmetros técnicos de referência (VAN DEN BROECK; STUYTS; DRIESEN, 2018).

Cabe ainda ressaltar que se torna necessário normas e padrões referentes à qualidade de energia para sistemas operando em corrente contínua, atribuindo deveres e responsabilidades aos indivíduos que buscam essas soluções (VAN DEN BROECK; STUYTS; DRIESEN, 2018).

No mundo, já existem alguns padrões para aplicações referentes à utilização de corrente contínua, como na Europa o ETSI EN 300 132-3-1, dispõe da utilização de corrente contínua aplicada em *datacenters* como também em outras instalações de comunicação de dados. É definido, no padrão, diretrizes para o projeto, além de teste de equipamento compatíveis com níveis de alimentação entre 260-400 Vcc, estabelecendo níveis de tensão para operação normal, níveis de corrente de sobrecarga e tempos de atuação em caso de falhas (OLIVEIRA, 2016).

No Brasil, a norma ABNT 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 momento, não há normas nacionais que disponham de eventos relacionados à qualidade de energia em corrente contínua.

1.7.1 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 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 - Std 1159.

1.7.2 Variações de longa e curta duração na tensão

No que diz respeito à tensão, é possível categorizar as variações com base na duração, magnitude ou 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” ou “mergulho” 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” (do inglês *voltage swell*) é definida como um aumento no

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.

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.

Tabela 1.4 - Classificação da variação de tensão de curta duração.

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 - Std 1159.

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 aplicados em eventos de curta duração. A Tabela 1.5 mostra os eventos de variação de tensão de longa duração.

Tabela 1.5 - Classificação da variação de tensão – longa duração.

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 - Std 1159.

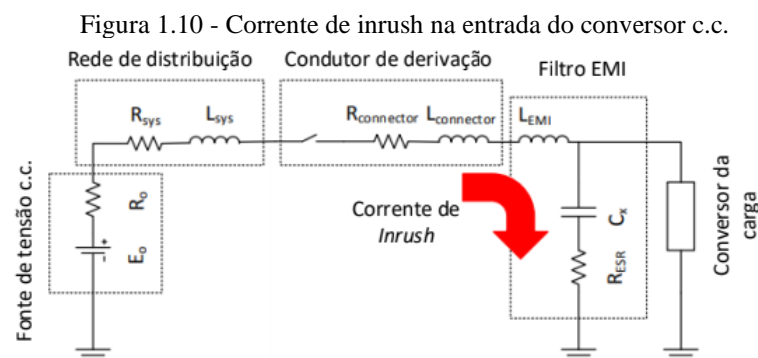
Interrupções sustentadas estão associadas, por exemplo, a uma seção do barramento desconectada após uma falha. Sobretensões podem ser causadas por variações na potência ou por má atuação do regulador de tensão. Destaca-se este fenômeno como o mais impactante numa MDCC, pois os equipamentos e os condutores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

Especificamente, afundamentos e elevações na tensão podem ocorrer durante o chaveamento de capacitores, geralmente localizados nos conversores de potência c.c./c.c. Nesse sentido, é possível destacar um dos problemas relacionados à transmissão em corrente contínua: corrente *inrush*.

1.7.2.1 Corrente de Inrush

Este fenômeno pode ocorrer durante a conexão de um conversor de potência desenergizado a uma MDCC. O capacitor de entrada do conversor, associado ao filtro EMI conforme ilustrado na Figura 1.10, 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, afetariam o funcionamento de equipamentos dessa rede.

Este problema pode ser minimizado de duas formas: realizar o pré-carregamento do conversor antes de conectá-lo à rede ou adotar uma metodologia de *soft-start*, utilizado para evitar correntes de *inrush* em transformadores e motores nas redes c.a.



Fonte: Torres (2019).

1.7.3 Desequilíbrio de tensão em sistema bipolar

O desequilíbrio na tensão ocorre devido ao carregamento desbalanceado ou geração desigual nos barramentos positivos e negativos em uma MDCC bipolar. No caso de uma MDCC conectada à rede c.a., o desbalanceamento entre fases também pode causar a desequilíbrio no lado c.c.

1.7.4 Distorção na forma de onda

As componentes espúrias, resultado de tensões ou correntes oscilantes, surgem com determinadas frequências dependendo de sua origem. Ainda que em sistemas c.c. não existam frequências harmônicas múltiplas da fundamental, dado que a frequência do sistema é 0 Hz, é comum denominar tensões ou correntes espúrias por inter-harmônicos. Inter-harmônicos

podem causar diversos problemas, entre eles, interferências nos sinais de comunicação que utilizam a rede elétrica (PLC, do inglês *Power Line Communication*) (PINOMAA *et al.*, 2013) e nos instrumentos de medições (VAN DEN BROECK; STUYTS; DRIESEN, 2018), visto que a frequência conduzida em uma MDCC pode variar de baixas frequências (abaixo de 9 kHz) a altas frequências, em bandas de 9 – 150 kHz e 150 kHz – 30 MHz (KURMA *et al.*, 2015). Os conversores de potências são considerados a principal fonte de inter-harmônicos em um sistema de distribuição c.c., causados pela frequência de chaveamento devido à modulação por largura de pulso (PWM, do inglês *Pulse Width Modulation*).

Outro evento ou fenômeno de qualidade de energia é denominado de *notching* ou recorte na tensão, sendo caracterizado pela profundidade do recorte ou entalhe e sua duração. Este distúrbio ocorre com polaridade oposta à forma de onda da tensão normal de operação. Nesse sentido, em uma MDCC, o *notching* pode ser causado durante o chaveamento de conversores de potência com capacitores de saída de baixa capacitância, conforme mostra Van den Broeck; Suyts; Driesen (2018).

1.7.5 Flutuações na tensão do barramento c.c.

Nos sistemas de distribuição c.a., flutuações na tensão causam oscilações nas cargas de iluminação proporcionando desconforto, fenômeno designado por uma cintilação, denominado de efeito *flicker*. A norma IEC 61000 define o efeito *flicker* como “impressão visual de instabilidade provocada por estímulo luminoso cuja luminância varia com o tempo”.

Em um sistema de distribuição c.c., variações na potência transmitida, em baixas frequências, causam flutuações na tensão da rede. Lâmpadas incandescentes são mais sensíveis a esses eventos.

1.8 Considerações finais

O presente capítulo discorreu sobre redes em corrente contínua, apresentando diferentes topologias e configurações que podem ser adotadas por essa tecnologia. Estas redes demonstram vantagens técnicas e econômicas que a tornam de grande importância, em virtude de poder oferecer maior eficiência energética, possibilitando a sua aplicação em instalações residenciais, comerciais ou mesmo industriais. Apresentaram-se também normas e padrões que discorrem de figuras de mérito da qualidade de energia em sistemas em corrente contínua. O capítulo seguinte descreve a nanorede de distribuição em corrente contínua do GEDAE/UFPA e as cargas envolvidas nos ensaios realizados, apresentando seus componentes e como estão conectados.

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 externa do prédio do GEDAE, mostrando os principais equipamentos do sistema de geração e armazenamento presentes na NDCC, as cargas empregadas para testes, bem como a disposição dos componentes na referida rede.

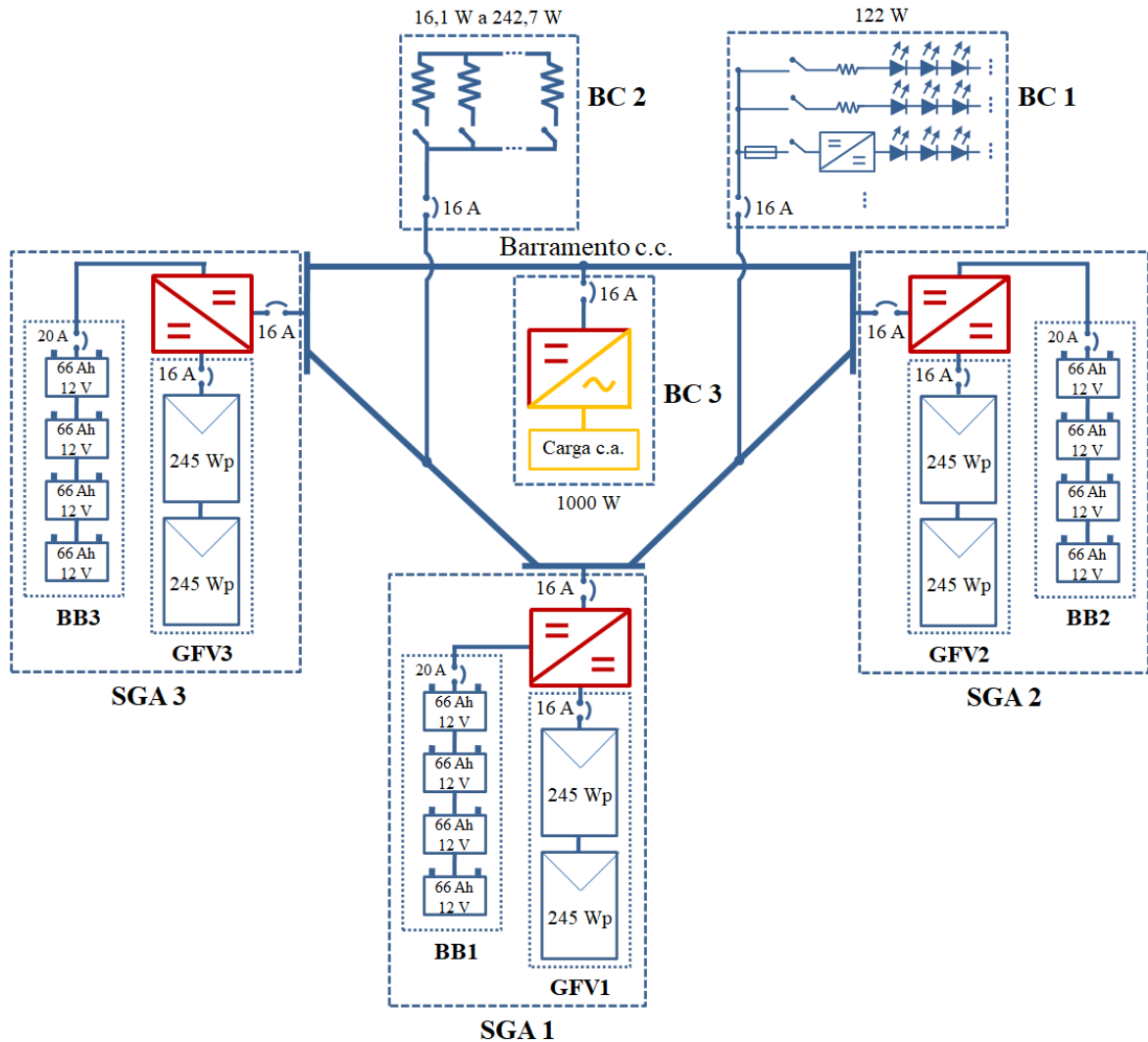
2.1 Sistema de geração e armazenamento (SGA)

A NDCC em estudo está instalada na área externa do prédio do GEDAE/UFPA. O prédio do GEDAE está localizado na cidade universitária Prof. José da Silveira Neto – 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 cargas. 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 sob 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 os controladores de carga em um quadro de montagem.

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, a NDCC 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.

Figura 2.1 - Diagrama unifilar da NDCC.



Fonte: Autoria própria.

2.1.1 Controlador de carga (CC)

Três controladores de carga fazem a interface dos sistemas de geração e armazenamento com a NDCC, estando estes abrigados no quadro de montagem do centro de conexões. O SGA1 utiliza o controlador de carga do modelo SCCM20-100R, Figura 2.2, do fabricante *Outback Power*, operando com uma corrente máxima de 20 A, possibilitando a utilização de um banco de baterias de 12 V ou 24 V. O controlador possui a função de seguimento do ponto de máxima potência (SPMP) do gerador fotovoltaico, oferecendo a potência máxima do gerador sob dadas condições de temperatura e irradiância. Na Tabela 2.1 constam as características do controlador de carga.

Figura 2.2 - Controlador de carga SCCM20-100R.



Fonte: OutBack Power (2021).

Tabela 2.1 - Especificações técnicas do controlador de carga SCCM20-100R.

Seção	Parâmetro	12 V	24 V			
FV	Potência máxima	300 W	600 W			
	Tensão máxima c.c.	100 V (desligado); 90 V (operando)				
	Tensão de circuito aberto	20 V – 100 V				
	Tensão de máxima potência	15 V – 75 V	27 V – 75 V			
	Corrente máxima de curto-circuito	20 A				
Bateria	Tensão de entrada	8 V – 15 V	16 V – 30 V			
	Corrente em modo de espera	< 37 mA	< 26 mA			
	Capacidade	Mínimo de 100 Ah em regime de C/5				
Carregador	Tensão de carga	Etapa	Flooded	VRLA	Flooded	VRLA
		<i>Bulk</i>	14,8 V	14,6 V	29,6 V	29,2 V
		<i>Absorb</i>	14,8 V	14,4 V	29,6 V	28,8 V
	Tempo no modo de absorção	2 horas				
	Tensão no modo <i>Float</i>	13,2 V	13,5 V	26,4 V	27,0 V	
	Corrente máxima de carga	20 A				
	Faixa de compensação de temperatura	+ 30 mV/°C / 12 V de 0 °C a 24 °C - 30 mV/°C / 12 V de 26 °C a 60 °C				
Sensor de temperatura da bateria	NTC 10K					
Equalização	Nota: A equalização ocorre a cada 60 dias ou após uma desconexão de carga por subtensão na bateria.					
	Tensão máxima de equalização	15,5 V	-	31,0 V	-	
	Tempo de equalização	1 hora				
Proteções internas	Proteção interna	Eletrônica	Reversão de polaridade do FV e da bateria			
		Passiva	Fusível de 30 A			
	Corrente máxima no terminal das cargas	20 A				
	Tensão de desconexão por subtensão	11,4 V		22,8 V		
	Tensão de reconexão após subtensão	12,4 V		24,8 V		
Tensão de desconexão por sobretensão	15,0 V		30,0 V			
Eficiência	SPMP	> 99% acima de 1000 W/m ²				
	Conversão	Até 98,5%				

Fonte: OutBack Power (2021).

O SGA2 e o SGA3 possuem o controlador de carga, ilustrado na Figura 2.3, da fabricante EPEVER modelo XTRA *series* – 2210N, para realização da interface com a NDCC. O controlador possui a tecnologia de SPMP, ou MPPT (do inglês, *Maximum Power Point Tracking*), 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 2.2 apresentam-se as características do controlador.

Figura 2.3 - Controlador de carga XTRA 2210N.



Fonte: EPEVER (2020).

Tabela 2.2 - Especificações técnicas do controlador de carga XTRA 2210N.

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	< 35mA	< 22mA			
Carregador	Tensão de carga	Etapa	Flooded	VRLA	Flooded	VRL
		<i>Boost</i>	14,6 V	14,4 V	29,2 V	A
	Tensão no modo <i>Float</i>	13,8 V		27,6 V	28,8	
	Corrente máxima de carga e descarga	20 A		V		
Equalização	Tensão máxima de equalização	Faixa de compensação de temperatura		+ 3 mV/°C/2 V		
		14,8 V	14,6 V	29,6 V	29,2	
Proteções internas	Corrente máxima no terminal das cargas	20 A				
	Tensão de desconexão por subtensão	11,1 V		22,2 V		
	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 (2020).

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.

2.1.2 Gerador 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 este módulo foi submetido a um ensaio em um simulador solar para obtenção dos parâmetros elétricos do mesmo, como descrito em Torres (2019).

As características elétricas nas condições padrões de ensaio² são apresentados na Tabela 2.3. Tais valores pertencem a um módulo avulso utilizado na NDCC, a partir do ensaio no simulador solar, presente no laboratório do GEDAE, modelo *HighLight 3c*, classe A+A+A+, do fabricante PASAN MEASUREMENT SYSTEMS.

Tabela 2.3 - 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 2.4 constam os coeficientes térmicos dos módulos utilizados, obtidos na folha de dados do fabricante (YINGLI SOLAR, 2014).

Tabela 2.4 - 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 podem ser observadas na Tabela 2.5. Os mesmos estão dispostos em um telhado, como é possível observar na Figura 2.4, localizado na área de testes do prédio do GEDAE. Todos os geradores possuem sua orientação para o norte magnético, com desvio azimutal igual a 13° nordeste, sob ângulo de inclinação de 11° em relação ao plano horizontal.

Tabela 2.5 - 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).

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

Figura 2.4 - Disposição de cada GFV no telhado.



Fonte: Autoria própria.

2.1.3 Banco de baterias (BB)

Os bancos de baterias estão dispostos sob a estrutura de telhado e são formados por quatro baterias seladas de chumbo ácido em associação série-paralelo, cada um. As baterias que compõem o banco são do modelo BLUETOP D27M, da fabricante *Optima Batteries*, Figura 2.5, tendo tensão nominal de 12 V e capacidade nominal de 66 Ah (C/20).

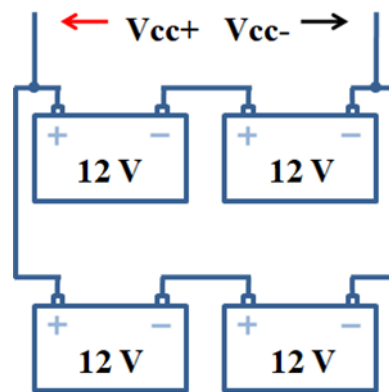
Figura 2.5 - Bateria de chumbo ácido.



Fonte: Autoria própria.

Cada banco de baterias possui uma associação em paralelo de um conjunto de duas baterias de 12 V conectadas em série, como mostra a Figura 2.6, proporcionando um banco com tensão nominal de 24 V e capacidade nominal de 132 Ah. Considerando que as baterias já estiveram em uso anteriormente, passando por elevado *stress* de umidade, temperatura e descargas profundas, cada banco possui, aproximadamente, 70% da capacidade nominal (TORRES, 2019).

Figura 2.6 - Esquema de conexão do banco de baterias.



Fonte: Autoria própria.

2.2 Banco de cargas (BC)

Para fins de testes de demanda e consumo na NDCC, empregam-se bancos de carga, conforme especificados na Tabela 2.6, os quais foram pensados considerando premissas distintas.

Tabela 2.6 - Característica de cada banco de carga.

BC	Carga	Tipo de Carga	Quantidade	Tensão Nominal (Vcc)	Potência Unitária (W)
1	Barra de LEDs	Potência constante	2	24	25
	Painel LED <i>SLIM</i> com conversor c.c./c.c.	Potência constante	6	36	12
2	Resistor Variável	Resistência constante	1	-	16,1 – 242,7 ³
3	Inversor Autônomo	Potência constante	1	24	1000

Fonte: Autoria própria.

O banco de cargas nº 1 (BC1) é constituído de cargas 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. Para o banco de carga nº 3 (BC3), utiliza-se um inversor com intuito da realização da

³ Potência variável do banco de cargas nº 2 considerando o suprimento por uma tensão nominal de 24 V em corrente contínua.

interface da rede c.c. com cargas c.a., dessa forma, observando os possíveis impactos para NDCC. As subseções seguintes fazem o detalhamento de cada banco de carga.

2.2.1 Banco de carga nº 1

A iluminação artificial utilizando lâmpadas LED aplicada em residências, ambientes de trabalho ou vias públicas é realidade pelo preço de mercado competitivo se comparada à vida útil e eficiência de conversão de energia elétrica em energia luminosa em relação às lâmpadas fluorescentes e incandescentes. Nesse sentido, o BC1 foi confeccionado com a utilização de iluminação a LED em dois tipos disponíveis no mercado: barra de LEDs e Painéis LED *SLIM* com conversor c.c. A potência demandada pelo referido banco de carga pode ser de até 122 W e o consumo pode ser de até 2,92 kWh/dia.

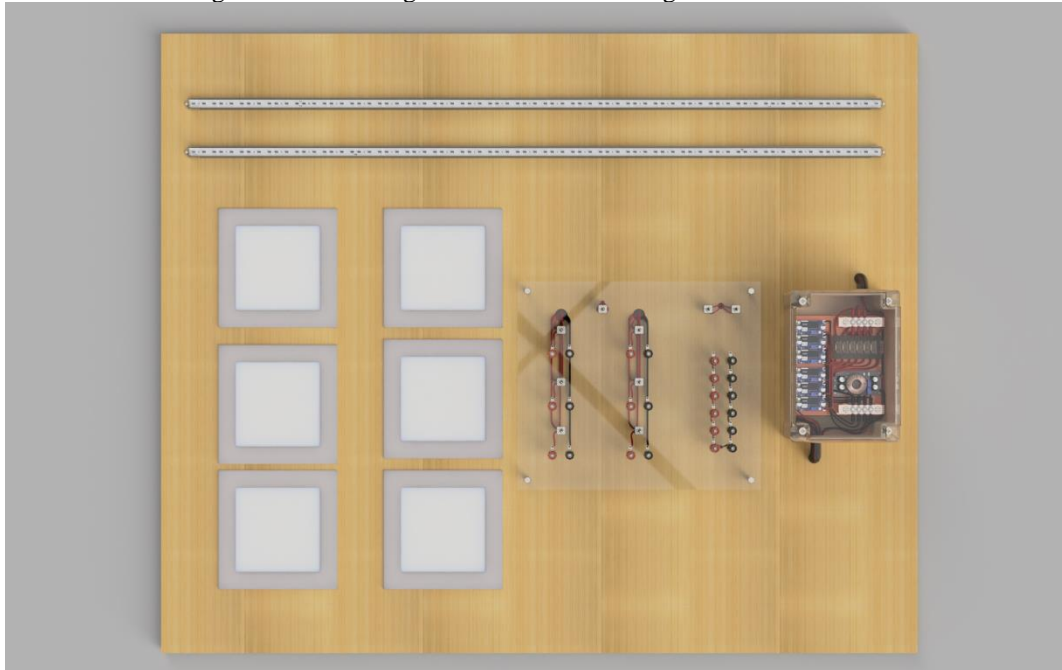
Inicialmente, o BC1 foi elaborado em um ambiente computacional de modelagem, de forma a realizar a escolha da disposição dos componentes sobre a estrutura e organização do circuito na caixa de montagem, economizando espaço e possibilitando mudanças futuras na adição de novas cargas. O *software Autodesk Fusion 360* foi utilizado para o trabalho de modelagem 3D, por oferecer licença livre para estudantes e ser uma plataforma intuitiva e simples para realização do processo de modelagem.

O processo de modelagem 3D iniciou com a criação dos componentes, com base em suas medidas obtidas por meio de uma régua de precisão ou por informações de dimensões, quando existentes, da folha de dados do componente. Alguns componentes (chave alavanca, borne de conexão fêmea e fusíveis) foram obtidos por meio de modelagens 3D já existentes, disponíveis no *site GrabCAD*⁴, o qual permite o uso livre dos arquivos.

O banco de cargas nº 1, cujo resultado da modelagem 3D é ilustrado na Figura 2.7, está composto por: painel de acionamento das cargas, caixa de conexões, cargas e estrutura de suporte.

⁴ O *GrabCAD*, Inc. é uma *startup* baseada em Cambridge, Massachusetts, que criou um ambiente de colaboração gratuito baseado em nuvem que ajuda as equipes de engenharia a gerenciar, visualizar e compartilhar arquivos CAD.

Figura 2.7 - Modelagem 3D do banco de carga nº 1 vista frontal.

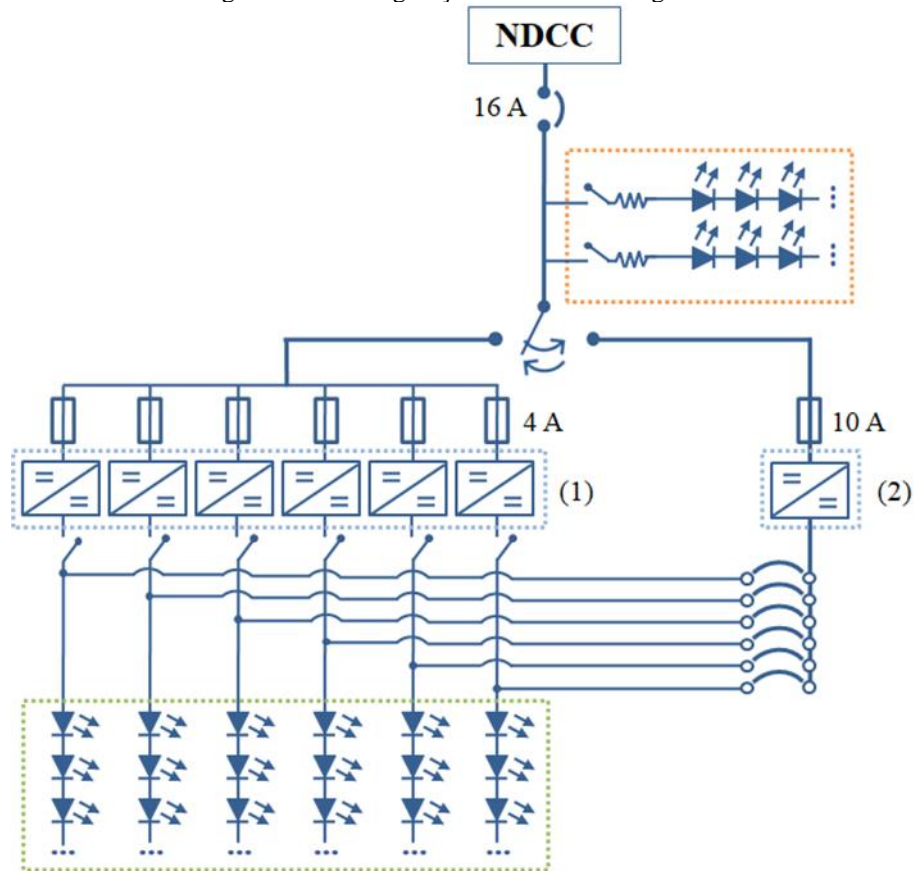


Fonte: Autoria própria.

A estrutura de suporte do BC1 é feita a partir de uma chapa de madeira de compensado com as dimensões 100x90x12 cm de comprimento, largura e espessura, respectivamente.

As barras de LED fixadas na estrutura de compensado (pontilhado laranja na Figura 2.8) possuem uma chave alavanca para acionamento individual e não compartilham da utilização de conversores. As luminárias (pontilhado verde da Figura 2.8) estão arranjadas de forma a possibilitar duas configurações distintas, sendo essas, a utilização de um *driver* descentralizado (1) ou centralizado (2), conforme o esquema ilustrado na Figura 2.8.

Figura 2.8 - Configuração do banco de carga nº 1.



Fonte: Autoria própria.

Para o acionamento das luminárias ou painéis LED *SLIM*, inicialmente uma chave alavanca de três posições possibilita a escolha da estratégia de *driver*, seja descentralizado ou centralizado. Posteriormente, se a estratégia para alimentar as cargas adotada for com 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, a fim de simular distâncias distintas da conexão das luminárias com a NDCC. Tal estratégia se torna interessante por mostrar qual configuração está mais passível a sofrer influências de um distúrbio da rede de distribuição, causando consequências para as cargas que serão supridas.

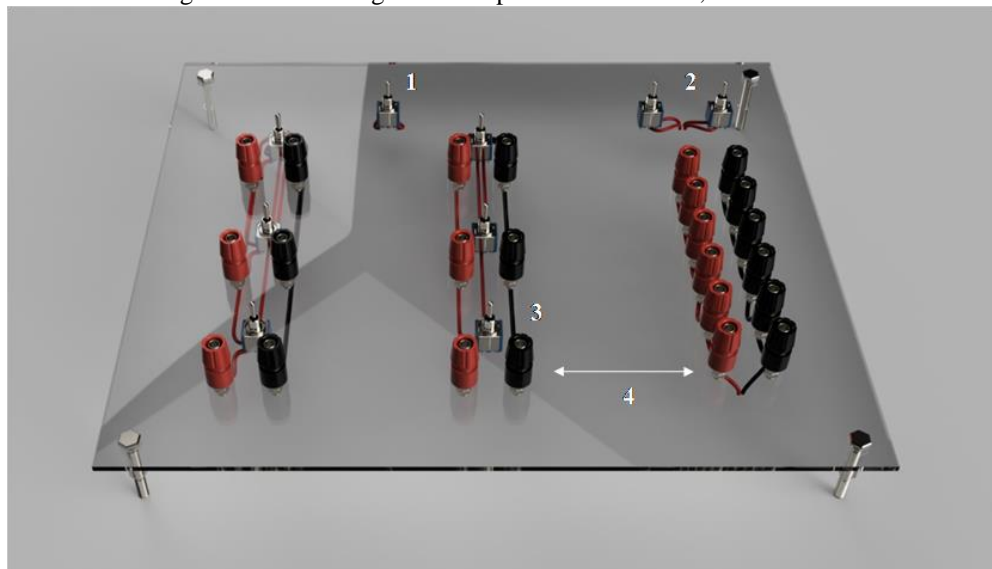
O sistema de proteção adotado se deu pela adição de fusíveis na entrada de cada conversor, considerando sua corrente máxima de entrada disponível na folha de dados do componente. Além disso, um disjuntor realiza a interface da NDCC com o BC1.

2.2.1.1 Painel de acionamento das cargas

O painel de acionamento das cargas foi construído em uma estrutura de acrílico de 35x30x0,3 cm de comprimento, largura e espessura, respectivamente. Na Figura 2.9 apresenta-

se o resultado da modelagem 3D do painel de acionamento das cargas, onde seis chaves alavancas em conjunto dos bornes de conexão fêmea positivo (+) e negativo (-) são responsáveis pelo acionamento das luminárias de LED. Acima, a chave alavanca de três posições (1) permite os estados: desligado/centralizado/descentralizado, permitindo a troca do conversor que será responsável por suprir as luminárias. Duas chaves alavancas (2) realizam o acionamento individual das barras de LED. As seis chaves alavancas, indicado apenas pelo (3), são responsáveis pelo acionamento individual das luminárias, nesse caso supridas pelo conversor c.c./c.c. descentralizado. Por fim, os bornes de conexão fêmea, indicados pela seta (4), permitem que o conversor c.c./c.c. centralizado possa suprir as luminárias por meio de condutores de diferentes comprimentos.

Figura 2.9 - Modelagem 3D do painel de conexões, vista frontal.



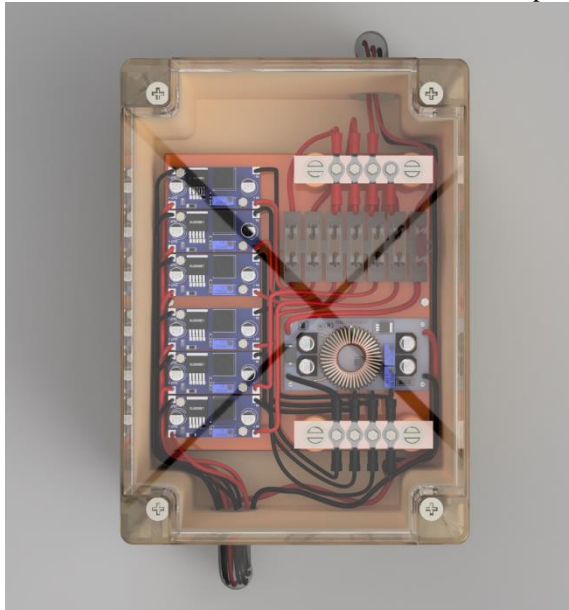
Fonte: Autoria própria.

2.2.1.2 Caixa de conexões

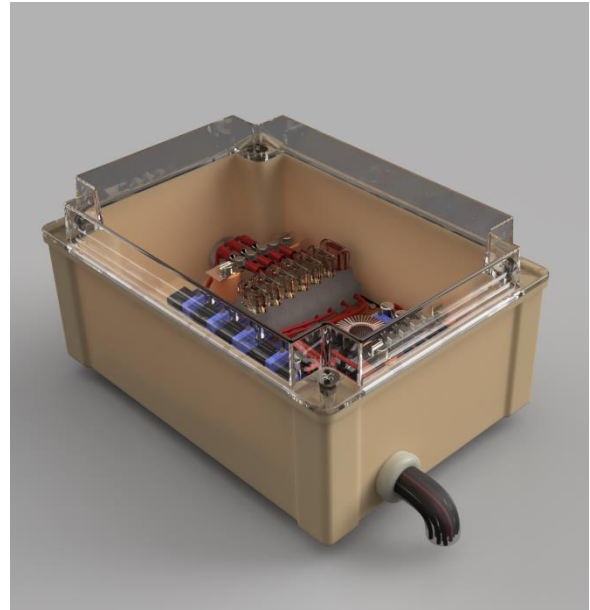
A caixa de montagem utilizada é da fabricante *Schuhmacher*, possui grau de proteção IP65 e dimensões 20x14x9 cm de comprimento, largura e profundidade, respectivamente, onde é feita a disposição do circuito com seis conversores c.c./c.c. descentralizado e um conversor c.c./c.c. centralizado, sistema de proteção, com a utilização de fusíveis e portas fusíveis, além do barramento de cobre positivo (+) e negativo (-), disposto de forma a facilitar as conexões. Posteriormente, um organizador de fios direciona os condutores para conexão no painel de acionamento das cargas por trás da estrutura de compensado.

Na Figura 2.10 apresenta-se o resultado da modelagem 3D, com vista frontal e lateral, da caixa de conexões e dos componentes (conversores, conectores e barramentos).

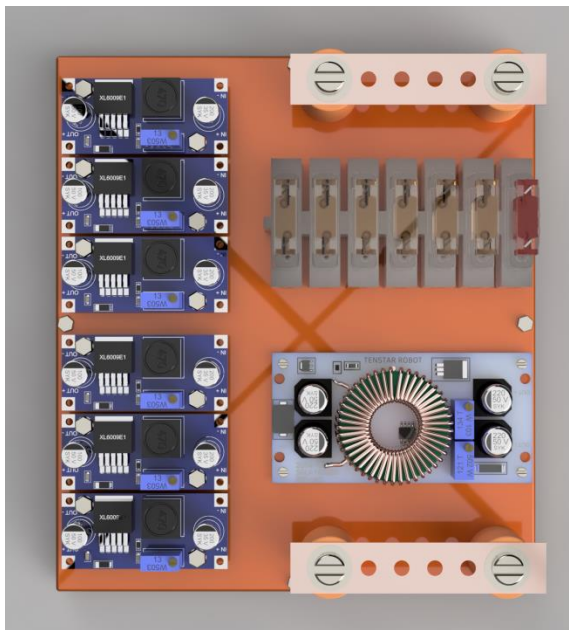
Figura 2.10 - Modelagem 3D da caixa de conexões e dos componentes, vista frontal (a) e (c), lateral (b) e (d), respectivamente.



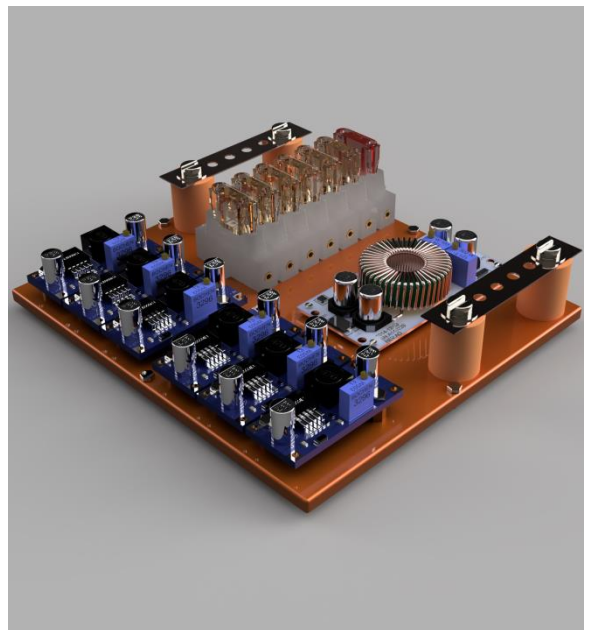
(a)



(b)



(c)



(d)

Fonte: Autoria própria.

A construção física do BC1 ocorreu de forma a seguir o que estava determinado durante o processo de modelagem 3D. No entanto, durante a aquisição da caixa de montagem foi obtido o modelo com dobradiça, facilitando o acesso aos componentes para ocasiões futuras. Além disso, foram utilizados fusíveis de menores dimensões, oferecendo mais espaço na caixa de montagem para disposição dos outros componentes. Nas Figuras 2.11(a), (b), (d) e (d) mostra-se o banco de cargas finalizado.

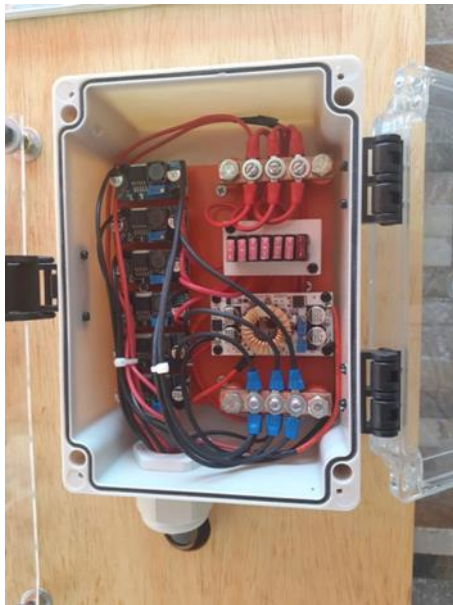
Figura 2.11 - BC1 vista frontal (a), painel de conexões (b), caixa de montagem (c) e luminárias (d).



(a)



(b)



(c)



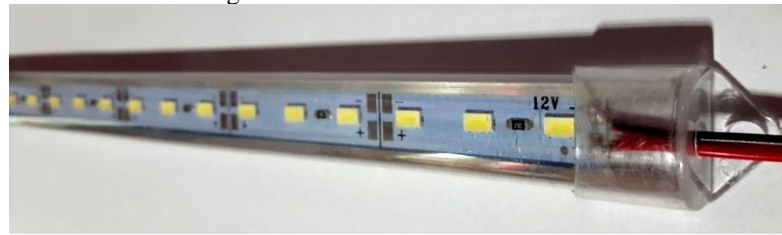
(d)

Fonte: Autoria própria.

2.2.1.3 Barra de LEDs

A barra de LEDs utilizada, ilustrada na Figura 2.12, possui potência e tensão nominal de operação de 25 W e 24 V, respectivamente, 1 metro de comprimento, estrutura de alumínio com capa protetora de plástico transparente e luz da cor branca fria, ilustrada na Figura 2.12(b). Barras de LEDs ou fitas de LEDs são utilizadas em iluminações indiretas, por exemplo, em sancas de gesso abertas, aplicadas em residências, escritórios e lojas, sendo encontradas no mercado no formato de barra ou fita. No BC1 estão arranjadas duas barras de LEDs totalizando uma potência de 50 W e um consumo de até 1,2 kWh/dia apenas das barras de LEDs.

Figura 2.12 - Barra de LED do BC1.



(a)

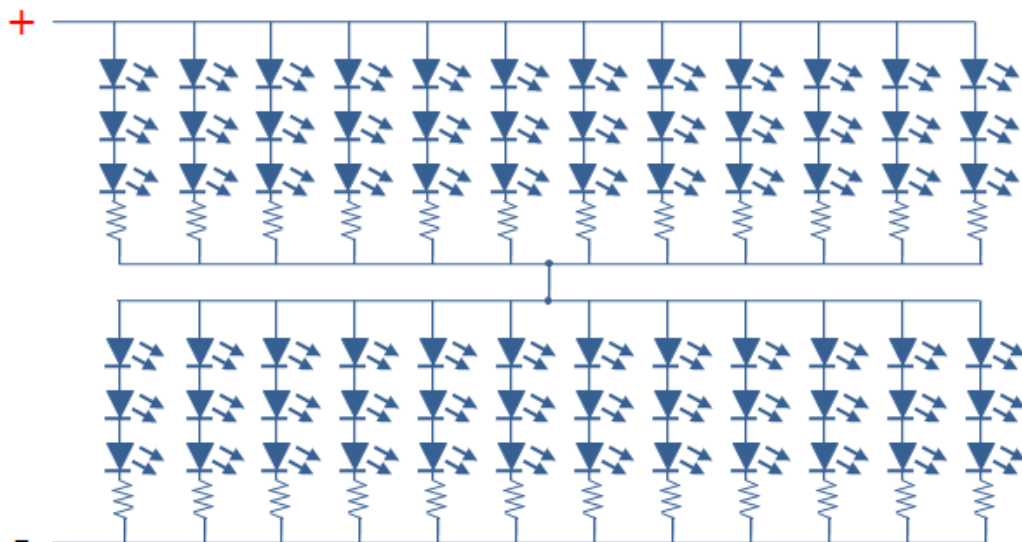


(b)

Fonte: Autoria própria.

Internamente estão conectadas em série duas fitas de LEDs de 12 V de 0,5 metro de comprimento. Cada fita de LEDs conta com 12 *strings* em paralelo, cada uma contendo 3 LEDs em série e 1 resistor SMD (do inglês, *Surface Mounting Devices*) para limitar a corrente que passa pelos diodos emissores de luz, evitando que os mesmos sejam queimados em caso de correntes elevadas. A Figura 2.13 mostra o circuito que representa a barra de LEDs utilizada no BC1.

Figura 2.13 - Circuito representativo da barra de LED.

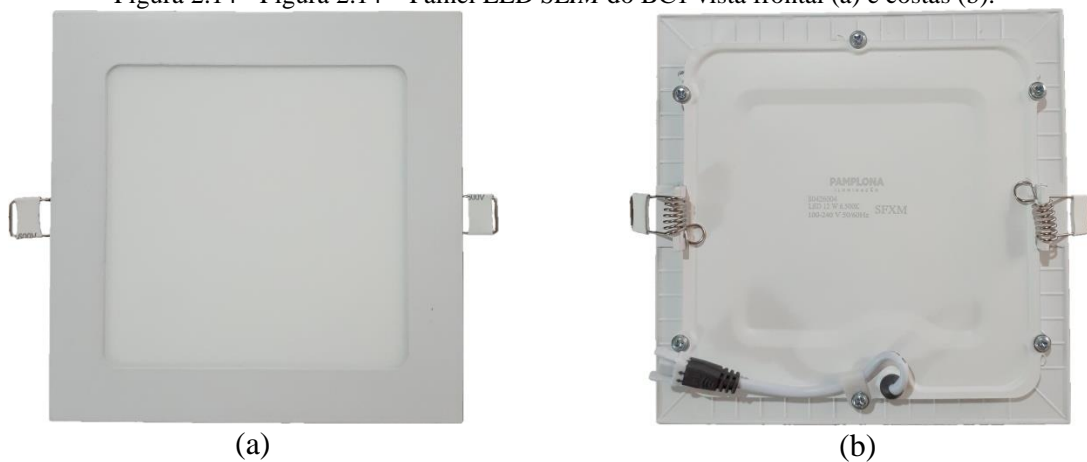


Fonte: Autoria própria.

2.2.1.4 Luminária – Painel LED SLIM com conversor c.c./c.c.

O BC1 também é composto por seis luminárias da fabricante Blumenau Iluminação, modelo Painel LED *SLIM* com estrutura de alumínio, cor branca fria e opera com uma potência nominal de 12 W e tensão de entrada de 100 a 240 V_{rms} em corrente alternada. Portanto, a outra parte do BC1, composto pelas referidas luminárias, possui uma potência nominal de 72 W e um consumo de, aproximadamente, 1,72 kWh/dia, considerando as seis luminárias. Na Figura 2.14(a) e (b) apresentam-se as fotografias tomadas das partes frontal e traseira da luminária Painel LED *SLIM*, respectivamente.

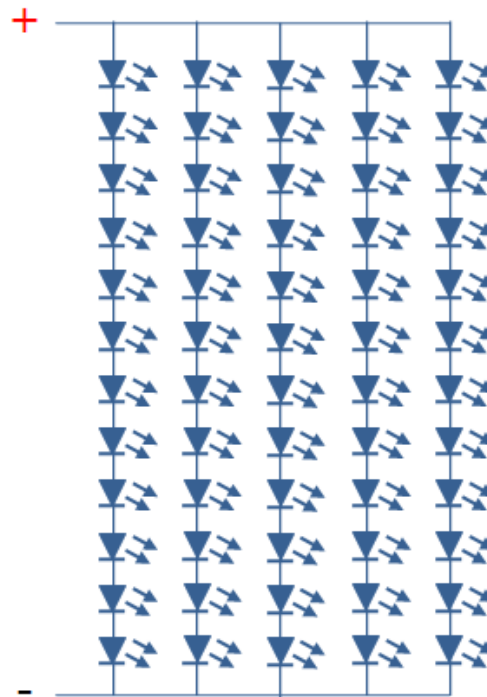
Figura 2.14 - Figura 2.14 – Painel LED *SLIM* do BC1 vista frontal (a) e costas (b).



Fonte: Autoria própria.

Internamente as luminárias possuem, sob uma fita condutora, 60 LEDs arranjados, sendo 12 em série e 5 em paralelo, como mostra a Figura 2.15. Nesse caso, diferente da barra de LEDs, os LEDs estão conectados diretamente um ao outro sem um componente que auxilie no limite de corrente que irá passar em cada LED, dessa forma, fazendo-se necessária a utilização de um *driver*.

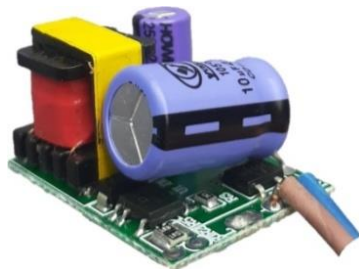
Figura 2.15 - Circuito representativo da luminária de LEDs do BC1.



Fonte: Autoria própria.

Luminárias comerciais de LEDs são normalmente vendidas com seus respectivos *drivers* de conexão, o qual realiza a adequação do nível de tensão da rede de distribuição convencional e fornece um valor de corrente constante que será entregue à luminária, evitando que a mesma seja danificada. Na Figura 2.16 apresenta-se a placa de circuito e a capa protetora do *driver* que acompanha os painéis LED utilizados no trabalho.

Figura 2.16 - *Driver* de fábrica do painel LED (a) e estrutura de proteção (b).



(a)



(b)

Fonte: Autoria própria.

Estudos mostram que *drivers* comerciais utilizados para suprir lâmpadas de LED, quando em conjunto com outros *drivers* em um barramento, injetam componentes harmônicas de corrente na rede, além de estarem suscetíveis a quedas de tensão da rede, ocasionando pequenas variações na luminosidade da lâmpada (ABDALAAL; HO, 2017). De forma geral,

drivers utilizados para suprir lâmpadas de LED possuem eficiência de aproximadamente 85% (JHUNJHUNWALA, *et al.*, 2016).

Para os painéis de LED do banco de cargas nº 1 foi realizada a troca do *driver* de fábrica por um conversor c.c./c.c. visando à adequação do nível de tensão do barramento da NDCC para 36 Vcc, tendo em vista que não foi possível encontrar no mercado local luminárias que operassem com tensão nominal de 24 Vcc.

Para o modo descentralizado, foi utilizado o conversor c.c./c.c., apresentado na Figura 2.17(a), do tipo *step up* ou *boost*, modelo do *chip* base XL6009, elevando a tensão do barramento c.c., de 24 V para 36 V. 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 necessário um dissipador de calor acima dessa potência. As características do conversor são apresentadas na Tabela 2.7(a).

Para o modo centralizado, foi utilizado o conversor c.c./c.c., apresentado na Figura 2.17(b), 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 *trimpot* individuais.

Figura 2.17 - Conversor c.c./c.c. boost descentralizado (a) e centralizado (b).



Fonte: Curto Circuito (2020).

Tabela 2.7 - Características técnicas do conversor c.c./c.c. *boost*.

Parâmetro	(a)	(b)
Tensão de entrada	5 – 32 Vcc	8 – 45 Vcc
Tensão de saída	5,5 – 36 Vcc	12 – 50 Vcc
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: Curto Circuito (2020).

2.2.2 Banco de carga nº 2

O BC2 consiste de uma carga resistiva, ilustrado na Figura 2.18, capaz de dissipar uma potência de até 242,7 W, sob uma tensão de 24 Vcc. A mesma possui 15 elementos resistivos, cada um com resistência de 35,6 Ω , possibilitando diversas formas de conexões série e paralelo. Essa carga é normalmente comercializada para ser utilizada como aquecedor de ar, sendo fabricada, nesse caso, pela IMC (Indústria de Aparelhos Elétricos).

Figura 2.18 - Carga resistiva de alta potência.



Fonte: Autoria própria.

2.2.3 Banco de carga nº 3

Para o BC3 foi utilizado um inversor de onda senoidal pura, da fabricante *Xantrex*, modelo *Prosine Sine Wave Inverter 1000*, ilustrado na Figura 2.19, o qual possui potência nominal de 1.000 W, tensão nominal de entrada de 24 V, fornece uma tensão senoidal na saída com valor nominal de 120 V_{rms} e frequência de 60 Hz. Este inversor pode fornecer no lado c.a. uma corrente de até 8,3 A_{rms} e corrente de pico de até 25 A. Na Tabela 2.8 apresentam-se as características técnicas do equipamento. Portanto, o emprego do inversor possibilita que a NDCC possa suprir cargas em corrente alternada.

Figura 2.19 - Inversor autônomo de onda senoidal pura.



Fonte: Xantrex (2009)

Tabela 2.8 - Características técnicas do inversor utilizado.

Parâmetro	Valor
Modelo	<i>Prosine Sine Wave Inverter 1000 – 24 V</i>
Potência de saída	1000 W
Capacidade de Sobrecarga, 5 segundos	1500 W
Tensão de Saída	120 V _{rms}
Corrente Nominal de Saída	8,3 A _{rms}
Corrente de Pico	25 A
Consumo sem Carga	22 W
Frequência de Saída	60 Hz ± 0,05%
Dimensões (C x L x A)	391 x 279 x 114 mm
Peso	6,5 kg
Temperatura de Operação	0 - 60 °C
Faixa de Tensão de Entrada	20 - 32 V _{cc}
Rendimento Máximo	88,4%, a 600 W

Fonte: Xantrex (2009).

2.3 Rede de distribuição

A NDCC está localizada na área externa 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 2.20, confeccionado pela fabricante nacional Alubar. Na Tabela 2.9 mostram-se as características do condutor.

Figura 2.20 - Condutor de alumínio multiplexado da NDCC.



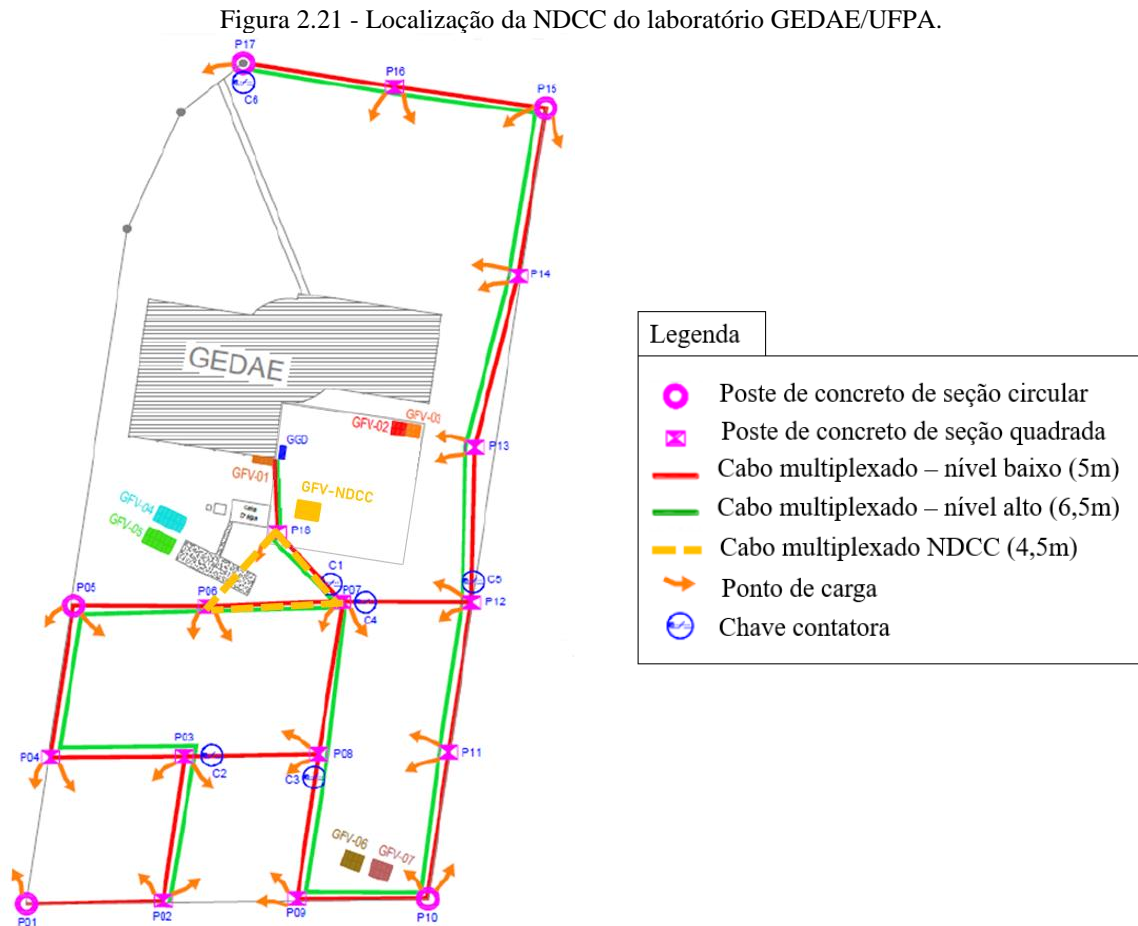
Fonte: Autoria própria.

Tabela 2.9 - Características técnicas do condutor cabo de alumínio XLPE 0,6/1 kV da fabricante Alubar.

Parâmetro	Valor
Seção transversal	35 mm ²
Tipo de encordoamento	Compactado
Isolação	XLPE
Têmpera	H19
Massa linear	137,03 kg/km
Espessura mínima de isolação	1,6 mm
Diâmetro do condutor isolado	9,95 mm
Número de fios	7
Resistência elétrica em c.c. a 20 °C	0,8037 Ω/km
Coef. de variação da resist. por temp.	0,00403 °C ⁻¹

Fonte: Alubar (2005).

Os postes utilizados para sustentação da NDCC são do tipo duplo T com altura de 7 metros e seção quadrada (250G), os mesmos também fazem a sustentação da MDCA. Na Figura 2.21 identifica-se a localização da NDCC, entre os postes P18, P07 e P06 da MDCA, próximos ao gerador fotovoltaico da NDCC, na área de testes.

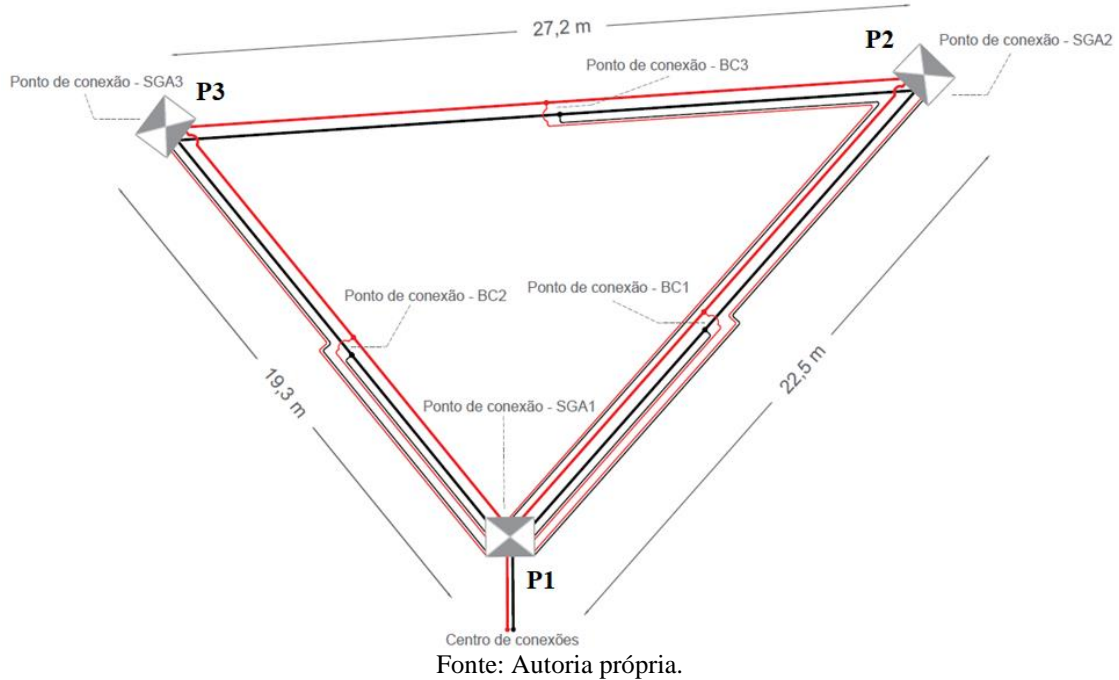


Fonte: Adaptado de Albuquerque (2019).

Na Figura 2.22 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. Esta figura foi elaborada utilizando-se o *software Autodesk AutoCAD*, o qual oferece licença gratuita para estudantes. Ressalta-se ainda que na Figura 2.22 os postes P1, P2 e P3 equivalem aos postes P18, P06 e P07, respectivamente, da Figura 2.21.

Os SGA2 e SGA3 possuem o ponto de conexão com a NDCC nos postes P2 e P3 da Figura 2.22, respectivamente, assim como BC1, BC2 e BC3 estão conectados na metade da distância de cada poste da NDCC. Os equipamentos, GFV, BB e BC estão dispostos no centro de conexões, proporcionando maior flexibilidade para manuseio ou troca em uma eventual falha dos equipamentos. O centro de conexões está abrigado em uma estrutura que simula uma cobertura residencial com telhas cerâmicas do tipo *plan*.

Figura 2.22 - Esquema da NDCC, com a identificação dos pontos de conexão de cada SGA e BC na rede.



Na Tabela 2.10 mostra-se o comprimento do condutor utilizado para cada equipamento, localizado no centro de conexões, em relação ao ponto de conexão com a NDCC.

Tabela 2.10 - 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: Adaptado de Torres (2019).

Na Figura 2.23, é mostrado o centro de conexões o qual abriga os três SGAs que compõem a NDCC. Cada SGA possui um conjunto de disjuntores c.c. responsável pela proteção contra sobrecargas e curto-circuito, realizando a interface do controlador de carga com gerador fotovoltaico, banco de baterias e posterior conexão com o barramento c.c. da NDCC, conforme está disposto nas informações técnicas na Tabela 2.11.

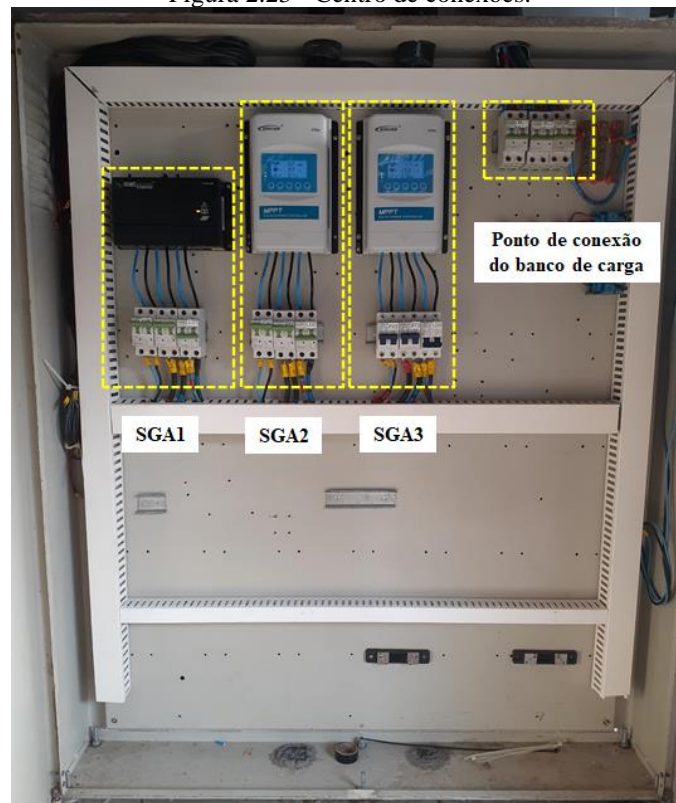
Tabela 2.11 - Especificações técnicas dos disjuntores c.c. utilizados na proteção do SGA.

SGA	Fabricante	Local	Corrente Nominal	Número de Polos	Tensão de Isolamento	Curva de Ruptura	Corrente Máxima
1 & 2	TONGOU	GFV	16 A	2P	1000 V	C	6 kA
		BB	20 A				
		NDCC	20 A				
3	TOMZN	GFV	16 A	2P	440 V	C	
		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, conforme é ilustrado na Figura 2.23. O centro de conexões também dispõe de espaço sobressalente para disposição de sistemas de medições, monitoração ou alterações na configuração da NDCC.

Figura 2.23 - Centro de conexões.



Fonte: Autoria própria.

2.4 Considerações finais

No presente capítulo apresentou-se as características da NDCC, além de seus componentes e como esses estão conectados, formando a NDCC do GEDAE. O capítulo seguinte apresenta os resultados dos ensaios propostos empregando os bancos de carga descritos no presente capítulo, identificando-se eventos de qualidade de energia elétrica na NDCC.

CAPÍTULO 3 VERIFICAÇÃO E AVALIAÇÃO DOS FENÔMENOS DE QUALIDADE DE ENERGIA ELÉTRICA NA NDCC

Este capítulo é destinado à apresentação de resultados e discussões em relação aos ensaios realizados, com o objetivo de avaliar a qualidade da energia elétrica (QEE) da nanorrede de distribuição em corrente contínua construída nas dependências do prédio do GEDAE, localizado na UFPA, campus Guamá.

Em um primeiro momento são apresentados os instrumentos utilizados para medição e aquisição de dados, assim como a disposição destes na NDCC. Mostra-se também a utilização dos bancos de cargas desenvolvidos, descritos no Capítulo 2, em seus respectivos ensaios. Por conseguinte, apresentam-se os resultados obtidos a respeito da QEE da NDCC, onde os ensaios propostos buscam identificar eventos de QEE com base na IEEE - Std 1159 e seus eventuais impactos na NDCC.

3.1 Materiais e Métodos

Para avaliação dos eventos de QEE foram propostos três ensaios, os quais objetivam mostrar diferentes impactos à NDCC e demais cargas conectadas ao barramento c.c., sendo estes:

- Impacto no ponto de conexão de um banco de cargas de iluminação LED durante a entrada e saída de carga de alta demanda de corrente;
- Análise da tensão e corrente em diferentes pontos de medição na NDCC, com a utilização de um inversor para suprimento de cargas c.a.;
- Avaliação da eficiência do suprimento com diferentes conversores para luminárias LED.

Os ensaios 1 e 2 foram realizados em quatro condições distintas, as quais estão indicadas na Tabela 3.1 e compõem os seus respectivos subensaios.

Tabela 3.1 – Premissa utilizada para os ensaios 1 e 2.

Premissa
NDCC com a geração fotovoltaica em horário de alta irradiância.
NDCC com geração fotovoltaica em horário de baixa irradiância.
NDCC sem geração fotovoltaica e com bancos de baterias carregados.
NDCC sem geração fotovoltaica e com bancos de baterias parcialmente descarregados.

Fonte: Autoria própria.

Para a última situação, realizou-se a descarga dos bancos de baterias até um nível de tensão onde o controlador emitisse um alerta de baixa tensão para seu respectivo banco de

baterias. Estes valores foram obtidos com base na folha de dados do equipamento, onde para o controlador da fabricante *Outback Power*, corresponde a um valor tensão de 23,6 V e para o controlador da fabricante *EPEVER*, o valor de 24 V.

Para a aquisição de dados 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. mais c.a. (*true rms*).

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 1000 V. Para os ensaios propostos, o equipamento esteve dividido em dois canais para leitura dos valores de tensão e outros dois canais para leitura dos valores de corrente. 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.

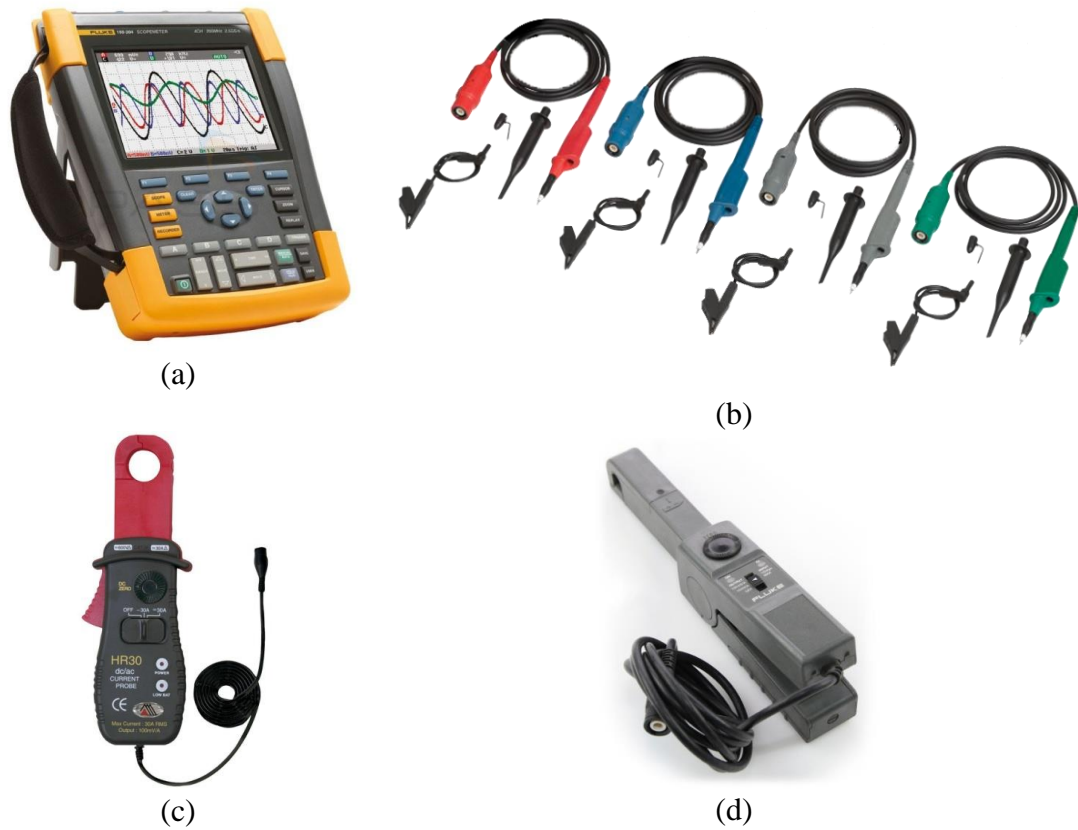
Para a leitura dos valores de tensão c.c. e c.a. foram utilizadas garras de tensão do tipo jacaré modelo *VPS410* pertencentes ao osciloscópio digital, Figura 3.1(b), com exatidão de $\pm 1\%$, para valores c.c. até 20 kHz. Para leitura dos valores de corrente c.c. e c.a. foram utilizadas as pinças de corrente da fabricante *FLUKE*, modelo 80i-110s, com *range* de até 100 A (c.c. ou c.a. pico) (Figura 3.1(d)) e da fabricante *MINIPA*, modelo *HR30*, com a seleção do acoplamento c.c. e *range* de até 30 A_{rms} (Figura 3.1(c)). Na Tabela 3.2 consta o erro correspondente a cada escala e nível de corrente registrado pelas pinças de corrente utilizadas. As pinças possuem conectores do tipo *BNC* (50Ω), compatíveis com os canais do osciloscópio.

Tabela 3.2 - Especificações elétricas, quanto ao erro de leitura, das pinças de corrente utilizadas.

Especificações elétricas	FLUKE 80i-110s		MINIPA HR30
	Erro		
Sinal de saída (escala)	100 mV/A	10 mV/A	100 mV/A
50 mA a 10 A	< 3% da leitura + 50 mA	-	$\pm 1\%$ da leitura + 2 mA
Corrente de entrada c.a. ou c.c. pico	50 mA a 30 A	-	< 4% da leitura + 50 mA
	50 mA a 40 A	-	< 12% da leitura + 50 mA
	40 A a 80 A	-	-
	80 A a 100 A	-	< 15% da leitura

Fonte: *FLUKE* (2020), *MINIPA* (2020).

Figura 3.1 - Osciloscópio digital portátil FLUKE (a), garras de tensão do tipo jacaré (b), garra de corrente MINIPA (c) e garra de corrente FLUKE (d).



Fonte: FLUKE (2020) e MINIPA (2020).

Durante a realização dos ensaios propostos, os bancos de cargas foram acomodados sob a estrutura de telhado empregada para o abrigo de equipamentos da NDCC, como mostra a Figura 3.2(a), facilitando a conexão com o quadro elétrico do centro de conexões.

Figura 3.2 - Bancos de cargas acomodados em campo (a) e junção do BC3 com *drivers* do ensaio 3 (b).



Fonte: Autoria própria.

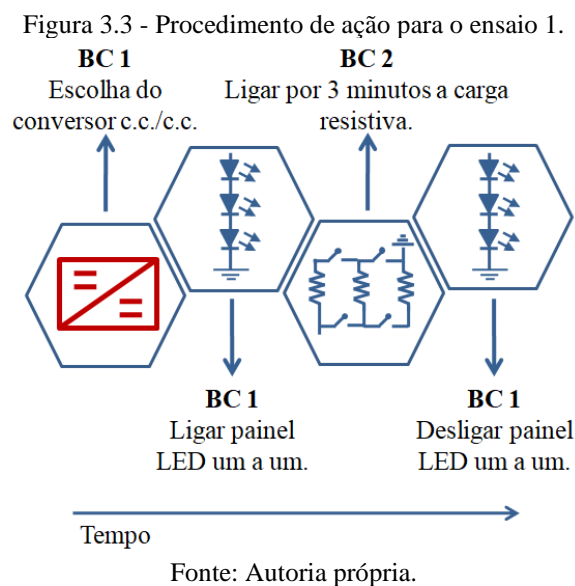
Destaca-se também a fixação dos *drivers* das lâmpadas LED, referentes ao ensaio 3, sobre a estrutura que compõe o banco de cargas 3, Figura 3.2(b). Esta ação foi feita visando maior facilidade de manuseio desses componentes.

3.2 Impacto no ponto de conexão de um banco de cargas de iluminação LED durante a entrada e saída de carga de alta demanda de corrente

O primeiro ensaio proposto objetiva mostrar o impacto no barramento c.c. e possíveis influências nas demais cargas conectadas ao barramento, durante a entrada e saída de uma carga demandando elevado nível de corrente elétrica da rede. Neste caso, empregou-se a carga resistiva (BC2), descrita no Capítulo 2. A conexão do BC1 e BC2 à NDCC se deu por meio dos disjuntores c.c. dispostos no centro de conexões.

Objetiva-se neste ensaio identificar eventos de curta duração, como elevações e quedas no nível de tensão do barramento c.c., além de eventos transitórios, resultados do chaveamento na rede do conversor c.c./c.c. pertencente ao BC1.

O procedimento operacional do ensaio 1, observado na Figura 3.3, ocorreu inicialmente com o chaveamento, no barramento c.c., do conversor c.c./c.c., seja centralizado ou descentralizado para suprir os painéis LED, seguido do chaveamento dos painéis LED, um a um, em intervalos de 20 segundos entre cada um. Após isso, a carga resistiva foi ligada durante 3 minutos e após a sua saída da rede, os painéis LED foram desligados um a um no mesmo intervalo de tempo em que foram ligados.



A configuração utilizada para o BC1 deu-se, como comentado no procedimento de ação, na escolha do conversor c.c./c.c. (centralizado ou descentralizado) e a posterior utilização dos seis painéis LED, totalizando uma potência de 72 W.

É importante ressaltar que durante os testes iniciais, do BC1 na NDCC, as barras de LED se provaram sensíveis ao nível de tensão da rede, nesse caso para valores a partir de 25,6 V, ocasionando a queima ou perda na luminosidade de alguns LEDs da luminária (Figura 3.4). Nesse sentido, a barra de LEDs não foi utilizada durante os ensaios.

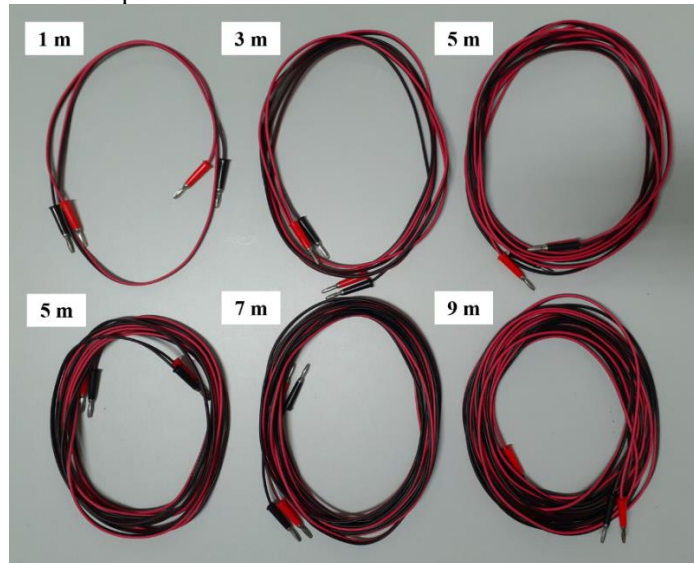
Figura 3.4 - Barra com avaria em alguns LEDs.



Fonte: Autoria própria.

Em conjunto com o conversor c.c./c.c. centralizado foram utilizados cabos de diferentes tamanhos, conforme descrito no Capítulo 2 (Figura 3.5), para realizar a conexão dos painéis LED com o conversor. Diferentes tamanhos de cabos de conexão objetivam simular uma situação em que a carga, isto é a luminária, está disposta em diferentes pontos da instalação suprida por uma rede de distribuição em corrente contínua, seja em uma instalação residencial ou em um sistema de iluminação pública, como exemplo, luminárias posicionadas ao longo de uma ponte para travessia de pedestre.

Figura 3.5 - Cabos para conexão das luminárias ao conversor c.c./c.c. centralizado.



Fonte: Autoria própria.

O BC2 foi utilizado em duas configurações: $5,08 \Omega$ (7 elementos resistivos em paralelo) representando, aproximadamente, 50% da potência nominal e com $2,37 \Omega$ (15 elementos resistivos em paralelo) representando 100% da potência nominal. Logo, a potência dissipada no BC2 esteve intrinsecamente relacionada com a quantidade dos elementos resistivos em paralelo e com o nível de tensão de operação do barramento c.c. da NDCC.

Desse modo, na Tabela 3.3 consta um resumo de todas as configurações adotadas por ambos os bancos de cargas utilizados e seus respectivos subensaio. Para cada configuração houve quatro subensaios que são referentes as premissas propostas anteriormente, no início do Capítulo.

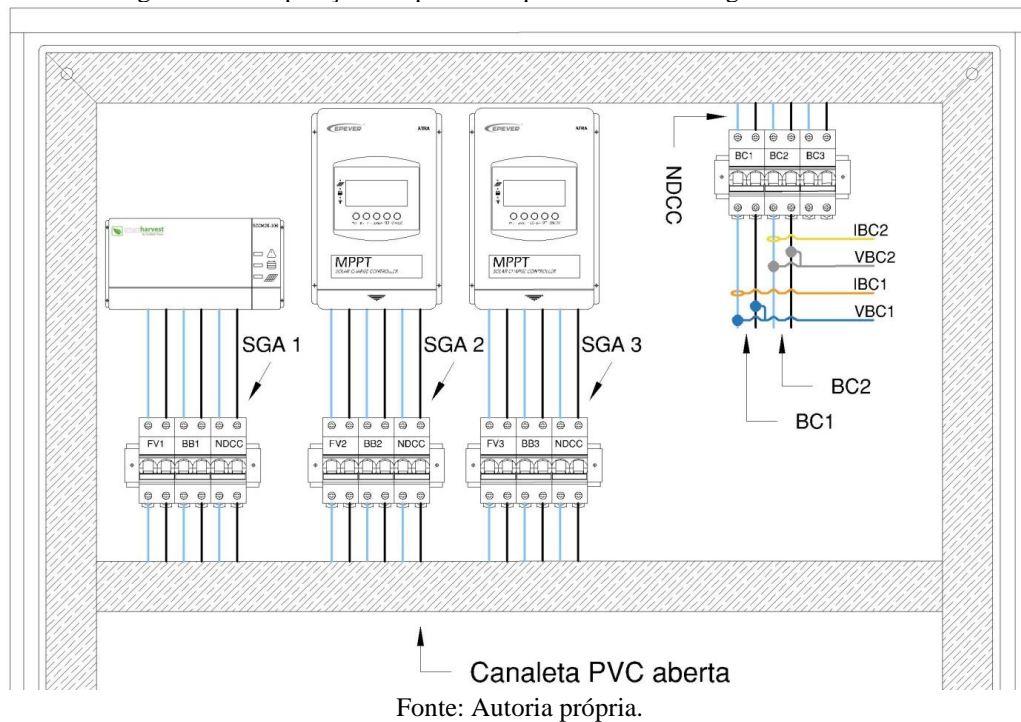
Tabela 3.3 – Resumo dos subensaios referentes ao ensaio 1.

Configuração do BC1 e BC2		Identificador
BC1	BC2	-
Conversor c.c./c.c. centralizado	2,37 Ω	1.1
		1.2
		1.3
		1.4
	5,08 Ω	1.5
		1.6
		1.7
		1.8
Conversor c.c./c.c. descentralizado	2,37 Ω	1.9
		1.10
		1.11
		1.12
	5,08 Ω	1.13
		1.14
		1.15
		1.16

Fonte: Autoria própria.

Para a leitura de corrente do BC1 foi utilizada a garra de corrente da fabricante FLUKE modelo 80i-110s com escala de 10 mV/A. Do mesmo modo, para leitura de corrente do BC2 foi utilizada a garra de corrente da fabricante MINIPA modelo HR30 com escala de 100 mV/A. Para leitura de tensão de ambos os bancos de cargas foi utilizada a ponta de prova de tensão pertencente ao osciloscópio digital portátil. Dessa forma, os valores de tensão e corrente de BC1 e BC2 foram obtidos conforme disposição mostrada na Figura 3.6.

Figura 3.6 - Disposição das pontas de provas de tensão e garras de corrente.



3.2.1 Resultados

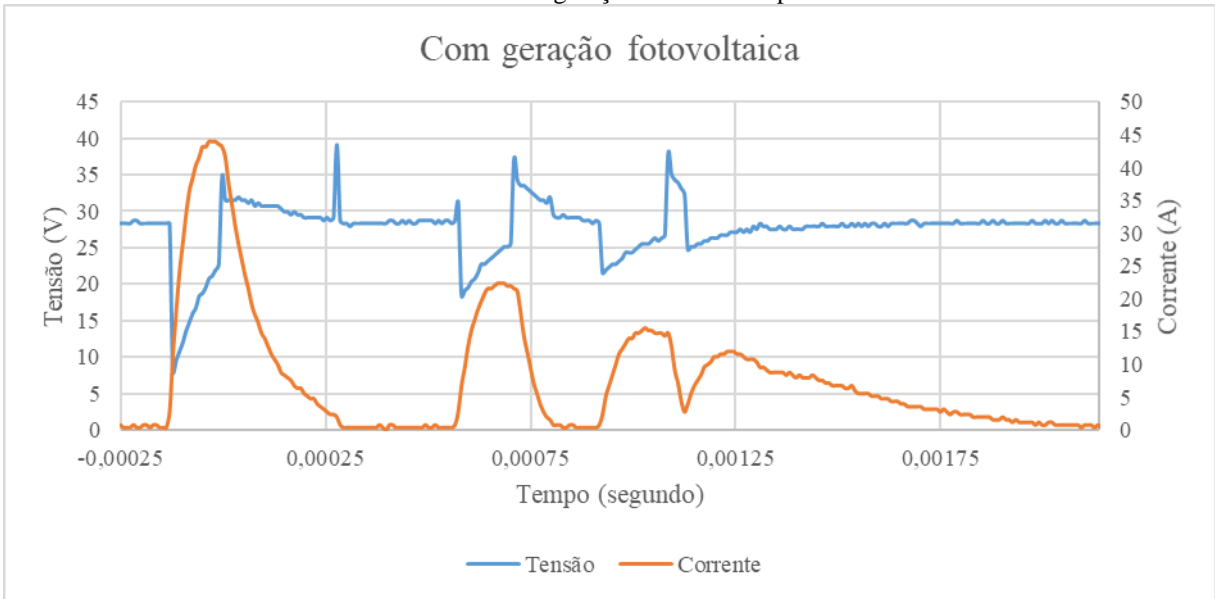
O ensaio possui, ao todo, duração de 8 minutos com um período de amostragem de 16 ms, registrando 30.000 pontos por variável, ao longo de todo o ensaio. O valor de tensão é apresentado em p.u. (sistema por unidade) para gráficos e tabelas, visto que a NDCC possui um barramento de referência de 24 V (equivalente a 1 p.u.). No entanto, destaca-se, em um primeiro momento, que foi realizada a observação do evento relacionado ao acionamento dos conversores no barramento c.c. da NDCC sob um menor tempo de amostragem, nesse caso 8 μ s, visto que era esperado a ocorrência de eventos transitórios. A verificação desse evento em específico ocorreu sob duas configurações da rede, com e sem a geração fotovoltaica, apenas com bancos de baterias para o último caso.

3.2.1.1 Conversor c.c./c.c. centralizado

Para a observação do evento transitório, tanto do conversor c.c./c.c. centralizado quanto para o descentralizado, fez-se o chaveamento do conversor na NDCC sem que houvesse demanda por parte dos painéis LED, nesse caso, energizando apenas os conversores e observando o evento até a corrente em regime permanente próxima a 0 A.

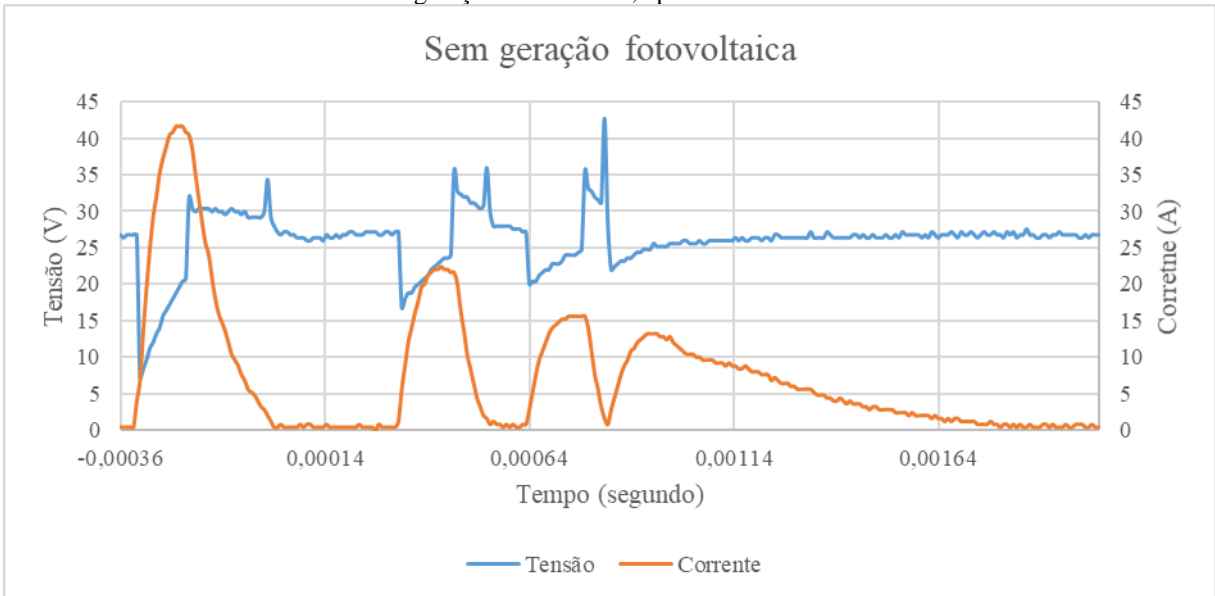
Para o conversor c.c./c.c. centralizado houve um evento transitório de característica oscilatória com 4 ciclos de duração, com tempo de aproximadamente 2,3 ms, para ambos os casos (com e sem geração fotovoltaica), ilustrado na Figura 3.7 e Figura 3.8.

Figura 3.7 - Evento transitório oscilatório resultante da entrada do conversor c.c./c.c. centralizado no barramento c.c. da NDCC com geração fotovoltaica presente.



Fonte: Autoria própria.

Figura 3.8 - Evento transitório oscilatório resultante da entrada do conversor c.c./c.c. centralizado no barramento c.c. da NDCC sem geração fotovoltaica, apenas com os bancos de baterias.



Fonte: Autoria própria.

Na Tabela 3.4 estão os valores observados para esse evento, caracterizando um evento transitório oscilatório em baixa frequência, menor que 5 kHz com duração entre 0,3 a 50 ms, como apresentado no IEEE - Std 1159. A tensão do barramento c.c., nesse período, assume um elevado valor máximo, próximo a 45 V, podendo influenciar em equipamentos operando na rede. A componente espectral ou frequência predominante do evento oscilatório foi obtida por meio da Transformada Rápida de Fourier FFT (do inglês *Fast Fourier Transform*) onde o sinal amostrado no tempo é convertido para o domínio da frequência.

Tabela 3.4 - Parâmetros elétricos do evento transitório oscilatório para o conversor c.c./c.c. centralizado.

Configuração da NDCC	Duração (ms)	Transitório Oscilatório	
		Magnitude (p.u.)	Componente Espectral (kHz)
Com FV	2,28	0,33 – 1,63	2,94
Sem FV	2,18	0,30 – 1,78	3,43

Fonte: Autoria própria.

Na Tabela 3.5 apresenta-se o evento de longa duração, acima de 1 minuto, observado durante os subensaios realizados, isto é, identifica-se uma sobretensão no barramento c.c. da rede. No decorrer dos subensaios a tensão do barramento sofreu variação, mas ainda assim continuou acima de 1,1 p.u., com exceção do subensaio 1.4, onde o BC2 estava configurado em 2,37 Ω . Dessa forma, para os subensaios apresentados a seguir obteve-se a média dos valores de tensão eficaz conforme mostra a Equação 3.1. Onde, N é o número de amostras e V_{rms} é o valor eficaz obtido pelo osciloscópio considerando as componentes c.c. e c.a.

$$V_{m\acute{e}dia} = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N V_{rms} \quad (3.1)$$

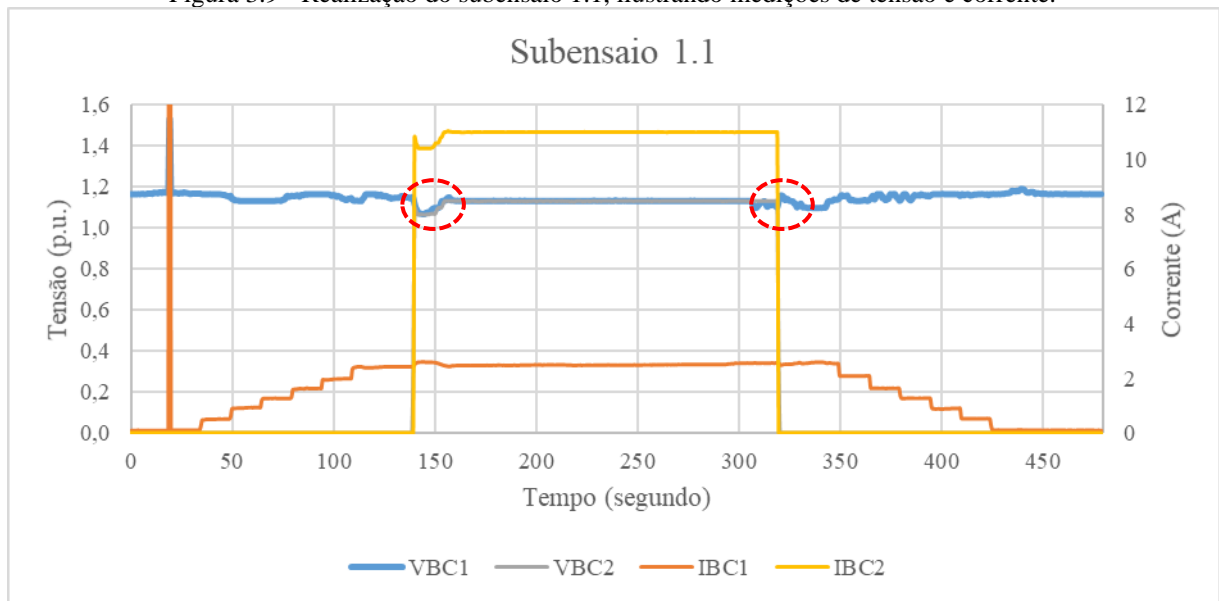
Tabela 3.5 - Tensão do barramento c.c. da NDCC durante os subensaios com conversor c.c./c.c. centralizado com BC2 configurado em 2,37 Ω .

Sub ensaio	Variações de longa duração Sobretensão	
	Duração (minutos)	Magnitude (p.u.)
1.1	8	1,15
1.2	8	1,22
1.3	5	1,11
1.4	-	-

Fonte: Autoria própria.

O subensaio 1.1 foi realizado no dia 28/09/2020 às 13h05, com a presença da geração fotovoltaica em horário de alta irradiância. O comportamento dos valores de tensão e corrente monitorados ao longo do subensaio 1.1 está apresentado na Figura 3.9. A entrada do BC2 na rede causou uma diminuição na tensão para 1,07 p.u. por 13 segundos, enquanto a saída do BC2 causou um aumento na tensão para 1,17 p.u. por 12 segundos. Visto que a tensão do barramento c.c. permaneceu acima de 1 p.u. ao longo dos subensaios, pode-se considerar que a entrada o BC2 pode causar uma diminuição no nível tensão, conforme mostra os marcadores na Figura 3.9. Ressalta-se ainda que para o subensaio 1.1 o valor médio da tensão correspondeu a 1,15 p.u., no tempo total de 480 segundos.

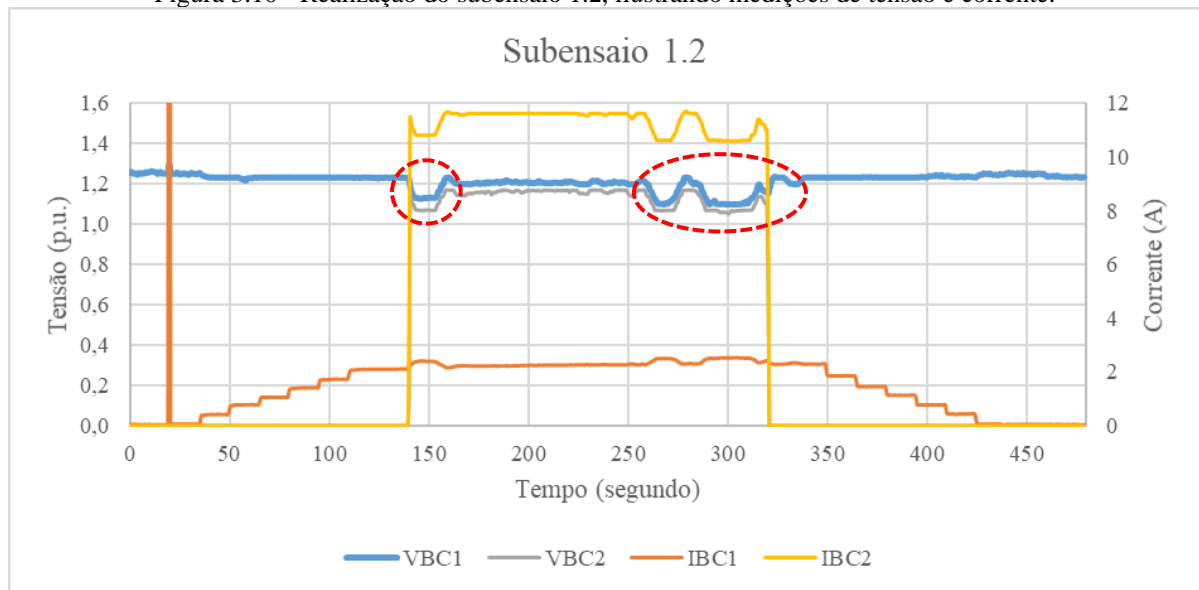
Figura 3.9 - Realização do subensaio 1.1, ilustrando medições de tensão e corrente.



Fonte: Autoria própria.

O subensaio 1.2 foi realizado no dia 29/09/2020 às 9h07, com a presença da geração fotovoltaica em horário de baixa irradiância, com céu levemente nublado. Neste subensaio houve redução na tensão tanto durante a entrada do BC2 com magnitude de 1,13 p.u. durante 20 segundos e, também, devido à presença de nuvens, no instante 275 e 300 segundos do subensaio, com magnitude de 1,07 p.u. durante 4 segundos e 1,07 p.u. durante 16 segundos, respectivamente, destacado na Figura 3.10, a qual mostra o comportamento dos valores de tensão e corrente monitorados ao longo do subensaio 1.2. O aumento na tensão da rede proveniente da saída do BC2 ocorreu de forma sutil com magnitude de 1,23 p.u. num período de, aproximadamente, 14 segundos.

Figura 3.10 - Realização do subensaio 1.2, ilustrando medições de tensão e corrente.



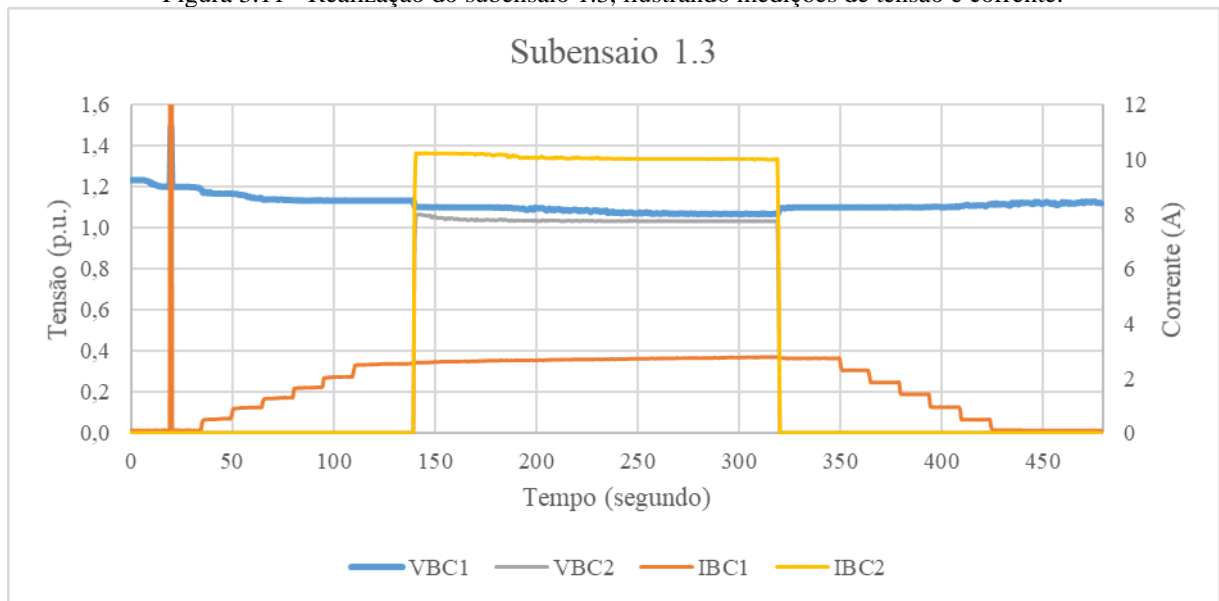
Fonte: Autoria própria.

O subensaio 1.3 foi realizado no dia 28/09/2020 às 13h32, sem a presença da geração fotovoltaica e com os bancos de baterias, indicados pelos controladores de carga, como carregados. O comportamento dos valores de tensão e corrente monitorados ao longo do subensaio 1.3 está apresentado na Figura 3.11.

A entrada e saída do BC2 não causou eventos de afundamento e elevação de tensão na rede como visto anteriormente. A justificativa para menor variação na tensão durante os subensaios sem geração fotovoltaica é apresentada adiante.

Além disso, observa-se uma queda na tensão de 1,23 p.u. para 1,13 p.u., resultado do desgaste já existente referente aos três bancos de baterias, como comentado em Torres (2019). Nesse subensaio, a tensão diminui e se estabiliza em 1,11 p.u., já sem cargas na rede.

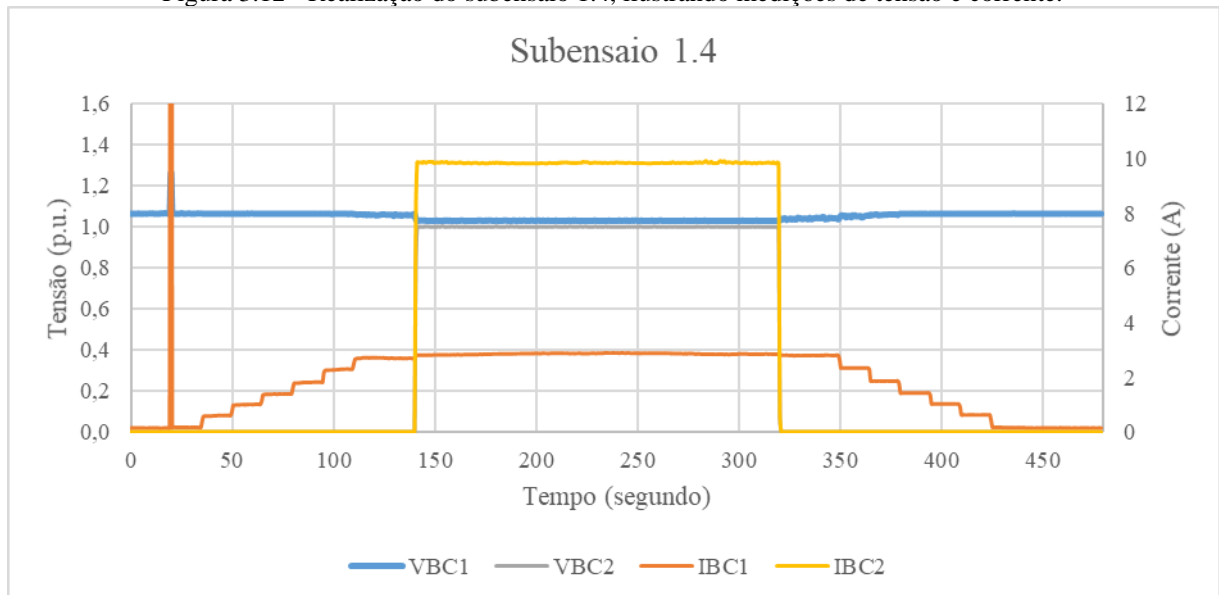
Figura 3.11 - Realização do subensaio 1.3, ilustrando medições de tensão e corrente.



Fonte: Autoria própria.

O último subensaio, identificado como subensaio 1.4, foi realizado no dia 29/09/2020 às 16h06, sem a geração fotovoltaica e com os bancos de baterias em baixa tensão, indicada pelos controladores de carga. Neste subensaio, nenhum evento de afundamento e elevação foi registrado. O comportamento dos valores de tensão e corrente monitorados ao longo do subensaio 1.4 está apresentado na Figura 3.12.

Figura 3.12 - Realização do subensaio 1.4, ilustrando medições de tensão e corrente.



Fonte: Autoria própria.

Destaca-se que não houve registro de eventos de variação na tensão de curta duração, afundamentos e elevações, os quais são caracterizados por possuírem magnitudes de 0,1 a 0,9 p.u. e 1,1 a 1,8 p.u., respectivamente, com duração de até 1 minuto. Visto que a tensão do

barramento c.c. esteve acima de 1 p.u., foram registrados apenas diminuições e aumentos no nível de tensão, resultado da entrada e saída do BC2 na rede e em alguns casos, passagens de nuvens ocasionando o sombreamento do gerador fotovoltaico. Observa-se que a variação na tensão da rede é resultado direto da variação na tensão do banco de baterias, visto que o controlador de carga não possui um controle ativo sobre a tensão do barramento c.c. da rede. Desse modo, as variações de tensão no banco de baterias são resultado das variações de corrente injetada ou demandada pelo banco. Visto que os bancos de baterias utilizados possuem elevado desgaste, diminuições e aumentos no nível de tensão são mais propensas de ocorrer.

O BC2 configurado em $5,08 \Omega$ também foi utilizado para realização dos subensaios que compõem o ensaio 1, destaca-se que os gráficos referentes a esses subensaios estão disponíveis no APÊNDICE I. Na Tabela 3.6 destaca-se novamente o nível de tensão da rede acima de 1,1 p.u. por mais de 1 minuto, caracterizando um evento de sobretensão, com exceção dos subensaios 1.7 e 1.8. Este comportamento era esperado visto que a configuração dos SGAs permaneceu inalterada.

Tabela 3.6 - Tensão do barramento c.c. da NDCC durante os subensaios com conversor c.c./c.c. centralizado com BC2 configurado em $5,08 \Omega$.

Sub ensaio	Variações de longa duração	
	Sobretensão	
	Duração (minutos)	Magnitude (p.u.)
1.5	8	1,15
1.6	8	1,22
1.7	-	-
1.8	-	-

Fonte: Autoria própria.

O subensaio 1.5 realizado no dia 28/09/2020 às 12h47, com a presença da geração fotovoltaica em um horário de alta irradiância, apresenta diminuições e aumentos na tensão do barramento que ocorreram em uma magnitude bem menor, visto que a corrente demandada neste caso pelo BC2 é menor, da mesma forma, o subensaio 1.6 realizado no dia 29/09/2020 às 9h31, com a presença da geração fotovoltaica em um horário de baixa irradiância.

Os subensaios 1.7 realizado no dia 28/09/2020 às 13h44, e 1.8, realizado no dia 29/09/2020 às 16h21, com os bancos de baterias carregados e descarregados, respectivamente, não apresentaram eventos de curta duração de afundamento e elevações no nível de tensão. Portanto, para o ensaio 1 com conversor c.c./c.c. centralizado com BC2 configurado em $5,08 \Omega$, não foram registrados eventos de variações na tensão de curta duração.

3.2.1.2 Conversor c.c./c.c. descentralizado

Para os conversores c.c./c.c. descentralizados, é interessante destacar que os mesmos estão conectados em paralelo, logo quando é feito o chaveamento dos conversores c.c./c.c. descentralizados, o conjunto entra em operação na rede no mesmo instante.

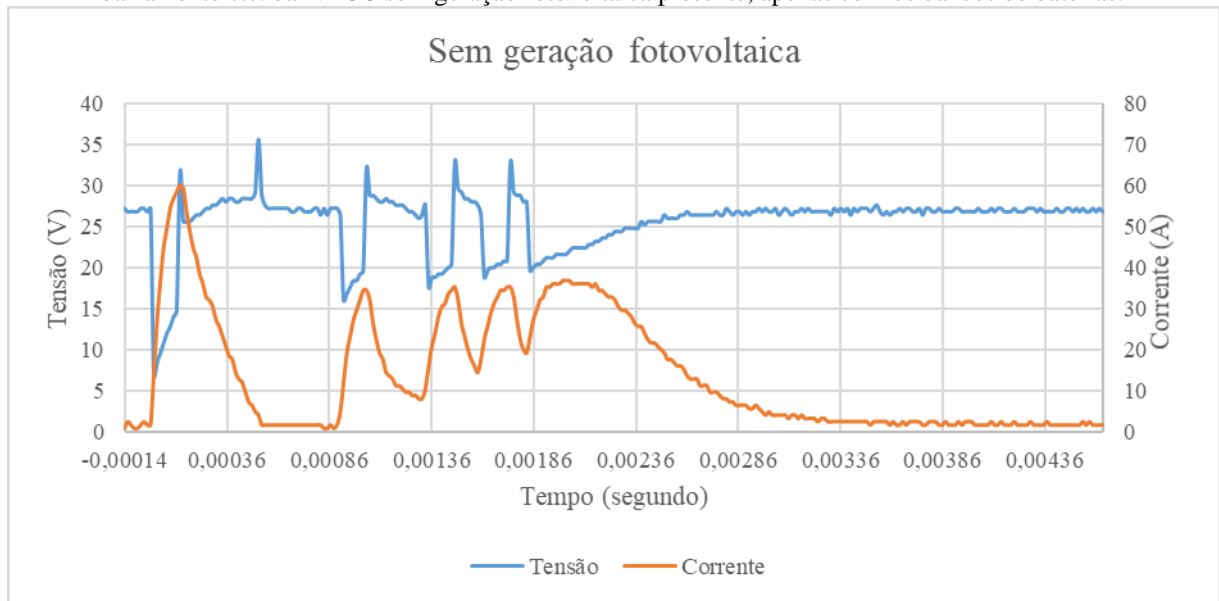
Realizou-se medições ao chavear os conversores com a presença da geração fotovoltaica, ilustrado na Figura 3.13, e outra medição sem a mesma, ilustrado na Figura 3.14, apenas com os bancos de baterias, onde foi observado um evento transitório oscilatório de 5 ciclos. Este evento ocorre em um intervalo de aproximadamente 2,5 ms, para ambos os casos.

Figura 3.13 - Evento transitório oscilatório resultante da entrada do conversor c.c./c.c. descentralizado no barramento c.c. da NDCC com geração fotovoltaica presente.



Fonte: Autoria própria.

Figura 3.14 - Evento transitório oscilatório resultante da entrada do conversor c.c./c.c. descentralizado no barramento c.c. da NDCC sem geração fotovoltaica presente, apenas com os bancos de baterias.



Fonte: Autoria própria.

Da mesma forma que para o conversor c.c./c.c. centralizado, o evento transitório oscilatório pode ser classificado como de baixa frequência, com base na IEEE - Std 1159. Na Tabela 3.7 constam os valores registrados para esse evento.

Tabela 3.7 - Parâmetros elétricos do evento transitório oscilatório para o conversor c.c./c.c. descentralizado.

Configuração da NDCC	Duração (ms)	Transitório Oscilatório	
		Magnitude (p.u.)	Componente Espectral (kHz)
Com FV	3,33	0,38 – 1,56	2,94
Sem FV	3,52	0,28 – 1,48	3,19

Fonte: Autoria própria.

O subensaio utilizando o conversor c.c./c.c. descentralizado, do BC1, com BC2 configurado em $2,37 \Omega$ foi realizado seguindo as mesmas premissas dos subensaios anteriores. Como observado antes, a tensão de longa duração no barramento c.c foi registrada acima de 1,1 p.u. nos subensaios 1.9 a 1.11, como mostrado na Tabela 3.8, sendo a ocorrência acima de 1 p.u. apenas durante 4 minutos para o subensaio 1.11.

Tabela 3.8 - Tensão do barramento c.c. da NDCC durante os subensaios com conversor c.c./c.c. descentralizado com BC2 configurado em $2,37 \Omega$.

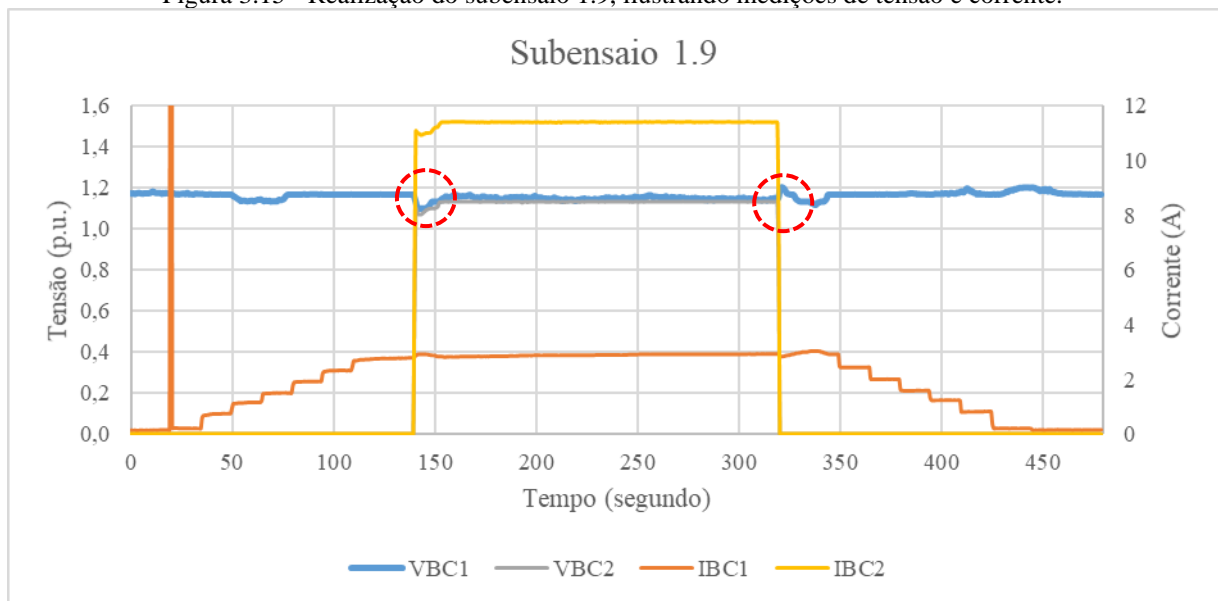
Sub ensaio	Variações de longa duração	
	Duração (minutos)	Magnitude (p.u.)
1.9	8	1,16
1.10	8	1,21
1.11	4	1,12
1.12	-	-

Fonte: Autoria própria.

O subensaio 1.9 foi realizado no dia 28/09/2020 às 12h18, com a presença da geração fotovoltaica em horário de alta irradiância. O comportamento dos valores de tensão e corrente monitorados ao longo do subensaio 1.9 está apresentado na Figura 3.15.

A entrada do BC2 causou uma diminuição e um aumento, no nível de tensão do barramento c.c., de 1,10 durante 20 segundos e 1,20 durante 5 segundos, respectivamente, Figura 3.15.

Figura 3.15 - Realização do subensaio 1.9, ilustrando medições de tensão e corrente.

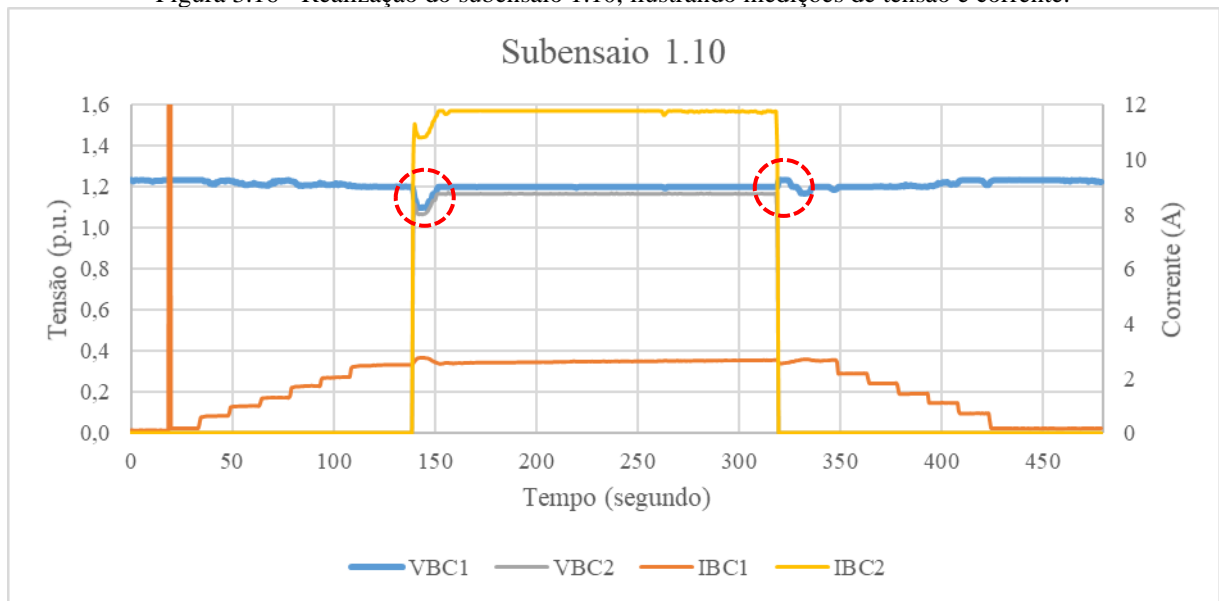


Fonte: Autoria própria.

O subensaio 1.10 foi realizado no dia 29/09/2020 às 8h54, com a presença da geração fotovoltaica em horário de baixa irradiância.

Neste subensaio não foi registrada a presença de nuvens, resultando em um nível de tensão mais estável, mas com diminuição e aumento no nível da tensão, proveniente da entrada do BC2 na rede, com magnitude de 1,10 durante 13 segundos e 1,23 durante 9 segundos, respectivamente, conforme mostrado na Figura 3.16.

Figura 3.16 - Realização do subensaio 1.10, ilustrando medições de tensão e corrente.

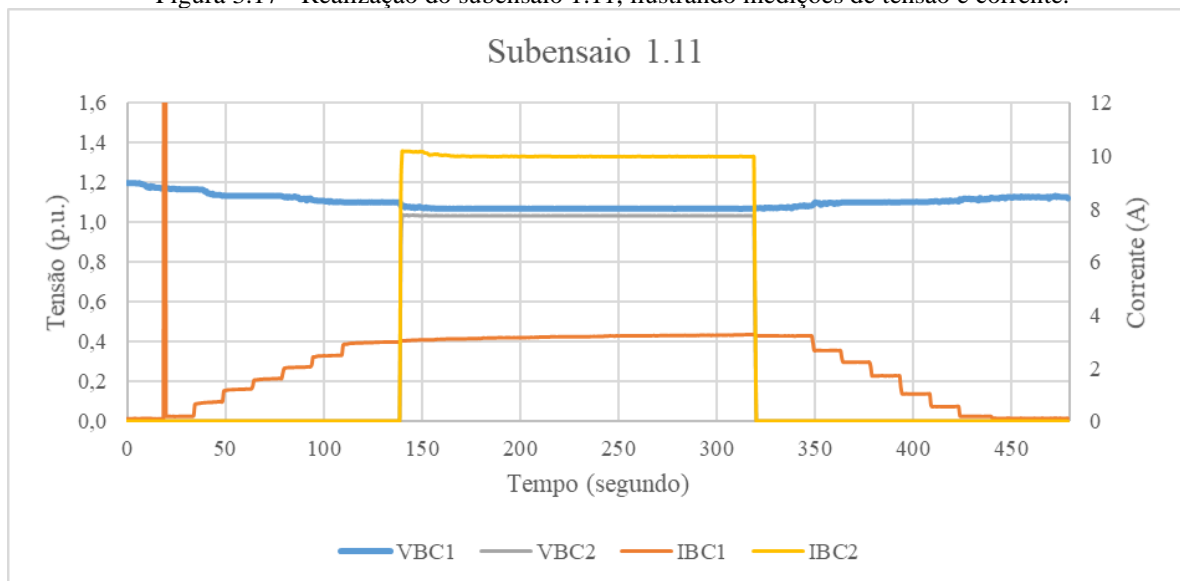


Fonte: Autoria própria.

O subensaio 1.11 foi realizado no dia 28/09/2020 às 13h17, sem a presença da geração fotovoltaica e com os bancos de baterias carregados, de acordo com a indicação pelos controladores de carga.

O comportamento dos valores de tensão e corrente monitorados ao longo do subensaio 1.11 está apresentado na Figura 3.17. Não foi registrado nenhum evento de curta duração, apenas uma queda no nível de tensão do barramento dado o elevado desgaste dos bancos de baterias até se estabilizar em um nível de tensão próximo a 1,10 p.u., após a desconexão de cargas na rede.

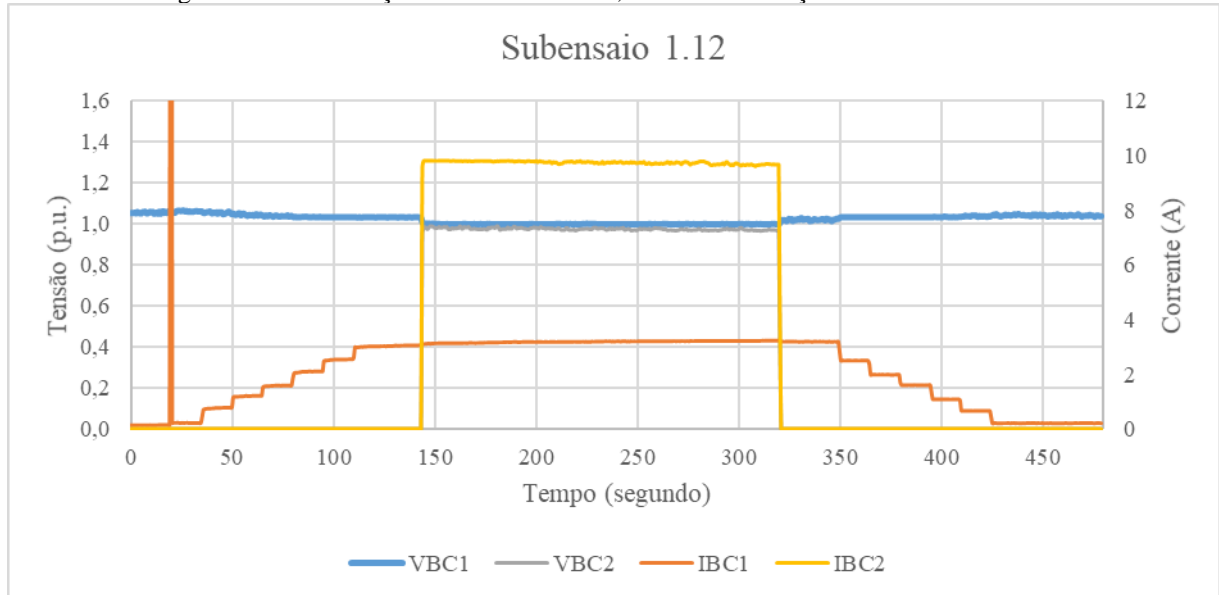
Figura 3.17 - Realização do subensaio 1.11, ilustrando medições de tensão e corrente.



Fonte: Autoria própria.

O subensaio 1.12 foi realizado no dia 29/09/2020 às 15h42, sem a presença da geração fotovoltaica e com os bancos de baterias em baixa tensão. O comportamento dos valores de tensão e corrente monitorados ao longo do subensaio 1.12 está apresentado na Figura 3.18. Neste subensaio, nenhum evento de curta duração foi registrado.

Figura 3.18 - Realização do subensaio 1.12, ilustrando medições de tensão e corrente.



Fonte: Autoria própria.

O impacto causado pela entrada do BC2 no barramento c.c. da NDCC ocasionou, para os subensaios 1.9 e 1.10, diminuição e aumento no nível de tensão da rede, não afetando a operação do BC1 em termos de variação da iluminância dos painéis LED. Para os subensaios seguintes, 1.11 e 1.12, não foi registrado nenhum evento.

Por fim, realizou-se o mesmo ensaio utilizando o BC2 configurado em $5,08 \Omega$, onde os gráficos estão disponíveis no APÊNDICE I. A Tabela 3.9 mostra o nível de tensão médio do barramento c.c. durante os subensaios.

Tabela 3.9 - Tensão do barramento c.c. da NDCC durante os subensaios com conversor c.c./c.c. centralizado com BC2 configurado em $5,08 \Omega$.

Sub ensaio	Variações de longa duração	
	Sobretensão	
	Duração (minutos)	Magnitude (p.u.)
1.13	8	1,17
1.14	8	1,20
1.15	4	1,12
1.16	-	-

Fonte: Autoria própria.

O subensaio 1.13 foi realizado no dia 28/09/2020 às 12h34, enquanto o subensaio 1.14 foi realizado no dia 29/09/2020 às 09h19, com a presença da geração fotovoltaica em horário

de alta irradiância e em baixa irradiância, respectivamente. Foram registrados diminuições e aumentos no nível de tensão da rede, em magnitudes menores. É interessante destacar no subensaio 1.14 a diminuição no nível de tensão do barramento durante a entrada do BC2, proveniente também do sombreamento dos geradores ocasionados pela presença de nuvens, em 1,10 p.u. com duração de 2 minutos.

O subensaio 1.15 foi realizado no dia 28/09/2020 às 13h58, enquanto o subensaio 1.16 foi realizado no dia 29/09/2020 às 16h39, ambos sem a presença da geração fotovoltaica e com os bancos de bateria carregados e descarregados, respectivamente. Nenhum evento de curta duração foi registrado.

Desse modo, observa-se menor impacto no barramento c.c., resultado da menor demanda por potência pelo BC2 (configurado com resistência equivalente de $5,08 \Omega$). Para esta sequência de subensaios, nenhum evento na variação de tensão de curta duração foi registrado.

3.2.2 Comentários sobre o ensaio 1

Como apresentado, nos subensaios referentes ao ensaio 1, eventos de longa duração e transitório foram registrados. O evento de longa duração relacionado à sobretensão na tensão da rede é visto como um ponto onde pode haver mitigação, visto que a NDCC não possui mecanismo de controle para o nível de tensão da rede.

Os impactos, para o barramento c.c. da NDCC, proveniente da entrada do BC2 e sombreamento do gerador fotovoltaico por nuvens, resultaram em diminuições e aumentos no nível de tensão da rede. Destaca-se, como interessante, a realização desses subensaios utilizando novos bancos de baterias.

A intensidade luminosa dos painéis LED, do BC1, que estavam em operação durante a entrada e saída do BC2 não sofreram impactos quanto à variação na iluminância ou interrupção da operação. A utilização dos conversores centralizado e descentralizados do BC1 se deu pela diferença na qual as cargas (painéis LED) eram supridas, nesse caso por condutores de diferentes comprimentos e por chaves alavancas, respectivamente. Desse modo, não foi observado nenhum comportamento a parte que causasse eventos de QEE ou elevassem a magnitude dos eventos observados entre a utilização dos condutores de diferentes comprimentos para chaves alavancas. Além disso, nenhum dispositivo de proteção, fusível, disjuntor ou proteção interna dos controladores de carga foram atuados ou avariados devido aos eventos registrados.

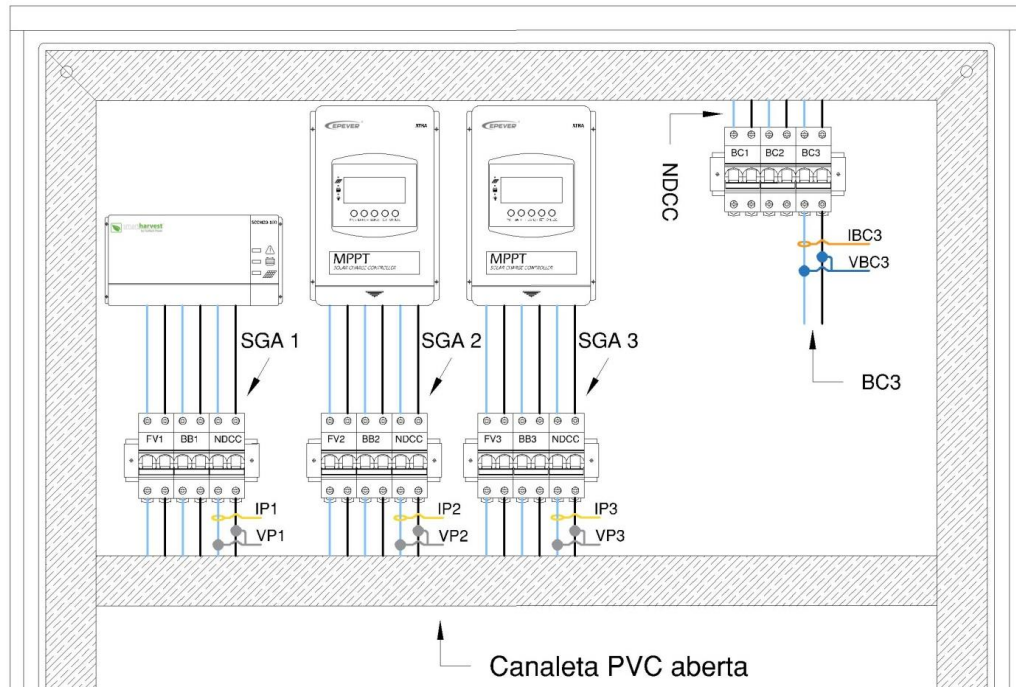
O evento transitório oscilatório, como resposta ao acionamento dos conversores na rede, mostrou uma elevada magnitude na tensão da rede, o que poderia influenciar em cargas sensíveis ou instrumentos de medições, conectados ao barramento. Destaca-se, também, a significativa magnitude de corrente de pico requisitada por ambos os conversores, evento descrito no Capítulo 1 como, corrente de *inrush* o qual tem-se a suavização ou mitigação por meio de estratégias de pré-carga ou *soft-start*. Nesse sentido, é interessante o estudo de entrada de conversores na NDCC observando o impacto dos mesmos na rede sob diferentes estratégias de acionamento, em conjunto com outras cargas operando na rede.

3.3 Análise da tensão e corrente em diferentes pontos de medição na NDCC, com a utilização de um inversor para suprimento de cargas c.a.

O segundo ensaio realizado teve por objetivo mostrar a influência na tensão e corrente do barramento c.c. quando se utiliza um inversor autônomo de onda senoidal suprindo cargas lineares e não lineares. A tensão de saída nominal do inversor utilizado é de 120 V_{rms} e a frequência nominal é de 60 Hz. O evento conhecido como *ripple* de corrente, com frequências próximas a 120 Hz, ocorre em diferentes magnitudes, e nesse caso, para o lado c.c. devido à comutação dos transistores do inversor para fornecer uma forma de onda alternada, para o lado c.a. do sistema (ARAÚJO, 2019).

Para esse ensaio, foram registrados os valores de tensão e corrente na entrada do BC3 e em três pontos distintos da rede, próximos a saída de cada SGA, visando mostrar a magnitude do *ripple* de corrente em diferentes pontos da NDCC, conforme identificado a Figura 3.19.

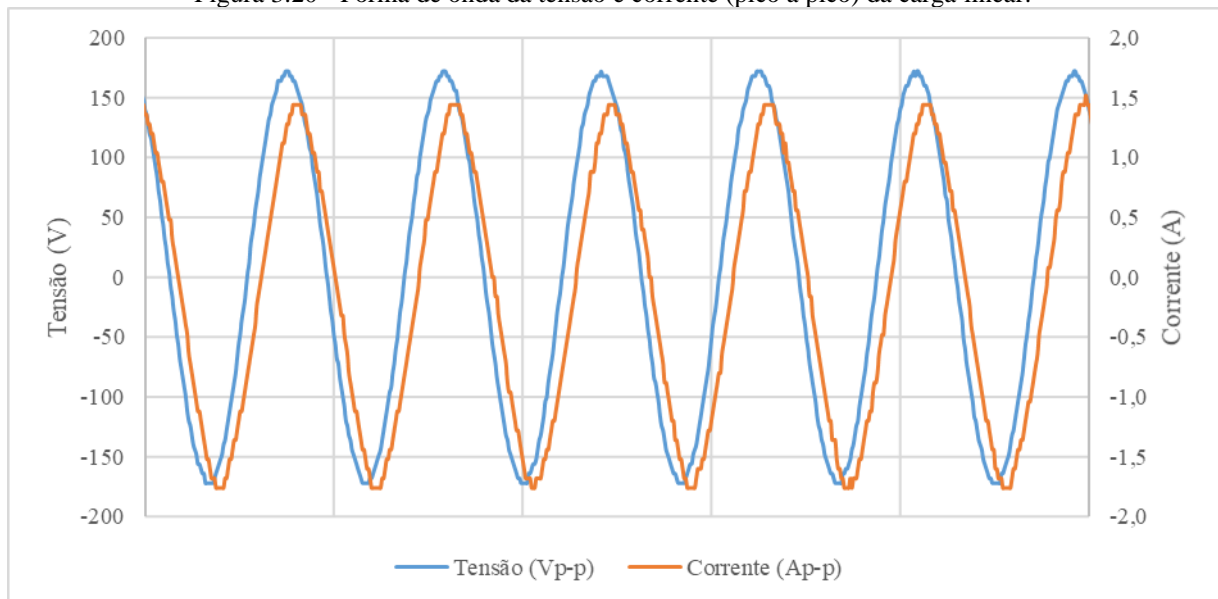
Figura 3.19 - Disposição das pontas de provas de tensão e garras de corrente no quadro elétrico do centro de conexões.



Fonte: Autoria própria.

Dois tipos diferentes de cargas c.a. supridas pelo inversor foram utilizadas: cargas lineares e não lineares. Como carga linear foi utilizado um ventilador da fabricante ARNO modelo *Ultra Silence Force* com potência de 136 W. O gráfico da Figura 3.20 apresenta o perfil de tensão e corrente da carga.

Figura 3.20 - Forma de onda da tensão e corrente (pico a pico) da carga linear.



Fonte: Autoria própria.

Considerando os valores amostrados de tensão e corrente, o cálculo do valor eficaz ou RMS da tensão e corrente foi realizado por meio da Equação 3.2.

$$X_{\text{rms}} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{k=1}^N X_{(k)}^2} \quad (3.2)$$

Onde, 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 3.3.

$$S = V_{\text{rms}} \times I_{\text{rms}} \quad (3.3)$$

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, dividido pelo número de amostras coletadas, Equação 3.4.

$$P = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N V_{(k)} \times I_{(k)} \quad (3.4)$$

O fator de potência (FP) é igual a razão entre potência ativa e a potência aparente, Equação 3.5.

$$\text{FP} = \frac{P}{S} \quad (3.5)$$

Por fim, o valor de potência não ativa foi calculado pela Equação 3.6., conforme definida no padrão IEEE - Std 1459-2010.

$$N_a = \sqrt{S^2 - P^2} \quad (3.6)$$

A Tabela 3.10 dispõe dos parâmetros elétricos calculados referentes à carga linear.

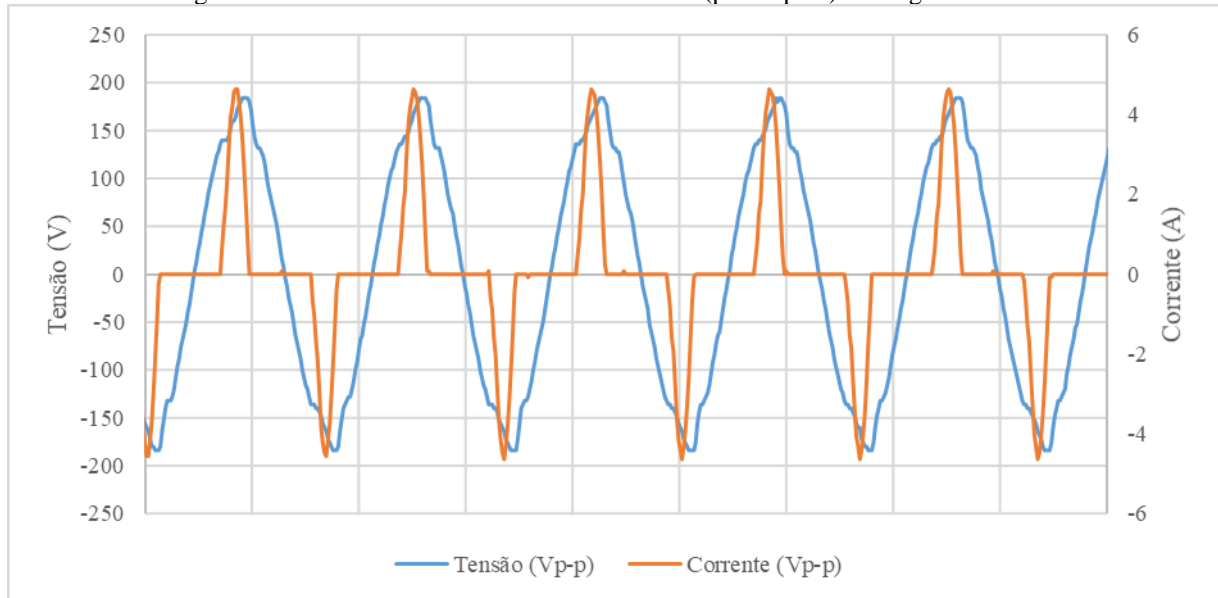
Tabela 3.10 - Potência aparente, ativa e não ativa da carga linear.

Parâmetro Elétrico	Valor (unid.)
Corrente eficaz (I _{rms})	1,1 Arms
Tensão eficaz (V _{rms})	121,2 Vrms
Potência aparente (S)	132,54 VA
Potência ativa (P)	118,14 W
Potência não ativa (N _a)	60,09 VAr
FP	0,89

Fonte: Autoria própria.

Do mesmo modo, como carga não linear foram utilizadas sete lâmpadas fluorescentes compactas da fabricante G-Light, 20 W cada, configurando uma potência total de, aproximadamente, 140 W. A Figura 3.21 apresenta o perfil da tensão de suprimento e corrente do conjunto de sete lâmpadas fluorescentes compactas conectadas na saída do inversor, no qual há distorção na forma de onda da corrente referente à tensão. Com a presença desta carga, tendo um comportamento não senoidal na corrente, ocorre ainda a distorção na forma de onda da tensão de suprimento do inversor (GALHARDO, 2006).

Figura 3.21 - Forma de onda da tensão e corrente (pico a pico) da carga não linear.



Fonte: Autoria própria.

A Tabela 3.11 dispõe dos parâmetros elétricos calculados referentes à carga não linear.

Tabela 3.11 - Potência aparente, ativa e não ativa da carga não linear.

Parâmetro Elétrico	Valor (unid.)
Corrente eficaz (Irms)	1,7 Arms
Tensão eficaz (Vrms)	121,7 Vrms
Potência aparente (S)	210,55 VA
Potência ativa (P)	137,99 W
Potência não ativa (Na)	159,02 VAr
FP	0,66

Fonte: Autoria própria.

Na Tabela 3.12 constam as duas configurações adotadas pelo BC3 e seus respectivos subensaios. Cada configuração possui quatro subensaios referentes à premissa apresentada no início do Capítulo.

Tabela 3.12 – Resumo dos subensaios referente ao ensaio 2.

Configuração do BC3	Identificador
	2.1
	2.2
Carga linear	2.3
	2.4
	2.5
	2.6
Carga não linear	2.7
	2.8

Fonte: Autoria própria.

3.3.1 Resultados

O ensaio 2 foi realizado com a aquisição de dados em uma amostragem de 0,4 ms por parâmetro elétrico nos diferentes pontos de medição da NDCC. É importante ressaltar que o osciloscópio digital portátil usado nas medições possui apenas quatro canais disponíveis, logo, não foi possível realizar as medições em todos os pontos simultaneamente. Para cada subensaio foram registrados valores de tensão e corrente no ponto de medição próximo ao BC3 e aos pontos P1, P2 e P3, próximos aos SGAs 1, 2 e 3, respectivamente. O tempo, para registro dos parâmetros elétricos, de um ponto de medição a outro foi de 10 minutos, visto que, os dados do osciloscópio digital portátil eram gravados em um *Pen Drive*, para posterior tratamento.

3.3.1.1 Carga linear

O subensaio 2.1 realizado no dia 01/10/2020 às 12h45, com a presença da geração fotovoltaica em horário de alta irradiância. No presente subensaio, o ponto P1 apresentou um valor de corrente baixo e com sinal negativo, não possuindo nenhuma contribuição para o suprimento das cargas conectadas e evidenciando o carregamento do banco de baterias de forma sutil. Os níveis de tensão nos pontos próximos aos SGAs foram registrados na faixa de 1,2 p.u. e no ponto próximo ao BC3 registrou-se uma tensão de 1,17 p.u., dada a queda de tensão ao longo da NDCC.

Na Tabela 3.13 constam os valores dos parâmetros elétricos registrados em cada ponto da NDCC. É possível destacar maior contribuição do SGA que corresponde ao ponto P3, visto que este está a uma menor distância do ponto de conexão do BC3 na NDCC. Em todos os pontos da NDCC foi registrada a presença de *ripple* na corrente e em diferentes níveis, ilustrado na Figura 3.22, os quais não causaram instabilidade no nível de tensão da rede.

O subensaio 2.2 foi realizado no dia 01/10/2020 às 8h52, com a presença da geração fotovoltaica em horário de baixa irradiância. Em alguns momentos, houve a presença de nuvens, o que ocasionou uma mudança no valor de corrente fornecida por cada SGA, visto que a corrente dos geradores fotovoltaicos é proporcional à irradiância incidente.

O comportamento observado no subensaio 2.2 é análogo ao subensaio 2.1, diferindo apenas na contribuição entre os pontos P2 e P3. Do mesmo modo que o subensaio anterior, o nível de tensão do barramento permaneceu constante, próximo a 1,2 p.u. A Tabela 3.14 apresenta os valores registrados para os respectivos pontos.

Tabela 3.13 - Parâmetros elétricos do subensaio 2.1 em pontos distintos da NDCC, com inversor em BC3 suprindo carga linear.

Pontos da NDCC	Subensaio 2.1			
	Tensão (p.u.)	Corrente média (A)	Corrente de <i>Ripple</i> (Ap-p)	Frequência do <i>Ripple</i> (Hz)
BC3	1,17	5,32	1,04	119,04
P1	1,23	-0,02	0,24	119,04
P2	1,24	2,10	0,32	119,04
P3	1,24	2,81	0,48	119,04

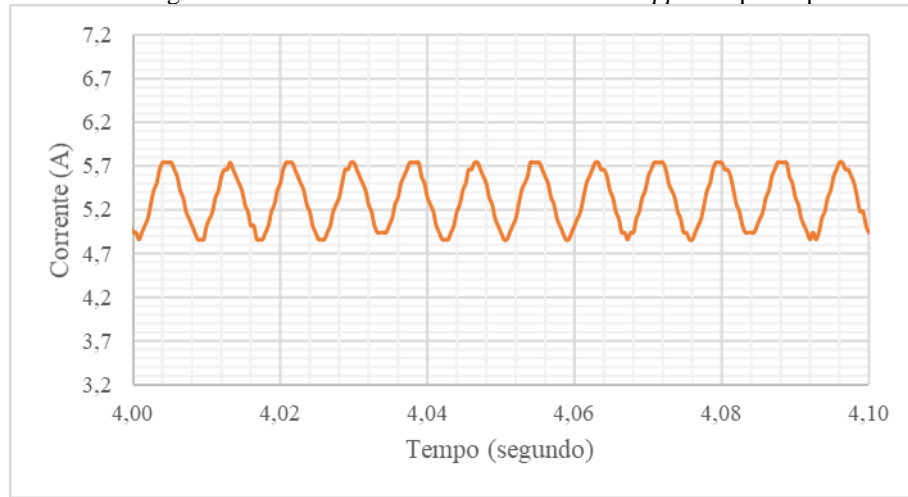
Fonte: Autoria própria.

Tabela 3.14 - Parâmetros elétricos do subensaio 2.2 em pontos distintos da NDCC, com inversor em BC3 suprindo com carga linear.

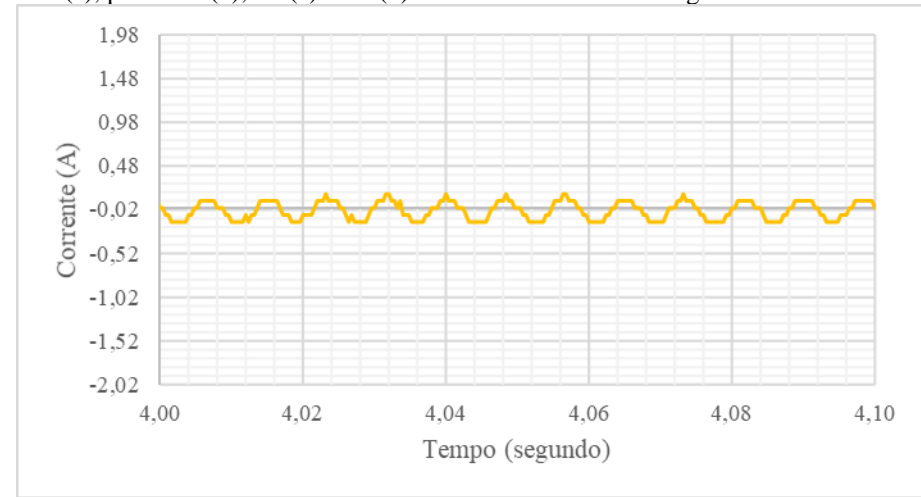
Pontos da NDCC	Subensaio 2.2			
	Tensão (p.u.)	Corrente média (A)	Corrente de <i>Ripple</i> (Ap-p)	Frequência do <i>Ripple</i> (Hz)
BC3	1,14	5,59	1,12	119,04
P1	1,21	0,09	0,16	119,04
P2	1,21	1,65	0,16	119,04
P3	1,17	3,92	0,48	119,04

Fonte: Autoria própria.

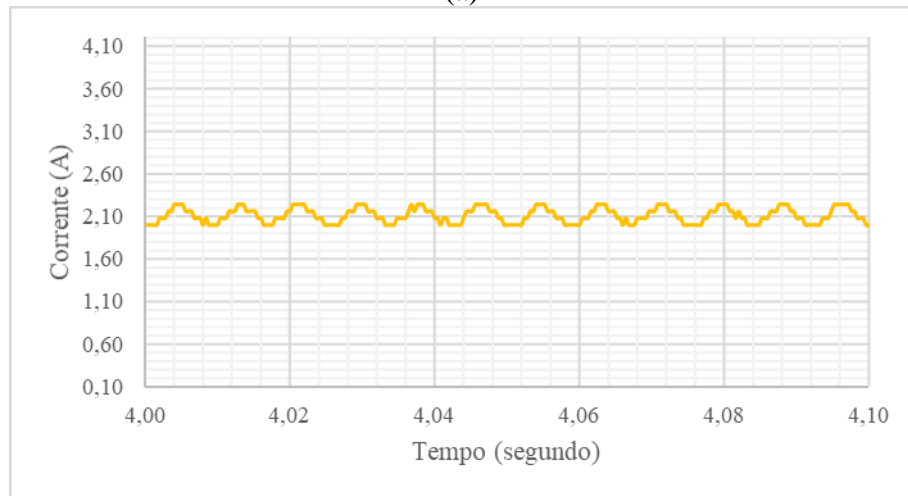
Figura 3.22 - Forma de onda da corrente com *ripple* no ponto próximo ao BC3 (a), ponto P1 (b), P2 (c) e P3 (d) do subensaio 2.1 com carga linear.



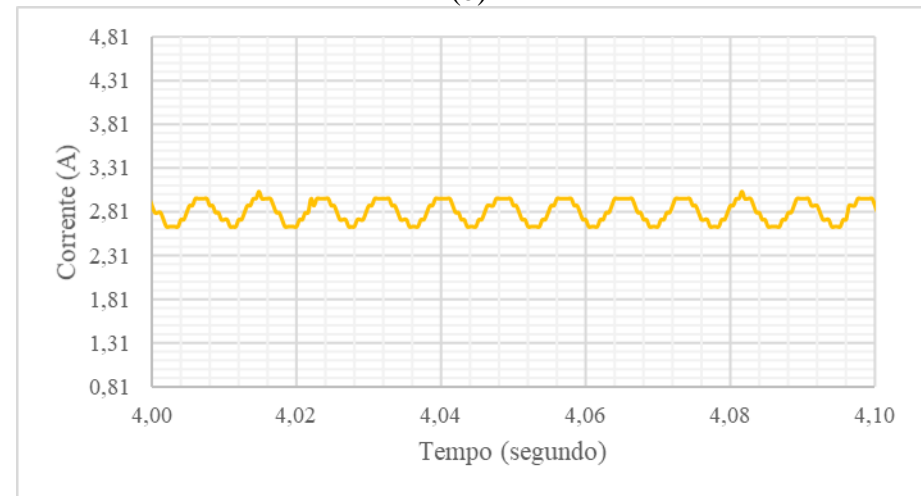
(a)



(b)



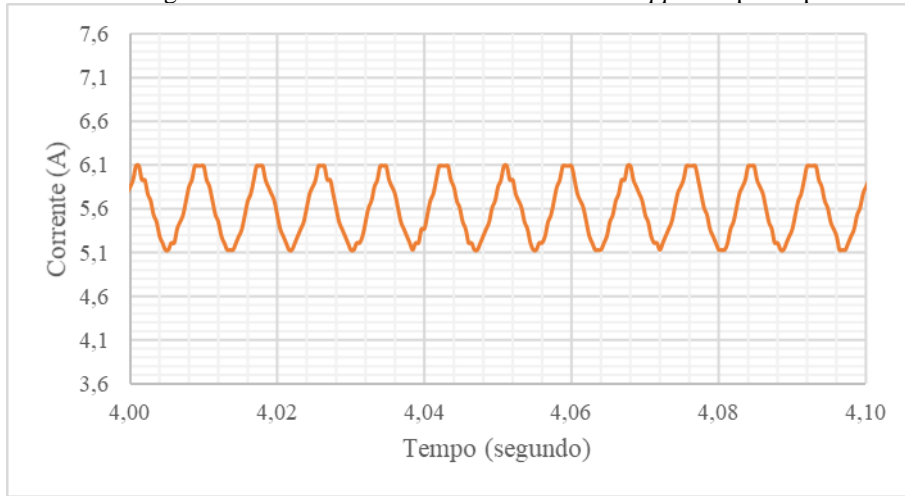
(c)



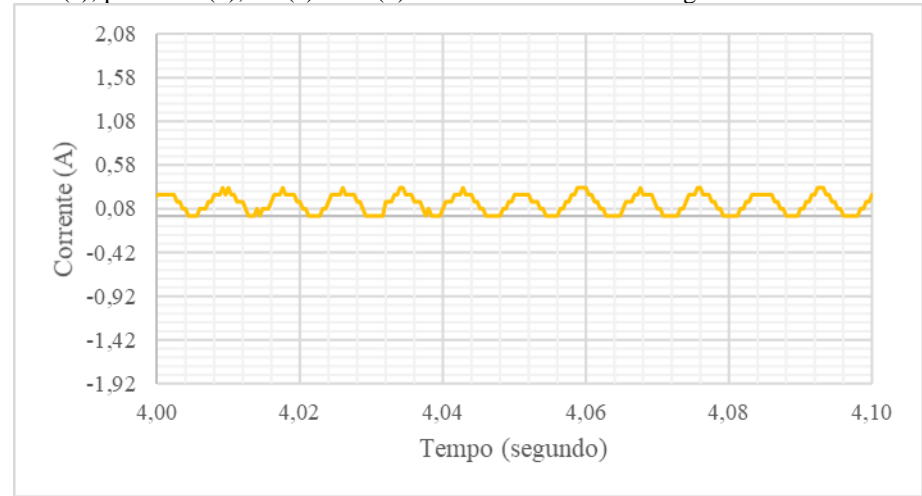
(d)

Fonte: Autoria própria.

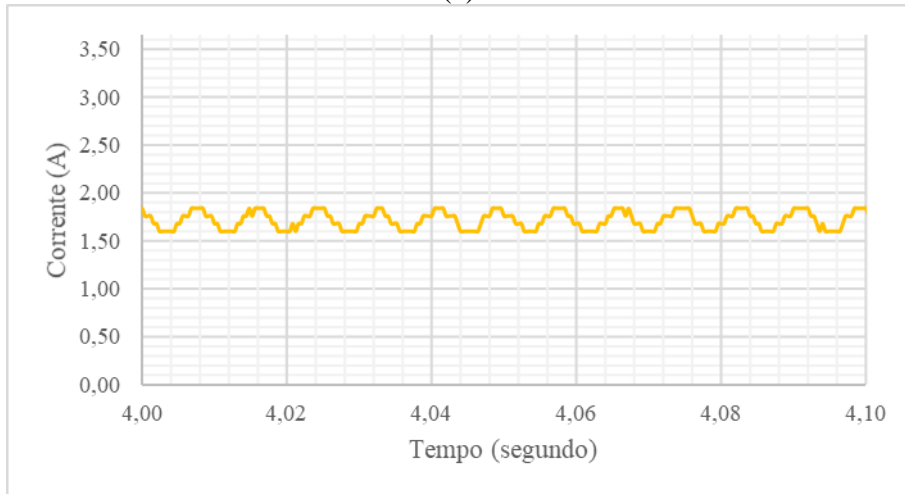
Figura 3.23 - Forma de onda da corrente com *ripple* no ponto próximo ao BC3 (a), ponto P1 (b), P2 (c) e P3 (d) do subensaio 2.2 com carga linear.



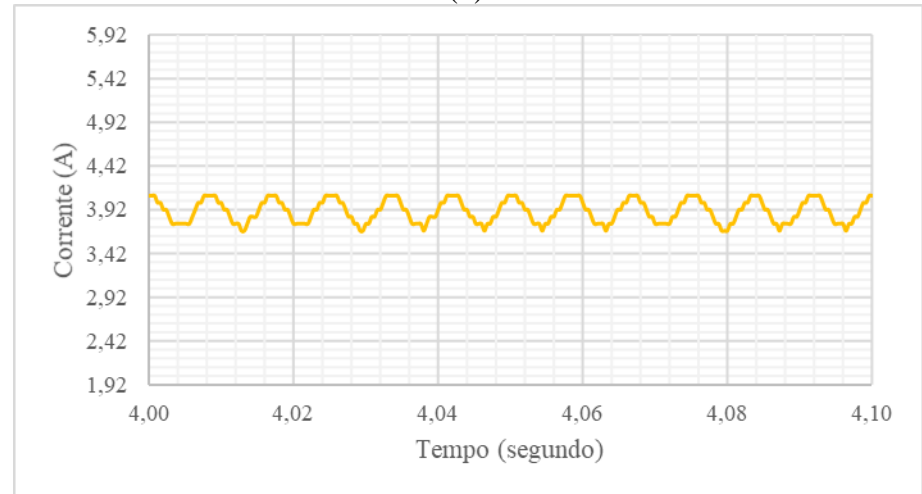
(a)



(b)



(c)



(d)

Fonte: Autoria própria.

O subensaio 2.3 foi realizado no dia 01/10/2020 às 10h01, sem a presença da geração fotovoltaica e com os bancos de baterias carregados, com formas de onda de corrente ilustradas na Figura 3.24. O valor de corrente referente à contribuição do SGA 3 é menor se comparado com os subensaios anteriores, devido à contribuição antes inexistente do SGA 1 localizado no ponto P1. Na Tabela 3.15 constam os valores registrados para cada ponto. Além disso, destaca-se que o nível de tensão do barramento c.c. permaneceu praticamente constante, isto é, sem variação durante o referido subensaio.

O subensaio 2.4 foi realizado no dia 02/10/2020 às 11h03, sem a presença da geração fotovoltaica e com os bancos de baterias em um nível de tensão baixo. Observa-se, nesse caso, a contribuição do P2 abaixo da contribuição do ponto P1, onde é possível concluir que o banco de baterias do SGA 2, correspondente ao ponto P2, estava com um estado de carga menor que os demais. O ponto P3, como nos subensaios anteriores, apresentou maior contribuição para o suprimento da carga com uma corrente média de 2,50 A e *ripple* de corrente de 0,40 A pico a pico, Figura 3.25(c). Na Figura 3.25 ilustra-se a forma de onda de corrente registradas.

Na Tabela 3.16 constam os valores registrados em cada ponto, comentados anteriormente. O nível de tensão dos pontos P1 a P3 mantiveram-se constantes sem nenhuma variação significativa. Para ambos subensaios, 2.3 e 2.4, a tensão do barramento c.c. permaneceu estável.

Tabela 3.15 - Parâmetros elétricos do subensaio 2.3 em pontos distintos da NDCC, com inversor em BC3 suprindo com carga linear.

Subensaio 2.3				
Pontos da NDCC	Tensão (p.u.)	Corrente média (A)	Corrente de <i>Ripple</i> (Ap-p)	Frequência do <i>Ripple</i> (Hz)
BC3	1,04	6,08	1,04	119,04
P1	1,10	1,82	0,40	119,04
P2	1,11	1,86	0,32	119,04
P3	1,10	2,33	0,40	119,04

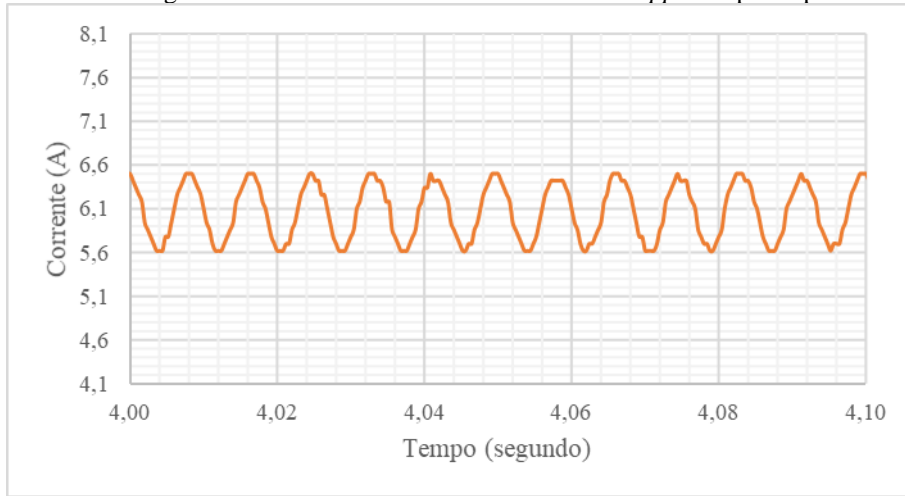
Fonte: Autoria própria.

Tabela 3.16 - Parâmetros elétricos do subensaio 2.4 em pontos distintos da NDCC, com inversor em BC3 suprindo com carga linear.

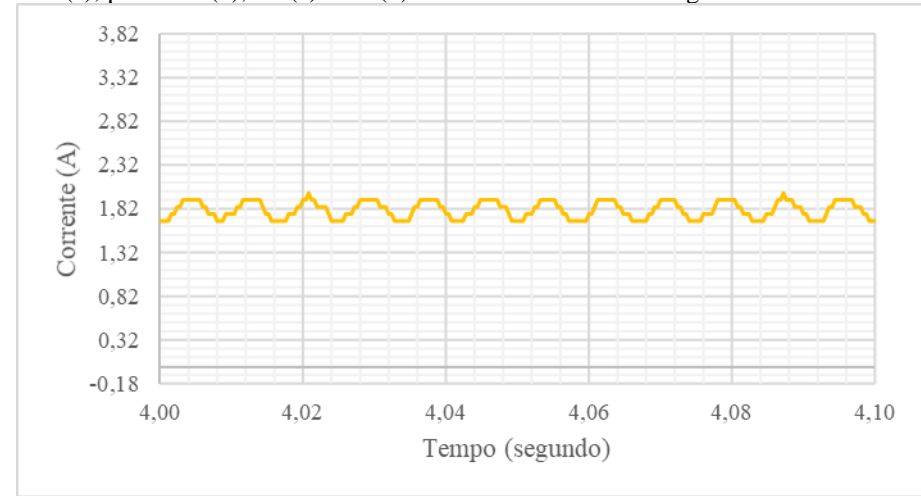
Subensaio 2.4				
Pontos da NDCC	Tensão (p.u.)	Corrente média (A)	Corrente de <i>Ripple</i> (Ap-p)	Frequência do <i>Ripple</i> (Hz)
BC3	1,01	6,35	0,96	119,04
P1	1,02	2,33	0,40	119,04
P2	1,00	1,72	0,32	119,04
P3	1,04	2,50	0,40	119,04

Fonte: Autoria própria.

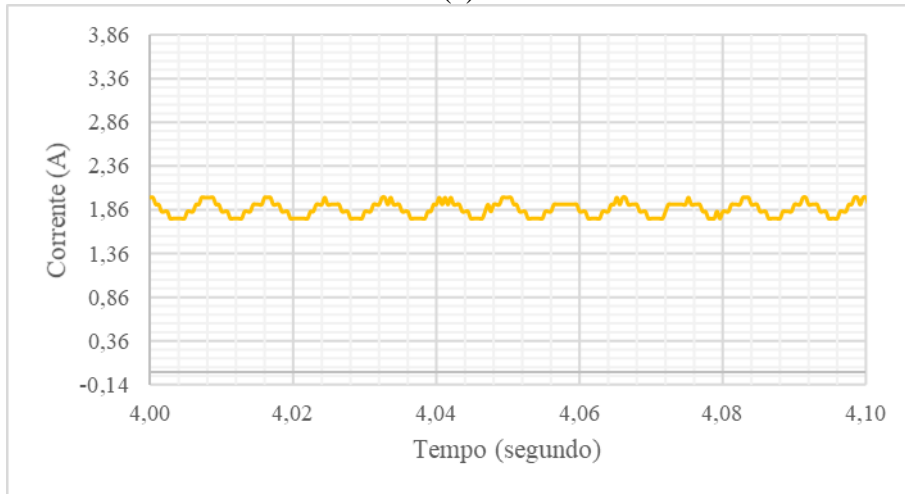
Figura 3.24 - Forma de onda da corrente com *ripple* no ponto próximo ao BC3 (a), ponto P1 (b), P2 (c) e P3 (d) do subensaio 2.3 com carga linear.



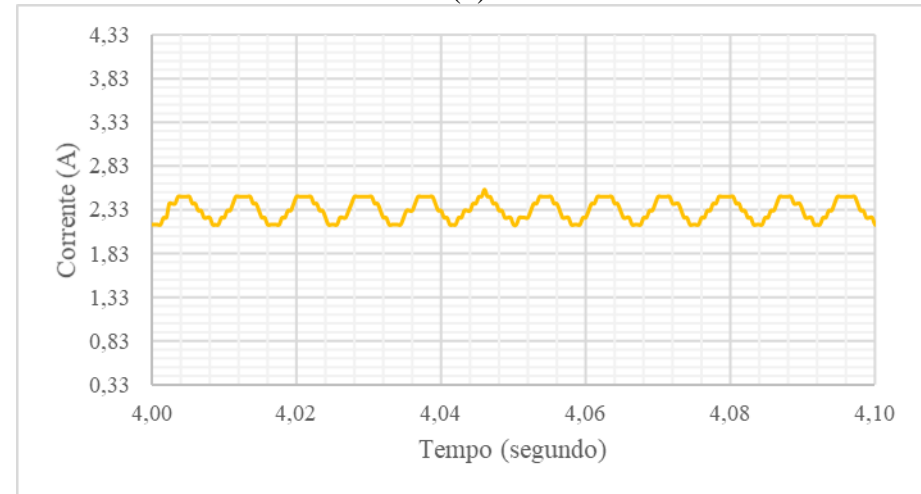
(a)



(b)



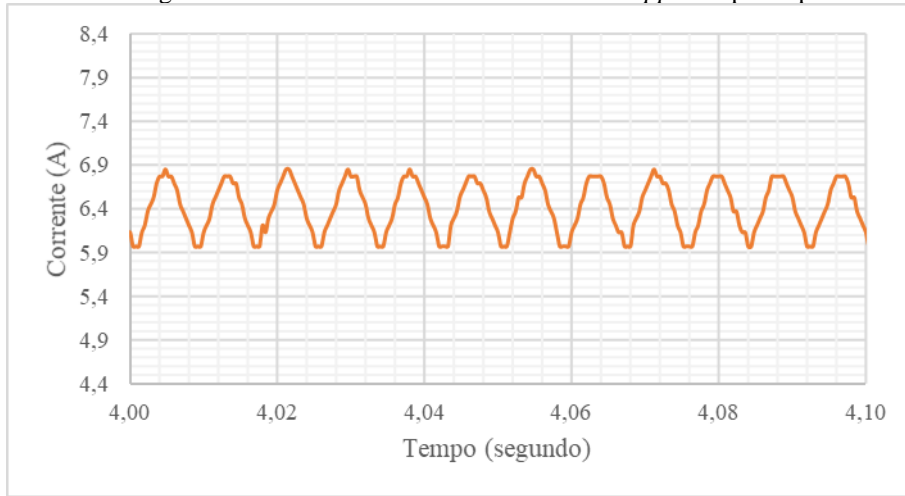
(c)



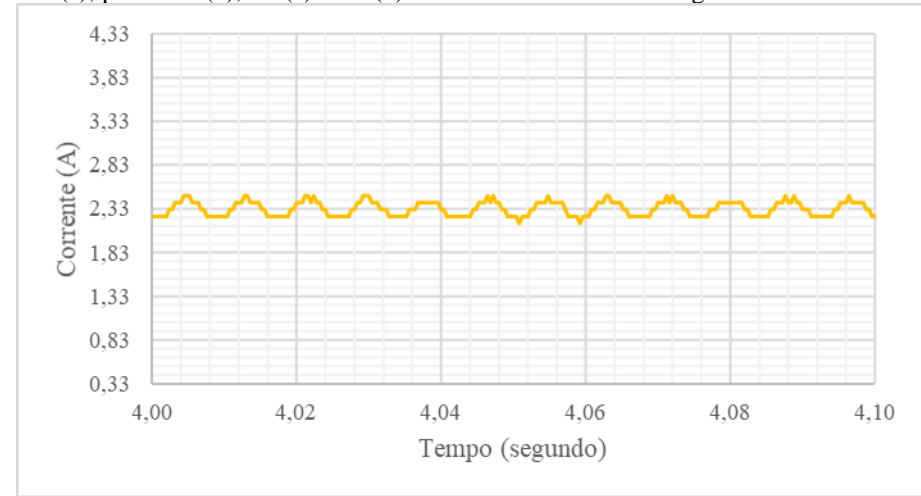
(d)

Fonte: Autoria própria.

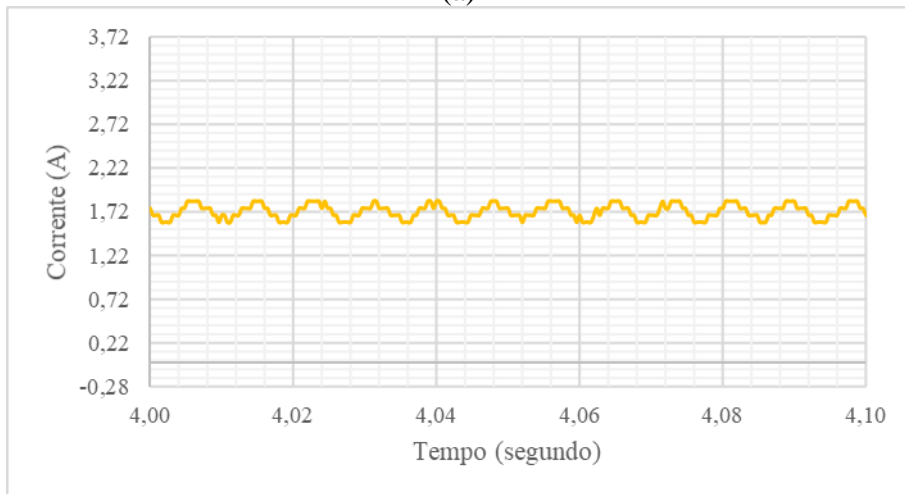
Figura 3.25 - Forma de onda da corrente com *ripple* no ponto próximo ao BC3 (a), ponto P1 (b), P2 (c) e P3 (d) do subensaios 2.4 com carga linear.



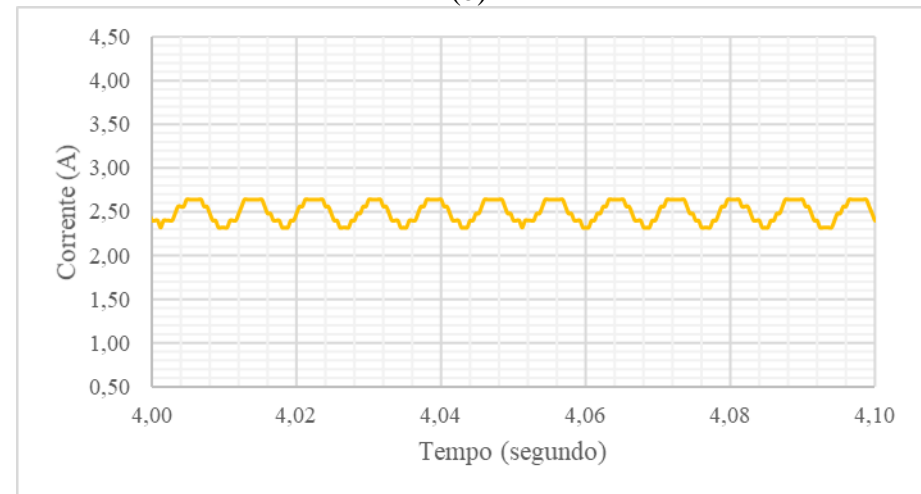
(a)



(b)



(c)



(d)

Fonte: Autoria própria.

3.3.1.2 Carga não linear

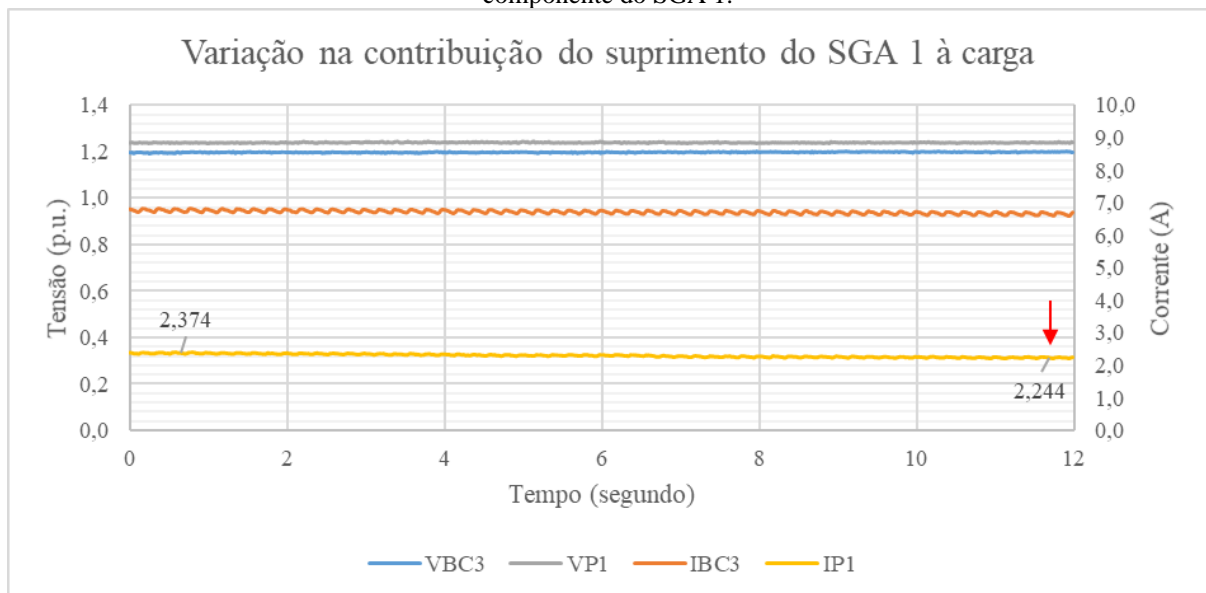
O subensaio 2.5 foi realizado no dia 01/10/2020 às 12h22, com a presença da geração fotovoltaica em horário de alta irradiância. Foi observada uma contribuição dos SGAs com 1,35 A de diferença ao consumo da carga, nesse caso pode-se afirmar que houve variação no valor de corrente injetada na rede pela geração durante o andamento do subensaio. Como exemplo, a Figura 3.26 mostra o único registro de variação de corrente, nessa ocasião para menos, referente ao SGA1. No entanto, não foi registrado o exato momento em que houve o aumento na contribuição dos SGAs à carga. Na Tabela 3.17 constam os valores registrados para contribuição de cada SGA.

Tabela 3.17 - Parâmetros elétricos do subensaio 2.5 em pontos distintos da NDCC, com o inversor em BC3 suprindo carga não linear.

Pontos da NDCC	Subensaio 2.5			
	Tensão (p.u.)	Corrente média (A)	Corrente de Ripple (Ap-p)	Frequência do Ripple (Hz)
BC3	1,16	6,17	2,64	119,04
P1	1,24	2,30	1,04	119,04
P2	1,24	1,51	0,72	119,04
P3	1,24	3,71	1,12	119,04

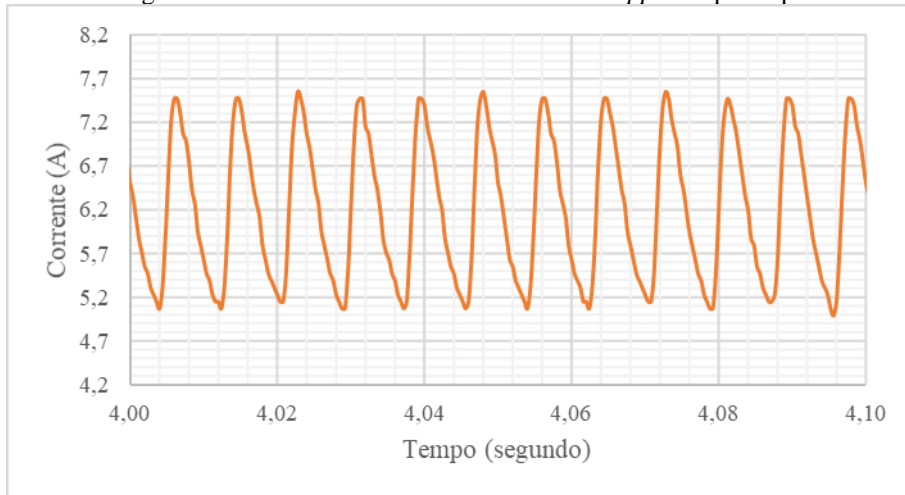
Fonte: Autoria própria.

Figura 3.26 - Variação na corrente injetada na rede, resultado da mudança na irradiância incidente no gerador componente do SGA 1.

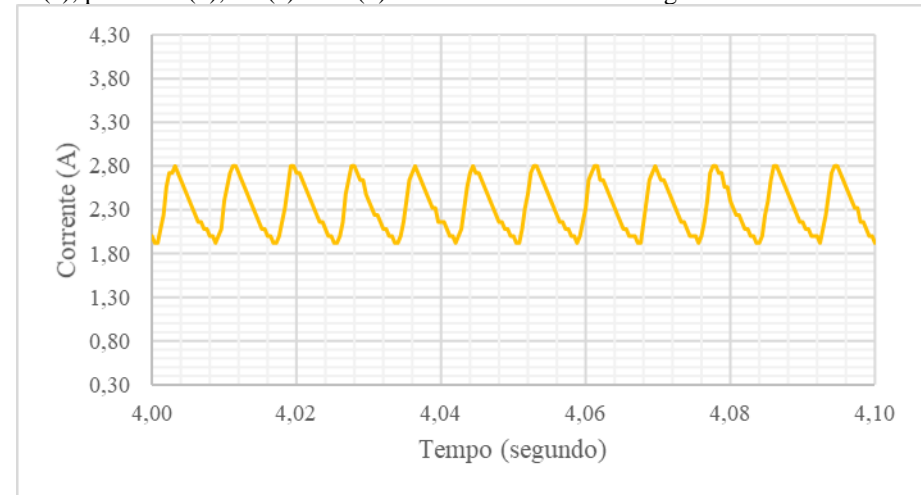


Fonte: Autoria própria.

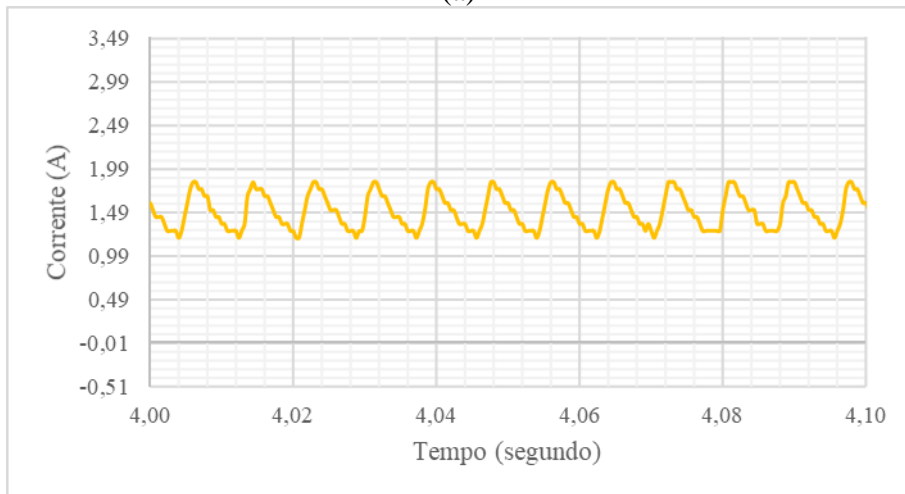
Figura 3.27 - Forma de onda da corrente com *ripple* no ponto próximo ao BC3 (a), ponto P1 (b), P2 (c) e P3 (d) do subensaio 2.5 com carga não linear.



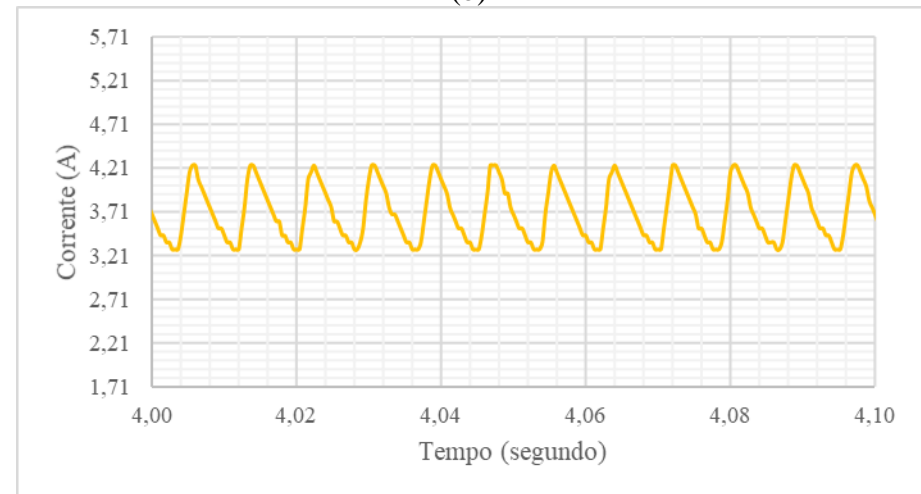
(a)



(b)



(c)



(d)

Fonte: Autoria própria.

O subensaio 2.6 foi realizado no dia 01/10/2020 às 09h17, com a presença da geração fotovoltaica em horário de baixa irradiância e inversor suprindo a carga não linear.

Na Figura 3.28, referente ao ponto P3 localizado próximo ao SGA 3, observa-se a variação da corrente média, acima de 1 A, ao final alcançando valor próximo a 4,5 A, mostrando nesse caso a influência de nuvens na contribuição de cada SGA ao suprimento da carga conectada a NDCC.

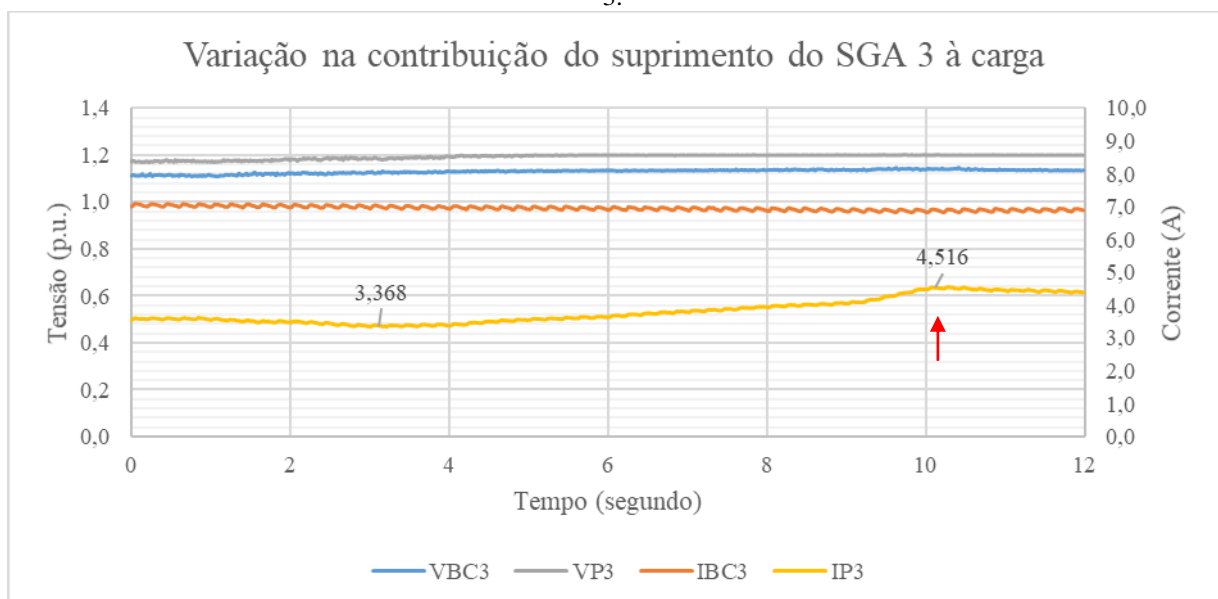
Na Tabela 3.18 constam os valores dos parâmetros elétricos registrados por ponto, ilustrando a forma de onda na Figura 3.29. Novamente, como no ensaio 2.5 com cargas não lineares, nenhuma instabilidade no nível de tensão foi observada referente ao *ripple* de corrente, apenas à diminuição da irradiância incidente, decorrente do dia nublado.

Tabela 3.18 - Parâmetros elétricos do subensaio 2.6 em pontos distintos da NDCC, com inversor em BC3 suprindo carga não linear.

Pontos da NDCC	Subensaio 2.6			
	Tensão (p.u.)	Corrente média (A)	Corrente de <i>Ripple</i> (Ap-p)	Frequência do <i>Ripple</i> (Hz)
BC3	1,11	6,87	2,64	119,04
P1	1,17	1,59	0,72	119,04
P2	1,17	2,77	0,56	119,04
P3	1,18	3,34	1,04	119,04

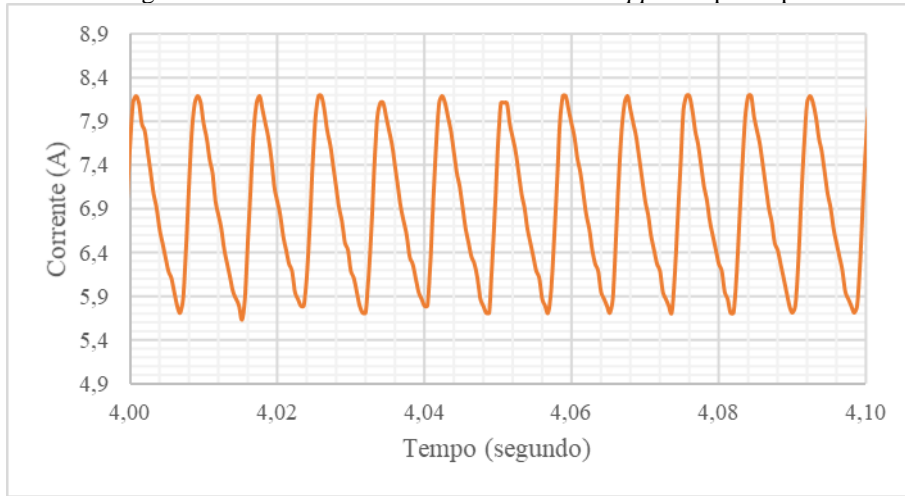
Fonte: Autoria própria.

Figura 3.28 - Variação na corrente injetada na rede, resultado do sombreamento do gerador componente do SGA 3.

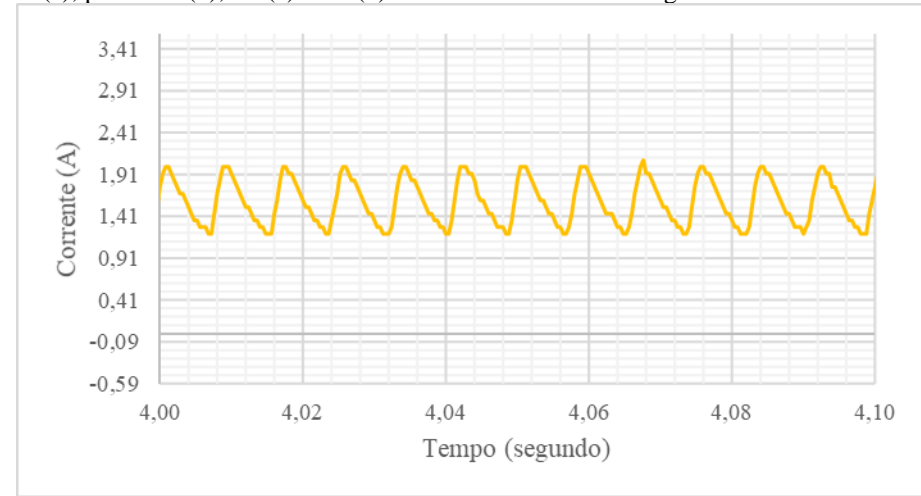


Fonte: Autoria própria.

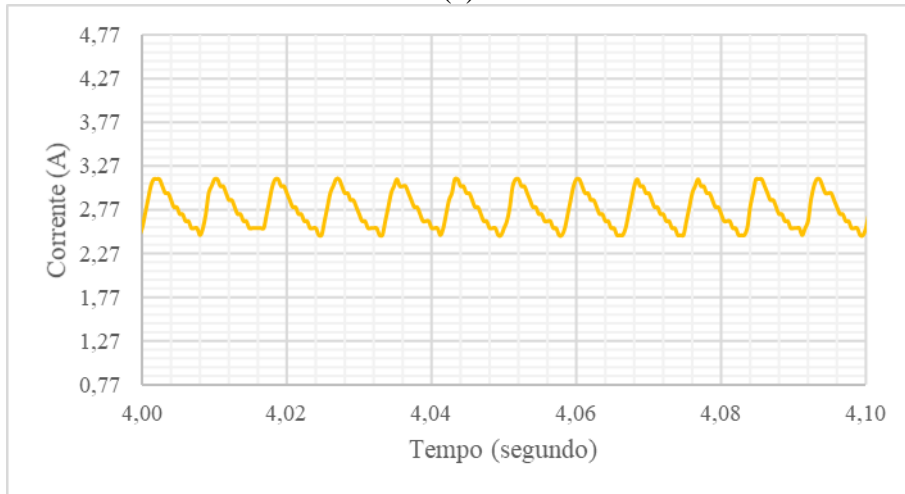
Figura 3.29 - Forma de onda da corrente com *ripple* no ponto próximo ao BC3 (a), ponto P1 (b), P2 (c) e P3 (d) do subensaio 2.6 com carga não linear.



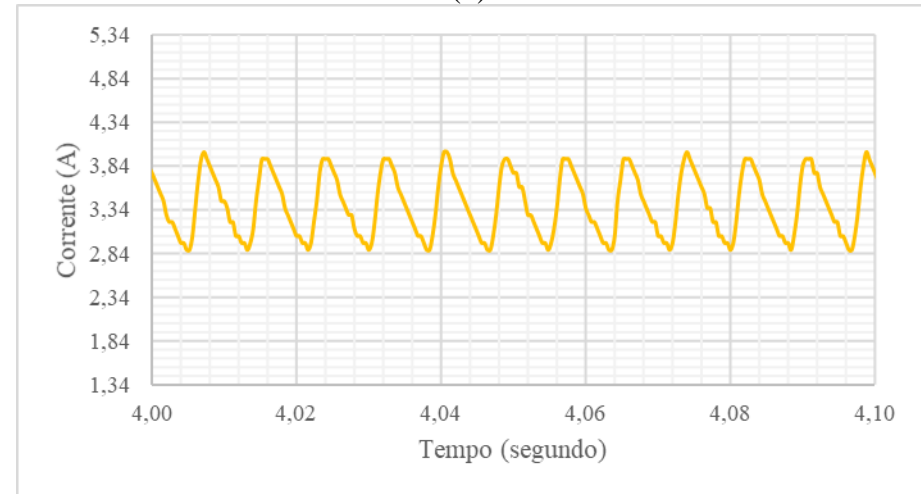
(a)



(b)



(c)



(d)

Fonte: Autoria própria.

O subensaio 2.7, para cargas não lineares, foi realizado no dia 01/10/2020 às 10h32, sem a presença da geração fotovoltaica e com os bancos de baterias carregados, com formas de onda de corrente apresentados na Figura 3.30. Na Tabela 3.19 constam os parâmetros elétricos registrados por ponto. O nível de tensão do barramento permaneceu estável.

Por fim, o subensaio 2.8 foi realizado no dia 02/10/2020 às 10h57, sem a presença da geração fotovoltaica, com os bancos de baterias em um nível de tensão baixo e com o inversor suprindo cargas não lineares, com formas de ondas de corrente apresentadas na Figura 3.31. Na Tabela 3.20 constam os valores dos parâmetros elétricos registrados por ponto. De forma geral, ambos os ensaios apenas com os bancos de baterias suprindo a carga tiveram contribuições próximas por SGA, sendo o SGA 3 o mais presente.

Tabela 3.19 - Parâmetros elétricos do subensaio 2.7 em pontos distintos da NDCC, com inversor em BC3 suprindo com carga não linear.

Subensaio 2.7				
Pontos da NDCC	Tensão (p.u.)	Corrente média (A)	Corrente de Ripple (Ap-p)	Frequência do Ripple (Hz)
BC3	1,03	7,78	2,64	119,04
P1	1,10	2,60	0,88	119,04
P2	1,10	2,25	0,72	119,04
P3	1,10	2,97	1,20	119,04

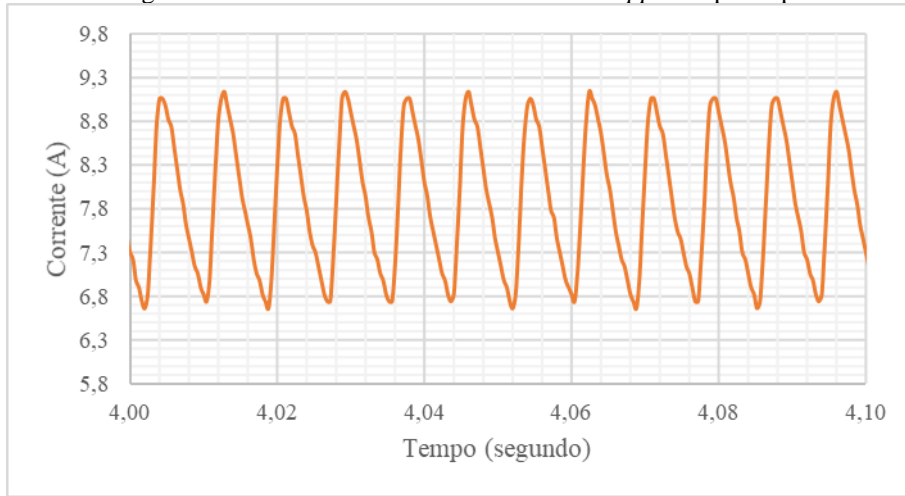
Fonte: Autoria própria.

Tabela 3.20 - Parâmetros elétricos do subensaio 2.8 em pontos distintos da NDCC, com inversor em BC3 suprindo com carga não linear.

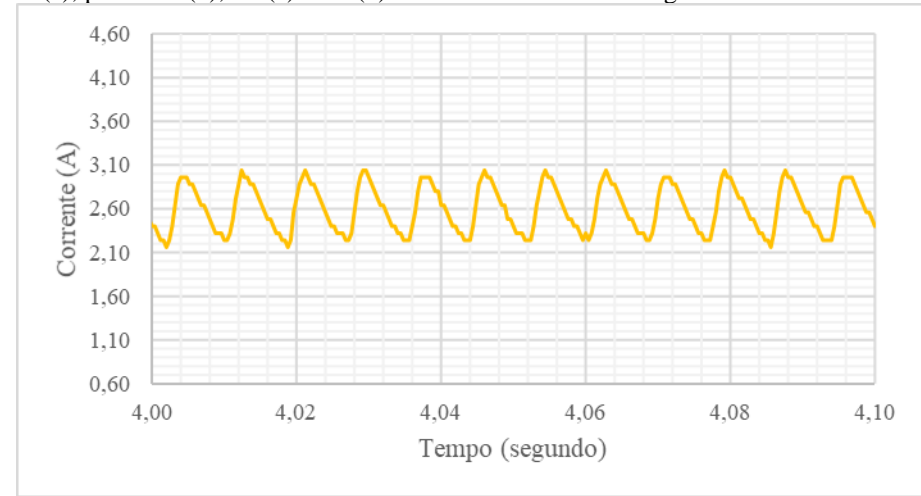
Subensaio 2.8				
Pontos da NDCC	Tensão (p.u.)	Corrente média (A)	Corrente de Ripple (Ap-p)	Frequência do Ripple (Hz)
BC3	1,02	7,31	2,24	119,04
P1	1,04	2,66	0,72	119,04
P2	1,02	2,03	0,64	119,04
P3	1,03	3,08	0,96	119,04

Fonte: Autoria própria.

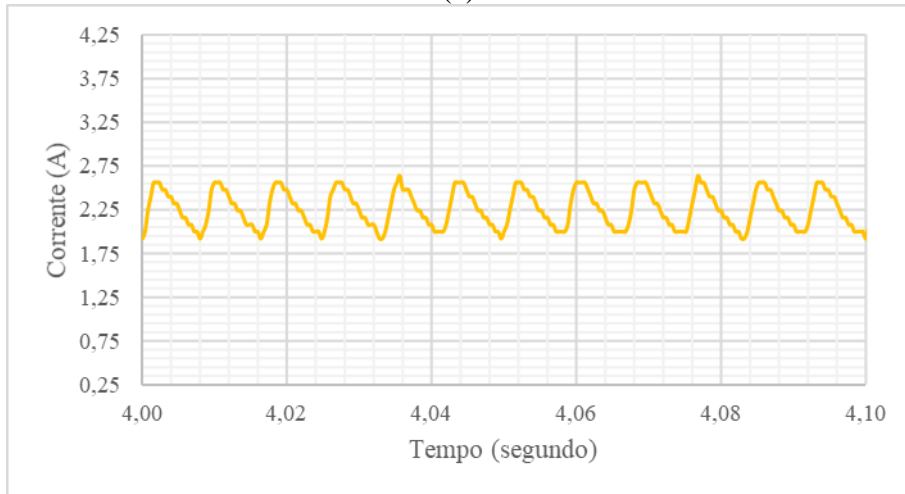
Figura 3.30 - Forma de onda da corrente com *ripple* no ponto próximo ao BC3 (a), ponto P1 (b), P2 (c) e P3 (d) do subensaio 2.7 com carga não linear.



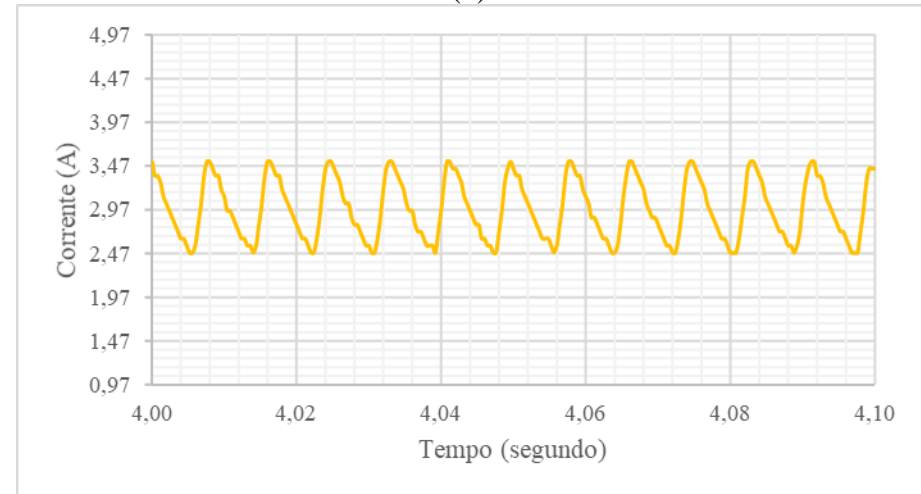
(a)



(b)



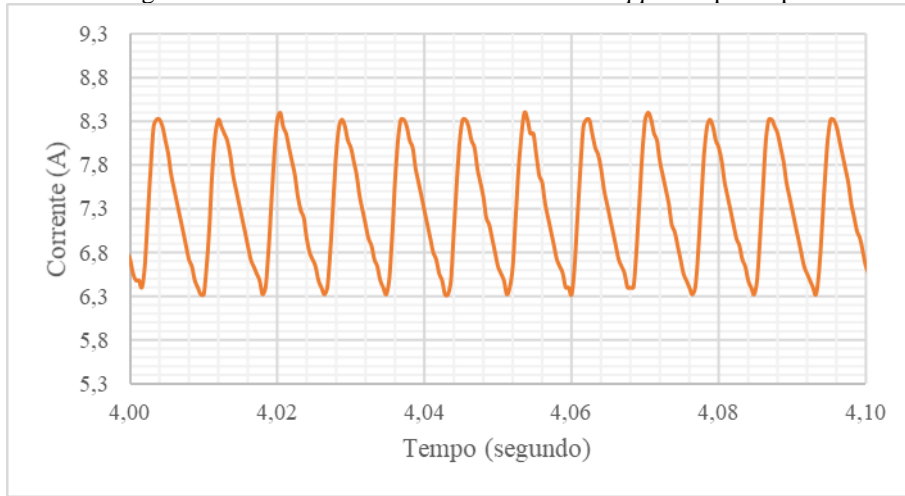
(c)



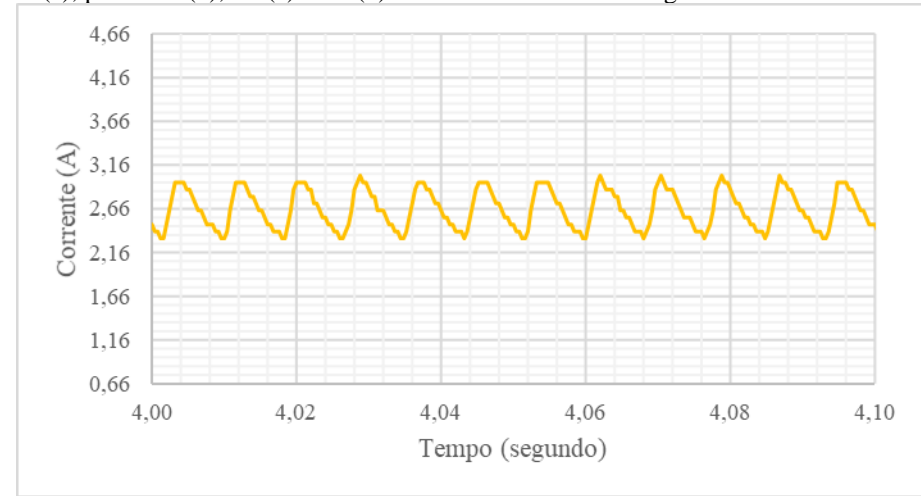
(d)

Fonte: Autoria própria.

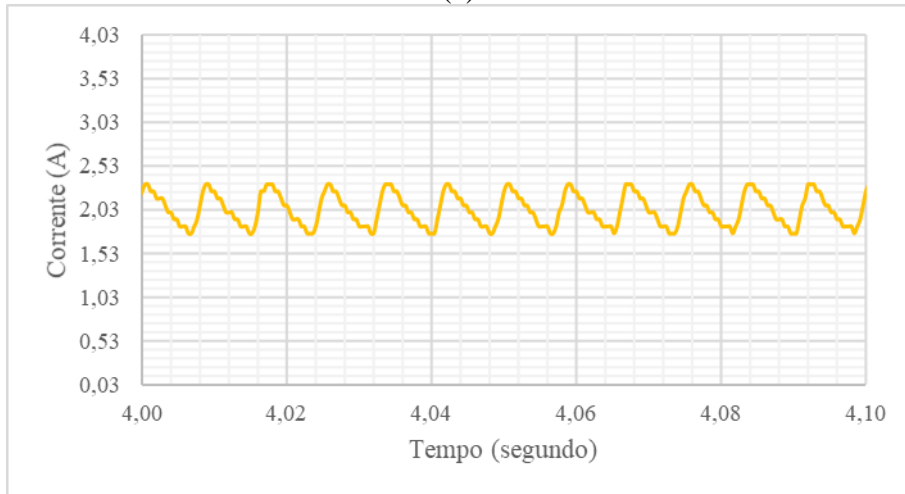
Figura 3.31 - Forma de onda da corrente com *ripple* no ponto próximo ao BC3 (a), ponto P1 (b), P2 (c) e P3 (d) do subensaio 2.8 com carga não linear.



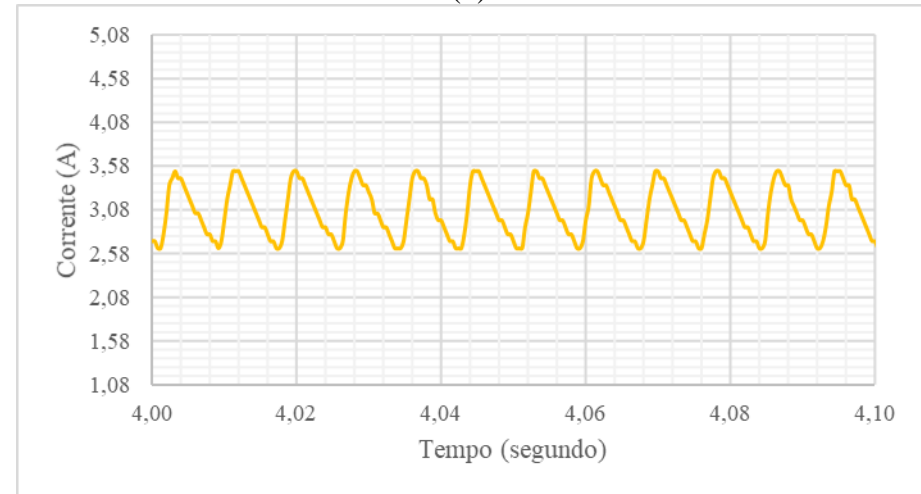
(a)



(b)



(c)



(d)

Fonte: Autoria própria.

3.3.2 Comentários sobre o ensaio 2

Os resultados apresentados pela proposta do ensaio 2 trouxeram um ponto interessante a ser observado, a existência de *ripple* na corrente em diferentes magnitudes ao longo do barramento c.c. da NDCC e conforme a situação operacional da NDCC, dada a contribuição de cada SGA para o suprimento da carga, seja em um momento em que a geração fotovoltaica esteja presente ou não (apenas com banco de baterias).

O ensaio 2 utilizando a carga não linear apresentou, de forma geral, *ripple* de corrente mais expressivos com forma de onda “dentada” com magnitudes mais elevadas, em especial mais próxima do ponto de conexão do BC3 na NDCC. Em contrapartida, o *ripple* na corrente, utilizando cargas linear apresentaram formas de onda próximas a uma senoide.

Destaca-se como necessidade de medição futura, o monitoramento dos valores de irradiância em conjunto da contribuição de cada SGA à carga conectada ao barramento, observando sua influência na magnitude da corrente de *ripple*.

Além disso, quando no barramento c.a. há um maior fluxo de potência não ativa, tem-se um *ripple* mais expressivo na magnitude da corrente no lado c.c. Deste modo, torna-se interessante em trabalhos futuros o estudo do impacto do *ripple* na corrente no barramento c.c. em conjunto ao uso de diferentes tipos de cargas, seja voltada a dispositivos de comunicação, medição ou climatização, no intuito de observar possíveis influências na operação destas.

É interessante também a observação da influência de diferentes magnitudes de corrente de *ripple* sobre a estabilidade da tensão da rede, visto que a tensão dos bancos de baterias está relacionada à corrente demandada por cargas acionadas na rede. Nesse contexto, variações na corrente demandada ocasionariam variações na tensão do barramento c.c. da NDCC. Para os ensaios realizados não foi observada essa influência.

3.4 Avaliação da eficiência do suprimento com diferentes conversores para luminárias LED

O ensaio 3 foi realizado com base na identificação da eficiência de conversão elétrica de cada conversor c.c./c.c. utilizado (conversores c.c./c.c. centralizado e descentralizados) para os painéis de LED, cuja conexão do(s) conversor(es) foi realizada diretamente na NDCC. Do mesmo modo, obteve-se o valor de eficiência de conversão elétrica para os *drivers*, que comumente realizam a interface c.a./c.c. para os painéis LED com a rede de distribuição

convencional, nesse caso foi utilizado um inversor de onda senoidal, componente do BC3, conectado à NDCC.

O presente estudo tem o intuito de apresentar qual conjunto de conversores possui melhor desempenho para suprir os painéis LED em questão, arranjados no BC1, apresentando a eficiência individual de cada *driver* ou conversor, e total do sistema, com todos os *drivers* e conversores atuando.

A estratégia da utilização de conversores centralizados e descentralizados pode trazer também vantagens para uma aplicação em escala real, por exemplo, em residências ou *datacenters*.

O emprego de conversores descentralizados apresenta como vantagem maior flexibilidade, permitindo a reposição individual de cada conversor em caso de avaria ou queima do componente, além de poder dispor próximo à luminária ou em um quadro elétrico, facilitando manutenções. Destaca-se também que, para as luminárias empregadas, o conversor descentralizado permite a operação mais próxima do ponto de máxima eficiência de conversão.

A estrutura centralizada, referente ao conversor utilizado, oferece controle centralizado para as luminárias podendo realizar ações conjuntas de regulação de tensão ou acionamento, dispondo de menor flexibilidade em caso de avaria ou queima do componente, sendo necessário a troca do mesmo, afetando todo o conjunto de cargas (luminárias) conectadas ao mesmo. Além disso, necessita de um local para disposição do componente, por exemplo, quadro de distribuição.

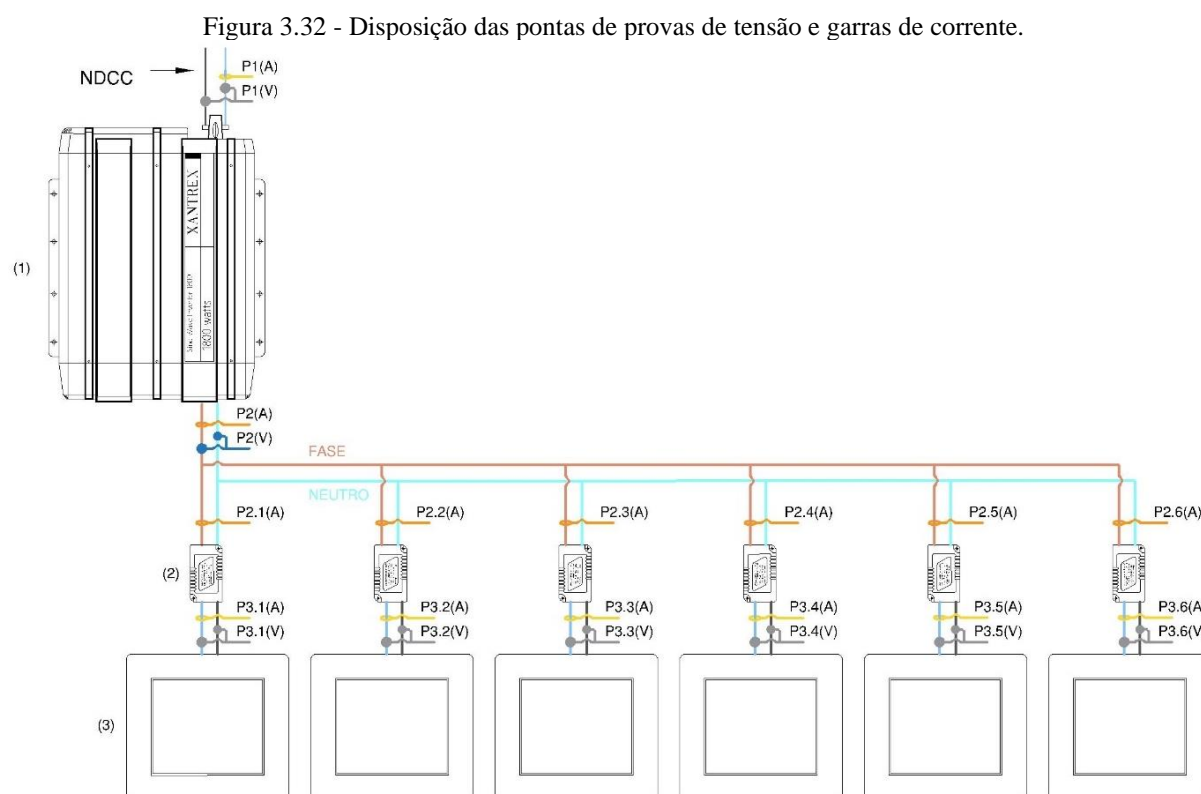
Em relação aos *drivers* aplicados a LED, de forma geral, são normalmente dispostos próximos à luminária, com conectores específicos para conexão com a luminária, oferecendo pouca flexibilidade na disposição do componente projetado de fábrica.

3.4.1 Resultados

É importante destacar que, considerando o baixo valor de corrente associado ao suprimento de cada painel LED, existe um dado valor de exatidão para as respectivas garras de corrente empregadas (Tabela 3.2) o que influencia no valor final do cálculo da eficiência. Nesse sentido, os valores de eficiência de conversão elétrica apresentados possuem uma margem de erro associadas à exatidão dos instrumentos de medição. Os valores utilizados no cálculo de eficiência são realizados com base na potência ativa de cada componente.

3.4.1.1 Driver painel LED

Os *drivers* que acompanham os painéis LED de fábrica foram submetidos a ensaios de eficiência de conversão elétrica, em conjunto com o inversor utilizado no ensaio 2. Em um primeiro momento, registraram-se os valores de tensão e corrente de saída c.c. de cada *driver*, nesse caso dos pontos P3.1 a P3.6 ilustrados na Figura 3.32, onde foi observado que permaneceram constantes. Nesse contexto, também foram obtidos os valores de tensão e corrente na entrada de cada *driver*, pontos P2.1 a P2.6, destacando que estes foram submetidos ao mesmo nível de tensão c.a., ponto P2, como mostrado na Figura 3.32.



Fonte: Autoria própria.

Durante a etapa de medições observou-se que o componente eletrônico não apresenta estratégia de correção do fator de potência, possuindo, na entrada, uma forma de onda de corrente distorcida referente à forma de onda da tensão. Além disso, destaca-se que na saída do *driver*, é fornecida uma tensão de 37 V e corrente de 270 mA (APÊNDICE II) puramente contínua, para suprimento da luminária LED.

Por meio da Equação 3.6 calcula-se a eficiência individual de cada *driver*, determinada pela divisão da potência ativa de saída pela potência ativa de entrada de cada *driver*. Na Tabela 3.21 constam os valores calculados.

$$\eta_{\text{individual}} = \frac{P_{3.n} \text{ (W)}}{P_{2.n} \text{ (W)}} \quad (3.6)$$

Onde, n tanto na Equação 3.6 quanto nas seguintes, indica o componente correspondente, numerado de I a VI, escolhido de forma aleatória, nesse caso os *drivers* das luminárias.

Além da eficiência individual de cada *driver*, foi calculada, como mostra a Equação 3.7, a eficiência global envolvendo todos os seis painéis LEDs supridos por seus respectivos *drivers*. Foi observada uma variação considerável referente à eficiência individual de cada *driver*, com valor mínimo de eficiência medida de 84,6% e máximo de 91,9%. Pode-se entender essa variação dada a exatidão das garras de corrente utilizadas.

$$\eta_{\text{global}} = \frac{\sum_{n=1}^6 P_{3.n} \text{ (W)}}{P_2 \text{ (W)}} \quad (3.7)$$

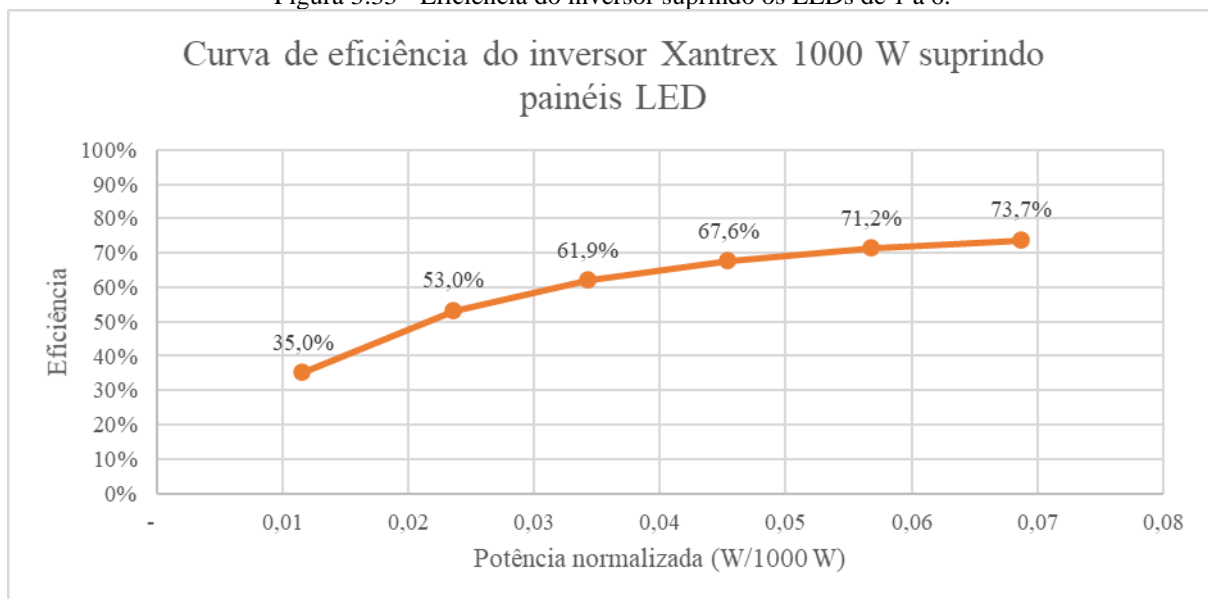
Tabela 3.21 - Eficiência individual de cada *driver*.

<i>Driver</i>	Eficiência (%)	
	individual	global
I	86,6	
II	91,9	
III	89,1	87,1
IV	86,7	
V	85,1	
VI	84,6	

Fonte: Autoria própria.

Também se levantou a curva de carregamento para o inversor, utilizado no BC2, suprimindo os seis painéis LED, Figura 3.33. Espera-se uma eficiência de operação baixa, dado o baixo carregamento, sendo que o inversor possui potência nominal de 1000 W.

Figura 3.33 - Eficiência do inversor suprindo os LEDs de 1 a 6.



Fonte: Autoria própria.

Por fim, calculou-se a eficiência envolvente desde o inversor até os painéis LED, como mostra a Equação 3.8, Tabela 3.22.

$$\eta_{\text{total}} = \frac{\sum_{n=1}^6 P_{3.n} \text{ (W)}}{P_1 \text{ (W)}} \quad (3.8)$$

Nesse caso, obtendo-se a soma dos valores de tensão e corrente dos seis painéis LEDs pelos valores de tensão e corrente, c.c., de entrada do inversor.

Tabela 3.22 - Eficiência total envolvendo inversor e os seis *drivers*.

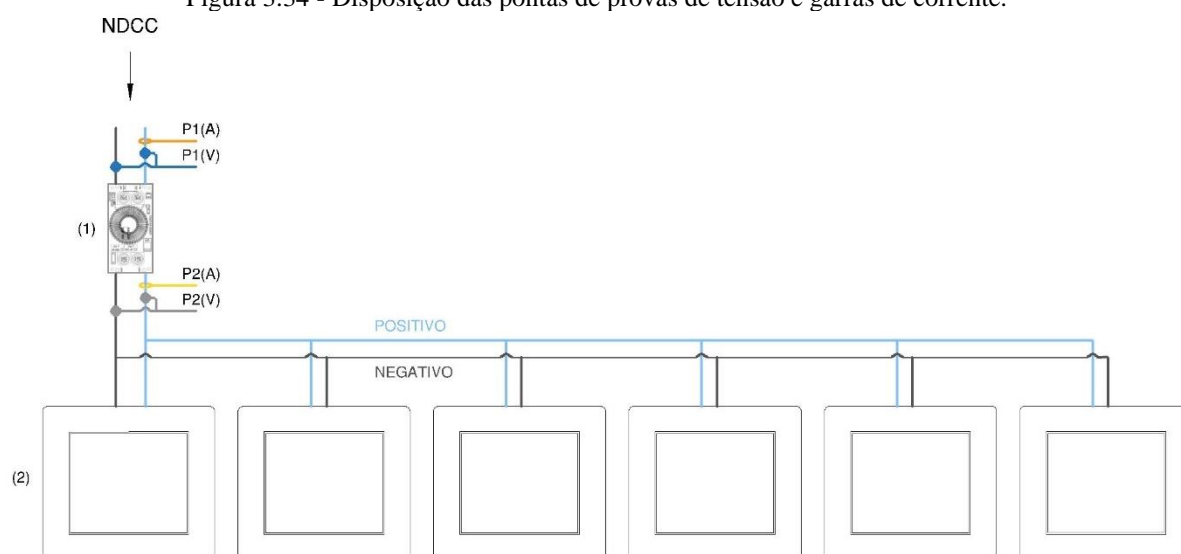
<i>Drivers</i> e inversor	Eficiência total (%)
I - IV	64,9

Fonte: Autoria própria.

3.4.1.2 Conversor c.c./c.c. centralizado

Para o conversor c.c./c.c. centralizado levantou-se a curva de carregamento apresentando a eficiência correspondente. A Figura 3.34 mostra a disposição dos pontos em que foram dispostas as garras de corrente e pontas de prova de tensão, esses, P1 e P2, correspondendo a entrada e saída, respectivamente, do conversor.

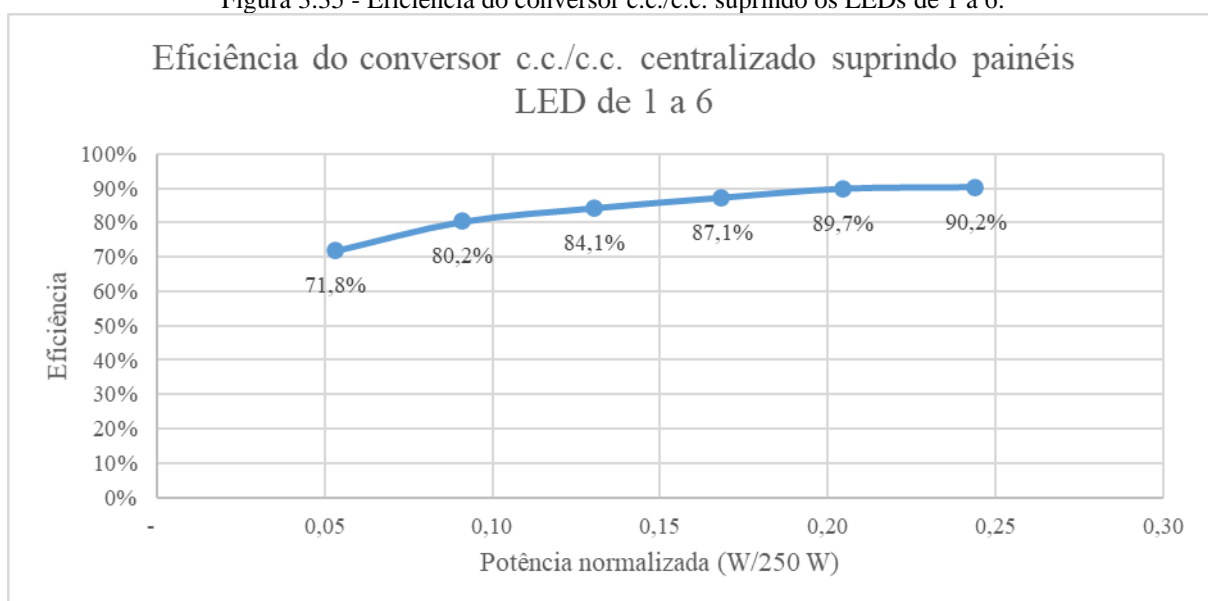
Figura 3.34 - Disposição das pontas de provas de tensão e garras de corrente.



Fonte: Autoria própria.

A Figura 3.35 apresenta a eficiência correspondendo aos seis painéis LED supridos pelo conversor. Observa-se o aumento na eficiência de conversão elétrica visto que a potência requerida pelos painéis LED fica cada vez mais próxima da potência nominal do conversor c.c./c.c., no entanto, ainda assim abaixo da potência nominal do conversor. Nesse sentido, com o acionamento de apenas um painel LED a eficiência fica em torno de 71,8% e indo até 90,2%, quando passam a ser supridos os seis painéis LED.

Figura 3.35 - Eficiência do conversor c.c./c.c. suprido os LEDs de 1 a 6.

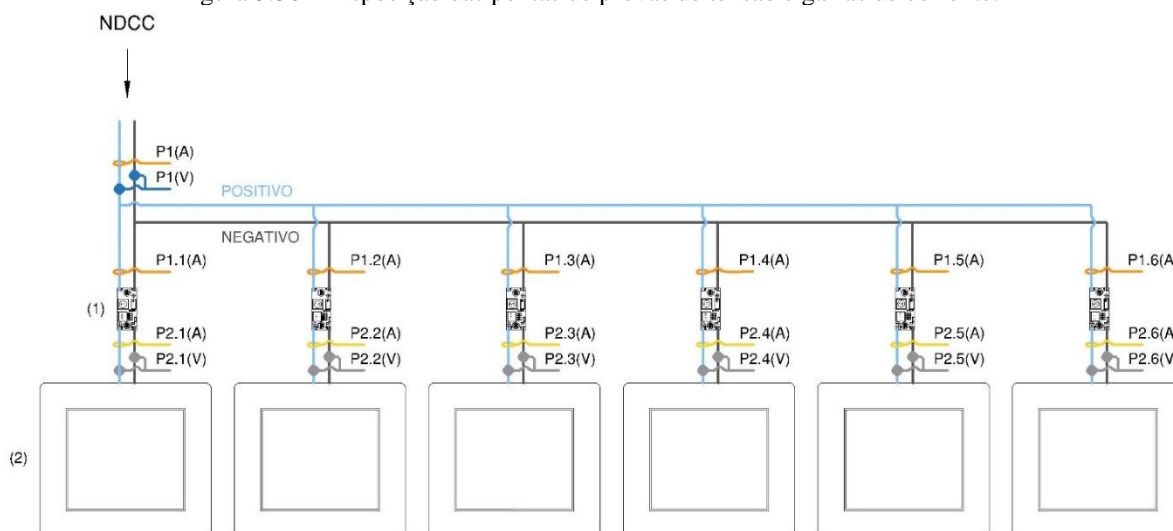


Fonte: Autoria própria.

3.4.1.3 Conversor c.c./c.c. descentralizado

Da mesma forma que realizado para os *drivers*, os conversores c.c./c.c. descentralizados também foram submetidos individualmente e de modo global ao ensaio de eficiência. A Figura 3.36 apresenta os pontos onde foram registrados os valores de tensão e corrente.

Figura 3.36 - Disposição das pontas de provas de tensão e garras de corrente.



Fonte: Autoria própria.

O cálculo da eficiência individual de cada conversor foi realizado utilizando a Equação 3.10, dada pela razão entre a potência ativa, de entrada, no ponto P2 pela potência ativa de saída, ponto P1, nesse último caso, considerando a corrente individual de entrada de cada conversor.

$$\eta_{\text{individual}} = \frac{P2.n \text{ (W)}}{P1.n \text{ (W)}} \quad (3.10)$$

A Tabela 3.23 constam os valores de eficiência calculado para cada conversor, onde a numeração de I a VI foi escolhida de forma aleatória para os conversores disponíveis. Os conversores foram regulados de forma a proporcionar uma tensão de saída próxima a 36 V. Ressalta-se que com a constante utilização dos conversores, a tensão de saída sofre pequenas alterações da ordem de 0,2 V. Nesse sentido, os valores de eficiência estão intimamente ligados à regulação do nível de tensão de saída.

A eficiência global, envolvendo os seis conversores, foi obtida utilizando a Equação 3.11, na qual foi dada pela divisão do somatório das potências ativa de saída de cada conversor pela potência ativa de entrada.

$$\eta_{\text{global}} = \frac{\sum_{n=1}^6 P_{2.n} \text{ (W)}}{P_1 \text{ (W)}} \quad (3.11)$$

Tabela 3.23 - Eficiência individual cada conversor c.c./c.c.

Conversor c.c./c.c. descentralizado	Tensão de saída (V _{saída})	Eficiência (%)	
		individual	global
I	38,0	96,6	
II	37,0	90,0	
III	36,8	92,7	93,9
IV	36,9	91,9	
V	36,9	95,3	
VI	37,0	95,6	

Fonte: Autoria própria.

3.4.2 Comentários sobre o ensaio 3

Quando se tem a exclusão do estágio c.a./c.c. para suprimento de painéis LED há maior eficiência, tanto individual quanto global.

Os *drivers* dos painéis LED apresentaram eficiências individuais distintas, acima de 85% e abaixo de 90%, com exceção do *driver* II. Além disso, a eficiência global, considerando todos os *drivers* ligados foi de 87%, tendo-se 59,2 W correspondente ao somatório da potência de saída dos *drivers* e a demanda de 68 W na entrada dos *drivers*, obtida pelo somatório da potência dos 6 painéis LED. O inversor responsável pela interface c.c./c.a. apresentou um baixo rendimento, 73,7%, suprimindo os 6 painéis LED, resultado do baixo carregamento do equipamento. Por fim, a eficiência global envolvendo os *drivers* em conjunto do inversor foi de 64,9%, em virtude das perdas nos estágios c.c./c.a. e c.a./c.c, correspondendo a uma demanda de aproximadamente 104,8 W na entrada do inversor.

O conversor c.c./c.c. centralizado apresentou uma curva de eficiência crescente chegando em até 90,2%, suprimindo os 6 painéis LED com potência de entrada de 61,6 W e potência de saída de 55,06 W, com o conversor c.c./c.c. regulado para fornecer uma tensão de saída de 35,2 V. O valor de eficiência registrado para o conversor esteve de acordo com o informado pelo fabricante, como apresentado no Capítulo 2.

O conversor c.c./c.c. descentralizado mostrou um valor de eficiência individual acima de 90%, para cada conversor, alcançando até 96,6% para o conversor I. Os conversores utilizados estavam regulados para níveis de tensão de saída próximos a 37 V, visando adequar ao nível de tensão de saída do *driver* de fábrica que acompanha a luminária. A eficiência global, envolvendo todos os 6 conversores, foi de 93,9%, com demanda de potência na entrada de 70,4 W e potência de saída de 66,1 W. Observa-se que a potência de saída para o conversor c.c./c.c. descentralizado é maior que para o caso centralizado, visto que a tensão fornecida para suprir

os LEDs da luminária não esteve regulada em um único valor, fornecendo em alguns casos mais potência para o suprimento da carga. Considerando a exatidão das medições de tensão e corrente, a eficiência calculada para cada um dos 6 conversores está de acordo com as apresentadas pela folha de dados disponibilizada pelo fabricante, o qual menciona eficiência de 88% a 95%, como informado no Capítulo 2.

Cabe ainda ressaltar que o ensaio 3 foi realizado apenas com os bancos de baterias conectados à NDCC, sem geração fotovoltaica, visando obter menor variação no nível de tensão da rede. Desse modo, a NDCC esteve durante os ensaios com nível de tensão próximo a 26 V. Assim, constatou-se que considerando a potência demandada no ponto de conexão da NDCC, obteve-se melhor desempenho global para o conversor c.c./c.c. centralizado seguido do descentralizado e, por fim, os *drivers*.

O conversor c.c./c.c. centralizado foi o que demandou menor potência de entrada (61,6 W) para o suprimento de 6 painéis LED, mesmo empregando nos ensaios condutores de comprimentos distintos e sabendo que dado maior comprimento do condutor há maiores perdas ôhmicas relacionada ao mesmo.

CONCLUSÃO

Este trabalho compreendeu uma breve análise acerca da QEE e eficiência energética de uma nanorrede de distribuição em corrente contínua localizada no GEDAE/UFPA, utilizando como referência a recomendação IEEE - Std 1159 para classificar e caracterizar a presença de eventos no lado de corrente contínua, adotando-se nos ensaios realizados, modos de diferentes operações, com diferentes tipos de cargas.

Para o desenvolvimento do referido trabalho, os bancos de cargas confeccionados e arranjados puderam oferecer suporte aos ensaios propostos, com naturezas distintas, utilizando componentes eletrônicos ativos e passivos, com diferentes consumos de energia elétrica entre cada banco de carga. Além disso, buscou-se a utilização de algumas cargas usualmente empregadas em instalações elétricas residenciais atendidas pela NDCC, como cargas de iluminação a LED. Desse modo, os eventos de qualidade de energia elétrica observados no trabalho, também podem estar presentes em situações reais de uso dessas cargas.

Durante as análises de QEE, a NDCC apresentou sobretensão em grande parte dos ensaios realizados, não havendo estratégias de controle para regulação do nível de tensão da rede. Desse modo, a tensão do barramento c.c. pode ser dita como bastante dinâmica, dependendo, principalmente, do nível de tensão dos bancos de baterias, o qual pôde-se observar elevado desgaste dos bancos pertencentes aos três SGAs, fato também verificado no trabalho de Torres (2019). Destaca-se também a geração fotovoltaica presente, dependente da irradiância incidente, realizando o carregamento dos bancos de modo a influenciar indiretamente na tensão da rede.

Os ensaios propostos mostraram eventos de QEE que estão presentes na NDCC dependendo do seu modo de operação. Além disso, a realização de ensaios com diferentes conversores suprindo lâmpadas LED mostraram maior eficiência com a exclusão do estágio c.a./c.c. (estágio de retificação). É interessante destacar, para o último caso, que a exclusão do estágio c.a./c.c. se faz possível, para cargas que internamente possuem seu consumo em c.c., apenas quando tem-se a adequação do nível de tensão da rede com a carga. Nesse contexto, para implementação de redes em corrente contínua em empreendimentos residenciais, comerciais ou industriais, torna-se necessário uma interface c.c./c.c. e que este conversor opere com eficiência elevada.

Por fim, considerando os resultados apresentados neste trabalho com a ocorrência de eventos de qualidade de energia, mesmo nestas condições, mas que se devem buscar mecanismos para mitigação, 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 e ainda o emprego de cargas em corrente contínua já difundidas, como lâmpadas LED.

Como proposta de melhoria às análises de QEE e eficiência energética, desenvolvidas no referido trabalho, podem-se citar:

- Estudo da relação entre o nível de tensão do barramento c.c. com dados de irradiância e temperatura ao longo do tempo;
- Análise de eventos de QEE, no lado de corrente contínua, empregando cargas de diferentes tipos e de elevada demanda de corrente da NDCC;
- 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;
- Observação do *ripple* de corrente e de tensão no barramento c.c. sob diferentes configurações operacionais da NDCC, além de diferentes tipos de cargas;
- Avaliação da eficiência energética global do sistema utilizando diferentes tipos de conversores suprindo diferentes tipos de cargas, sob configurações distintas dos SGAs;
- Projeto de controlador regulador de tensão para a NDCC, visando adequar o nível de tensão do barramento c.c. a 24 V;
- Realização da análise de QEE e da operação da NDCC com novos bancos de baterias;
- Realização de estudo de QEE da NDCC interligada com uma microrrede em c.a., isto é, mais especificamente um *link* com a Microrrede em Corrente Alternada (MRCA) existente no GEDAE/UFPA.
- Realização de estudos de QEE e eficiência energética aplicado a redes em corrente contínua de pequeno porte operando em comunidades isoladas.

REFEÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABDALAAL, R. M. AND HO, C. N. M. **Characterization of commercial LED lamps for power quality studies**, 2017 IEEE Electrical Power and Energy Conference (EPEC), Saskatoon, SK, 2017, pp. 1-6, doi: 10.1109/EPEC.2017.8286200.

ABNT NBR IEC 6164-1:2007 – **Dispositivos de Proteção Contra Surtos em Baixa Tensão. Parte 1: Dispositivos de Proteção Conectados a Sistemas de Distribuição de Energia de Baixa Tensão – Requisitos de Desempenho e Métodos de Ensaio**. Associação Brasileira de Normas Técnicas.

ABNT NBR5410:2004 – **Instalações Elétricas de Baixa Tensão**. Versão corrigida, 2008. Associação Brasileira de Normas Técnicas.

ALBUQUERQUE, L. O. **Avaliação da Qualidade do Suprimento de Energia Elétrica no Laboratório de Sistemas Híbridos e Microrredes do GEDAE/UFPA**, 08. Jul. 2019. Trabalho de Conclusão de Curso, Belém, Brasil: Universidade Federal do Pará.

ALLEE, G. AND TSCHUDI, W. **Edison Redux: 380 Vdc Brings Reliability and Efficiency to Sustainable Data Centers**, in IEEE Power and Energy Magazine, vol. 10, no. 6, pp. 50-59, Nov.-Dec. 2012, doi: 10.1109/MPE.2012.2212607.

ALUBAR, Cabos Multiplexados e Singelos XLPE/PE - 0,6 / 1kV. **Folha de dados**, Disponível em:

https://www.alubar.net.br/img/site/arquivo/201023_Cat_Tec_Alubar_Aluminio_2015.pdf

Acesso em 25 Fev. 2021.

ANEEL. **Resolução Normativa N° 482/2012**. 17 de abril de 2012b. Brasília, Brasil: Agência Nacional de Energia Elétrica.

ARAÚJO, L. F. **Desenvolvimento de Ferramentas Laboratoriais para Ensaios Automatizados de Inversores Autônomos**. 20. Dez. 2019. Trabalho de Conclusão de Curso, Faculdade de Engenharias Elétrica e Biomédica. Belém, Brasil: Universidade Federal do Pará.

ASAKIMORI, K., MURAI, K., TANAKA, T., BABASAKI, T. **Effect of inrush current flowing into EMI filter on the operation of ICT equipment in HVDC system**, 2014 IEEE 36th International Telecommunications Energy Conference (INTELEC), Vancouver, BC, 2014, pp. 1-5.

DAN JITARU, **99% efficiency DC-DC converter**, *2014 IEEE 36th International Telecommunications Energy Conference (INTELEC)*, Vancouver, BC, 2014, pp. 1-6, doi: 10.1109/INTLEC.2014.6972125.

DUAN J., LI Z., ZHOU Y., WEI Z.; **Study on the voltage level sequence of future urban DC distribution network in China: A Review**. *Electrical Power and Energy System*, 2020, Vol. 117.

ELSAYED, A. T.; MOHAMED, A. A.; MOHAMMED, O. A. **DC microgrids and distribution systems: An overview**. *Electric Power Systems Research*, v. 119, p. 407–417, 2015.

EPE. Empresa de Pesquisa Energética, **Plano decenal de expansão da energia 2030**, tech. rep., Ministério de Minas e Energia, Brasília, Brasil, 2020.

EPEVER, Controlador de carga EPEVER XTRA 2210N. **Folha de dados**, Disponível em: <https://www.neosolar.com.br/loja/fileuploader/download/download/?d=1&file=custom%2Fupload%2FFile-1579208483.pdf> Acesso em 03 Jan, 2021.

ETSI **EN 300-132-3-1** (V2.1.1). Disponível em: https://www.etsi.org/deliver/etsi_en/300100_300199/3001320301/02.01.01_40/en_3001320301v020101o.pdf. Acesso em 02 Dez. 2020.

FARHADI, M. AND MOHAMMED, O. A. **Protection of multi-terminal and distributed DC systems: Design challenges and techniques**. *Electric Power Systems Research*, v. 143, p. 715–727, 2017.

FLUKE, 80i-110s AC/DC Current Probe. **Folha de dados**, ver. 1. Disponível em: https://dam-assets.fluke.com/s3fs-public/80i110s_iseng0100.pdf?XFS2MXiqNYqJX6B5U47dUNjZ575.U_sv Acesso em 17 Nov. 2020.

FLUKE, ScopeMeter® Test Tool 190 Series II. **Folha de dados**, rev. 1, 1/14. Disponível em: https://dam-assets.fluke.com/s3fs-public/190_104_umpor0200.pdf. Acesso em 17 Nov. 2020.

GALHARDO, M. A. B. **Contribuições ao estudo da compensação de harmônicos em sistemas de energia elétrica**. 2006, 164 p. Tese de Doutorado (Engenharia Elétrica) – PPGEE, Universidade Federal do Pará, Belém.

GERBER, D. L.; LIOU, R.; BROWN, R. **Energy-saving Opportunities of Direct-DC Loads in Buildings**. *Applied Energy*, v. 248, p. 274–287, 2019.

GORJI, S. A., SAHEBI, H. G., EKTESABI, M., RAD, A. B. **Topologies and Control Schemes of Bidirectional DC–DC Power Converters: An Overview**, in *IEEE Access*, vol. 7, pp. 117997-118019, 2019, doi: 10.1109/ACCESS.2019.2937239.

HAILESELASSIE, T. M. AND UHLEN, K. **Power System Security in a Meshed North Sea HVDC Grid**, in *Proceedings of the IEEE*, vol. 101, no. 4, pp. 978-990, April 2013, doi: 10.1109/JPROC.2013.2241375.

HUGHES, T. P. **Networks of Power: Electrification in Western Society, 1880-1930**. JHU Press, 1993.

IEEE Standards Association. IEEE Std1159 - **IEEE recommended practice for monitoring electric power quality**. (Jun. 2019)

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/IEEESTD.2010.5439063.

International Electrotechnical Commission. IEC 61000-4-30: **Electromagnetic compatibility (EMC) - Part 4-30: testing and measurement techniques – power quality measurement methods.**, Tech. rep. International Electrotechnical

JHUNJHUNWALA, A., VASUDEVAN, K., KAUR, P., RAMAMURTHI, B., KUMARAVEL, BITRA, S., UPPAL, K., **Energy efficiency in lighting: AC vs DC LED lights**, 2016 First International Conference on Sustainable Green Buildings and Communities (SGBC), Chennai, 2016, pp. 1-4, doi: 10.1109/SGBC.2016.7936068.

KAKIGANO, H., MIURA, Y., ISE, T., AND UCHIDA, R. **DC Voltage Control of the DC Micro-grid for Super High-Quality Distribution**, 2007 Power Conversion Conference - Nagoya, Nagoya, 2007, pp. 518-525, doi: 10.1109/PCCON.2007.373016.

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.

KWASINSKI, A. **Advanced power electronics enabled distribution architectures: Design, operation, and control**, 8th International Conference on Power Electronics - ECCE Asia, Jeju, 2011, pp. 1484-1491, doi: 10.1109/ICPE.2011.5944475.

MASTERS, M. G. **Renewable and Efficient Electric Power System**. Hoboken, NJ: Wiley; 2004.

MINIPA, Garra de Corrente Modelo: HR30. **Folha de dados**, ver. 1. Disponível em: http://www.minipa.com.br/images/proposta_tecnica/HR-30-1301-BR.pdf. Acesso em 17 Nov. 2020.

MOIA, J. **Sistema de Conversão Estática CA – CC Bidirecional Aplicado à Microrredes CC Bipolares**, 2016. Dissertação de Doutorado, Santa Catarina, Brasil: Universidade Federal de Santa Catarina.

MOUSSA, S., JEBALI-BENGHORBAL, M., *et al.* **Bus voltage level choice for standalone residential DC nanogrid**. Sustainable Cities And Society, 2019, Vol. 46.

NOVAES, K.; MANITO, A. R. A.; MELENDEZ, T.; MOCELIN, A. R.; ZILLES, R.; PINHO, J. T. **“Geração Distribuída com Armazenamento Conectada à Rede Elétrica.”** In: VII Congresso Brasileiro de Energia Solar, 2018, Gramado. Congresso Brasileiro de Energia Solar., 2018.

OLIVEIRA, T. R. **“Distribuição local de energia em corrente contínua: estudo, desenvolvimento e implementação de um protótipo de nanorrede C.C. dedicado aos setores residencial e comercial.”** 2016, 340 p. Tese de Doutorado – Faculdade de Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte.

OUTBACK POWER, Smart Harvest SCCM20-100R MPPT Charge Controller Series. **Folha de dados**, Disponível em: <https://www.solaris-shop.com/content/SCCM20-100%20Specs.pdf>. Acesso em 20 Fev, 2021.

PINOMAA, A., AHOLA, J., KOSONEN A. AND NUUTINEN, P. **Noise analysis of a power-line communication channel in an LVDC smart grid concept**, 2013 *IEEE 17th International Symposium on Power Line Communications and Its Applications*, Johannesburg, 2013, pp. 41-46, doi: 10.1109/ISPLC.2013.6525822.

RAWAT, G. S. AND SATHANS, **Survey on DC microgrid architecture, power quality issues and control strategies**, 2018 2nd International Conference on Inventive Systems and Control (ICISC), Coimbatore, 2018, pp. 500-505, doi: 10.1109/ICISC.2018.8399123.

SCHÖNBERGER, J., DUKE, R., AND ROUND, S. D. **DC-Bus Signaling: A Distributed Control Strategy for a Hybrid Renewable Nanogrid**, in *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 53, no. 5, pp. 1453-1460, Oct. 2006, doi: 10.1109/TIE.2006.882012.

TAHIM, A. P. N., **Controle de Microrredes de Distribuição de Energia Elétrica em Corrente Contínua**, 2015. Dissertação de Doutorado, Santa Catarina, Brasil: Universidade Federal de Santa Catarina.

TEXAS INSTRUMENTS CI TL494, Pulse-Width-Modulation Control Circuit. **Folha de dados**, Disponível em: <https://www.ti.com/lit/ds/symlink/tl494.pdf?ts=1612356842944> Acesso em 03 Jan. 2021.

THOMAS, B. A. **Edison revisited: Impact of DC distribution on the cost of LED lighting and distributed generation**, 2010 *Twenty-Fifth Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC)*, Palm Springs, CA, 2010, pp. 588-593, doi: 10.1109/APEC.2010.5433612.

TORRES, P. F. **Desenvolvimento e Modelagem de uma Nanorrede de Distribuição em Corrente Contínua em Baixa Tensão com Sistemas de Geração Distribuída**, 23. Out. 2019. Dissertação de Mestrado, Belém, Brasil: Universidade Federal do Pará.

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.

VERÍSSIMO, P. H. A. **Laboratório de Sistemas Híbridos e Minirredes: Processo de Montagem, Instalação, Comissionamento e Ensaio Operacionais**, 30. Dez. 2014. Trabalho de Conclusão de Curso, Belém, Brasil: Universidade Federal do Pará.

WUNDER, B., OTT, L., KAISER, J., HAN, Y., FERSTERRA F. AND MÄRZ, M. **Overview of different topologies and control strategies for DC micro grids**, 2015 IEEE First International Conference on DC Microgrids (ICDCM), Atlanta, GA, 2015, pp. 349-354, doi: 10.1109/ICDCM.2015.7152067.

XANTREX. **Owner's manual** – Xantrex Prosine sine Wave Inverter 1000/1800. Revisão B. Livermore, California USA: Xantrex Technology Inc. 2009. 88 p. Disponível em:

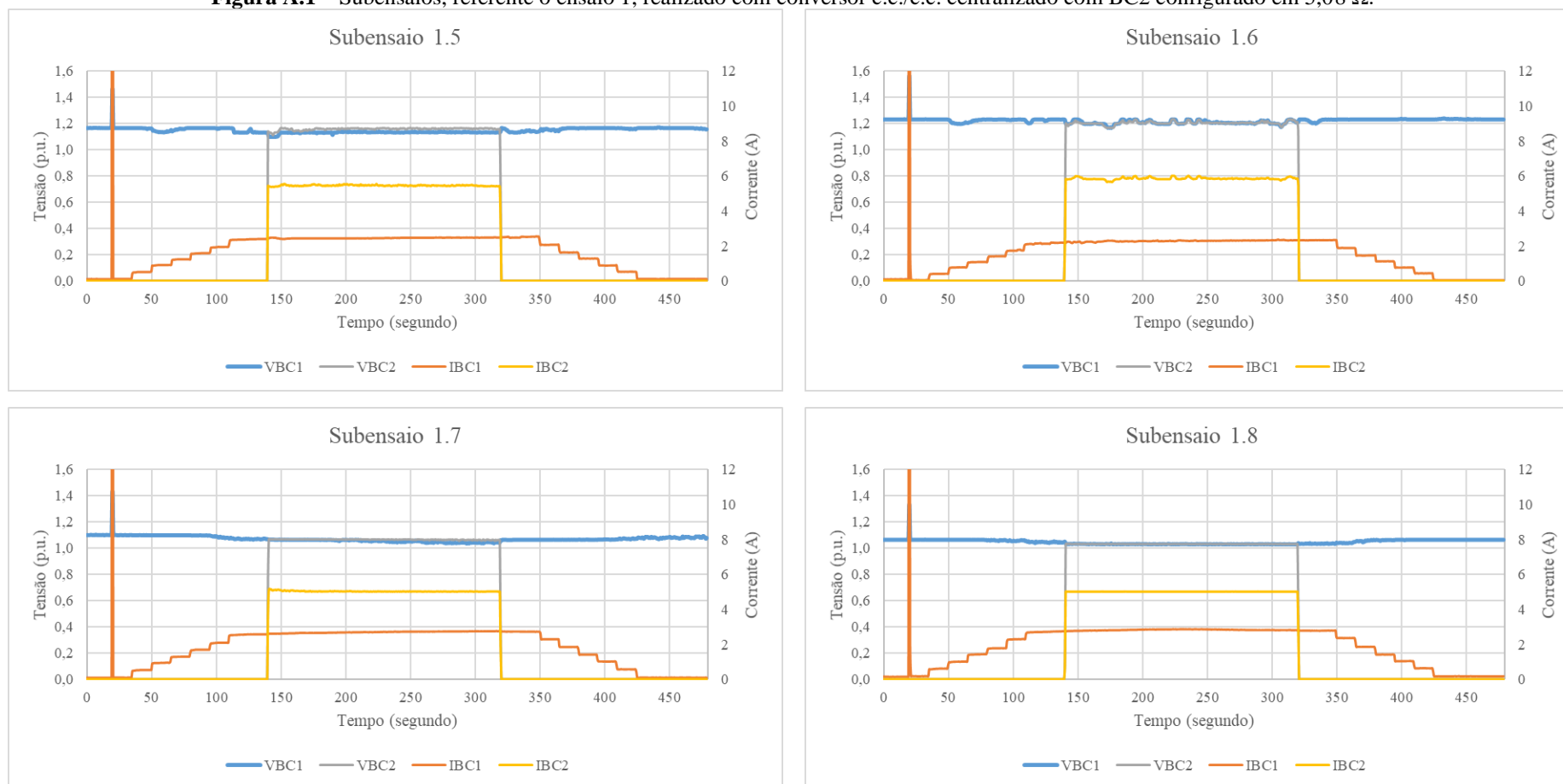
http://www.xantrex.com/documents/Power-Inverters/PROsine/Prosine%201000-1800%20Owner%27s%20Manual%28445-0049-01-01_Rev-B%29.pdf. Acesso em 20 Fev, 2021.

XLSEMI XL6009, Switching Current Boost. **Folha de dados**, Disponível em: <http://www.haoyuelectronics.com/Attachment/XL6009/XL6009-DC-DC-Converter-Datasheet.pdf>. Acesso em 03 Jan, 2021.

YINGLI SOLAR, YGE 60 CELL SERIES. **Folha de dados**, v. 2. Disponível em: <https://www.proinosolar.co.uk/media/catalog/product/y/i/yingli-solar-poly-yl250p-29b-data-sheet11r.pdf>. Acesso em 31 Jan. 2021.

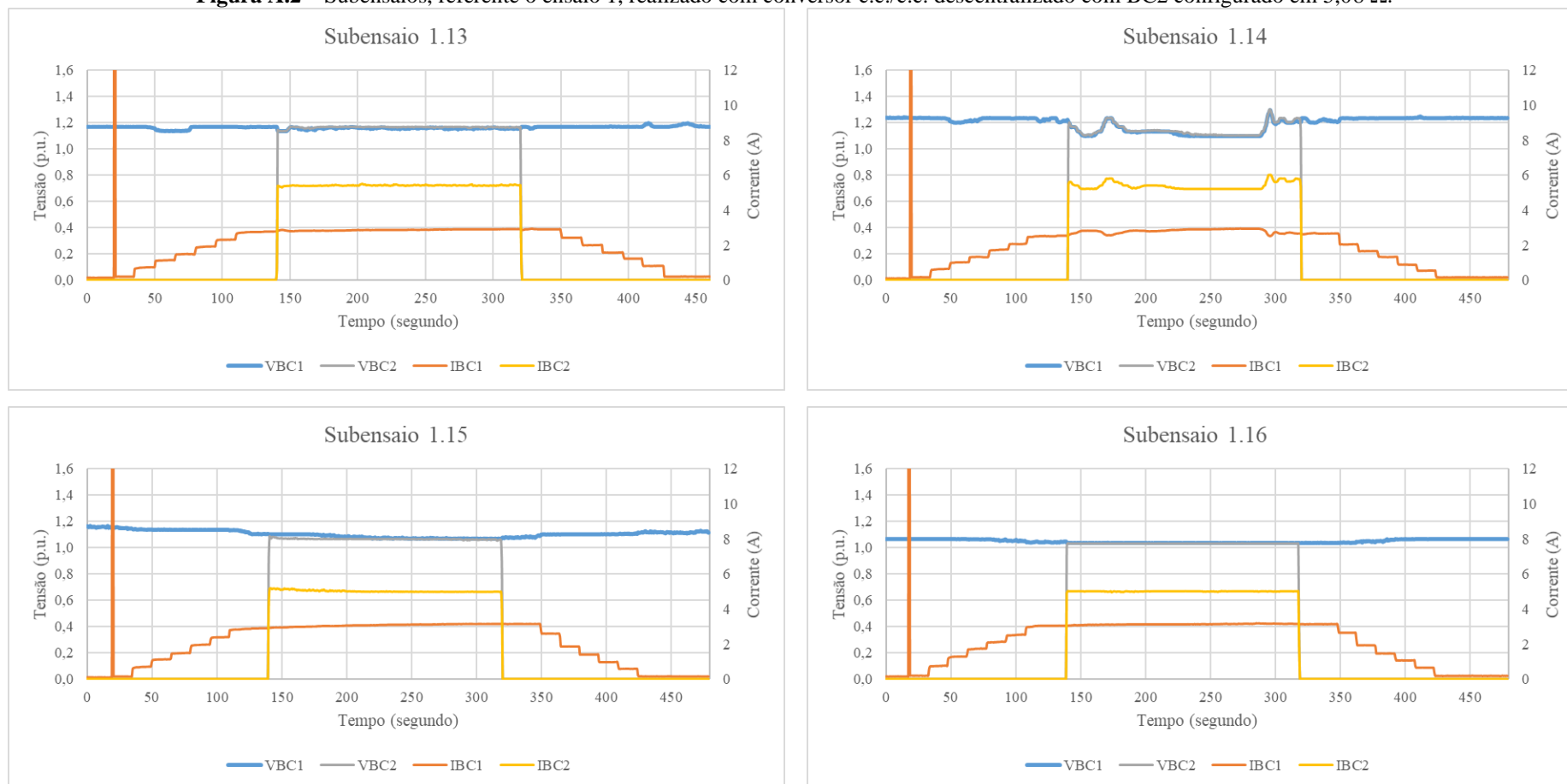
APÊNDICE I

Figura A.1 – Subensaios, referente o ensaio 1, realizado com conversor c.c./c.c. centralizado com BC2 configurado em $5,08 \Omega$.



Fonte: Autoria própria.

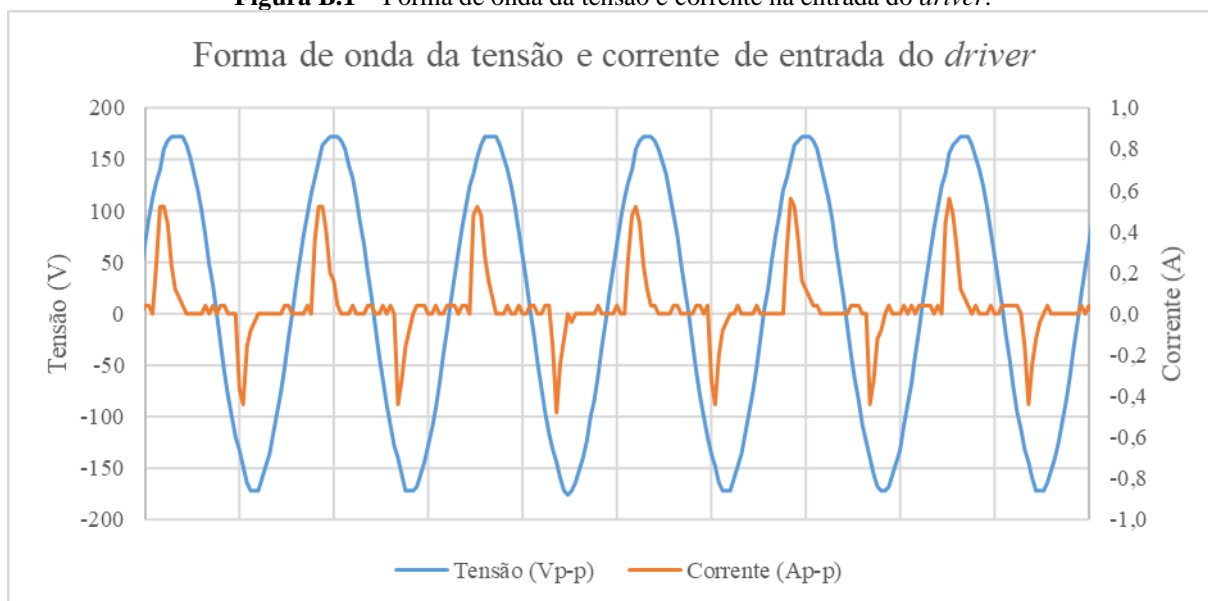
Figura A.2 – Subensaios, referente o ensaio 1, realizado com conversor c.c./c.c. descentralizado com BC2 configurado em 5,08 Ω .



Fonte: Autoria própria.

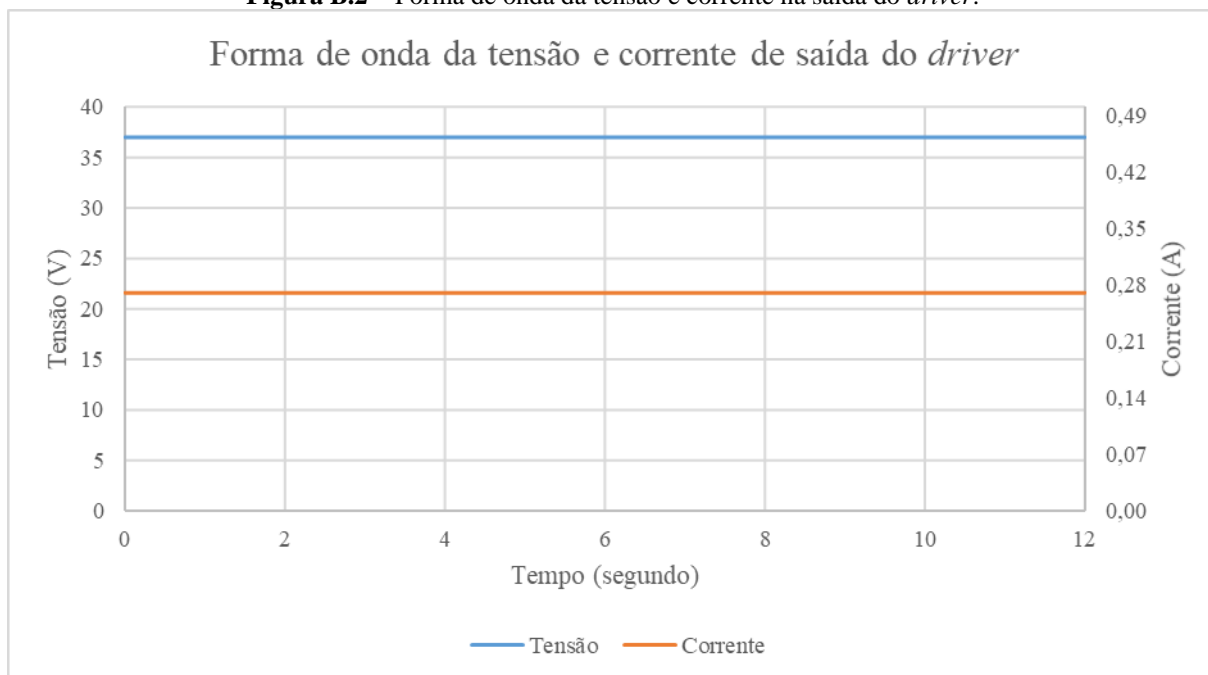
APÊNDICE II

Figura B.1 – Forma de onda da tensão e corrente na entrada do *driver*.



Fonte: Autoria própria.

Figura B.2 – Forma de onda da tensão e corrente na saída do *driver*.



Fonte: Autoria própria.