

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

IMPACTOS DE CARGAS MOTRIZES NA QUALIDADE DE ENERGIA E  
EFICIÊNCIA ENERGÉTICA EM UMA NANORREDE DE DISTRIBUIÇÃO EM  
CORRENTE CONTÍNUA

VICTOR PARENTE DE OLIVEIRA ALVES

DM 11/2024

UFPA / ITEC / PPGEE  
Campus Universitário do Guamá  
Belém-Pará-Brasil  
2024

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

VICTOR PARENTE DE OLIVEIRA ALVES

IMPACTOS DE CARGAS MOTRIZES NA QUALIDADE DE ENERGIA E  
EFICIÊNCIA ENERGÉTICA EM UMA NANORREDE DE DISTRIBUIÇÃO EM  
CORRENTE CONTÍNUA

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

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

2024

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

---

A474i Alves, Victor Parente de Oliveira.  
Impactos de Cargas Motrizes na Qualidade de Energia e  
Eficiência Energética em uma Nanorrede de Distribuição em  
Corrente Contínua / Victor Parente de Oliveira Alves. — 2024.  
157 f. : il. color.

Orientador(a): Prof. Dr. Marcos André Barros Galhardo  
Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Pará,  
Instituto de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em  
Engenharia Elétrica, Belém, 2024.

1. Cargas motrizes. 2. Nanorrede de distribuição em  
corrente contínua. 3. Qualidade de energia. 4. Eficiência  
energética. I. Título.

CDD 333.7923

---

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

**“IMPACTOS DE CARGAS MOTRIZES NA QUALIDADE DE ENERGIA E  
EFICIÊNCIA ENERGÉTICA EM UMA NANORREDE DE DISTRIBUIÇÃO EM  
CORRENTE CONTÍNUA”**

**AUTOR: VICTOR PARENTE DE OLIVEIRA ALVES**

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

APROVADA EM: 22/03/2024

**BANCA EXAMINADORA:**

---

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

---

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

---

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

---

**Prof. Dr. Renato Luz Cavalcante**  
(Avaliador Externo ao Programa – CAMPUS TUCURUÍ/UFPA)

**VISTO:**

---

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

Ao meu amado pai, Alcindo (em memória). À minha avó, Maria, que infelizmente partiu pouco tempo antes da conclusão deste trabalho. Espero que continuem olhando por mim e meus irmãos como faziam em vida e estejam felizes com esta conquista, assim como eu fico quando lembro de nossos momentos juntos.

## AGRADECIMENTOS

Agradeço, acima de qualquer coisa, à minha mãe, Sandra, por tudo que fez e faz por mim. Por todo o suporte, força e por sempre acreditar e me incentivar. Sem ela, nada disso seria possível.

Às minhas irmãs Camila, Gabriela e Laura e meu irmão Bruno por todo o suporte e companheirismo, por acreditarem e me incentivarem. À minha tia, Fátima, minha madrinha Virgínia, meus tios Carlos, Ricardo e José, meus primos (irmãos de coração) Henrique e Rafael por todo o incentivo e suporte e, não menos importante, por permanecermos juntos nos momentos turbulentos que passamos.

À minha companheira de vida, Michele, que sempre me incentiva e me dá o suporte necessário para seguir meus objetivos. Agradeço por sempre estar comigo, nos momentos bons e ruins.

Agradeço ao professor e orientador, Marcos André Barros Galhardo, por todos os ensinamentos, suporte e paciência ao longo dos anos e atividades no GEDAE.

Agradeço aos membros da banca examinadora, prof. Dr. Wilson Negrão Macêdo, prof. Dr. Edinaldo José da Silva Pereira e prof. Dr. Renato Luz Cavalcante, não somente por aceitarem avaliar meu trabalho, fornecendo valiosas contribuições, como também pelos ensinamentos e convivência nas atividades e no GEDAE.

Aos membros do GEDAE, prof. Claudomiro Barbosa, Arthur Fonseca, Yan Silva, Luana Albuquerque, Orlando Lemos, Ivan Parijós, Lucas Bulhosa e Wesley Monteiro pelo ótimo ambiente de trabalho proporcionado, bem como pela colaboração direta ou indireta deste trabalho.

Aos amigos que estão comigo há anos sempre me dando forças, Paulo Neno, Gustavo Oliveira, Victor Simon, Larissa Hasnah, Mário Kenard, Rebeca Guerreiro e Paulo Silva.

Aos amigos da UFPA pelo companheirismo: Gilberto Souza, Fabrício Lima, Orlando Pereira, Silmara Castro, Dheison Lobato.

Ao sr. João e sra. Selma, residentes de Ilha das Onças, que sempre me acolheram tão bem em sua casa durante a realização deste trabalho.

À CAPES pela concessão da bolsa de estudos.

## RESUMO

Este trabalho apresenta um estudo experimental envolvendo os impactos de cargas motrizes na qualidade de energia elétrica e eficiência energética em uma Nanorrede de Distribuição em Corrente Contínua (NDCC) idealizada e implementada pelo Grupo de Estudos e Desenvolvimento de Alternativas Energéticas (GEDAE) em Ilha das Onças, na comunidade às margens do Rio Piramanha, Barcarena-Pará. Para tanto, selecionou-se dois tipos de cargas motrizes visando à realização do presente trabalho, sendo motobombas, com modelos c.c. conectados diretamente à NDCC e c.a., atendidos por intermédio de inversores; e equipamentos para refrigeração: geladeira e *freezer*, ambos possuindo o mesmo modelo de compressor e operando em corrente contínua. No trabalho, apresentam-se as características técnicas da NDCC, bem como a instrumentação utilizada para medição e aquisição de dados envolvendo os parâmetros elétricos da rede e cargas monitoradas. Os eventos de qualidade de energia abordados dizem respeito, especialmente, a presença de ondulações (*ripple*) com a injeção de corrente c.a. ao longo da NDCC no regime permanente de operação das cargas motrizes e corrente de *inrush* durante o acionamento das motobombas. Em relação aos eventos de curta duração, dá-se foco ao afundamento de tensão durante o acionamento das cargas motrizes de refrigeração, visto que há um pico de demanda de elevada magnitude, chegando a mais de 28 vezes em relação à corrente nominal efetiva, ou valor rms, para uma das cargas. No que diz respeito à eficiência energética, faz-se um estudo comparativo envolvendo o cenário atual de operação da nanorrede com o uso de cargas mistas c.c. e c.a. e outros tecnicamente possíveis, porém não implementados, a fim de se destacar os benefícios da configuração adotada atualmente para o suprimento energético das famílias na localidade. Por fim, abordam-se ainda como resultados estimativas de custos evitados e reduções de emissões, considerando antes da implantação da NDCC o uso de motobombas à gasolina, mediante apresentação de dados e informações obtidos sobre uma das residências apresentadas no trabalho.

Palavras-chave: Cargas motrizes; Nanorrede de distribuição em corrente contínua; Qualidade de energia; Eficiência Energética.

## ABSTRACT

This work presents an experimental study involving the impacts of rotative loads on electrical energy quality and energy efficiency in a Direct Current Distribution Nanogrid (DCDN) idealized and implemented by the *Grupo de Estudos e Desenvolvimento de Alternativas Energéticas* (GEDAE) in Ilha das Onças, a community on the banks of the Piramanha River, Barcarena-Pará. Therefore, two types of rotative loads were selected for this work: DC motor pumps, directly connected to the DCDN, and AC models, supplied through inverters; and refrigeration equipment: refrigerator and freezer, both with the same compressor model and operating on direct current. The work presents the technical characteristics of the DCDN, as well as the instrumentation used for measurement and data acquisition involving electrical parameters of the grid and monitored loads. The energy quality events addressed relate especially to the presence of ripples with the injection of AC current along the DCDN in the steady-state operation regime of the rotative loads and inrush current during the activation of the motor pumps. Regarding short-duration events, focus is given to voltage sag during the activation of refrigeration, as there is a peak of demand of high magnitude, reaching more than 28 times the effective nominal current, or rms value, for one of the loads. Concerning energy efficiency, a comparative study is conducted involving the current operational scenario of the nanogrid with the use of mixed DC and AC loads and other technically feasible but not implemented scenarios, in order to highlight the benefits of the current configuration for energy supply to families in the area. Finally, cost avoidance estimates and emission reductions are also addressed, considering the use of gasoline motor pumps before the implementation of the DCDN, through the presentation of data and information obtained from one of the households presented in the work.

Keywords: Rotative loads; Direct current distribution nanogrid; Energy quality; Energy efficiency.

## LISTA DE FIGURAS

### CAPÍTULO 1

Figura 1.1 – Configurações (a) unipolar e (b) bipolar de uma microrrede de distribuição em corrente contínua. ....	31
Figura 1.2 – Estrutura radial para uma rede em corrente contínua. ....	33
Figura 1.3 – Estrutura em anel para uma rede em corrente contínua. ....	34
Figura 1.4 – Estrutura com múltiplos barramentos para uma rede em corrente contínua. ....	35
Figura 1.5 – Estrutura com múltiplos terminais para uma rede em corrente contínua. ....	36
Figura 1.6 – Estrutura em escada para uma rede em corrente contínua. ....	37
Figura 1.7 – Estrutura zonal para uma rede em corrente contínua. ....	38
Figura 1.8 – Hierarquia de controle em função da largura de banda. ....	39
Figura 1.9 – Esquema de controle hierárquico em uma rede c.c. ....	39
Figura 1.10 – Esquema geral de um controle do tipo centralizado. ....	41
Figura 1.11 – Esquema geral de um controle do tipo descentralizado. ....	42
Figura 1.12 – Esquema geral de um controle do tipo distribuído. ....	42
Figura 1.13 – Aterramento TT (a) rede unipolar e (b) rede bipolar. ....	44
Figura 1.14 – Aterramento TN-S (a) rede unipolar e (b) rede bipolar. ....	45
Figura 1.15 – Aterramento TN-C (a) rede unipolar e (b) rede bipolar. ....	45
Figura 1.16 – Aterramento TN-C-S (a) rede unipolar e (b) rede bipolar. ....	46
Figura 1.17 – Aterramento IT (a) rede unipolar e (b) rede bipolar. ....	47

### CAPÍTULO 2

Figura 2.1 – Exemplo de evento transitório impulsivo em um perfil de tensão c.c. de 24 V <sub>c.c.</sub> . 54	54
Figura 2.2 – Exemplo de evento transitório oscilatório em um perfil de tensão c.c. de 24 V <sub>c.c.</sub> . ..	54
Figura 2.3 – Exemplo de afundamento de curta duração em um perfil de tensão de 24 V <sub>c.c.</sub> . ..	55
Figura 2.4 – Exemplo de elevação de curta duração em um perfil de tensão de 24 V <sub>c.c.</sub> . ....	56
Figura 2.5 – Exemplo de interrupção de curta duração em um perfil de tensão de 24 V <sub>c.c.</sub> . ....	56
Figura 2.6 – Exemplo de subtensão de longa duração em um perfil de tensão de 24 V <sub>c.c.</sub> . ....	57
Figura 2.7 – Exemplo de sobretensão de longa duração em um perfil de tensão de 24 V <sub>c.c.</sub> . ....	58
Figura 2.8 – Exemplo de interrupção sustentada em um perfil de tensão de 24 V <sub>c.c.</sub> . ....	58

Figura 2.9 – Exemplo de conteúdo espectral de uma forma de onda contendo harmônicos e interharmônicos. ....	60
Figura 2.10 – Exemplo de <i>ripple</i> de tensão em um perfil de 24 V <sub>c.c.</sub> . ....	63
Figura 2.11 – Surgimento de corrente de <i>inrush</i> na entrada do conversor c.c. em uma rede em corrente contínua. ....	64
Figura 2.12 – Atuação de um <i>soft-start</i> na corrente de saída da fonte. ....	65

### CAPÍTULO 3

Figura 3.1 – Mapa da Ilha das Onças. ....	68
Figura 3.2 – Localização das unidades conectadas à rede. ....	70
Figura 3.3 – Diagrama da NDCC. ....	73
Figura 3.4 – Análise operacional do controlador de carga. ....	74
Figura 3.5 – Bombas d’água (a) Intech BP500, (b) Ferrari Acquaflo e (c) Thebe TP ci. ....	75
Figura 3.6 – Bomba d’água TWP50SH-GII. ....	76
Figura 3.7 – (a) Geladeira duplex Junges e (b) <i>freezer</i> 70 litros Junges. ....	77
Figura 3.8 – Compressor GelBox BAR43. ....	78

### CAPÍTULO 4

Figura 4.1 – (a) Osciloscópio digital, (b) garras de tensão do tipo jacaré, (c) sonda de corrente HR30 e (d) sonda de corrente 80i-110s. ....	80
Figura 4.2 – (a) Analisador de qualidade de energia, (b) garras de tensão tipo jacaré e (c) sonda de corrente MN193-BK. ....	81
Figura 4.3 – Inversor Epever IP500-21. ....	82
Figura 4.4 – Bancada de testes. ....	83
Figura 4.5 – Formas de onda para uma lâmpada: (a) Osciloscópio 190-240s e (b) Powerpad 3945-B. ....	84
Figura 4.6 – Formas de onda para duas lâmpadas: (a) Osciloscópio 190-240s e (b) Powerpad 3945-B. ....	85
Figura 4.7 – Formas de onda para três lâmpadas: (a) Osciloscópio 190-240s e (b) Powerpad 3945-B. ....	86
Figura 4.8 – Formas de onda para quatro lâmpadas: (a) Osciloscópio 190-240s e (b) Powerpad 3945-B. ....	87

Figura 4.9 – Formas de onda para o ventilador: (a) Osciloscópio 190-240s e (b) Powerpad 3945-B. .... 88

Figura 4.10 – Formas de onda para o liquidificador: (a) Osciloscópio 190-240s e (b) Powerpad 3945-B. .... 89

Figura 4.11 – Formas de onda para o ventilador e liquidificador: (a) Osciloscópio 190-240s e (b) Powerpad 3945-B. .... 90

Figura 4.12 – Formas de onda para ventilador e furadeira: (a) Osciloscópio 190-240s e (b) Powerpad 3945-B. .... 91

## CAPÍTULO 5

Figura 5.1 – Disposição dos equipamentos para testes iniciais da geladeira em laboratório. ... 96

Figura 5.2 – Estágios de acionamento da geladeira c.c. .... 97

Figura 5.3 – Partida da geladeira c.c. no intervalo compreendido entre 0 e 0,12 ms. .... 98

Figura 5.4 – Regime permanente da geladeira c.c. .... 98

Figura 5.5 – Formas de onda registradas durante o ensaio de consumo de energia. .... 99

Figura 5.6 – Esquema simplificado de conexão no quadro da residência R.8. .... 102

Figura 5.7 – Esquema de conexão das cargas motrizes de refrigeração nas demais residências. ...  
..... 102

Figura 5.8 – Partida das cargas motrizes de refrigeração nas residências (a) R.2, (b) R.3, (c) R.4 e (d) R.5. .... 104

Figura 5.9 – Partida das cargas motrizes de refrigeração nas residências (a) R.6, (b) R.7 e (c) R.8.  
..... 105

Figura 5.10 – Regime permanente das cargas motrizes de refrigeração nas residências (a) R.2, (b) R.3, (c) R.4 e (d) R.5. .... 106

Figura 5.11 – Regime permanente das cargas motrizes de refrigeração nas residências (a) R.6, (b) R.7 e (c) R.8. .... 107

Figura 5.12 – Curva C característica de disparo de disjuntor. .... 109

Figura 5.13 – Espectro de amplitude de corrente (em ampères) para as formas de onda das cargas motrizes de refrigeração das residências (a) R.2, (b) R.3, (c) R.4 e (d) R.5. .... 112

Figura 5.14 – Espectro de amplitude de corrente (em ampères) para as formas de onda das cargas motrizes de refrigeração das residências (a) R.6, (b) R.7 e (c) R.8. .... 113

Figura 5.15 – Formas de onda no lado c.a. durante a atuação do *soft starter*. .... 115

Figura 5.16 – Esquema de ligação elétrica das bombas d’água presentes nas residências R.3 e R.5. .....	116
Figura 5.17 – Esquema de ligação elétrica das bombas d’água presentes nas residências R.4, R.8 e R.12. ....	116
Figura 5.18 – Conexões hidráulicas da bomba d’água presente na residência R.3. ....	117
Figura 5.19 – Conexões hidráulicas da bomba d’água presente na residência R.5. ....	117
Figura 5.20 – Formas de onda durante a partida das bombas d’água: (a) residência R.3 e (b) residência R.5. ....	118
A segunda parte dos ensaios diz respeito aos dados em regime permanente, tanto do lado c.c. quanto c.a., com medição simultânea do osciloscópio digital e analisador de qualidade de energia. Os resultados são apresentados nas Figuras 5.21, 5.22 e 5.23. Ainda, na Figura 5.24 mostra-se o espectro de amplitude de corrente no lado c.c. para ambos os casos.	
Figura 5.21 – Formas de onda em regime permanente no lado c.c. (a) residência R.3 e (b) residência R.5. ....	119
Figura 5.22 – Formas de onda em regime permanente no lado c.a. (a) saída do inversor e (b) saída do <i>soft starter</i> : bomba d’água da residência R.3. ....	120
Figura 5.23 – Formas de onda em regime permanente no lado c.a. (a) saída do inversor e (b) saída do <i>soft starter</i> : bomba d’água da residência R.5. ....	120
Figura 5.24 – Espectro de amplitude de corrente (em ampères) para as formas de onda no lado c.c. (a) residência R.3 e (b) residência R.5. ....	121
Figura 5.25 – Formas de onda durante a partida da antiga bomba d’água c.a. da residência R.8. . .....	123
Figura 5.26 – Esquemático da instalação hidráulica na residência R.8 durante o ensaio. ....	124
Figura 5.27 – Conexões hidráulicas da bomba d’água presente na residência R.4. ....	125
Figura 5.28 – Conexões hidráulicas da bomba d’água presente na residência R.8. ....	125
Figura 5.29 – Conexões hidráulicas da bomba d’água presente na residência R.12. ....	126
Figura 5.30 – Operação da bomba d’água presente na residência R.4. ....	127
Figura 5.31 – Operação da bomba d’água presente na residência R.8. ....	127
Figura 5.32 – Operação da bomba d’água presente na residência R.12. ....	127
Figura 5.33 – Espectro de amplitude de corrente da operação da bomba d’água presente na residência R.4. ....	129
Figura 5.34 – Espectro de amplitude de corrente da operação da bomba d’água presente na residência R.8. ....	129
Figura 5.35 – Espectro de amplitude de corrente da operação da bomba d’água presente na residência R.12. ....	129

Figura 5.36 – Potência total de cargas motrizes por residência. ....	133
Figura 5.37 – Consumo diário estimado por residência. ....	134
Figura 5.38 – Consumo estimado por residência considerando todas as cargas c.c. ....	136
Figura 5.39 – Consumo estimado diário por residência considerando cargas mistas. ....	137
Figura 5.40 – Curva de eficiência medida do inversor IP500-21. ....	138
Figura 5.41 – Consumo diário estimado por residência considerando todas as cargas c.a. ....	139

## LISTA DE TABELAS

### CAPÍTULO 1

Tabela 1.1 – Níveis de tensão para algumas aplicações em corrente contínua. ....	28
Tabela 1.2 – Caracterização dos níveis de tensão c.c. ....	28

### CAPÍTULO 2

Tabela 2.1 – Classificação dos eventos de curta duração. ....	55
Tabela 2.2 – Classificação dos eventos de longa duração. ....	57

### CAPÍTULO 3

Tabela 3.1 – Características dos GFVs em cada subsistema. ....	71
Tabela 3.2 – Características dos BBs em cada subsistema. ....	72
Tabela 3.3 – Características das bombas d'água utilizadas na pesquisa. ....	75
Tabela 3.4 – Residências onde ocorreram ensaios nas bombas d'água. ....	76
Tabela 3.5 – Residências onde ocorreram ensaios nos aparelhos de refrigeração. ....	78

### CAPÍTULO 4

Tabela 4.1 – Especificações elétricas quanto a exatidão na leitura das sondas de corrente utilizadas. ....	80
Tabela 4.2 – Cargas utilizadas no teste comparativo. ....	82
Tabela 4.3 – Comparação entre as medições: uma lâmpada. ....	84
Tabela 4.4 – Comparação entre as medições: duas lâmpadas. ....	85
Tabela 4.5 – Comparação entre as medições: três lâmpadas. ....	86
Tabela 4.6 – Comparação entre as medições: quatro lâmpadas. ....	87
Tabela 4.7 – Comparação entre as medições: ventilador. ....	88
Tabela 4.8 – Comparação entre as medições: liquidificador. ....	89
Tabela 4.9 – Comparação entre as medições: ventilador e liquidificador. ....	90
Tabela 4.10 – Comparação entre as medições: ventilador e furadeira. ....	91
Tabela 4.11 – Comparação entre as medições: potência aparente, potência ativa e fator de potência. ....	92

## CAPÍTULO 5

Tabela 5.1 – Comprimento aproximado do condutor de alimentação das geladeiras e <i>freezer</i> em cada residência. ....	101
Tabela 5.2 – Parâmetros elétricos das cargas motrizes durante a partida e regime permanente. ...	108
Tabela 5.3 – Indicadores envolvendo <i>ripple</i> nas cargas motrizes de refrigeração. ....	110
Tabela 5.4 – Parâmetros elétricos no lado c.c. dos inversores. ....	122
Tabela 5.5 – Parâmetros elétricos no lado c.a. dos inversores. ....	123
Tabela 5.6 – Parâmetros elétricos durante operação das bombas d'água c.c. ....	128
Tabela 5.7 – Indicadores envolvendo <i>ripple</i> nas motobombas das residências R.4, R.8 e R.12. ...	130
Tabela 5.8 – Levantamento de carga instalada. ....	130
Tabela 5.9 – Cargas c.c. consideradas no estudo de eficiência. ....	134
Tabela 5.10 – Cargas c.a. consideradas no estudo de eficiência. ....	139
Tabela 5.11 – Inversores selecionados para cada residência considerando as bombas com <i>soft starter</i> . ....	140
Tabela 5.12 – Consumo de energia mensal para cada cenário. ....	141

**LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS**

ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica

BB – Banco de Baterias

BLDC - *Brushless Direct Current Motor*

c.a. – Corrente Alternada

c.c. – Corrente Contínua

DFT – *Discrete Fourier Transform*

EE – Eficiência Energética

ELVDC – *Extra Low Voltage Direct Current*

GEDAE – Grupo de Estudos e Desenvolvimento de Alternativas Energéticas

IEC – *International Electrotechnical Commission*

IEEE – *Institute of Electrical and Electronic Engineers*

ISO – *International Organization for Standardization*

ITU – *International Telecommunication Union*

LVDC – *Low Voltage Direct Current*

MIGDI – Microssistema Isolado de Geração e Distribuição de Energia Elétrica

MME – Ministério de Minas e Energia

NDCC – Nanorrede de Distribuição em Corrente Contínua

QEE – Qualidade de Energia Elétrica

RDF – *Ripple Distortion Factor*

RMS – *Root Mean Square*

SGA – Sistema de Geração e Armazenamento

SIGFI – Sistemas Isolados e com Fontes Intermitentes

UFPA – Universidade Federal do Pará

## SUMÁRIO

INTRODUÇÃO.....	21
1 REDES EM CORRENTE CONTÍNUA EM BAIXA E EXTRA BAIXA TENSÃO .....	27
1.1 Introdução.....	27
1.2 Topologias de rede.....	30
1.2.1 Polaridade .....	30
1.2.2 Estrutura .....	31
1.2.2.1 Radial.....	32
1.2.2.2 Anel .....	33
1.2.2.3 Múltiplos barramentos.....	34
1.2.2.4 Múltiplos terminais.....	35
1.2.2.5 Escada.....	36
1.2.2.6 Zonal.....	37
1.3 Estratégias de controle.....	38
1.3.1 Controle centralizado.....	40
1.3.2 Controle descentralizado .....	41
1.3.3 Controle distribuído.....	42
1.4 Sistemas de proteção .....	43
1.4.1 Falhas em redes c.c.....	43
1.4.2 Aterramento em redes c.c. ....	43
1.4.2.1 Configuração TT.....	43
1.4.2.2 Configuração TN .....	44
1.4.2.3 Configuração IT.....	46
1.4.3 Dispositivos de proteção.....	47
1.5 Vantagens de redes em corrente contínua.....	48

1.6	Cargas motrizes em redes de corrente contínua .....	49
2	QUALIDADE DE ENERGIA E EFICIÊNCIA ENERGÉTICA EM REDES EM CORRENTE CONTÍNUA EM BAIXA E EXTRA BAIXA TENSÃO .....	51
2.1	Introdução.....	51
2.2	Eventos de qualidade de energia elétrica.....	52
2.2.1	Eventos transitórios .....	53
2.2.2	Variações de curta e longa duração.....	54
2.2.3	Harmônicos e Interharmônicos .....	59
2.2.4	<i>Ripple</i> .....	61
2.2.5	Correntes de <i>inrush</i> .....	63
2.3	Eficiência energética.....	65
3	NDCC NA ILHA DAS ONÇAS E CARGAS MOTRIZES EMPREGADAS NO ESTUDO .....	68
3.1	Introdução.....	68
3.2	NDCC na Ilha das Onças.....	69
3.3	Cargas motrizes .....	74
3.3.1	Bombas d'água .....	74
3.3.2	Refrigeradores e <i>freezer</i> .....	77
4	MATERIAIS E MÉTODOS PARA OS ENSAIOS .....	79
4.1	Introdução.....	79
4.2	Instrumentação empregada nas medições.....	79
4.3	Teste comparativo entre os instrumentos de medição .....	81
4.4	Metodologia dos ensaios operacionais em campo.....	93
5	ENSAIOS OPERACIONAIS E ESTUDO COMPARATIVO .....	95
5.1	Introdução.....	95
5.2	Ensaios operacionais no GEDAE/UFPA .....	95
5.3	Ensaios operacionais em Ilha das Onças .....	100

5.3.1	Ensaio operacionais com as cargas de refrigeração .....	100
5.3.2	Ensaio operacionais com as bombas d'água .....	114
5.3.2.1	Bombas d'água c.a.....	116
5.3.2.2	Bombas d'água c.c.....	124
5.4	Estudo comparativo de eficiência energética .....	130
5.4.1	Cenário 1 .....	134
5.4.2	Cenário 2 .....	136
5.4.3	Cenário 3 .....	137
5.5	Uso de motobomba à gasolina.....	141
	CONCLUSÕES .....	144
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	147

## INTRODUÇÃO

A demanda por energia elétrica no mundo aumenta a cada ano que passa, uma vez que o seu usufruto está diretamente ligado à qualidade de vida e ascensão econômica de determinada região. Corroborando com essa necessidade acerca da demanda energética, há projeções de que em 2025 apenas a China irá demandar 503,1 TWh de energia, 48,1 TWh a mais do que a previsão para 2023. Em nível mundial, estima-se que o consumo extra em 2025 seja cerca de 938 TWh de energia elétrica (IEA, 2023a).

Para o atendimento de toda essa demanda por eletricidade, busca-se tanto o aprimoramento das plantas de geração já em operação ao redor do globo, como a implementação de novas usinas geradoras, sistemas de transmissão e distribuição de eletricidade. Dados do IEA (2023b) apontam que a produção total de energia no mundo em 2022 foi da ordem de 29.033 TWh. Dentro desse contexto, as fontes renováveis de energia vêm se mostrando uma boa alternativa para, além de complementar a geração, diversificar a matriz energética, tornando-a mais sustentável e mais robusta.

Vê-se na literatura diversos trabalhos científicos e relatórios técnicos com dados da inserção dessas fontes primárias de energia no setor elétrico. Em 2021, a energia solar fotovoltaica foi responsável por 3% da energia elétrica mundial produzida no ano em questão, aumentando essa representação para 4,5% em 2022. Ainda no ano de 2021, a contribuição total das fontes renováveis de energia para a produção de eletricidade no mundo foi de 3.657,2 TWh, saltando para 11.350 TWh no ano seguinte (IEA, 2022; IEA, 2023c; BP, 2022; *Energy Institute*, 2023).

No Brasil, em 2022, houve um recorde de geração de eletricidade proveniente de fontes renováveis de energia. Enquanto a importação e a geração por fonte térmica apresentaram queda de 99,5% e 56,65%, respectivamente, as fontes eólica, hidráulica e solar cresceram 12,6%, 17,1% e 64,3%, respectivamente, quando comparado com 2021. Com isso, verifica-se um acréscimo na presença dessas fontes de 16,3% na matriz elétrica nacional, o que corresponde a 8.686 MW médio, considerando apenas geração centralizada. Em números totais, a geração no país em 2022, considerando apenas as fontes renováveis foi da ordem de 1.669,59 TWh, representando cerca de 88% da matriz elétrica nacional (CCEE, 2023; EPE, 2023).

Contrastante a esse cenário de aumento da produção de energia elétrica, destaca-se o fato de uma parcela significativa da sociedade ainda viver sem acesso à eletricidade. Mesmo que mundialmente o número de pessoas sem acesso à eletricidade tenha diminuído após décadas, o montante ainda é da ordem de 770 milhões, estando a maior parte localizada na África e Ásia (IEA, 2022a). A situação da África é ainda mais preocupante uma vez que dados apontam o aumento no número de pessoas nestas condições. Costumazes dificuldades econômicas são fatores de longa data que contribuem para esta situação no território africano e, ademais, a pandemia de COVID-19 agravou ainda mais o quadro, elevando de 74% para 77% a porção de pessoas sem acesso à eletricidade na África Subsaariana (IEA, 2022a; IEA, 2022b).

No cenário brasileiro, muitas pessoas também seguem sem acesso à energia elétrica. A maior parte da população que se encontra isolada da rede elétrica está localizada na Amazônia Legal, uma região compreendida por nove estados brasileiros: RR, AM, AL, RO, PA, AP, MA, TO e MT. Na conjuntura do ano de 2019, o número de pessoas nestas condições na área supracitada era próximo de um milhão, evidenciando que no Brasil uma das principais desigualdades está relacionada ao acesso e distribuição de energia elétrica, sendo possível relacionar estas desigualdades energéticas às desigualdades sociais e espaciais em território nacional (Brown *et al.*, 2022; Thives, Ghisi e Júnior, 2022).

As localidades que concentram pessoas sem acesso à eletricidade normalmente são distantes dos centros urbanos ou de difícil acesso e, por vezes, não há interesse econômico por parte das distribuidoras de energia em atendê-los por meio da rede elétrica convencional. Nestas circunstâncias, a produção de eletricidade no próprio local entra como auxiliadora para o atendimento dessas regiões.

Dessa forma, em localidades onde há um considerável número de edificações próximas, minirredes e nanorredes em corrente contínua se mostram viáveis tecnicamente e economicamente para o suprimento de residências não atendidas pela rede elétrica convencional.

No Brasil há programas governamentais para universalização do acesso à energia elétrica, como exemplo, o Programa Luz para Todos, que se destina a atender a população do meio rural e residentes em regiões remotas da Amazônia Legal; outro programa é o Mais Luz para a Amazônia, que objetiva promover o acesso à energia elétrica para a população localizada nas regiões remotas dos estados da Amazônia Legal, visando o

desenvolvimento social e econômico destas comunidades (MME, [s.d.]a.; MME, [s.d.]b). Há uma série de regras a serem seguidas para o atendimento de uma edificação beneficiária destes programas, devido a critérios de padronização, a exemplo da Resolução Normativa nº 1.000 de 7 de dezembro de 2021 da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) (ANEEL, 2021). O atendimento por meio de sistemas isolados acontece mediante Sistemas Isolados e com Fontes Intermitentes (SIGFI) ou Microsistema Isolado de Geração e Distribuição de Energia Elétrica (MIGDI), sendo que para os MIGDIs o fornecimento deve ser realizado em corrente alternada, enquanto em relação aos SIGFIs, a distribuidora de energia pode implementar um sistema misto de fornecimento com o atendimento de parte das cargas em corrente contínua, conforme apresentado pelo Ministério de Minas e Energia (MME) (MME, 2017).

Todavia, vale mencionar que por mais fundamental que sejam os programas para a eletrificação de comunidades sem acesso à energia elétrica, mesmo neste âmbito há a necessidade de busca por um atendimento energeticamente mais eficiente e, em muitos casos, o emprego de microrredes e nanorredes em corrente contínua podem ser melhores alternativas.

As minirredes e nanorredes em corrente contínua apresentam algumas vantagens para tais aplicações e, dessa forma, são uma alternativa para projetos envolvendo eletrificação de comunidades isoladas ou rurais, uma vez que certas cargas, quando alimentadas diretamente em c.c., operam com maior eficiência devido à eliminação do estágio de conversão c.c./c.a. Alguns exemplos desse tipo de carga são os motores c.c. e sistemas de iluminação em LED. Além disso, estas redes são flexíveis e podem ser implementadas em diversas topologias, introduzindo aquela que melhor se ajusta às necessidades do projeto em questão.

Com a operação de uma nanorrede em corrente contínua em uma localidade isolada da rede elétrica convencional, é possível a energização de cargas imprescindíveis para os moradores. Primeiramente, cita-se as bombas d'água, comumente alimentadas por geradores à combustíveis fósseis, para coleta de água e posterior utilização cotidiana. Outro exemplo são as geladeiras, visto que em comunidades de difícil acesso muito ainda se utiliza gelo para conservação de alimentos. Nos exemplos mencionados, verifica-se alguns benefícios das nanorredes c.c. como a diminuição dos impactos ambientais provenientes das emissões de gases do efeito estufa, liberados durante a operação dos geradores, bem como a redução do impacto financeiro na economia das famílias com

aquisição de combustível e gelo, menor número de equipamentos no sistema (inversor) e consequentemente menor probabilidade de defeitos.

Visando minimizar a diferença social ainda existente entre moradores de centros urbanos e de comunidades isoladas, o Grupo de Estudos e Desenvolvimento de Alternativas Energéticas (GEDAE), da Universidade Federal do Pará (UFPA), idealizou e implementou uma nanorrede de distribuição em corrente contínua (NDCC) para o fornecimento energético de algumas famílias residentes na comunidade às margens do rio Piramanha, na Ilha das Onças, Município de Barcarena, estado do Pará. Cabe ressaltar que a infraestrutura é proveniente de projetos de pesquisa executados pelo GEDAE/UFPA e objetiva atender o maior número possível de famílias na localidade e, para tanto, o mesmo segue em expansão ao longo dos anos.

Mediante todo o exposto, o presente trabalho busca avaliar o impacto na qualidade de energia e eficiência energética durante a operação de cargas motrizes supridas pela NDCC, focalizando as bombas d'água e cargas de refrigeração devido à importância na vida dos moradores. Todas as cargas motrizes referentes à refrigeração operam diretamente em corrente contínua, enquanto em relação às bombas d'água há tanto modelos c.c. quando c.a. atendidas por intermédio de inversor.

Para a avaliação operacional, buscou-se identificar eventos relacionados à qualidade de energia elétrica como afundamento de tensão, flutuação de tensão, correntes de *inrush* durante o pico de demanda e *ripple*. No que tange à qualidade de energia, são abordados assuntos como consumo de energia, carregamento do inversor e modo de energização da carga.

### **Objetivo Geral**

Avaliar o impacto na qualidade de energia e eficiência energética durante a operação de cargas motrizes na nanorrede de distribuição em corrente contínua implantada na Ilha das Onças.

### **Objetivos Específicos**

- Realizar ensaios em cargas motrizes essenciais e de uso diário por parte dos moradores da comunidade: geladeiras e *freezer* e motobombas;
- Comparar os parâmetros elétricos de cargas motrizes supridas diretamente em corrente contínua e em corrente alternada por intermédio de inversores;

- Avaliar os eventos de qualidade de energia associados à operação das cargas motrizes mencionadas anteriormente;
- Discutir sobre a estratégia utilizada para mitigação da corrente de *inrush* de motobombas c.a.
- Avaliar aspectos de eficiência energética das cargas motrizes baseados nos dados coletados durante os ensaios;
- Apresentar um estudo comparativo envolvendo eficiência energética entre três cenários tecnicamente possíveis de operação da NDCC;
- Apresentar os benefícios ambientais atrelados à NDCC, especialmente com a substituição de motobombas à combustíveis fósseis.

### **Estrutura da Dissertação**

Assim, o presente trabalho encontra-se estruturado conforme segue.

No Capítulo 1 faz-se uma revisão da literatura envolvendo redes em corrente contínua em baixa e extra-baixa tensão, com enfoque em microrredes e nanorredes. Apresenta-se os aspectos técnicos que englobam as nanorredes c.c., em especial as possíveis topologias, bem como as tecnologias empregadas em sua formação. Além disso, também são abordados assuntos pertinentes à formação de uma NDCC, como controle, aterramento e sistemas de proteção. Por fim, é discorrido sobre as vantagens das redes em corrente contínua e o emprego de cargas motrizes neste tipo de rede.

No Capítulo 2 é abordado sobre a qualidade de energia e eficiência energética em redes em corrente contínua. Primeiramente são apresentados e discorridos acerca dos eventos transitórios, variações de curta e longa duração, mostrando normatizações relacionadas aos respectivos eventos, bem como o emprego de indicadores relacionados aos eventos de qualidade de energia identificados nas medições abordadas na presente dissertação. Além disso, expõe-se acerca das possibilidades de incremento na eficiência energética considerando a operação das redes em corrente contínua, destacando os principais aspectos técnicos sobre o assunto.

No Capítulo 3 detalha-se a respeito da comunidade onde o trabalho foi realizado, mostrando as características técnicas da NDCC implementada na comunidade e as cargas motrizes que serviram como objeto de estudo.

No Capítulo 4 são indicados os materiais e métodos utilizados para a coleta de dados das grandezas elétricas em campo. Ainda, mostra-se os resultados dos ensaios

preliminares realizados em laboratório para validação do uso dos equipamentos de medição.

No Capítulo 5 é discorrido sobre os ensaios operacionais e os resultados obtidos durante as medições, indicando o registro dos fenômenos de qualidade de energia anteriormente mencionados. Além disso, é feito um estudo comparativo envolvendo a eficiência energética entre três possíveis cenários de operação da NDCC, considerando: todas as cargas operando em c.c., cargas mistas c.c. e c.a. e todas as cargas operando em c.a. supridas por intermédio de inversores.

Por fim, são apresentadas as conclusões e sugestões para futuros trabalhos buscando a continuação do estudo desenvolvido.

# 1 REDES EM CORRENTE CONTÍNUA EM BAIXA E EXTRA BAIXA TENSÃO

## 1.1 Introdução

As redes em corrente contínua (c.c.) não são uma novidade e suas aplicações datam do século XIX, período marcado pela conhecida “Guerra das Correntes”. Esta “guerra” foi uma intensa disputa que pautava a forma de distribuição de energia elétrica e tinha de um lado Thomas Edson, idealizador do sistema de geração, distribuição e cargas em corrente contínua, patenteando, em 1880, a primeira lâmpada incandescente bulbo; do outro lado estava Nikola Tesla, engenheiro croata que concebeu o conceito de corrente alternada (c.a.) em 1886, juntamente com a ideia do uso de transformadores para alteração do nível de tensão elétrica (Woudstra *et al.*, 2013).

Devido à tecnologia da época, Tesla acabara vitorioso na disputa. Contudo, após a invenção do transistor, em 1947, os progressos na eletrônica fizeram com que a utilização de sistemas em corrente contínua voltasse a ser debatido e estudado (Woudstra *et al.*, 2013). Várias cargas cotidianamente utilizadas, como por exemplo, luminárias em LED, aparelhos de telefonia móvel, computadores, dentre outros, são supridas em corrente contínua, seja diretamente ou indiretamente.

Com os avanços também na eletrônica de potência, a eficiência na conversão de energia para alimentação de cargas em corrente contínua aumentou consideravelmente, porém, ainda há perdas no processo de conversão, c.c/c.c ou c.a./c.c., quando o abastecimento é realizado em corrente contínua ou em corrente alternada. Dessa forma, nas pesquisas atuais não somente o fato da rede elétrica ser em corrente contínua é levado em consideração, mas a eficiência energética e a qualidade da energia elétrica também.

Apesar de haver redes de distribuição em corrente contínua em alta tensão, na presente dissertação são enfatizadas e caracterizadas as redes de distribuição em corrente contínua em baixa tensão (LVDC, do inglês, *Low Voltage Direct Current*) e extrabaixa tensão (ELVDC, *Extra Low Voltage Direct Current*). Na Europa, em 2006, foram criadas diretrizes para o uso de sistemas em corrente contínua com a definição dos níveis de tensão para aplicações de até 1500 V (IEC, 2017).

Na Tabela 1.1 é apresentada uma síntese da divisão feita para algumas aplicações comuns e níveis de tensão usuais, segundo o padrão IEC 60038 (IEC, 2017).

Tabela 1.1 – Níveis de tensão para algumas aplicações em corrente contínua.

<b>Nível de tensão c.c.</b>	<b>Aplicações</b>
3,6 – 5 V	Alimentação de CIs
9 V	Baterias portáteis
12 V	Bateria automotiva e iluminação
18 – 20 V	Ferramentas elétricas sem fio
24 – 36 V	Bicicleta elétrica
48 V	Telecomunicações, automóveis híbridos leves
270 V	Sistemas de aviação e aeroespaciais
400 V	Centros de dados, sistemas hospitalares, veículos elétricos
600 – 1500 V	Ferrovias, metrô

Fonte: Adaptado de IEC (2017).

É possível verificar por meio da Tabela 1.1 que as aplicações em corrente contínua, em seus diversos níveis de tensão, englobam várias áreas estratégicas à sociedade, por isso o desenvolvimento de pesquisas na área deve ser constante. Ainda em relação aos níveis possíveis de tensão c.c., faz-se uma distinção baseada no intervalo de valores, conforme apresentado na Tabela 1.2.

Tabela 1.2 – Caracterização dos níveis de tensão c.c.

<b>Caracterização</b>	<b>Intervalo de tensão c.c.</b>
Alta tensão	$V_{c.c} > 1.500 \text{ V}$
Baixa tensão	$120 \leq V_{c.c.} \leq 1.500 \text{ V}$
Extra baixa tensão	$V_{c.c} < 120 \text{ V}$

Fonte: Adaptado de IEC CEI (2009).

As redes em corrente contínua apresentam certas vantagens em relação às redes em corrente alternada, uma delas é a redução de perdas com a eliminação das necessidades de inversores. Além disso, várias cargas utilizam corrente contínua para alimentação interna de componentes eletrônicos, sendo assim, a etapa de retificação interna também é eliminada ou atenuada, uma vez que o determinado equipamento pode ser alimentado diretamente, devendo apenas ser respeitado o nível de tensão requerido.

Conforme explanado em Modu *et al.* (2023), é usual distinguir nanorredes, microrredes e minirredes em função da potência de carga e/ou capacidade de geração, sendo o termo nanorredes designado a sistemas de menor potência. Todavia, ainda não há um consenso na literatura sobre as faixas de potência que se inserem cada uma delas.

As minirredes e nanorredes em corrente contínua permitem também a possibilidade de agregar geração e armazenamento ao longo de sua extensão sem um procedimento padrão de sincronismo (IEC, 2017). Dessa forma, estas apresentam grande flexibilidade para as mais variadas aplicações. Por ser um tópico de elevada relevância para o desenvolvimento humano, científico e tecnológico, pesquisas estão sendo conduzidas para desenvolver conversores mais eficientes, estratégias de controle avançadas e soluções inovadoras para armazenamento de energia em corrente contínua, podendo-se citar, como exemplo, Jyothi *et al.* (2021), Ganesan *et al.* (2015) e Mulleriyawage e Shen (2018).

Mesmo com as vantagens supracitadas em relação às redes em corrente alternada, as redes c.c. ainda possuem alguns desafios para sua implementação em massa. Um desses desafios diz respeito ao aspecto econômico, dado que como a produção de equipamentos que operam em c.c. não acontece em larga escala quando comparado aos que operam em c.a., torna-se mais dispendioso a aquisição de cargas de uso cotidiano.

No âmbito de comunidades remotas, as dificuldades são ainda mais acentuadas para compra de equipamentos que operam em c.c. Então, com base nas experiências vivenciadas pelo GEDAE, a diferença de preço dos equipamentos c.c. e c.a. acaba sendo um impeditivo, fazendo com que muitos moradores nestas localidades ainda prefiram, por exemplo, manter o equipamento c.a. que era, anteriormente à implantação de uma rede c.c., suprido por gerador a combustível fóssil, mesmo que a longo prazo essa preferência se torne equivocada considerando a operação de um sistema com maiores perdas na distribuição de eletricidade, em função de perdas em conversores eletrônicos c.c./c.a e operando com baixo carregamento.

Neste trabalho, considera-se o termo nanorrede para os sistemas implementados e estudados pelo GEDAE. Ainda que tratadas separadamente, a característica modular de uma nanorrede dispõe da possibilidade de interconectar por meio de um *gateway* diversas nanorredes a fim de se formar uma microrrede ou até mesmo uma minirrede (Torres, 2019).

Mesmo que o foco deste trabalho sejam as redes em corrente contínua, vale ressaltar que uma nanorrede ou microrrede de distribuição de energia elétrica pode também ser formada em corrente alternada ou então híbrida, contendo tanto barramento c.c. quanto c.a. Para a implementação do tipo mais adequado de rede deve-se levar em consideração as cargas que serão atendidas, podendo estas serem puramente c.c., c.a. ou então cargas adaptadas.

## 1.2 Topologias de rede

A topologia de uma rede em corrente contínua é uma característica que deve ser cuidadosamente levada em consideração, visto que afeta diretamente em diversos pontos essenciais de um projeto, como por exemplo, flexibilidade, custo de implementação, controlabilidade, robustez, escalabilidade, resiliência, dentre outros (Modu *et al.*, 2023). No que diz respeito às topologias, deve-se atentar a alguns aspectos, conforme apresentado a seguir.

### 1.2.1 Polaridade

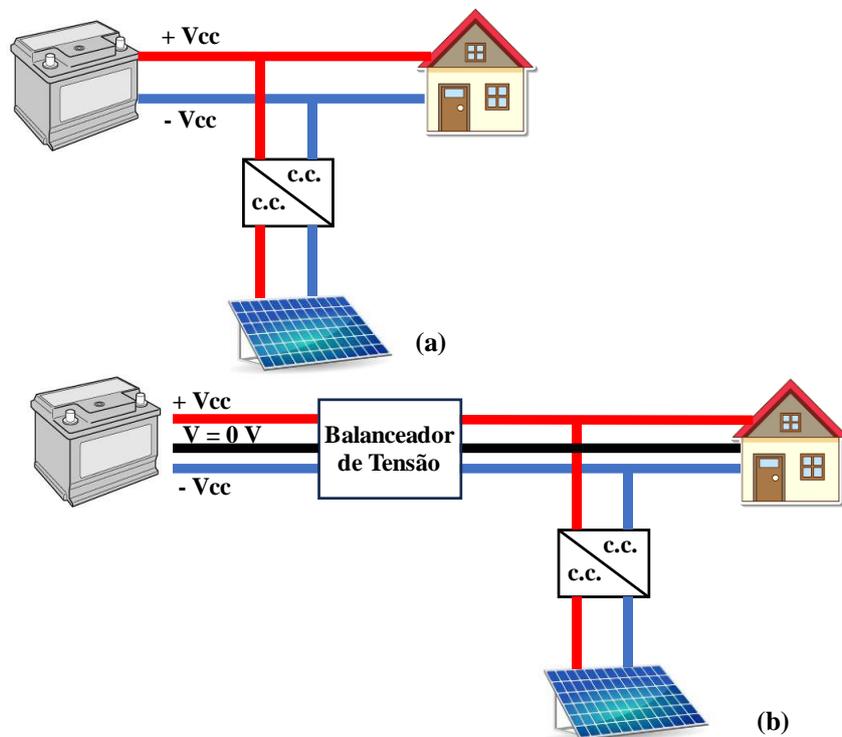
Em termos de polaridade, as configurações mais comuns são a unipolar e bipolar e dizem respeito ao nível de tensão do barramento principal da rede, conforme destacado em Modu *et al.* (2023). Na configuração unipolar as cargas são conectadas diretamente nos polos positivo e negativo do barramento c.c., essa configuração possui mais fácil implementação devido a menor complexidade em relação à configuração bipolar, contudo o sistema está mais suscetível a interrupções em caso de falhas.

As microrredes e nanorredes em corrente contínua com polaridade bipolar, são empreendidas em três fios, sendo o polo positivo, o polo negativo e o polo neutro (com potencial elétrico igual a 0 V). Com este tipo de rede é possível obter uma maior flexibilidade em relação ao nível de tensão de operação, podendo a mesma operar em  $+V_{cc}$ ,  $-V_{cc}$  e  $2 \times V_{cc}$ . Nesta configuração a rede torna-se mais robusta em caso de falha em uma das linhas, uma vez que as outras duas podem continuar alimentando o sistema.

Em contrapartida, devido à possibilidade de uma eventual assimetria nas tensões positivas e negativas é necessário um circuito para balanceamento de tensão ou um sistema de controle entre os conversores acoplados aos barramentos, o que torna a rede mais complexa e mais onerosa em aspectos financeiros quando comparada às redes unipolares (Torres, 2019; Moussa *et al.*, 2018).

Na Figura 1.1 ilustram-se as configurações unipolar e bipolar de uma microrrede de distribuição em corrente contínua.

Figura 1.1 – Configurações (a) unipolar e (b) bipolar de uma microrrede de distribuição em corrente contínua.



Fonte: Autoria própria.

Há ainda, conforme apresentado em Torres (2019), uma terceira configuração, contudo, menos comum. Esta configuração considera uma tensão variável no barramento c.c. principal e é utilizada, por exemplo, para acoplamento direto da geração fotovoltaica no barramento c.c. A topologia em questão elimina a necessidade de conversores c.c./c.c. entre os geradores fotovoltaicos e o barramento c.c., porém, requer conversores c.c./c.c. de acoplamento das cargas. Além disso, estes conversores de acoplamento devem possuir operação com tensão de entrada variável. O principal ponto contraproducente para esta configuração é a aplicação em redes cujos geradores fotovoltaicos possuam diferentes temperaturas de operação, inclinações e orientações espaciais, visto que assim os mesmos possuem máxima tensão e potência diferentes, fazendo com que a conexão em paralelo impossibilite o máximo aproveitamento de uns em detrimento de outros.

## 1.2.2 Estrutura

Diz-se que a estrutura de uma microrrede em corrente contínua é definida de acordo com a conexão realizada entre o barramento c.c. principal com as cargas e,

eventualmente, à rede c.a. Em suma, as estruturas dividem-se em radial e anel, sendo possível outras configurações baseadas nestas duas, chamadas de redes interconectadas. As estruturas radiais e em anel, bem como as principais estruturas interconectadas, são apresentadas a seguir.

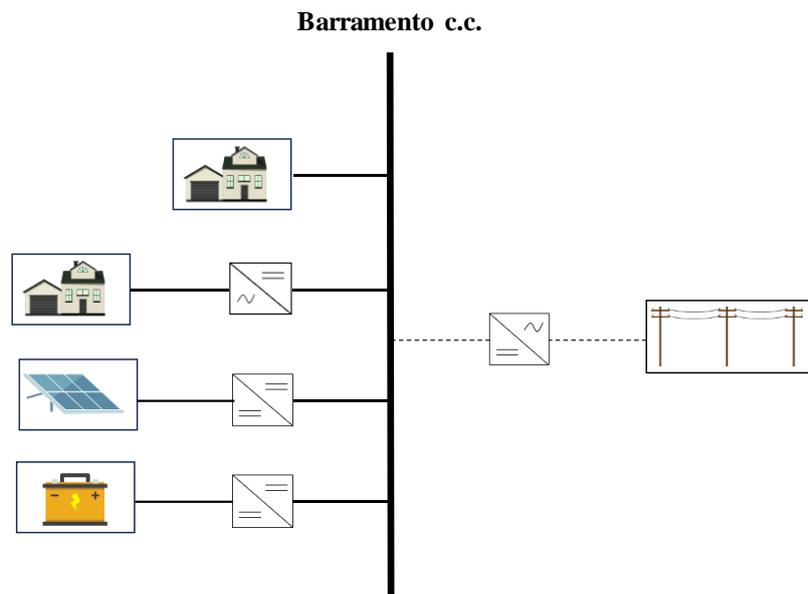
### 1.2.2.1 Radial

Para este tipo de estrutura a potência é transmitida em um único caminho, por meio do barramento c.c. principal, às cargas. Nesse caso, há um ponto comum de conexão entre as cargas, sistemas de geração de energia e sistemas de armazenamento e dependendo da aplicação, o barramento c.c. principal pode ser unipolar ou bipolar. A estrutura radial é preferencialmente implementada em instalações residenciais, visto que todas as cargas operam em baixa tensão, salvo exceções (Modu *et al.*, 2023; Kumar *et al.*, 2017).

Devido à simplicidade de implementação da estrutura radial e menores custos envolvidos, este é o tipo mais comum em sistemas de distribuição. Além disso, é possível que em diversos casos as cargas e fontes sejam instaladas próximas, diminuindo, assim, perdas na distribuição. Todavia, um sistema com estrutura radial possui confiabilidade menor quando comparado a outras configurações possíveis. Isso acontece uma vez que a perda de parte da rede pode implicar em interrupções no acesso das cargas conectadas ao barramento c.c. principal, ou ainda, em caso de problemas no barramento c.c. principal, pode ocorrer a interrupção geral do sistema (Kumar *et al.*, 2017; Meng *et al.*, 2017; Prabhala *et al.*, 2018; Razmi e Lu 2022).

Diante disso, uma alternativa para aprimorar a confiabilidade deste tipo de sistema é a inserção de múltiplos sistemas de armazenamento de energia, conforme (Modu *et al.*, 2023). Na Figura 1.2 apresenta-se um esquema geral deste tipo de estrutura para uma rede em corrente contínua com estrutura radial. Na figura em questão destaca-se ainda, por meio da linha tracejada, que há a eventual possibilidade de conexão da rede em corrente contínua com uma rede em corrente alternada.

Figura 1.2 – Estrutura radial para uma rede em corrente contínua.



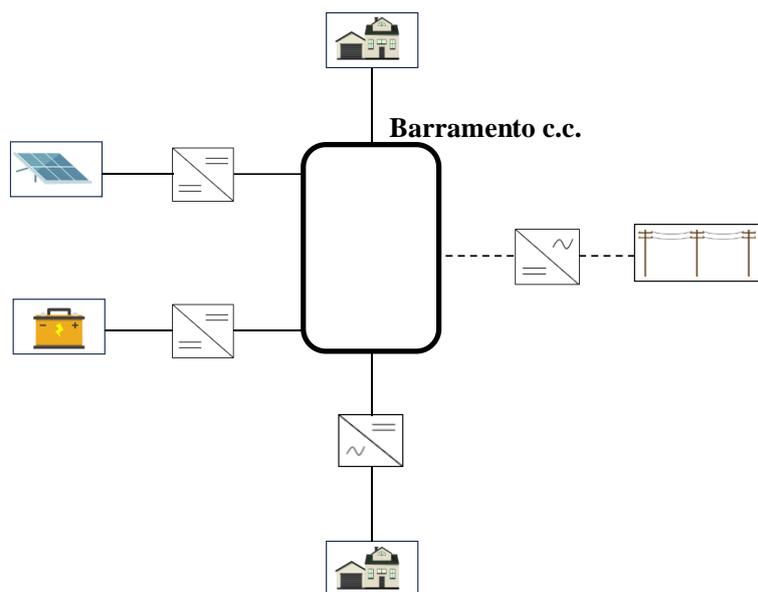
Fonte: Alves *et al.* (2024).

É exequível, ainda, a interconexão de duas ou mais microrredes em corrente contínua fazendo uso da estrutura radial. Essa conexão pode ser em série ou paralelo dependendo das configurações físicas das microrredes. Na conexão em paralelo aumenta-se a confiabilidade do sistema, dado que em caso de falha em um dos barramentos é possível isolá-lo, não afetando, portanto, a operação dos barramentos das microrredes vizinhas (Kumar *et al.*, 2017).

### 1.2.2.2 Anel

A estrutura de rede em anel, Figura 1.3, possibilita maior flexibilidade em situações de falta, visto que o fluxo de potência pode se dar em dois caminhos. A indicação da linha tracejada na Figura 1.3 segue o mesmo padrão do caso ilustrado anteriormente (estrutura radial), em relação à eventual conexão com a rede c.a. A implementação desse modelo é mais complexa e, em termos financeiros, mais custoso quando comparado à estrutura radial. Conforme exposto em Modu *et al.* (2023) e Kumar *et al.* (2017), esse tipo de estrutura é mais recomendada para redes urbanas e industriais que requiram maior flexibilidade.

Figura 1.3 – Estrutura em anel para uma rede em corrente contínua.



Fonte: Alves *et al.* (2024).

Nesta estrutura é possível que o anel seja dividido por meio de chaves comutadoras para que em caso de falha em um trecho da rede este seja isolado e não venha a influenciar a operação da parcela que não está sobre condição de falta (Prabhala *et al.*, 2018). Devido à necessidade de ser uma rede menos suscetível a faltas, existem alguns métodos de proteção específicos para redes implementadas com essa estrutura, como por exemplo os apresentados em Mohanty e Pradhan (2019) e Zhang *et al.* (2019).

Para um controle de cada barramento, bem como o controle entre os barramentos vizinhos, pode-se empregar um Dispositivo Eletrônico Inteligente (do inglês IED *Intelligent electronic device*), logo, no caso de alguma falta detectada pelo dispositivo, primeiramente o barramento com operação comprometida é isolado do sistema para posteriormente ser atendido eletricamente por um caminho alternativo devido à conexão em anel (Modu *et al.*, 2023; Kumar *et al.*, 2017).

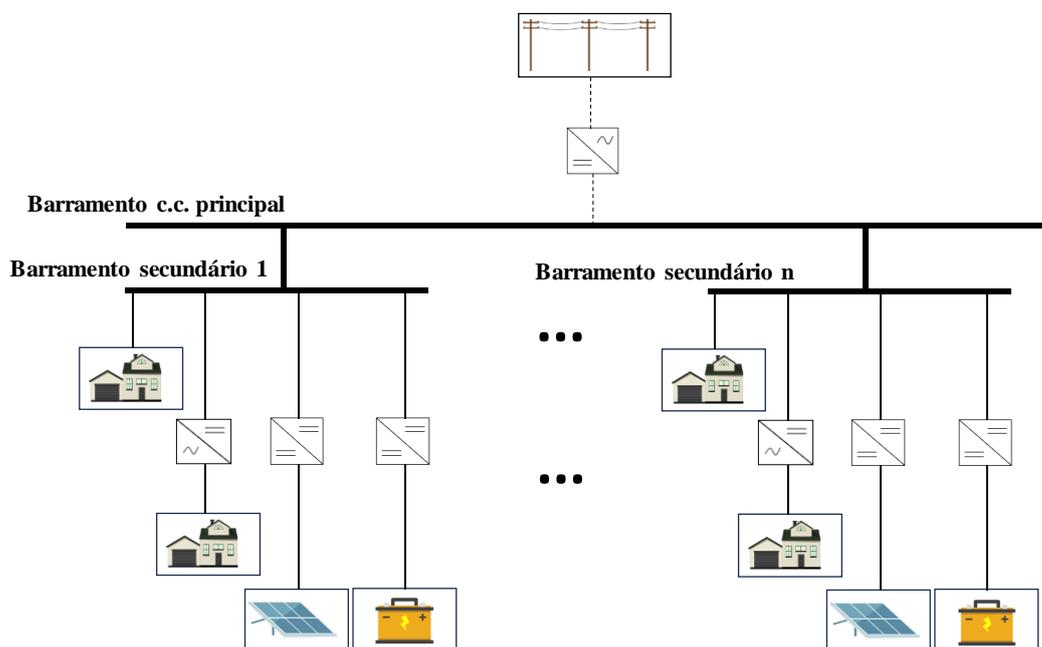
### 1.2.2.3 Múltiplos barramentos

Esta estrutura de rede pode ser entendida como uma versão expandida da estrutura radial. Neste cenário, entrega-se maior confiabilidade, eficiência e disponibilidade energética quando comparado com a estrutura radial convencional. Cada conjunto formado pelos componentes conectados aos barramentos secundários, somados entre si mesmos, é caracterizado como um *cluster* de microrrede e há o intercâmbio de energia

entre os barramentos secundários sempre que houver déficit ou excesso de energia. Ademais, caso haja uma falha em um dos barramentos que possa vir a comprometer os demais ou causar perturbação no barramento c.c. principal, o barramento sob condição de falta pode ser isolado do conjunto até que sua operação seja devidamente reestabelecida (Modu *et al.*, 2023; Leng *et al.*, 2022).

Apresenta-se na Figura 1.4 um esquema geral de uma rede c.c. com estrutura de múltiplos barramentos.

Figura 1.4 – Estrutura com múltiplos barramentos para uma rede em corrente contínua.



Fonte: Alves *et al.* (2024).

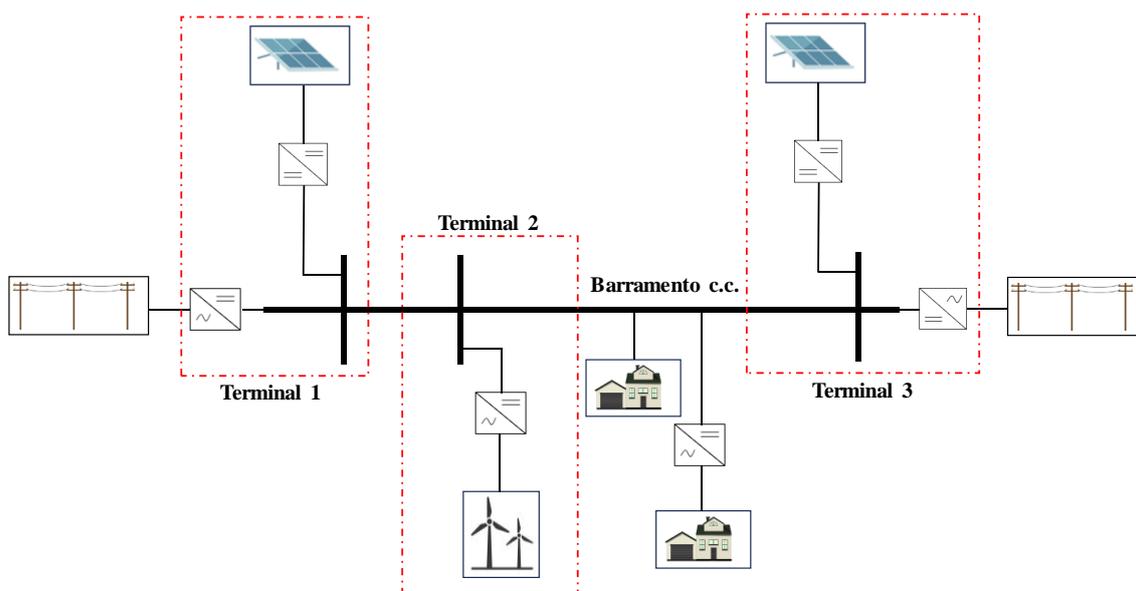
#### 1.2.2.4 Múltiplos terminais

A estrutura de múltiplos terminais foi inicialmente concebida para operações de sistemas em corrente contínua em alta tensão, como na geração eólica *offshore*. A interface é realizada por meios de conversores c.a./c.c. de duas ou mais redes c.a. e o fluxo de energia ser mais complexo em relação ao sistema radial convencional. Porém, apesar disso, como o sistema permite vários caminhos para transmissão de energia, esta configuração apresenta certa flexibilidade, visto que busca alcançar o equilíbrio no compartilhamento de energia entre suas unidades. Para isso, conversores de são empregados para equilibrar automaticamente a incompatibilidade de potência (Modu *et al.*, 2023; Xu *et al.*, 2008).

Para combinar sistemas c.a. e c.c. em alta tensão com redes de múltiplos terminais é preciso levar em consideração alguns desafios técnicos como a operação de dispositivos em alta potência, bem como o controle dessa integração no quesito de dinâmica, fluxo de potência e estabilidade. Outro aspecto a ser examinado são os custos do projeto, já que equipamentos que operam em corrente alternada possuem valores monetários diferentes dos que têm sua operação em corrente contínua (Rodriguez e Rouzbehi, 2017).

Todos os desafios técnicos são replicados quando se trata de uma rede em corrente contínua na configuração de múltiplos terminais operando em baixa tensão. Acrescentando ainda o fato da necessidade de conversores c.c./c.c. que sejam capazes de compatibilizar a tensão da rede com a tensão das cargas c.c. presentes em residências. Vê-se na Figura 1.5 um esquema geral de uma rede c.c. com estrutura de múltiplos terminais.

Figura 1.5 – Estrutura com múltiplos terminais para uma rede em corrente contínua.



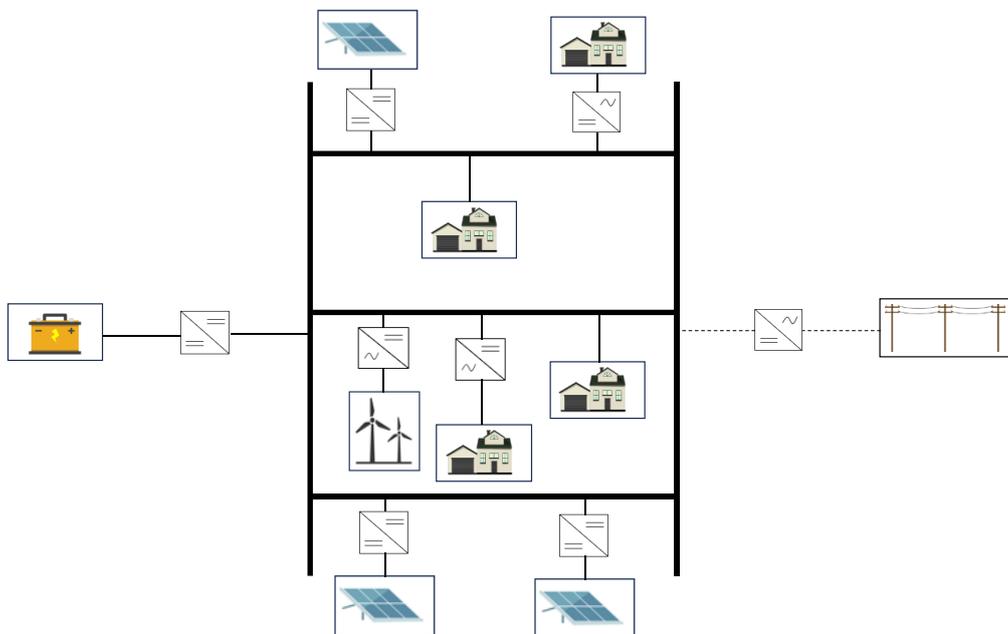
Fonte: Alves *et al.* (2024).

### 1.2.2.5 Escada

A estrutura em escada, Figura 1.6, é vista como uma extensão da estrutura de rede em anel. Apesar de acrescentar robustez e confiabilidade ao sistema, o custo de implementação também é superior quando comparado à rede em anel convencional. Dois barramentos secundários são conectados aos barramentos principais, a fim de se formar os anéis da rede, onde um conjunto que forma um anel pode fornecer ou solicitar energia dos demais anéis presentes no sistema. A rede permite fluxo de potência por mais de um

caminho e também oferece melhor gerenciamento de falhas, pois há a possibilidade de isolar, em caso de falta, somente o ramo inoperante, bem como o barramento secundário completamente (Modu *et al.*, 2023; Prabhala *et al.*, 2018).

Figura 1.6 – Estrutura em escada para uma rede em corrente contínua.



Fonte: Alves *et al.* (2024).

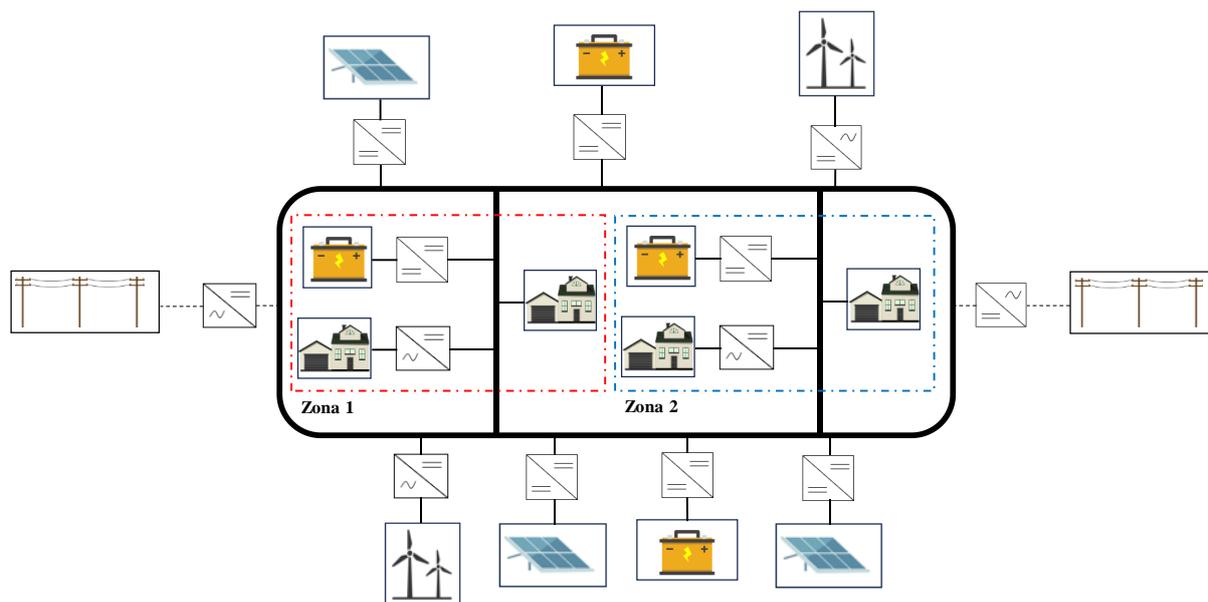
### 1.2.2.6 Zonal

A estrutura zonal, pode ser classificada como um conjunto de microrredes c.c. conectadas em cascata em configuração simétrica, onde o sistema é dividido em zonas e cada zona está ligada a dois barramentos c.c. redundantes. Nesta configuração as cargas possuem mais disponibilidade energética já que há a possibilidade de serem atendidas por mais de uma maneira, sendo: múltiplos barramentos c.c. simultaneamente, sequencialmente ou exclusivamente por um barramento c.c. (Kumar *et al.*, 2017).

A possibilidade de uma carga ser atendida por mais de um barramento pode afetar o desempenho operacional do sistema, causando complicações à referida estrutura de rede, conforme explanado por Kumar *et al.* (2017) e Modu *et al.* (2023). Em vista disso, Balong e Krein (2011) propõem uma estratégia para que a carga venha a ser suprida por meio do barramento c.c., exclusivamente um por vez, que possuir maior nível de tensão naquele momento, havendo ainda a chance de alternar o barramento de alimentação dependendo das condições de operação da carga e do sistema.

Apresenta-se na Figura 1.7 a estrutura geral de uma rede c.c. com estrutura zonal.

Figura 1.7 – Estrutura zonal para uma rede em corrente contínua.



Fonte: Alves *et al.* (2024).

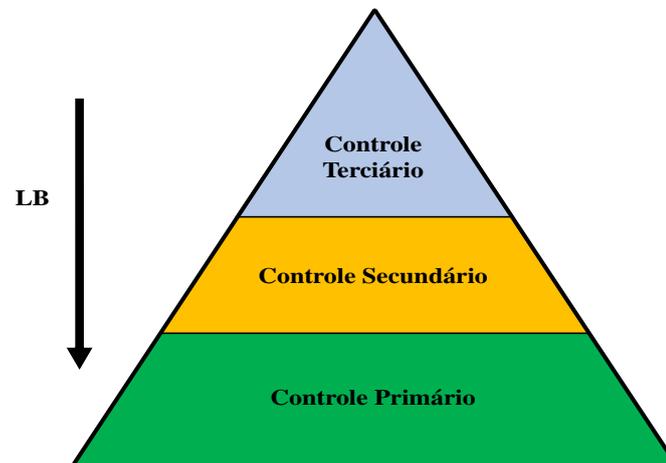
### 1.3 Estratégias de controle

Um dos objetivos principais da microrrede é controlar o fluxo de energia dentro de uma área local, atendendo determinadas cargas com as condições necessárias para seu funcionamento. Para tanto, as estratégias de controle podem ser aplicadas de forma em que haja comunicação entre os dispositivos de potência ou sem comunicação dedicada. Santoro *et al.* (2023) apresenta em seu trabalho um esquema geral hierárquico multinível baseado na norma *International Society of Automation-95* em que os 6 níveis previstos na norma são reduzidos, no contexto de microrredes, para 4 níveis, indo do 0 ao 3. Ainda segundo os autores, à medida que o nível considerado aumenta, a estabilidade e robustez da operação dos níveis mais baixos requerem uma largura de banda (LB) menor de sinais de controle e referência.

Meng *et al.* (2017) também aborda em seu trabalho a questão do controle hierárquico, apresentando que o controle e gerenciamento estão associados a múltiplos objetivos relacionados à área técnica, escala de tempo e níveis físicos. Torres (2019) mostra que o mesmo controle hierárquico apresentado em Meng *et al.* (2017) pode ser aplicado no controle de uma microrrede em corrente contínua.

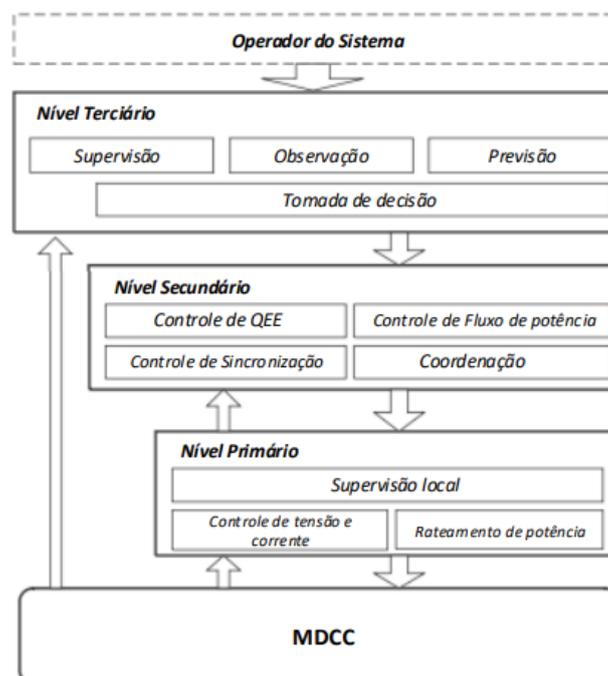
Na Figura 1.8 apresenta-se a estrutura hierárquica em função da largura de banda, enquanto na Figura 1.9 mostra-se a relação entre os níveis da hierarquia em função dos objetivos.

Figura 1.8 – Hierarquia de controle em função da largura de banda.



Fonte: Adaptado de Santoro *et al.* (2023).

Figura 1.9 – Esquema de controle hierárquico em uma rede c.c.



Fonte: Torres (2019).

O nível primário da hierarquia faz referência ao controle local. Para isso, é necessária uma coordenação de múltiplas fontes para garantir a estabilidade de tensão e potência no barramento principal. As principais funções de controle local, conforme

mostrado em Fan, Yu e Xia (2021), envolvem controle de tensão e corrente, controle do lado da fonte e compartilhamento de carga.

O nível secundário da hierarquia lida com a operação em nível do sistema, como controle da qualidade de energia, controle de fluxo de potência e coordenação da geração entre as fontes distribuídas (MENG *et al.*, 2017).

Por fim, o nível terciário da hierarquia de controle trata da otimização, gerenciamento e regulação do sistema em nível geral. Outrossim, consoante com Meng *et al.* (2017) e Santoro *et al.* (2023), nesta etapa versa, por exemplo, a respeito do armazenamento e despacho de energia.

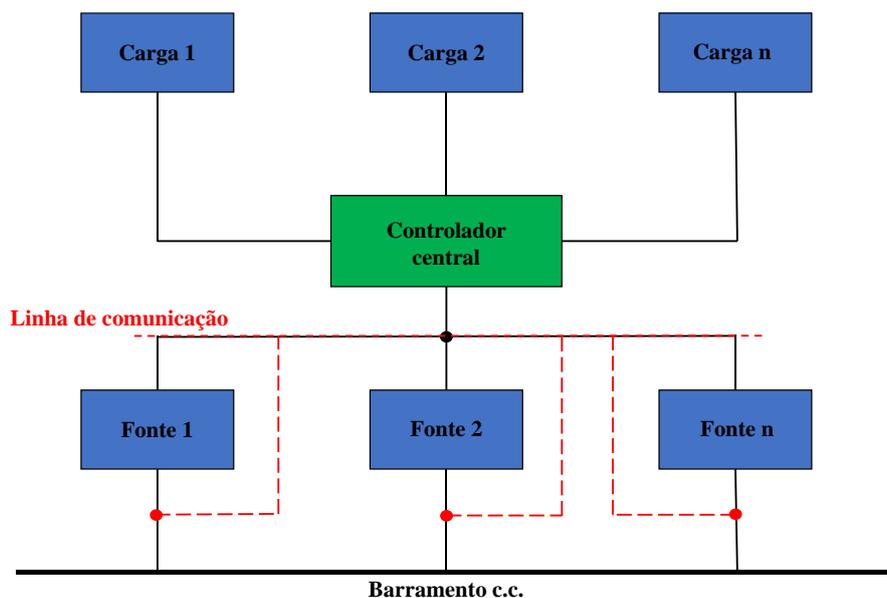
Considerando o sistema hierárquico apresentado, há a possibilidade de implementação do controle por meio de diferentes estruturas, baseadas na coordenação, as quais são apresentadas a seguir:

### **1.3.1 Controle centralizado**

No controle centralizado, o gerenciamento de dados dos componentes da rede é feito por apenas um controlador central. Os dados coletados pelas unidades distribuídas são gerenciados, tratados e enviados de volta pelo controlador central às unidades distribuídas por meio de um canal de comunicação digital de acordo com Kumar, Agarwal e Agarwal (2019). Ainda segundo os autores, como principais vantagens deste método destacam-se a forte observabilidade e controlabilidade de todo o sistema, contudo, acaba tendo como desvantagens a baixa confiabilidade e a flexibilidade, sendo mais recomendado em aplicações de microrredes c.c. de pequeno porte.

Burmester *et al.* (2017) ainda ressalta que a linha ou caminho de comunicação é dependente de uma alta largura de banda, devido à coleta de dados para execução de instruções em tempo hábil. Vê-se na Figura 1.10 o esquema geral de um controle do tipo centralizado aplicado a uma microrrede com várias cargas e várias fontes de geração.

Figura 1.10 – Esquema geral de um controle do tipo centralizado.



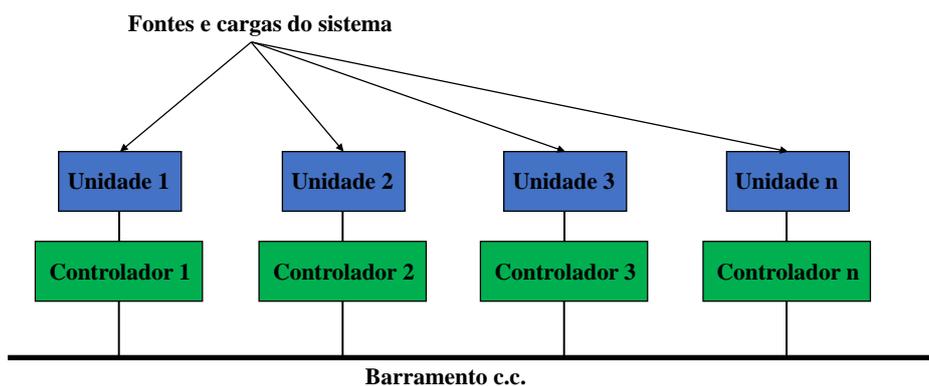
Fonte: Adaptado de Burmester *et al.* (2017).

### 1.3.2 Controle descentralizado

Na estratégia descentralizada não há uma linha de comunicação e as unidades distribuídas são controladas por controladores independentes utilizando dados de variáveis locais. Kumar, Agarwal e Agarwal (2019) e Burmester *et al.* (2017) destacam que o controle descentralizado é mais robusto e confiável quando comparado ao sistema centralizado, isso porque os controladores independentes são responsáveis pela coleta e processamento de dados num dado trecho do sistema e uma eventual falha em um deles não acarreta a falta geral de dados operacionais do sistema. Apesar disso, ainda seguindo os trabalhos supracitados, a descentralização apresenta certas limitações operacionais, pois as informações sobre as outras unidades de controle podem ser insuficientes.

Apresenta-se na Figura 1.11 a representação geral de um sistema cuja estratégia de controle é descentralizada.

Figura 1.11 – Esquema geral de um controle do tipo descentralizado.

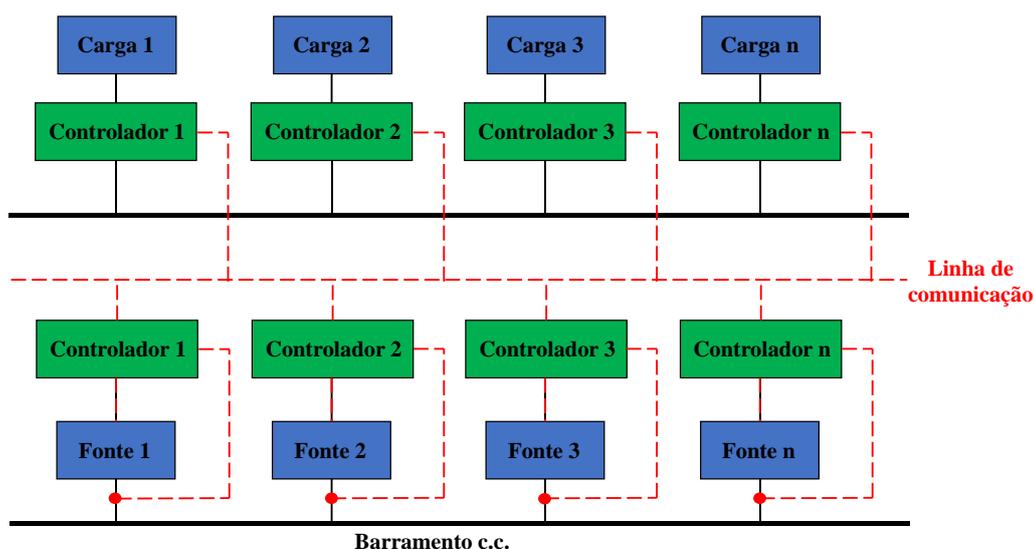


Fonte: Adaptado de Burmester *et al.* (2017) e Kumar, Agarwal e Agarwal (2019).

### 1.3.3 Controle distribuído

O controle distribuído possui características das duas estratégias de controle citadas anteriormente, já que possui a topologia de um sistema descentralizado adicionando linhas de comunicação entre os nós do sistema, como em um controle centralizado (Burmester *et al.*, 2017). À medida que os dados são processados pelas unidades de controle independentes, estes são compartilhados com as demais presentes no sistema, a fim de que seja estruturada uma estratégia de controle mútua para um dado evento identificado. Na Figura 1.12 é apresentado o esquemático de uma microrrede com controle distribuído.

Figura 1.12 – Esquema geral de um controle do tipo distribuído.



Fonte: Adaptado de Burmester *et al.* (2017).

## 1.4 Sistemas de proteção

Mohammadi, Ajaeli e Stevens (2019) apontam em seu trabalho alguns benefícios técnicos no que diz respeito ao uso de microrredes c.c., contudo, reforçam a necessidade de continuidade de pesquisa para avanços em determinadas partes do conjunto, como é o caso das estratégias de proteção. Neste contexto, é possível verificar na literatura trabalhos envolvendo o desenvolvimento de sistemas de proteção de microrredes c.c. ou híbridas. Cita-se como exemplo Zhang *et al.* (2019), Jolhe *et al.* (2021) e Seo (2022).

Para Augustine *et al.* (2018), um dos desafios principais no que tange à proteção c.c. é o fato de não haver o cruzamento em zero na corrente elétrica ao longo do tempo, como em c.a., fazendo com que seja mais difícil interromper faltas em c.c. com fusíveis e disjuntores.

### 1.4.1 Faltas em redes c.c.

Mishra *et al.* (2022) destaca que um esquema de proteção é baseado no tipo de falhas ou outros distúrbios que o sistema pode apresentar. Ainda segundo o autor, normalmente as faltas que ocorrem em microrredes c.c. dividem-se em duas categorias. Tem-se, primeiramente, as faltas de arco, mais comuns em microrredes c.c. baseadas em sistemas solar fotovoltaicos e tem como alguns fatores de causa variações de energia armazenada em baterias, mudança de temperatura, danos mecânicos em cabos elétricos, contatos erráticos, degradação de solda e corrosão de condutores. A outra principal categoria de falta são os curtos-circuitos.

### 1.4.2 Aterramento em redes c.c.

Assim como em sistemas em corrente alternada, o aterramento nas redes em corrente contínua é fundamental para o bom funcionamento do conjunto, ajudando na manutenção dos níveis seguros de tensão, bem como corrente em regime transitório. Na Norma Internacional IEC 60364-1 de 2005 estão especificadas 5 configurações para aterramento em sistemas em corrente contínua, sendo cada uma delas apresentadas a seguir.

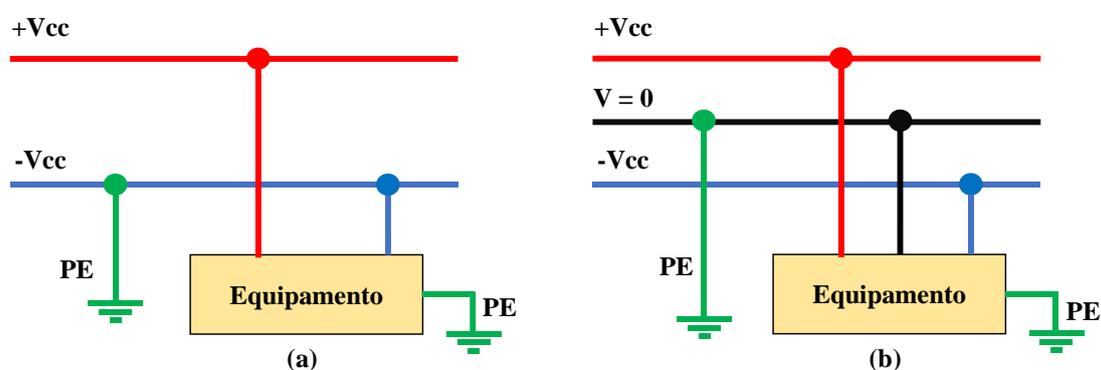
#### 1.4.2.1 Configuração TT

No aterramento TT a fonte de alimentação possui ligação direta à terra e as partes condutoras do equipamento suprido pela rede são ligadas ao terminal de aterramento

formado por um eletrodo de terra local, que é eletricamente independente do aterramento da fonte (Kumar *et al.*, 2017). Esta configuração apresenta como principais vantagens a fácil implementação e proteção confiável em faltas do tipo linha-terra, em contrapartida, destaca-se como principais pontos negativos a possibilidade de corrente circulantes e estresse por elevação de tensão, conforme apresentado em Mohammadi, Ajaeli e Stevens (2019) e Mishra *et al.* (2022).

O esquema comum de ligação nas duas polaridades de rede é mostrado na Figura 1.13.

Figura 1.13 – Aterramento TT (a) rede unipolar e (b) rede bipolar.



Fonte: Autoria própria.

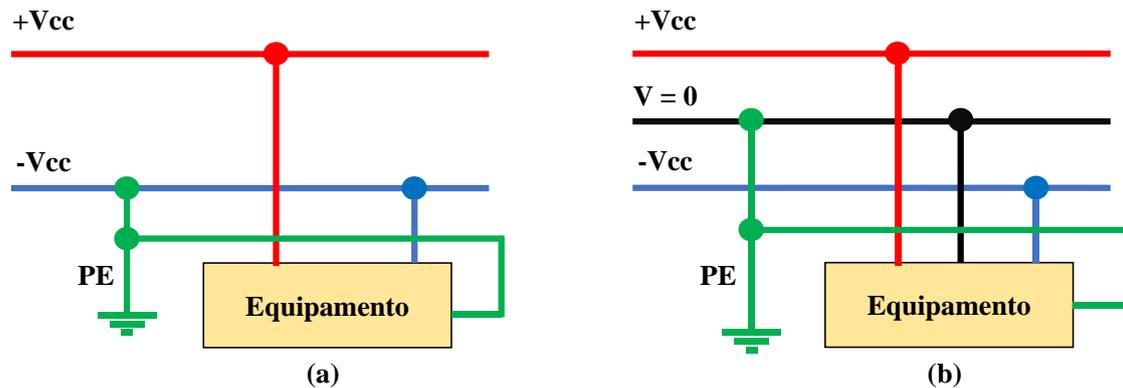
#### 1.4.2.2 Configuração TN

Esta configuração é a mais recomendada para microrredes em corrente contínua. Nela, o ponto médio do conversor é conectado ao terra e a carcaça do instrumento é conectada ao terminal  $V = 0$  e ao aterramento, para o caso de uma rede bipolar, enquanto que em uma rede unipolar, o polo negativo é conectado ao terra. Para a implementação desta configuração, necessita-se de baixa resistência de aterramento (Mohammadi, Ajaeli e Stevens, 2019).

Como principais pontos positivos dessa configuração, Mishra *et al.* (2022) destaca a baixa tensão de toque e limitação da magnitude da corrente elétrica no caso de uma falta do tipo linha-terra, além da ausência de sobretensão no isolamento do equipamento. Ainda segundo os autores, a principal desvantagem se dá pelo elevado transiente de corrente na presença de uma falta do tipo linha-terra devido ao caminho de retorno com baixa resistência.

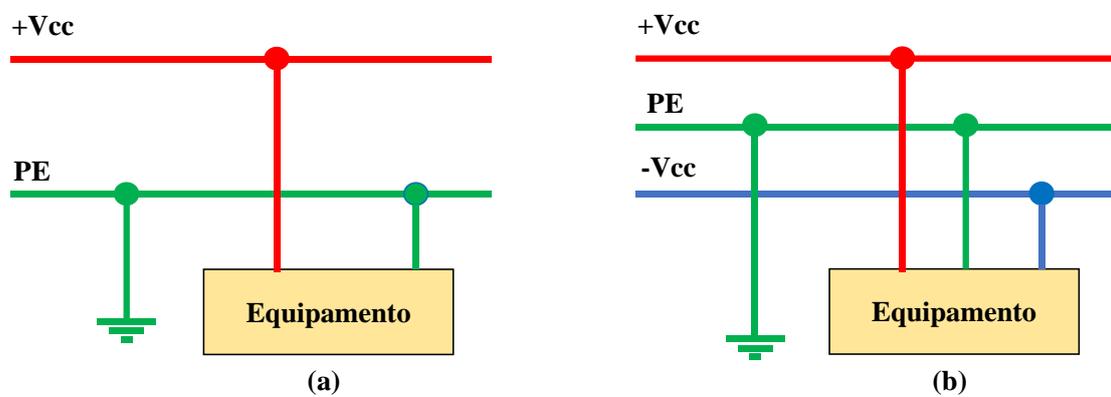
Salienta-se, ainda, que este tipo de aterramento pode ser subdividido em três possíveis configurações, sendo elas: TN-S, TN-C, TN-C-S. Os respectivos esquemas de ligação são apresentados nas Figuras 1.14, 1.15 e 1.16 para as duas principais polaridades de redes c.c.

Figura 1.14 – Aterramento TN-S (a) rede unipolar e (b) rede bipolar.



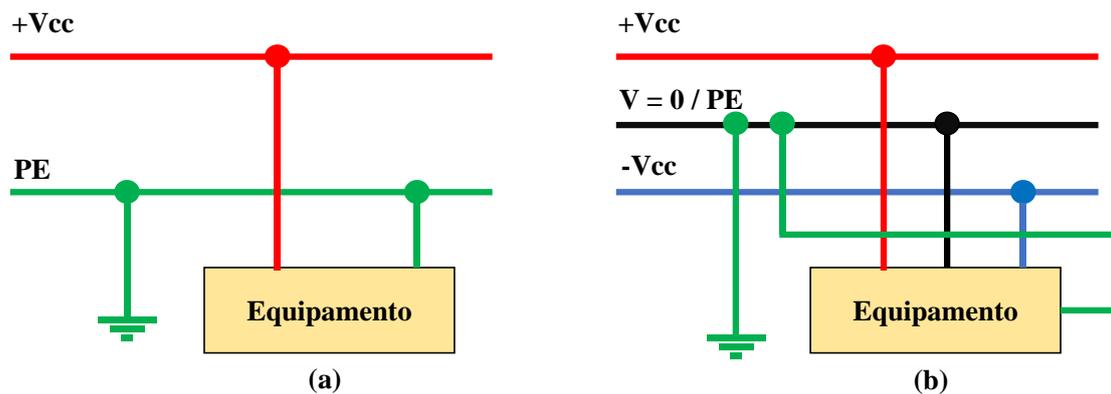
Fonte: Autoria própria.

Figura 1.15 – Aterramento TN-C (a) rede unipolar e (b) rede bipolar.



Fonte: Autoria própria.

Figura 1.16 – Aterramento TN-C-S (a) rede unipolar e (b) rede bipolar.



Fonte: Autoria própria.

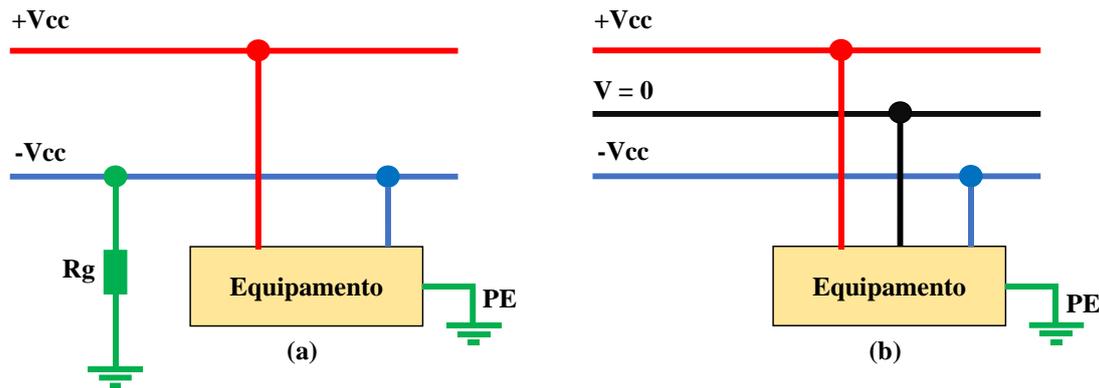
### 1.4.2.3 Configuração IT

Os sistemas cujo aterramento é do tipo IT têm as fontes de alimentação do sistema isoladas da terra e todas as partes condutoras expostas do equipamento são aterradas por meio de um eletrodo de aterramento. Kumar *et al.* (2017) destaca que a maior disponibilidade da instalação em condições de falta é uma das principais vantagens do arranjo tipo IT, visto que o mesmo não oferece um caminho de baixa impedância. No entanto, em uma eventual falta linha-terra, é possível que haja uma tensão transitória de alta magnitude, comprometendo a segurança do sistema.

Mohammadi, Ajaeli e Stevens (2019) apontam que o principal uso desta configuração de aterramento são os sistemas de telecomunicações. Ademais, a configuração IT com alta resistência de aterramento pode ser usada em sistemas de distribuição em corrente contínua isolado ou não isolado, limitando a magnitude da corrente de uma falta linha-terra com a instalação de um resistor de aterramento ( $R_g$ ) apropriado.

A Figura 1.17 mostra a aplicação de um arranjo IT em uma microrrede c.c. unipolar e bipolar.

Figura 1.17 – Aterramento IT (a) rede unipolar e (b) rede bipolar.



Fonte: Autoria própria.

### 1.4.3 Dispositivos de proteção

Augustine *et al.* (2018) apresenta individualmente características de dispositivos comumente adicionados aos sistemas em corrente contínua para a detecção de falhas e proteção do conjunto. Dentre eles, destacam-se os sensores, usados para identificação de faltas, sendo normalmente um equipamento que tem como princípio o efeito hall e ainda para detecção de faltas tem-se os elementos direcionais. Relativamente aos elementos que atuam diretamente na proteção individual das cargas ou de um conjunto de cargas, os autores apontam para os relés, disjuntores, fusíveis e dispositivos de interrupção de arco voltaico.

Dentre todos os dispositivos mencionados anteriormente os mais comuns em aplicações de microrredes e nanorredes em corrente contínua de baixa tensão são os disjuntores e fusíveis e, dessa forma, este tópico dá foco para estes itens.

Os fusíveis são os elementos mais simples e possuem limitação de tensão, normalmente, de 4.200 V. No caso dos disjuntores c.c., são considerados mais confiáveis e com melhor custo-benefício possuindo diversos tipos no mercado, como por exemplo, os comuns de atuação mecânica, disjuntores de estado sólido, disjuntores híbridos e, para aplicações mais complexas, os disjuntores do tipo Z (Chandra, Singh e Pant, 2020; Alam *et al.*, 2023).

Segundo apresentado em Chandra, Sigh e Pant (2020) e Alam *et al.* (2023), devido aos diversos modelos disponíveis de disjuntores, deve-se levar em consideração diversos fatores na hora da seleção deste componente, como por exemplo, o tamanho do

componente, custo e perdas. Além disso, pondera-se a respeito da corrente nominal do dispositivo, dado que o mesmo deve suportar uma elevada corrente de *inrush*.

Os disjuntores de atuação mecânica possuem comutação ativa e passiva, mas, para algumas aplicações, sua atuação pode ser considerada lenta e, para tanto, uma alternativa são os disjuntores de estado sólido que possuem chaveamento mais rápido por meio de um IGBT ou tiristor. Mais recentemente, ainda de acordo com os autores, tem-se os disjuntores híbridos, que são capazes de lidar com altas correntes com redução de perdas, além de elevada frequência de chaveamento e capacidade de suportar altas tensões.

Por fim, os autores abordam a respeito do disjuntor tipo Z. Este disjuntor é empregado em sistemas mais complexos, devido à capacidade de limitação de corrente de falta de modo bidirecional. Para mais, este dispositivo é capaz de discriminar faltas e alterações de carga no sistema. Todavia, apesar dos aprimoramentos tecnológicos, este tipo de disjuntor possui dois problemas: a não possibilidade de proteção prolongada e o fato de requerer elevada corrente transitória para sua atuação.

Na NDCC implementada pelo GEDAE na Ilha das Onças são empregados como dispositivos de proteção: disjuntores c.c. e c.a. para as cargas, fusíveis e dispositivos de proteção contra surtos, além dos sistemas de proteção individual embutidos nos equipamentos que formam a rede.

### **1.5 Vantagens de redes em corrente contínua**

Desde sua concepção, as microrredes e nanorredes em corrente contínua apresentam algumas vantagens em relação às redes em corrente alternada. Dessa forma, para este tópico buscou-se na literatura trabalhos que apresentem as vantagens das microrredes de distribuição em corrente contínua que podem também ser aplicadas às nanorredes de distribuição em corrente contínua.

Primeiramente, Balaji *et al.* (2022) comenta a respeito da menor complexidade de sistemas em corrente contínua com atuação de fontes renováveis. Segundo os autores, não há, nesse caso, a necessidade de sincronização ou regulação de potência ativa. Além disso, enfatizam ainda sobre a melhor estabilidade e confiabilidade do sistema.

Complementarmente, Ilyushin *et al.* (2023) aborda sobre a estrutura simplificada de uma microrrede c.c. em relação à c.a., o que acarreta menor custo de implementação.

Além disso, no caso de uma rede híbrida, há a maior capacidade de manter os parâmetros de qualidade de energia durante interrupções da rede c.a., se for o caso.

Calzadilla *et al.* (2022) frisa a possibilidade de operação em diversos níveis de tensão dependendo da aplicação e a facilidade no intercâmbio de potência entre os barramentos do sistema formado por mais de uma microrrede ou nanorrede em corrente contínua.

Em Pires, Pires e Cordeiro (2023) é feita uma lista com várias vantagens associadas às microredes e nanorredes de distribuição em corrente contínua. Na lista, focalizam-se o incremento da eficiência no acoplamento das fontes, devido a menos estágios de conversão c.c./c.a.; a presença dos elementos armazenadores de energia, que ajuda a promover maior eficiência global do sistema; a capacidade de atendimento direto de cargas c.c., novamente eliminando estágios de conversão c.a./c.c. no ponto de alimentação da carga; a menor intensidade do efeito pelicular; e a maior confiabilidade ocasionada pela capacidade de operação em modo ilhado.

## **1.6 Cargas motrizes em redes de corrente contínua**

No contexto de comunidades remotas ou isoladas, o intuito de implementação de redes em corrente contínua é a energização de cargas que contribuam para o aprimoramento da qualidade de vida da população residente na localidade. Dentre essas, citam-se cargas que empregam motores elétricos e são utilizadas cotidianamente, como por exemplo, geladeiras, bombas d'água, eletrodomésticos como liquidificador e ventilador, entre outros. Além disso, destaca-se ainda, para a região norte do país, a presença de motores elétricos em despoldadeiras de aço.

Sabry *et al.* (2020) faz uma revisão da literatura e apresenta os principais tipos de motores utilizados em determinadas cargas presentes em residências que podem ser supridas por redes em corrente contínua. Segundo os autores, o motor universal é o mais utilizado em eletrodomésticos, bem como em algumas ferramentas elétricas, uma vez que possui a característica de operação tanto em corrente contínua quanto em corrente alternada. Além disso, para as cargas motrizes baseadas no motor universal, quando a alimentação do equipamento é realizada em c.c. no intervalo de 50 V a 300 V é alcançado maior eficiência e prolongamento da vida útil em comparação à alimentação c.a. (Sabry *et al.*, 2017).

Para cargas motrizes de refrigeração que possuem compressores, bem como para as bombas d'água, os motores comumente aplicados, para uma configuração em corrente alternada são os de indução com velocidade variável. Por outro lado, para uma rede em corrente contínua suprindo cargas também em corrente contínua, o motor BLDC (do inglês *brushless direct current motor*) é a alternativa mais empregada na manufatura destas cargas (Sabry *et al.*, 2020; Sabry *et al.*, 2017).

Durante a operação de cargas motrizes em redes c.c. pode-se identificar impactos na qualidade de energia e eficiência energética. Mediante isto, visando apoiar as análises presentes nesta dissertação, no capítulo subsequente são tratados eventos da qualidade de energia, do tipo transitórios, de curta e longa duração, assim como aspectos relacionados à eficiência energética com enfoque em redes c.c.

## 2 QUALIDADE DE ENERGIA E EFICIÊNCIA ENERGÉTICA EM REDES EM CORRENTE CONTÍNUA EM BAIXA E EXTRA BAIXA TENSÃO

### 2.1 Introdução

A preocupação com a Qualidade de Energia Elétrica (QEE) vem aumentando ao passar do tempo dado os avanços tecnológicos e a possibilidade de melhor controle dos parâmetros elétricos durante o fornecimento de eletricidade. Junior (2018) indica que até o final da década de 1980, quando se falava em QEE, normalmente considerava-se apenas a frequência, nível de tensão e tempo de interrupção no fornecimento de energia, visto que as cargas supridas até então não eram exigentes quanto às especificações elétricas durante o seu atendimento.

O cenário mencionado anteriormente muda quando o sistema de distribuição de energia passa a atender cargas com características não lineares que impactam a QEE, como exemplo, motores elétricos acionados por dispositivos eletrônicos. Conforme discutido em Mayoral *et al.* (2023), a presença de cargas não lineares pode criar problemas como distorção harmônica e desequilíbrios de tensão, bem como afundamentos e/ou aumentos de tensão. Estes e outros fenômenos de QEE são abordados mais detalhadamente em tópicos subsequentes.

Ainda conforme Mayoral *et al.* (2023), no que diz respeito às microrredes, há a preocupação com a qualidade de energia tanto em operação ilhada quanto conectada à rede elétrica convencional. Para o primeiro caso, os autores afirmam que como os fenômenos mais comuns que afetam a QEE são variações de tensão e distorções harmônicas, enquanto que para as microrredes conectadas tem-se, além das distorções harmônicas, desbalanceamento de tensão, fluxo reverso de potência, dentre outros.

Mediante todas as preocupações com a qualidade de energia, juntamente com a utilização de novas tecnologias envolvendo as minirredes, microrredes e nanorredes (em corrente alternada ou contínua), normas e padrões foram criados e são atualizados, a fim de mensurar e caracterizar eventos relacionados à QEE, bem como o funcionamento de equipamentos durante estes eventos e os impactos em componentes do sistema elétrico. Cita-se como exemplo de entidades que trabalham na formulação e edição destes padrões e normas o *Institute of Electrical and Electronic Engineers (IEEE)*, *International Electrotechnical Commission (IEC)* e *International Organization for Standardization*

(ISO) e, em âmbito nacional, a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL). Embora a maior parte das normas e padrões considera sistemas ou redes operando em c.a.

Para além das preocupações com a qualidade de energia, outro ponto de enfoque em estudos relacionados com energia elétrica é a Eficiência Energética (EE). Maiores esforços envolvendo o assunto surgiram nos anos 70, durante a crise no petróleo. Na ocasião, vários países industrializados organizaram-se e fundos significativos foram levantados para financiamento de projetos de EE e fontes renováveis de energia, a fim de diminuir a dependência dos combustíveis fósseis. Para atingir as metas estabelecidas, sem comprometer significativamente a produção e evolução industrial, foram criadas entidades para trabalhar com enfoque em EE. O Reino Unido, por exemplo, criou o *Energy Saving Trust* (EST), já os Estados Unidos, o *Office of Energy Efficiency and Renewable Energy* (EERE).

No Brasil, por sua vez, por meio do Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica (PROCEL), tornou-se possível a implementação de diversas medidas voltadas para o aumento da eficiência de bens e serviços, tais como identificação de equipamentos e eletrodomésticos mais eficientes, promoção de boas práticas para uso eficiente de energia em residências, indústria e comércio; entre outros (EPE, 2023).

Assim, o incremento da eficiência energética pode ser proveniente tanto do uso de equipamentos mais eficientes, quanto de estratégias de operação e melhorias na rede de energia elétrica, a fim de se minimizar perdas, tornando o fornecimento mais eficiente. Logo, é de suma importância considerar os fundamentos que circundam a eficiência energética buscando aproveitar da melhor maneira possível os equipamentos supridos pela rede e os demais benefícios atrelados. Cabe ressaltar, ainda, que o conceito de eficiência energética não está atrelado à restrição do uso da eletricidade e sim fazer mais ou, pelo menos, o mesmo utilizando menos recursos e preservando o conforto e qualidade.

## **2.2 Eventos de qualidade de energia elétrica**

Como citado anteriormente, as microrredes e nanorredes em corrente contínua podem estar sujeitas a problemas envolvendo qualidade de energia. Estes acontecimentos são classificados como eventos transitórios, eventos de curta duração ou eventos de longa duração, além de estarem relacionados à tensão e corrente na rede. A seguir é discutido acerca dos principais eventos de qualidade de energia em microrredes e nanorredes em corrente contínua.

### 2.2.1 Eventos transitórios

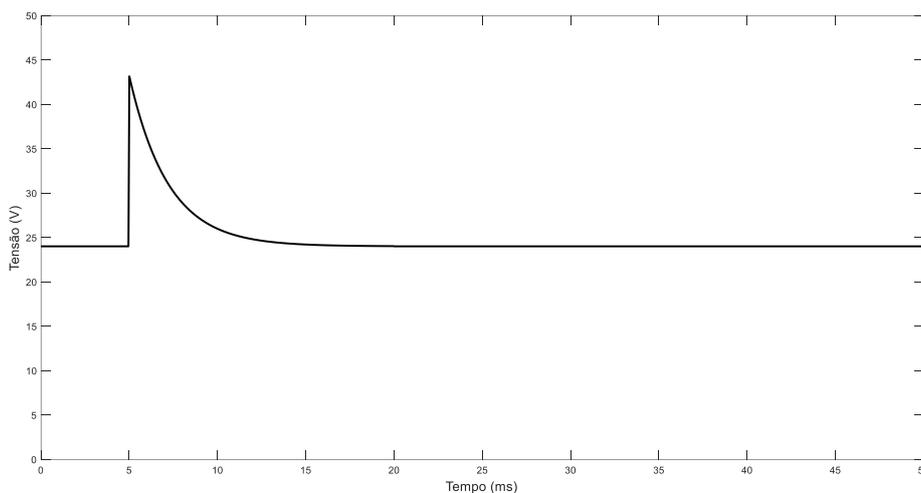
A avaliação da qualidade de energia, geralmente, é baseada na análise do perfil de tensão, conforme explanado em Ostrowska *et al.* (2022). Nos casos das minirredes e nanorredes, se esta for c.a. ou então c.c. conectada a uma rede c.a., eventos transitórios podem ocorrer devido a, por exemplo, chaveamento de banco de capacitores e mudança nas cargas do sistema. No caso de uma rede c.c. não conectada à rede c.a. outros fatores podem ocasionar eventos transitórios como o tipo de carga e conversores eletrônicos associados ao acionamento e funcionamento destas cargas, como será apresentado posteriormente como resultado desta pesquisa.

Ressalta-se, ainda, que com o desenvolvimento contínuo de novas tecnologias de geração de energia, a capacidade das fontes renováveis de energia tem aumentado, fazendo-se necessário a implementação de equipamentos que impactam a qualidade de energia, como relés, conversores c.c./c.c. e inversores. Sendo assim, há a necessidade de padronização dos limites aceitáveis de nível de tensão durante um evento deste tipo, a fim de que seja feito um correto dimensionamento dos elementos conectados à rede (Ostrowska *et al.*, 2022; Torres, 2019).

Ademais, um evento transitório pode ser dividido em duas categorias. O transitório impulsivo, que é definido como um evento repentino na condição nominal de tensão ou corrente, com polaridade unidirecional e que possui curta duração. Por outro lado, o evento transitório oscilatório é definido por uma rápida variação da tensão, corrente ou ambos, podendo a polaridade do evento transitório apresentar alternância entre valores positivos e negativos. A caracterização de um evento transitório impulsivo se dá pelo tempo de subida, tempo de descida e a magnitude do pico, enquanto um transitório oscilatório é caracterizado por meio do seu espectro de frequência e duração do evento (IEEE Std. 1159, 2019).

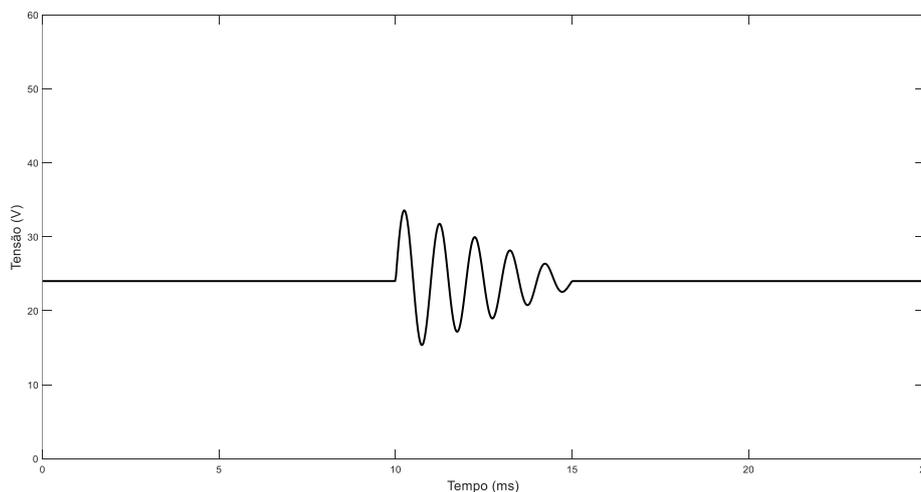
Nas Figuras 2.1 e 2.2 mostram-se, respectivamente, um exemplo de evento transitório impulsivo e de evento transitório oscilatório, considerando a tensão nominal c.c. em 24 V.

Figura 2.1 – Exemplo de evento transitório impulsivo em um perfil de tensão c.c. de 24 V<sub>c.c.</sub>



Fonte: Autoria própria.

Figura 2.2 – Exemplo de evento transitório oscilatório em um perfil de tensão c.c. de 24 V<sub>c.c.</sub>



Fonte: Autoria própria.

### 2.2.2 Variações de curta e longa duração

As variações de curta e longa duração se distinguem, além do tempo de ocorrência do evento, por fatores como a magnitude, de acordo com o visto em Broeck, Stuyts e Driesen (2018).

O padrão IEEE Std. 1159 distingue os eventos transitórios em instantâneos, momentâneos e temporários, baseado na duração dos mesmos. Considera-se, ainda, a direção da variação, se positiva ou negativa, e baseado nos valores rms (do inglês - *Root Mean Square*) categoriza-se a variação em afundamento, elevação ou interrupção. Na Tabela 2.1 estão apresentadas as informações sobre as subcategorias das variações de curta duração.

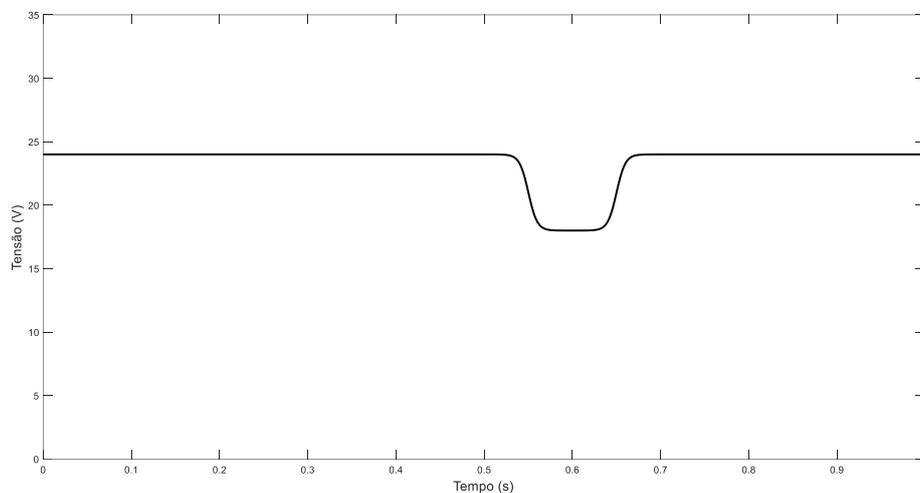
Tabela 2.1 – Classificação dos eventos de curta duração.

Tipo do evento	Categoria	Duração do evento	Magnitude da tensão (rms) em relação à tensão de referência
<b>Afundamento</b>	Instantânea	0,5 – 30 ciclos	
	Momentânea	30 ciclos – 3 seg.	0,1 – 0,9 p.u.
	Temporária	>3 seg. – 1 min.	
<b>Elevação</b>	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.
<b>Interrupção</b>	Momentânea	0,5 – 30 ciclos	
	Temporária	>3 seg. – 1 min.	< 0,1 p.u.

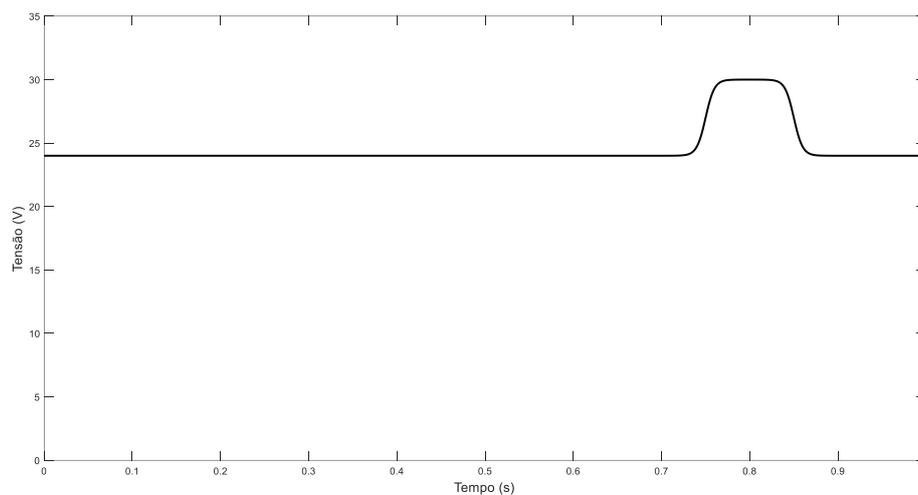
Fonte: Adaptado de IEEE Std. 1159.

Nas Figuras 2.3, 2.4 e 2.5 ilustram-se exemplos de afundamento, elevação e interrupção de curta duração, respectivamente, considerando um perfil de tensão c.c. nominal de 24 V.

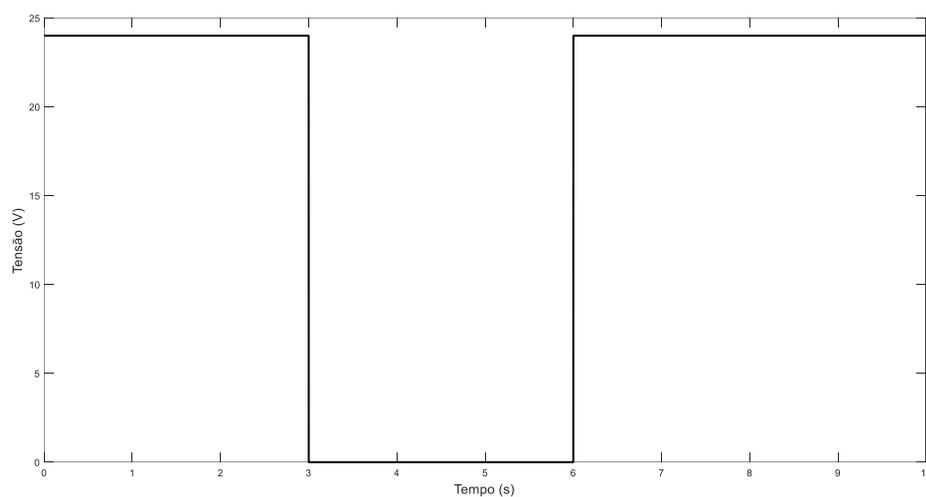
Figura 2.3 – Exemplo de afundamento de curta duração em um perfil de tensão de 24 V<sub>c.c.</sub>.



Fonte: Autoria própria.

Figura 2.4 – Exemplo de elevação de curta duração em um perfil de tensão de 24 V<sub>c.c.</sub>.

Fonte: Autoria própria.

Figura 2.5 – Exemplo de interrupção de curta duração em um perfil de tensão de 24 V<sub>c.c.</sub>.

Fonte: Autoria própria.

O padrão IEEE Std. 1159 define, ainda, as categorias para eventos que ocorrem em períodos longos, compreendidos por intervalos acima de um minuto. Na Tabela 2.2 são apresentadas as categorias dos eventos de longa duração, bem como suas respectivas magnitudes.

Tabela 2.2 – Classificação dos eventos de longa duração.

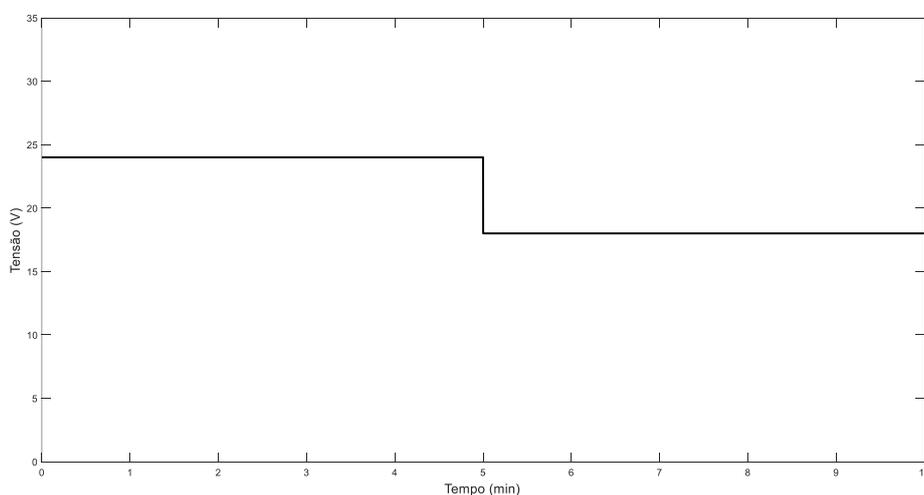
<b>Categoria</b>	<b>Duração do evento</b>	<b>Magnitude da tensão (rms) em relação à tensão de referência</b>
Subtensão	>1 min.	0,8 – 0,9 p.u.
Sobretensão		1,1 – 1,2 p.u.
Interrupção sustentada		0 p.u.

Fonte: Adaptado de IEEE Std. 1159.

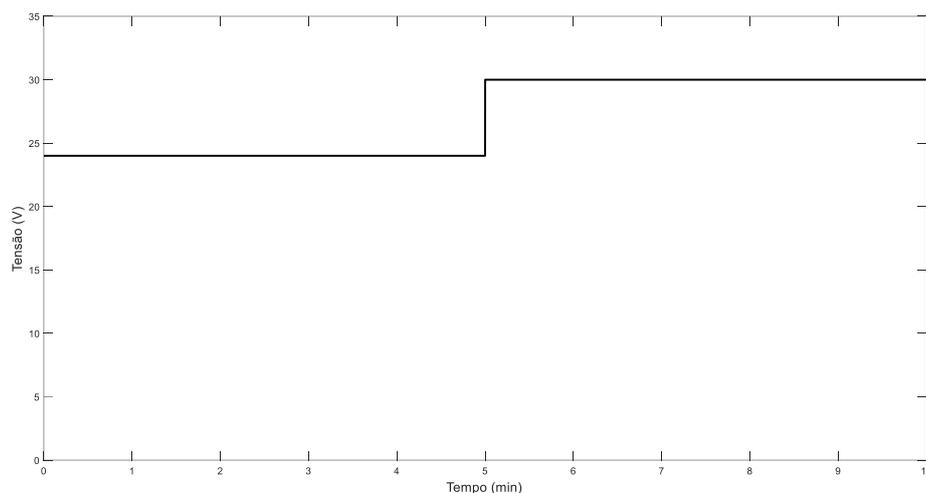
Pode-se associar as interrupções sustentadas, por exemplo, às faltas no barramento c.c., interrompendo o fornecimento de energia para o restante da rede. As sobretensões podem ser ocasionadas por variações na potência ou ainda por má atuação do regulador de tensão, podendo impactar no isolamento tanto do condutor quanto do equipamento conforme destaca Fonseca (2023). Em relação à subtensão, uma das principais falhas diz respeito a sobrecarga do sistema, podendo resultar na degradação do desempenho e confiabilidade do equipamento suprido pela rede.

Seguindo ainda o mesmo exemplo mostrado anteriormente, considerando um perfil de tensão c.c. nominal de 24 V, vê-se, respectivamente, nas Figuras 2.6, 2.7 e 2.8 a representação de subtensão, sobretensão e interrupção sustentada.

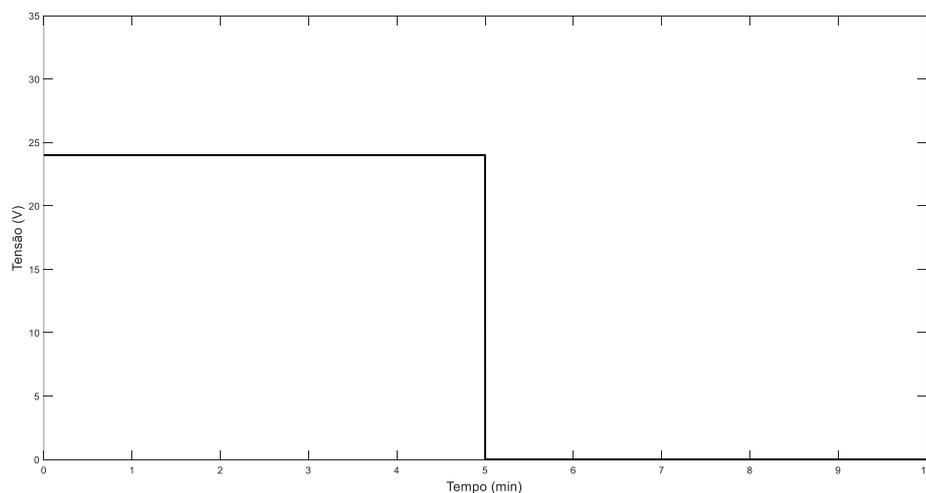
Figura 2.6 – Exemplo de subtensão de longa duração em um perfil de tensão de 24 V<sub>c.c.</sub>.



Fonte: Autoria própria.

Figura 2.7 – Exemplo de sobretensão de longa duração em um perfil de tensão de 24 V<sub>c.c.</sub>.

Fonte: Autoria própria.

Figura 2.8 – Exemplo de interrupção sustentada em um perfil de tensão de 24 V<sub>c.c.</sub>.

Fonte: Autoria própria.

Neste contexto, conforme destacado no trabalho de Fonseca (2023), o emprego de normas que envolvam a tolerância de equipamentos aos eventos supracitados são essenciais. Na norma europeia EN 50155 são definidos os limites de fornecimento de energia elétrica a equipamentos eletrônicos utilizados em sistemas ferroviários supridos em corrente contínua (CENELEC, 2017). Como exemplo de outras normas que seguem este escopo cita-se: EN 300 132-2 e ITU-T L.1200 para telecomunicações e centros de dados; EN 50163 para ferrovias eletrificadas e sistemas de trânsito rápido; IEC 61851-1 para redes de recarga de veículos elétricos e MIL-STD-704F para aviônicos (ETSI, 2019; ITU-T, 2012; CENELEC, 2020; IEC, 2017; *US Department of Defense*, 2004).

Mariscotti (2021) ainda ressalta que para equipamentos que operam em corrente alternada tem-se as normas IEC 61000-4-11 e IEC 61000-4-14, que tratam de técnicas de medição e ensaios de imunidade a quedas, curtas interrupções e variações de tensão, bem como a flutuações de tensão. Correspondentemente, tem-se a norma IEC 61000-4-29, que trata de técnicas de medição e ensaios de imunidades a quedas, curtas interrupções e variações de tensão para equipamentos elétricos e eletrônicos supridos em c.c., considerando diferentes especificações dos geradores (IEC, 2020; IEC, 2009; IEC CEI, 2000).

### 2.2.3 Harmônicos e Interharmônicos

No caso de um determinado sinal ser periódico, o mesmo pode ser representado por uma soma infinita de funções senoidais por meio da série de Fourier mais uma componente de frequência nula, com cada componente da soma possuindo uma determinada amplitude e fase. Com isso, a frequência das funções senoidais é um múltiplo inteiro ou harmônico da frequência da função periódica (Galhardo, 2006). Em um sistema em corrente contínua, como a frequência da fundamental é 0 Hz, por definição, não existe frequências harmônicas múltiplas da fundamental, contudo, pode haver tensões e correntes oscilantes que são denominadas de harmônicos ou interharmônicos, considerando a nomenclatura adotada em sistemas em corrente alternada (Whaite, Gainer e Kwasinski, 2015).

Os interharmônicos, em consonância com o padrão IEC 61000-2-1, são definidos como as componentes harmônicas não múltiplas inteiras da fundamental, podendo aparecer como frequências discretas ou como um espectro de larga faixa (IEC TR, 1990). Ainda, alguns autores, como Löfgren (2020), consideram subharmônicas aquelas componentes harmônicas cuja frequência está abaixo da frequência fundamental do sistema.

Devido às diferenças entre os sistemas c.a. e c.c., não necessariamente um método de análise de qualidade de energia de um sistema c.a. é adaptado para c.c., sendo por vezes necessária a criação de uma nova metodologia para análise conforme abordado em Hanlin *et al.* 2019 que apresenta a detecção de harmônicos e interharmônicos em microrrede c.c.

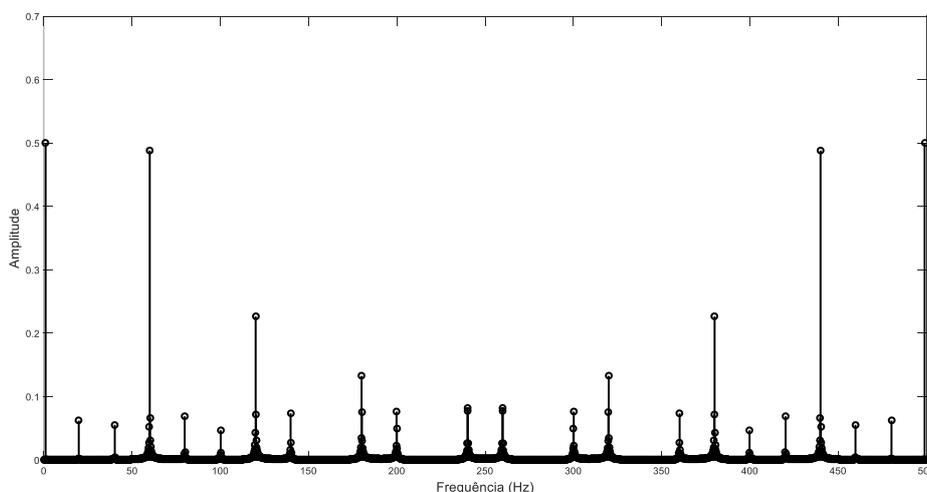
Para a classificação dos harmônicos ou interharmônicos geralmente há uma frequência de referência, que pode ser a componente alternada com maior magnitude no

lado c.c.. Além disso, pode-se ainda classificar como frequências espúrias no lado c.c. Broeck, Stuyts e Driesen (2018) e Torres (2019) abordam alguns problemas ocasionados pela presença de harmônicos e interharmônicos em microrredes em corrente contínua, como por exemplo a intensificação de perdas, diminuição da vida útil de equipamentos e instabilidade no barramento c.c.. Os harmônicos e interharmônicos causam ainda perdas adicionais nos capacitores de filtro e podem causar perturbações nos sinais de comunicação e dispositivos de medição.

Em sistemas em corrente alternada, Galhardo (2006) destaca que as principais fontes de injeção de harmônicos são as cargas com características não-lineares. Em relação às redes em corrente contínua pode-se citar como alguns fatores para o surgimento de componentes harmônicas as atuações de conversores de potência, como os inversores c.c./c.a. (geralmente introduzindo componentes harmônicas em baixa frequência na rede c.c.) e conversores c.c./c.c. (geralmente introduzindo componentes harmônicas de altas frequências na rede c.c.) por meio da comutação ou chaveamento de componentes eletrônicos. Outros fatores que impactam a rede com a presença de harmônicos e interharmônicos são a instabilidade do sistema, com oscilações e ressonâncias e o desbalanceamento de cargas que pode levar à distorção da forma de onda da corrente devido à assimetria das cargas presentes no sistema.

Na Figura 2.9 apresenta-se um exemplo de conteúdo espectral de uma forma de onda que contém harmônicos e interharmônicos.

Figura 2.9 – Exemplo de conteúdo espectral de uma forma de onda contendo harmônicos e interharmônicos.



Fonte: Autoria própria.

No que tange os padrões e recomendações envolvendo harmônicos, é possível verificar nos trabalhos de Li *et al.* (2022) Sepasi *et al.* (2023) e Ghosh e Zare (2023) uma explanação acerca dos principais padrões que envolvem o assunto, sendo citadas pelos autores: IEEE Std. 1124, IEEE Std. 519, IEEE Std. 1547, IEC 61000-3-2 e IEC 61000-3-16 (IEEE, 2003; IEEE, 2022; IEEE, 2018; IEC, 2018; IEC TS 2023). Destes, são aplicáveis para sistemas com suprimento em corrente contínua, os padrões IEEE Std. 1547 e IEC 61000-3-16.

#### 2.2.4 *Ripple*

Mariscotti (2007) utiliza em seu trabalho a definição de *ripple* conforme a norma IEC Std. 61000-4-7, sendo a variação em regime permanente do valor da grandeza elétrica (tensão ou corrente) durante o regime permanente de funcionamento do sistema elétrico (IEC, 2002). Barros, Apráiz e Diego (2019), considerando a norma IEC 161-02-10, caracteriza o *ripple* de tensão como uma tensão alternada sobreposta a uma tensão contínua (IEC, 1990). Semelhante a esta última definição, tem-se ainda a indicada pela norma IEEE Std. 1709, utilizada no trabalho de Fonseca (2023), onde o *ripple* é caracterizado como uma ondulação que ocorre sobre um nível de tensão contínua (IEEE, 2018). Como é possível verificar, existem várias normas ou padrões que classificam o evento de *ripple* e tratam do mesmo em dadas condições.

O *ripple* pode ser ocasionado por diversos fatores. Algumas fontes dessa ondulação são mencionadas na literatura como, por exemplo, o uso de sistemas retificadores c.a./c.c. e carregadores de baterias presentes em redes c.c., uso de conversores c.c./c.a., equipamentos que absorvem correntes pulsantes e certos tipos de cargas. Além disso, em casos de redes c.c. interconectadas com redes c.a., faltas e harmônicos no lado c.a. podem ocasionar a presença de *ripple* no barramento c.c. (IEC, 1999; Mariscotti, 2007; Barros, Apráiz e Diego, 2019; Wang *et al.*, 2021).

A presença da ondulação de tensão pode ocasionar problemas como sobreaquecimento de determinadas cargas, ruídos e perdas no sistema. Dessa forma, buscando quantificar o evento para aplicação de soluções que busquem amenizar os efeitos dessas ondulações, é possível definir o evento em termos matemáticos por meio da norma IEC 63282, apresentada mais detalhadamente no trabalho de Li *et al.* (2022). Nesse caso, o *ripple* de tensão é calculado conforme Equação (2.1) (IEC TR, 2020).

$$X_{ripple(rms)} = \sqrt{X_{rms}^2 - X_{cc}^2} \quad (2.1)$$

Sendo:

$$X_{rms} = \sqrt{\frac{1}{n_s} \times \sum_{t=t_0}^{t_n} x^2(t)}$$

$$X_{cc} = \frac{1}{n_s} \times \sum_{t=t_0}^{t_n} x(t)$$

Na expressão, os termos  $X_{rms}$  e  $X_{cc}$  correspondem, respectivamente, ao valor rms da tensão ou corrente no lado c.c. e o valor médio da tensão ou corrente no lado c.c., considerando um número de amostras  $n_s$  no intervalo  $t_0$  a  $t_n$ . Além disso,  $x(t)$  indica a variação temporal da tensão ou corrente no lado c.c..

Verifica-se, normalmente, dois parâmetros na caracterização de um estudo envolvendo *ripple*, a magnitude e a frequência de oscilação. Sendo assim, de posse dos perfis de onda em regime permanente, pode-se empregar dois indicadores, conforme apresentados em Barros, Apráiz e Diego (2019), consistindo no fator de pico do *ripple*, e fator rms do *ripple* calculados a partir das Equações 2.2 e 2.3, respectivamente.

$$fator\ de\ pico\ do\ ripple\ (\%) = \frac{X_{pico-vale}}{X_{cc}} \times 100\% \quad (2.2)$$

$$fator\ rms\ do\ ripple\ (\%) = \frac{X_{ripple(rms)}}{X_{cc}} \times 100\% \quad (2.3)$$

Nas Equações,  $X_{pico-vale}$ ,  $X_{cc}$  e  $X_{ripple(rms)}$  referem-se, respectivamente, ao valor de pico a vale do perfil com ondulação, o valor absoluto da componente contínua e o valor rms da ondulação.

Li *et al.* (2022), porém, destaca que com somente a avaliação da forma de onda  $x(t)$ , isto é, no domínio do tempo, não se pode identificar as componentes harmônicas presentes no lado c.c. e, portanto, deve-se escrever este termo no domínio da frequência conforme Equação (2.4) em que  $X_h$  e  $\varphi_h$  equivalem, respectivamente, à amplitude e fase da componente harmônica de ordem  $h$  e  $\omega = 2\pi f$ .

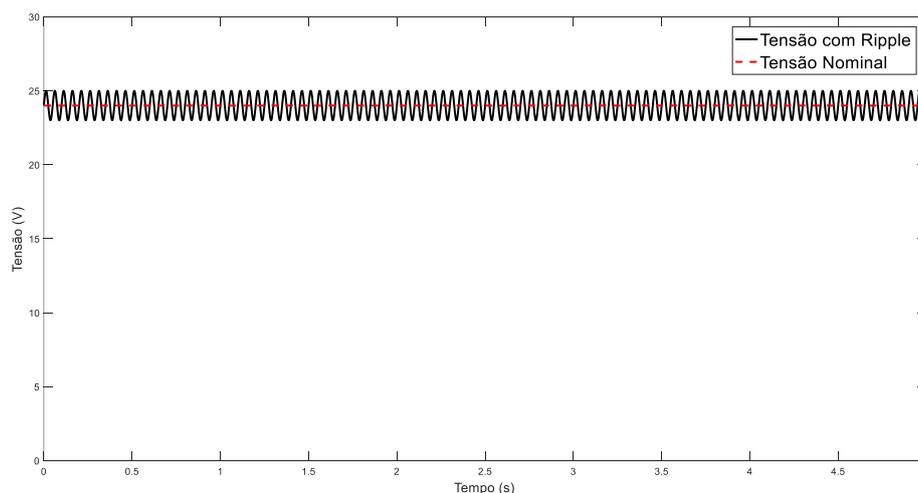
$$x(t) = X_{cc} + \sum_h X_h \times \text{sen}(h\omega t + \varphi_h) \quad (2.4)$$

De posse do sinal no domínio da frequência, outro parâmetro também apresentado em Barros, Apráiz e Diego (2019) é o Fator de Distorção de *Ripple* (RDF, do inglês *Ripple Distortion Factor*), que pode ser considerado como semelhante à THD em sistemas c.a. A definição matemática desta grandeza é apresentada na Equação 2.5 onde  $X_h$  diz respeito à amplitude de uma dada componente harmônica da ondulação obtida por meio da Transformada Discreta de Fourier (DFT, do inglês *Discrete Fourier Transform*) e  $X_{cc}$  o valor médio do sinal. Ressalta-se que o somatório da série é limitada até determinada ordem harmônica, conforme necessidade no estudo em que está sendo aplicada a DFT.

$$RDF = \sqrt{\sum_h \left(\frac{X_h}{X_{cc}}\right)^2} \times 100\% \quad (2.5)$$

Na Figura 2.10 ilustra-se um exemplo de *ripple* em um perfil de tensão com valor nominal médio de 24 V.

Figura 2.10 – Exemplo de *ripple* de tensão em um perfil de 24 V<sub>c.c.</sub>.



Fonte: Autoria própria.

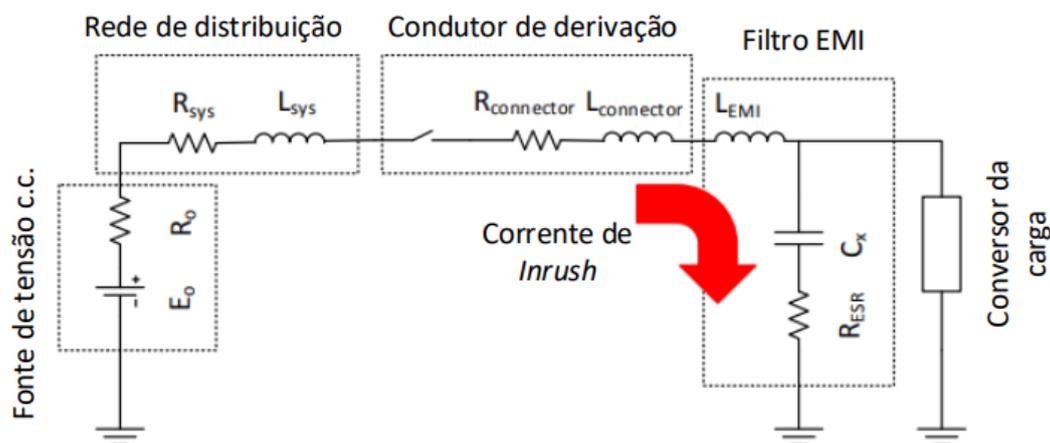
### 2.2.5 Correntes de *inrush*

A corrente de *inrush* é um evento transitório de partida caracterizado com uma corrente de entrada de elevada magnitude fornecida por uma fonte de alimentação durante a energização de determinados componentes da rede como transformadores, em casos de redes c.a., conversores eletrônicos de potência e cargas, como por exemplo, motores elétricos. Este evento é capaz afetar cargas mais sensíveis, devido poder ocasionar afundamentos de tensão, interferir também na própria fonte de alimentação do sistema, conexões e ocasionar acionamento de dispositivos de proteção. Por isso, deve ser

considerado durante a etapa de dimensionamento das proteções envolvidas na rede (Alam *et al.*, 2023; Kwak, Kim e Kim, 2020).

Durante a conexão em uma rede c.c. de um conversor de potência desenergizado, o capacitor de entrada do conversor que está associado ao filtro EMI irá carregar com uma corrente inicial de elevada magnitude. Na ocasião, a magnitude da corrente de *inrush*, bem como suas demais características, são definidas pela capacidade de fornecimento dos demais conversores conectados, do nível de tensão c.c. da rede, filtros, reatância e resistência do capacitor empregado no filtro dos conversores (Whaite, Grainger e Kwasinski, 2015; Torres, 2019). O fenômeno descrito é ilustrado na Figura 2.11.

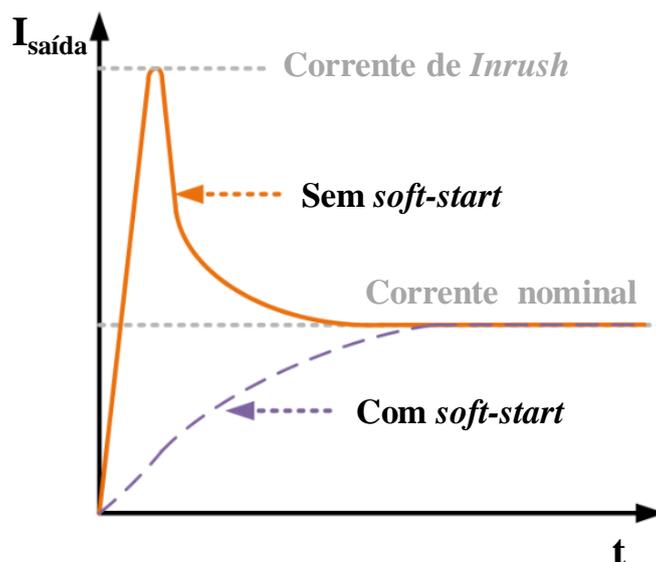
Figura 2.11 – Surgimento de corrente de *inrush* na entrada do conversor c.c. em uma rede em corrente contínua.



Fonte: Torres (2019).

É possível minimizar as correntes de *inrush* realizando o pré-carregamento do conversor antes que seja realizada a conexão deste à rede. Além disso, pode-se ainda ser aplicada uma metodologia de *soft-start* como utilizado para evitar este fenômeno em motores. Na literatura é possível encontrar diversos trabalhos abordando sobre metodologias de *soft-start*, a fim de se evitar as correntes de *inrush*, como por exemplo Kwak, Kim e Kim (2020), Sathishkumar *et al.* (2018), Clotea *et al.* (2017) e Giuliani *et al.* (2015). A Figura 2.12 mostra um exemplo da atuação de um *soft-start* na corrente de saída da fonte para uma determinada carga.

Figura 2.12 – Atuação de um *soft-start* na corrente de saída da fonte.



Fonte: Adaptado de Kwak, Kim e Kim (2020).

Destaca-se que o evento supracitado é abordado posteriormente durante apresentação dos resultados dos ensaios desenvolvidos para o presente trabalho. Ademais, reforça-se que foi aplicado um *soft-start* comercial e amplamente disponível no mercado para um dos tipos de cargas ensaiadas (bomba d'água).

### 2.3 Eficiência energética

Como mencionado anteriormente, o incremento da eficiência energética em uma rede de corrente contínua se dá de várias formas. Nesse sentido, é possível encontrar diversas abordagens na literatura a respeito do assunto. Em Sechilariu, Locment e Wang (2015), por exemplo, é proposto um sistema de controle a fim de se otimizar o gerenciamento de energia, tornando a rede apresentada pelos autores mais eficiente e, também, reduzindo o custo da energia devido a essa otimização. Em Kim *et al.* (2021), são apresentadas maneiras de se incrementar a eficiência energética de redes em corrente contínua presentes em navios. O trabalho apresenta uma rede com dois barramentos c.c. e considera aspectos como gerenciamento de energia, sistemas de armazenamento e tecnologias de estado sólido (*bus-switch*). Charad *et al.* (2021) faz uma revisão sobre a eficiência energética em redes híbridas c.c./c.a. analisando especialmente as perdas envolvidas.

Na NDCC implementada pelo GEDAE na Ilha das Onças, discutida detalhadamente no capítulo posterior, há a preocupação da equipe na transição de cargas

c.a. para c.c. buscando esse ganho de eficiência. Atualmente, em relação às cargas motrizes, objetos de estudo do presente trabalho, é possível encontrar refrigeradores, *freezer* e bombas d'água em corrente contínua sendo supridos pela NDCC. Como complementação da revisão literária acerca de eficiência energética em redes c.c., cita-se Sirsi e Ambekar (2015), Dastgeer *et al.* (2019) e Li *et al.* (2020) como exemplos de trabalhos que fazem a comparação direta entre redes c.c. e c.a. (considerando EE) e reforçam o quesito do uso de cargas c.c. para a maior eficiência energética do sistema.

Salienta-se que no presente trabalho é dado enfoque, no que diz respeito a EE, a forma de atendimento da carga, diretamente conectada à rede ou suprida por inversor. Assim como nos trabalhos mencionados anteriormente, também é feita uma comparação entre os tipos de cargas, c.c. ou c.a., atendidas pela rede, nesse caso, com foco no bombeamento de água.

Fregosi *et al.* (2015) exibem resultados positivos no incremento de EE no *design* de microrrede c.c. apresentada em seu trabalho, estando esta suprimindo cargas também c.c., o que ajuda no resultado favorável para melhoria da eficiência energética da microrrede.

De forma mais geral, o emprego de redes em corrente contínua em baixa e extra-baixa tensão apresentam vantagens técnicas em relação às redes em corrente alternada que acarretam o ganho de eficiência para o sistema. Uma das principais características diz respeito ao menor número de conversores inseridos no sistema, o que reduz perdas nas etapas de conversão c.c./c.c. e c.c./c.a. e também no processo de distribuição de energia, especialmente em menores distâncias. Além disso, destaca-se ainda uma integração mais eficiente das fontes renováveis de energia, como solar fotovoltaica, que possuem geração em corrente contínua, com estratégias de operação e redução de perdas nos conversores das fontes.

Ademais, redes em corrente contínua podem acrescer a eficiência energética devido à redução da necessidade de equipamentos auxiliares como transformadores e dispositivos para correção do fator de potência, normalmente empregados em redes convencionais em corrente alternada, reduzindo perdas no processo de operação e manutenção destes dispositivos. As redes c.c. permitem ainda melhor otimização do fluxo de energia às cargas, bem como melhorar o acoplamento de sistemas de armazenamento de energia (Modu *et al.*, 2023). Tudo isso contribui para maior eficiência energética global do sistema.

Outro ponto de destaque é o gerenciamento de carga de forma mais eficiente. Conhecendo as características das cargas, como a demanda em regime transiente e

permanente, a serem supridas pela rede, pode-se elaborar estratégias para que essas operem de forma mais eficiente. Neste caso, algumas alternativas como o uso de cargas nativas em corrente contínua ou então adaptações de cargas para que operem em c.c. são primordiais pois a demanda de energia é diretamente afetada, tornando a operação mais eficiente.

Ainda no aspecto de visão do lado da carga, um ponto fundamental é a compatibilização do nível de tensão c.c. entre fonte e carga para que seja eliminada a necessidade de conversores c.c./c.c. no ponto de alimentação. No caso de cargas em corrente alternada, caso o inversor não esteja dimensionado de forma que o mesmo trabalhe com carregamento adequado, esta operação se dará de forma menos eficiente.

Mediante todo o exposto, verifica-se a importância do conhecimento das informações operacionais e construtivas das cargas a serem supridas pela rede, bem como das características técnicas e operacionais dos subsistemas de geração, armazenamento e distribuição de energia elétrica, as quais impactam diretamente na qualidade e eficiência energética do sistema. Portanto, no capítulo posterior são apresentadas as cargas utilizadas no presente trabalho, bem como é feito o detalhamento da localidade onde o mesmo foi realizado.

### 3 NDCC NA ILHA DAS ONÇAS E CARGAS MOTRIZES EMPREGADAS NO ESTUDO

#### 3.1 Introdução

A Ilha das Onças localiza-se na Baía do Guajará, sob jurisdição administrativa do município de Barcarena, Estado do Pará. Trata-se de uma localidade com área territorial de aproximadamente 92 km<sup>2</sup> onde vivem cerca de 3.300 pessoas, tendo como principal atividade econômica o extrativismo, com destaque para o açaí (Nascimento, 2022). Ao total, mais de 20 comunidades habitam Ilha das Onças, sendo algumas delas: Araraquara, Bela Vista, Fé em Deus, Furo do Cavado, Furo da Conceição, dentre outras (Fernandes, 2020). Na Figura 3.1 é mostrado um mapa de localização da Ilha das Onças.

A comunidade na Ilha das Onças em que foi implantada a NDCC encontra-se a cerca de 10 km da cidade de Belém (capital do Estado do Pará) e o acesso é possível apenas por meio fluvial.

Figura 3.1 – Mapa de Ilha das Onças.



Fonte: Google Maps.

As comunidades presentes na Ilha das Onças não são atendidas pela rede elétrica convencional e, para ter acesso à eletricidade, recorrem a métodos tradicionais como o uso de geradores à diesel. O fornecimento geralmente não se dá continuamente ao longo do dia e sim por apenas algumas horas. Além dos impactos ambientais relacionados ao uso dos geradores à diesel, como a emissão de gases de efeito estufa, poluição do ar e poluição sonora, há também um elevado custo envolvido com a aquisição do combustível para a operação das máquinas.

A NDCC é fruto de um projeto de pesquisa iniciado em 2017 e está localizada na comunidade às margens do rio Piramanha. Na concepção inicial, a rede visava contemplar quatro residências e uma estação para recarga de uma embarcação elétrica (também planejada e desenvolvida pelo GEDAE/UFGA). Atualmente, depois de diversas expansões, o número de residências conectadas está em 11, além da estação de recarga, já mencionada, e uma igreja. Sendo assim, selecionou-se algumas destas residências ao longo da rede para a realização dos ensaios operacionais, apresentados detalhadamente no capítulo posterior.

Na comunidade em questão, um dos principais usos da energia é destinado ao bombeamento de água. Além disso, antes do início de operação da NDCC, o armazenamento de alimentos era realizado majoritariamente em reservatórios de isopor cheios de gelo. Este cenário foi contornado quando a nanorede foi expandida a ponto de ser possível a energização de equipamentos de refrigeração de alimentos e bebidas. Buscando maior eficiência, os equipamentos mencionados operam em corrente contínua, sendo conectados diretamente à rede. Considerando a importância que as cargas mencionadas possuem para a qualidade de vida da população, as cargas motrizes destinadas a bombeamento de água e refrigeração foram selecionadas para o estudo apresentado neste trabalho.

### **3.2 NDCC na Ilha das Onças**

Devido ser parte de um projeto de pesquisa, desde sua concepção inicial, para além do suprimento energético das residências, a NDCC implementada pelo GEDAE é utilizada para estudos acadêmicos, resultando na produção de trabalhos científicos, a exemplo de Bukirwa (2019), Costa (2021), Filho (2021), Costa (2022) e Fonseca (2023). Com isso, além de proporcionar melhoria na qualidade de vida dos moradores locais, a nanorede contribui para o desenvolvimento de pesquisa aplicada e formação de recursos humanos.

Em termos técnicos, conforme as características de topologia apresentadas no Capítulo 1, a NDCC trata-se de uma rede com tensão não regulada, unipolar e isolada, ou seja, não há conexão com a rede elétrica convencional c.a. e a NDCC opera com tensão nominal de 24 V<sub>c.c.</sub>, empregando um condutor positivo e um negativo. Adotou-se o referido nível de tensão seguindo alguns critérios principais, dentre eles: segurança,

disponibilidade no mercado de equipamentos que operam em 24 V<sub>c.c.</sub>, bem como a compatibilidade do nível de tensão de entrada dos inversores presentes nas residências.

Além disso, considerando a arquitetura da NDCC, é classificada como radial, possui aterramento do tipo TN e não há uma estratégia de controle específica implementada, apenas a atuação dos controladores de carga realizando o gerenciamento do fluxo de potência entre a geração, armazenamento e carga.

No atual estágio da NDCC, 11 residências e uma igreja, além da estação de recarga estão conectadas a ela. Na Figura 3.2 apresenta-se uma visão por satélite e a indicação das unidades conectadas à nanorede de distribuição.

Figura 3.2 – Localização das unidades conectadas à rede.



Fonte: Autoria própria.

Uma característica importante da rede é o fato de possuir geração e armazenamento distribuídos ao longo da mesma. Cabe ressaltar, contudo, que nem todas as unidades conectadas à NDCC possuem sistemas de geração e armazenamento, sendo algumas apenas carga para o conjunto completo. Atualmente, compõem a NDCC doze Geradores Fotovoltaicos (GFVs) com potência variando de 460 Wp a 1.600 Wp, detalhados na Tabela 3.1; dez sistemas de armazenamento de energia por meio de Banco de Baterias (BB), empregando diferentes tecnologias, cuja capacidade total é de 2.188,5 Ah.

Os SGAs (Sistemas de Geração e Armazenamento) completam-se com um controlador de carga, modelo XTRA3210N com tecnologia MPPT da fabricante Epever,

empregado nas edificações para fazer a interface de potência entre os respectivos sistemas de geração e armazenamento.

Tabela 3.1 – Características dos GFVs em cada subsistema.

Numeração do GFV	Indicação do SGA correspondente	Número de módulos fotovoltaicos	Fabricante	Potência nominal (Wp)	Potência total do GFV (Wp)
1		2	Soyang	315	630
2	R.1	2	Byd	330	660
3	Estação de recarga	4	Osda	400	1.600
4	R.3	2	Jypco	250	500
5	R.4	2	Byd	330	660
6	R.5	2	Jinko	550	1.100
7	R.6	2	Jinko	550	1.100
8	R.8	2	Jinko	550	1.100
9	Igreja	2	Jinko	550	1.100
10	R.9	2	Sunlight-pv	255	510
11		2	Solarworld	230	460
12	R.11	1	Jinko	550	550
<b>Total</b>	-	<b>25</b>	-	-	<b>9.970</b>

Fonte: Autoria própria.

Em relação ao armazenamento de energia, apenas os subsistemas intitulados Estação de Recarga e R.9 não possuem bancos de baterias. Dessa forma, os controladores de carga (da fabricante Epever, modelo TRACER para a estação de recarga) foram dispostos para operar na configuração apenas com os respectivos GFVs. Com isso, a energia produzida pelos módulos fotovoltaicos é injetada na rede c.c., auxiliando no carregamento dos bancos presentes nos demais subsistemas. As características dos bancos de baterias presentes na rede são destacadas na Tabela 3.2.

Tabela 3.2 – Características dos BBs em cada subsistema.

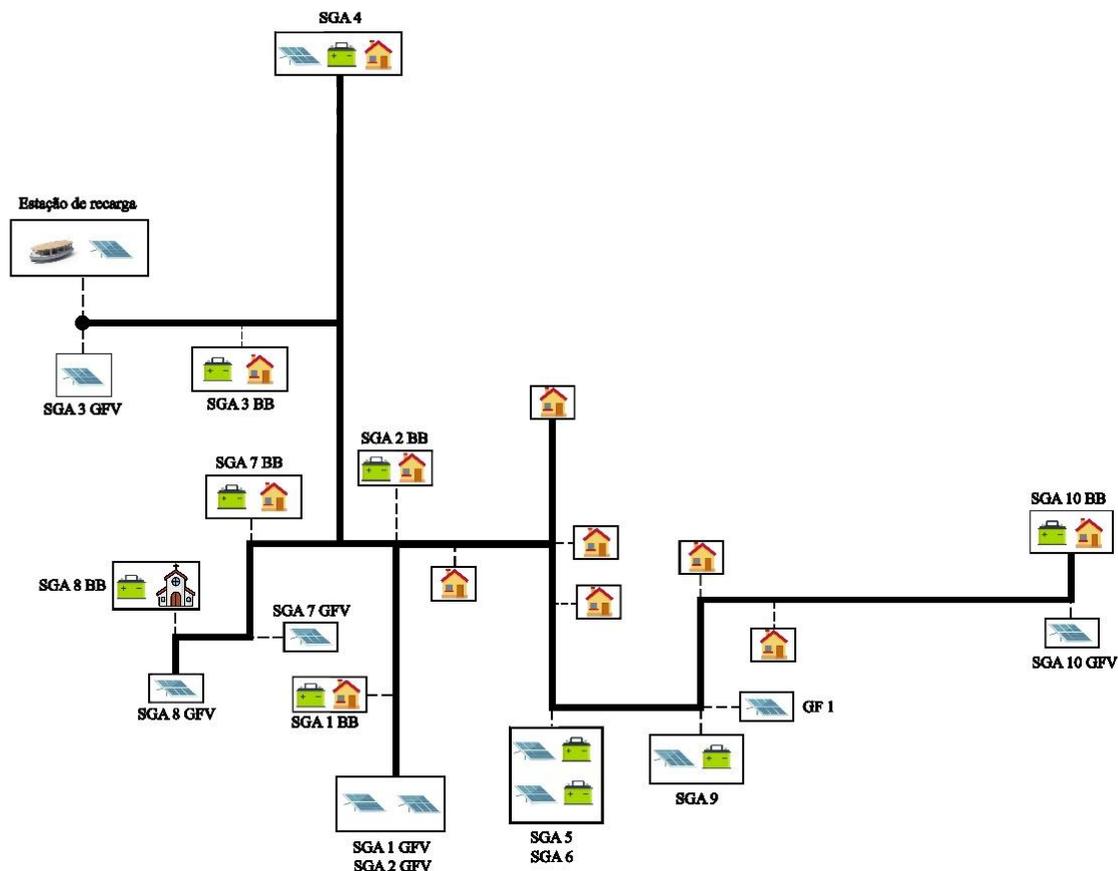
Indicação do SGA correspondente	Tecnologia da bateria	Número de baterias	Fabricante	Capacidade nominal (Ah)	Capacidade total do BB (Ah)
R.1	Chumbo-ácido	4	Outback	106	212
	Chumbo-ácido	2	Moura	220	220
R.3	Chumbo-ácido	2	Tudor	220	220
R.4	Chumbo-ácido	2	Tudor	220	220
R.5	Chumbo-ácido	4	Tudor	220	440
R.6	Chumbo-ácido	2	Tudor	220	220
R.8	Chumbo-ácido	4	Moura	111,3	222,6
Igreja	Íon de lítio	1	Unipower	100	100
R.9	Chumbo-ácido	4	Moura	111,3	222,6
R.11	Chumbo-ácido	2	Moura	111,3	111,3
<b>Total</b>	-	<b>27</b>	-	-	<b>2.408,5</b>

Fonte: Autoria própria.

A distribuição de energia ao longo da rede é realizada por cabos manufaturados em alumínio com seção transversal de 35 mm<sup>2</sup> e conta com aproximadamente 500 metros de comprimento. Internamente às edificações, as instalações c.c. possuem um cabo tronco em cobre com seção nominal de 10 mm<sup>2</sup>, de onde são ramificados os circuitos em condutos de modo aparente, visando facilitar na manutenção da instalação.

Vê-se, na Figura 3.3, o diagrama da NDCC na Ilha das Onças, com foco na apresentação dos SGAs que compõem o sistema.

Figura 3.3 – Diagrama da NDCC.

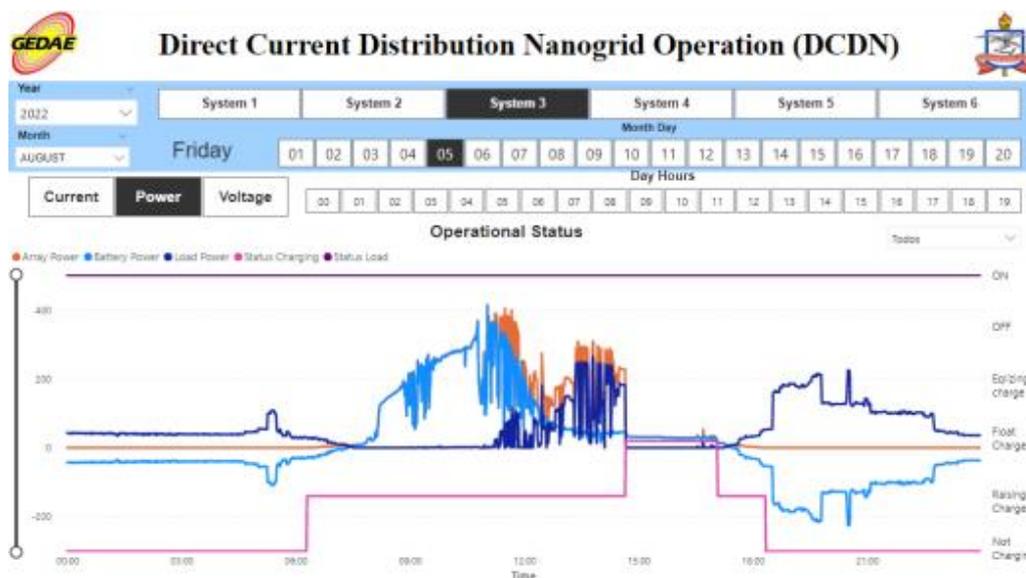


Fonte: Autoria própria.

Outra característica primordial da NDCC diz respeito a coleta de dados. Para o acompanhamento operacional do sistema, bem como para o desenvolvimento e produção de trabalhos científicos, faz-se a coleta de dados de cada subsistema com um registrador de dados (*datalogger*) do mesmo fabricante dos controladores de carga, modelo eLOG1. Por meio deste, registram-se os parâmetros elétricos tensão, corrente e potência dos GFVs, BBs e carga de cada um dos subsistemas com coleta de dados instantâneos a cada minuto. Posteriormente, os dados são tratados e apresentados em uma plataforma criada pelo GEDAE com o uso da ferramenta *Microsoft PowerBI* (Costa, 2022).

Mediante a análise dos dados coletados, é possibilitado a equipe realizar o diagnóstico energético do sistema, programar manutenções preventivas e corretivas quando for detectado que algum dos equipamentos não está operando da maneira desejada. Na Figura 3.4 apresenta-se a captura de uma das telas da plataforma desenvolvida para análise dos dados.

Figura 3.4 – Análise operacional do controlador de carga.



Fonte: Costa (2022).

### 3.3 Cargas motrizes

Inicialmente, fez-se um levantamento das cargas motrizes em todas as residências, considerando tanto aquelas com alimentação c.c. (energização do equipamento realizada diretamente pela rede), quanto c.a., com suprimento por intermédio de inversor. Dessa forma, considerando os dados de placa dos equipamentos, há a potência total de 2.648 W em cargas motrizes c.c. e 9.276 W em cargas motrizes c.a. Deste montante em corrente alternada, destaca-se que grande parte trata-se de liquidificadores, cuja potência de operação é limitada pelos inversores, conforme será mencionado mais detalhadamente posteriormente.

Para a produção do presente trabalho, foram selecionadas cargas motrizes consideradas essenciais usadas frequentemente pela maioria dos moradores e cuja operação cause maiores impactos na eficiência e qualidade de energia da NDCC: bombas d'água, refrigeradores e *freezers*.

#### 3.3.1 Bombas d'água

Anteriormente à NDCC, dois cenários principais envolvendo o bombeamento de água ocorriam, sendo esta atividade realizada por meio de motobomba à gasolina ou então de modelos em corrente alternada supridos por geradores à diesel. A partir do momento em que a rede atingiu a capacidade de atendimento de equipamentos que demandam maior potência, as motobombas à gasolina saíram de operação e os equipamentos

supridos em corrente alternada foram inseridos ao sistema da NDCC por intermédio de inversores. Posteriormente, foram inseridas bombas d'água que operam nativamente em corrente contínua para substituição de algumas bombas c.a.

Para as análises do presente trabalho, utilizou-se dois modelos de bombas d'água c.a. e um modelo de bomba c.c. As especificações de cada uma delas estão apresentadas na Tabela 3.3.

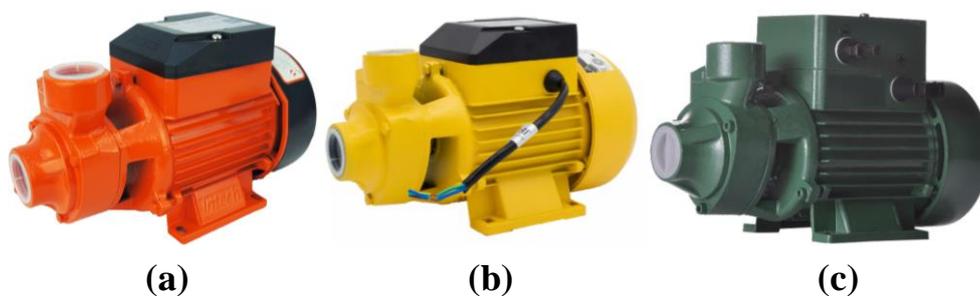
Tabela 3.3 – Características das bombas d'água utilizadas na pesquisa.

Fabricante	Modelo	Tipo de energização	Tensão nominal	Potência (W)	Vazão máxima ( $\frac{l}{h}$ )	Altura manométrica máxima (m)
Intech	BP500	c.a.	127 V <sub>c.a.</sub>	370	1.980	26
Ferrari	Acquaflow	c.a.	127 V <sub>c.a.</sub>	370	1.700	22
Thebe	TP ci	c.c.	44 V <sub>c.c.</sub>	272	1.500	34

Fonte: Adaptado de Intech [s.d.], Ferrari [s.d.] e Thebe [s.d.].

Mostra-se na Figura 3.5 fotografias dos três modelos supracitados, sendo (a) Intech BP500, (b) Ferrari Acquaflow e (c) Thebe TP ci.

Figura 3.5 – Bombas d'água (a) Intech BP500, (b) Ferrari Acquaflow e (c) Thebe TP ci.



Fonte: Autoria própria.

Mesmo que as bombas TP ci estejam atuando com tensão abaixo da tensão nominal, visto que a tensão nominal da nanorrede de distribuição é de 24 V<sub>c.c.</sub>, esta é maior do que a tensão mínima de operação do equipamento, 18 V<sub>c.c.</sub>. Além disso, após diversos testes iniciais em laboratório e em cenário real de operação na comunidade, o equipamento mostrou desempenho adequado no bombeamento de água. Outra característica importante da bomba d'água c.c. modelo TP ci é o fato de possuir um controlador interno com a função de MPPT. Dessa forma, o equipamento busca sempre

operar da melhor forma possível dadas as condições de alimentação, além de realizar uma partida suave da bomba.

Os ensaios operacionais envolvendo bombeamento de água foram realizados em cinco residências conectadas à NDCC. Na Tabela 3.4. são apresentadas as residências, bem como o modelo em operação em cada uma delas. Os resultados de medições e a análise da operação destes equipamentos são apresentadas no capítulo 5 da presente Dissertação.

Tabela 3.4 – Residências onde ocorreram ensaios nas bombas d'água.

<b>Residência</b>	<b>Modelo de bomba d'água</b>
R.3	Ferrari Acquaflow
R.4	Thebe TP ci
R.5	Intech BP500
R.8	Thebe TP ci
R.11	Thebe TP ci

Fonte: Autoria própria.

Especificamente a respeito da residência R.8, anteriormente à bomba c.c., operava na residência uma bomba d'água Ferrari Acquaflow. Dessa maneira, são também apresentados posteriormente, no capítulo 5, ensaios em ambos os modelos. Ainda, primeiramente, era utilizado na residência uma motobomba à gasolina modelo TWP50SH-GII, da fabricante Toyama (Figura 3.6), que também foi considerada no estudo. O equipamento possui potência nominal de 4.101 W e pode ser empregado em instalações com altura manométrica máxima de 30 m podendo atingir vazão máxima de 36.000 litros por hora.

Figura 3.6 – Bomba d'água TWP50SH-GII.



Fonte: Toyama [s.d.].

### 3.3.2 Refrigeradores e *freezer*

Como já mencionado, antes da NDCC, o armazenamento de alimentos e a refrigeração da água para consumo dependia da aquisição de gelo. Isso mudou quando a nanorrede começou a operar e passou a ser capaz de energizar equipamentos refrigeradores. Para as instalações residenciais, selecionou-se modelos que operam nativamente em corrente contínua para melhor eficiência. Atualmente, na NDCC são atendidas seis geladeiras duplex com 260 litros de capacidade e um *freezer* com 70 litros de capacidade, todos da fabricante Junges. Na Figura 3.7 mostra-se a fotografia dos dois modelos de equipamentos mencionados.

Figura 3.7 – (a) Geladeira duplex Junges e (b) *Freezer* 70 litros Junges.



Fonte: Adaptado de Junges [s.d.].

Os aparelhos possuem o mesmo compressor, sendo do modelo BAR43, da fabricante GelBox (Figura 3.8). Trata-se de um modelo contendo um motor hermético sem escovas com potência de 62 W. Além disso, como o mesmo é capaz de operar tanto com tensão de alimentação de 12 V<sub>c.c.</sub> quanto 24 V<sub>c.c.</sub>, o sistema conta com um controlador integrado.

Figura 3.8 – Compressor GelBox BAR43.



Fonte: Gelbox [s.d.].

Todavia, cabe ressaltar que, para além do compressor, há outros sistemas eletrônicos, como o de iluminação por exemplo, nos aparelhos e, com isso, a potência total informada pelo fabricante é de 72 W, sendo 3 A a corrente nominal quando a tensão de entrada é 24 V<sub>c.c.</sub>. As residências que possuem os modelos de aparelhos para refrigeração estão explicitadas na Tabela 3.5.

Tabela 3.5 – Residências onde ocorreram ensaios nos aparelhos de refrigeração.

<b>Residência</b>	<b>Tipo de equipamento</b>
R.2	Geladeira
R.3	Geladeira
R.4	Geladeira
R.5	Geladeira
R.6	Geladeira
R.7	<i>Freezer</i>
R.8	Geladeira

Fonte: Autoria própria.

Uma vez apresentadas as cargas estudadas no presente trabalho, bem como suas respectivas especificações e características, no capítulo subsequente é abordada acerca da instrumentação utilizada para a coleta de dados dos parâmetros elétricos nos testes realizados no laboratório do GEDAE/UFPA e em campo, na Ilha das Onças. A coleta de dados foi realizada por meio de dois instrumentos de medição e, para tanto, a título de validação do uso dos diferentes equipamentos, apresentam-se os resultados dos ensaios comparativos com diferentes cargas realizados no GEDAE/UFPA.

## 4 MATERIAIS E MÉTODOS PARA OS ENSAIOS

### 4.1 Introdução

O foco deste capítulo é a apresentação da instrumentação utilizada durante as campanhas de medição para coleta de dados de grandezas elétricas, sendo registrados dados de tensão e corrente, tanto no lado c.c. quanto c.a. Assim, expõe-se as especificações técnicas dos equipamentos; os testes realizados em bancada para a validação do uso dos instrumentos; os cálculos realizados para apresentação posterior dos dados; e uma breve descrição da metodologia dos ensaios em campo utilizando os instrumentos de medição.

### 4.2 Instrumentação empregada nas medições

Para o procedimento da coleta de dados de parâmetros elétricos utilizou-se dois equipamentos de medição, sendo o osciloscópio digital portátil 190-240s, da fabricante Fluke, para aquisição de tensão e corrente no lado c.c. durante os ensaios nas geladeiras e *freezer*; e tensão e corrente nos lados c.c. e c.a. para os ensaios nas bombas d'água; e o analisador de qualidade de energia modelo PowerPad 3945-B, da fabricante AEMC, para obtenção de tensão e corrente no lado c.a. (saída dos inversores) nos ensaios das bombas d'água.

Em relação ao osciloscópio digital, o mesmo possui uma taxa de amostragem de até 1,25 GS/s quando todos os quatro canais estão em uso. Além disso, a largura de banda do instrumento é de 200 MHz, podendo realizar leituras de até 1.000 Vrms.

Pertencente ao conjunto do osciloscópio, usou-se, para as leituras de tensão, pontas de prova com garras do tipo jacaré; a exatidão destas pontas de prova é de  $\pm 1\%$  da leitura para valores em corrente contínua e em corrente alternada até 20 kHz.

Na coleta de dados de corrente com o equipamento em questão, utilizaram-se duas sondas, a primeira modelo 80i-110s da fabricante Fluke para aquisição em corrente contínua e a segunda, para corrente alternada, modelo HR30, da fabricante Minipa. Ambas as sondas de corrente possuem conexão via terminal BNC com impedância de 50  $\Omega$ , sendo compatíveis, assim, com o osciloscópio digital.

Na Tabela 4.1 apresenta-se a exatidão correspondente a cada escala e nível de corrente em que os equipamentos podem registrar. Ademais, na Figura 4.1 mostra-se tanto o osciloscópio digital utilizado, quanto as pinças de tensão e sondas de corrente.

Tabela 4.1 – Especificações elétricas quanto a exatidão na leitura das sondas de corrente utilizadas.

Sinal de saída (escala)	Fluke 80i-110s		Minipa HR30	
	100 mV/A	10 mV/A	100 mV/A	
<b>Exatidão</b>				
<b>Corrente de entrada c.a. ou c.c. pico</b>	50 mA a 10 A	± 3% da leitura + 50 mA	-	± 1% da leitura + 2 mA
	50 mA a 30 A	-	± 4% da leitura + 50 mA	± 1% da leitura + 2 mA
	50 mA a 40 A	-	± 4% da leitura + 50 mA	-
	40 A a 80 A	-	± 12% da leitura + 50 mA	-
	80 A a 100 A	-	± 15% da leitura	-

Fonte: Adaptado de Fluke [s.d.] e Minipa [s.d.].

Figura 4.1 – (a) Osciloscópio digital, (b) garras de tensão do tipo jacaré, sonda de corrente (c) HR30 e (d) sonda de corrente 80i-110s.



Fonte: Fonseca (2021).

No que diz respeito ao analisador de qualidade de energia Powerpad 3945-B, o instrumento possui frequência de amostragem de 256 amostras por ciclo e é capaz de realizar leituras de tensão c.a., por meio das pinças do tipo jacaré que o acompanham, de até 480 Vrms na configuração monofásica e até 960 Vrms (fase-fase) na configuração

polifásica, ambos com resolução de 0,1 V e exatidão de  $\pm 0,5\%$  do valor medido. Há, ainda, a possibilidade de leitura de componentes de tensão c.c. com variação de 15 V a 680 V, nesse caso com resolução de 0,1 V e exatidão de  $\pm 1\%$  do valor medido.

O analisador de qualidade de energia é compatível com várias sondas de corrente disponíveis no portfólio do próprio fabricante. Para o desenvolvimento do referido trabalho, o modelo empregado foi o MN193-BK, da fabricante AEMC. Com este equipamento, é possível realizar leituras de corrente c.a. em duas escalas, 5 mA a 6 A ou 200 mA a 120 A, ambas com exatidão típica de  $\pm 1\%$  do valor medido. Mostra-se, na Figura 4.2 o conjunto analisador Powerpad 3945-B, as garras de tensão tipo jacaré e a sonda de corrente empregadas.

Figura 4.2 – (a) Analisador de qualidade de energia, (b) garras de tensão tipo jacaré e (c) sonda de corrente MN193-BK.



Fonte: Adaptado de Socintec (2024) e Jensen (2024).

### 4.3 Teste comparativo entre os instrumentos de medição

Como dois equipamentos com especificações diferentes foram utilizados para coleta de dados, inicialmente fez-se testes no laboratório do GEDAE, a fim de se verificar a diferença na leitura dos instrumentos. Sendo assim, selecionou-se algumas cargas em corrente alternada (Tabela 4.2) para serem supridas por intermédio de um inversor. O modelo de inversor aplicado no teste é o mesmo que se encontra nas residências atendidas pela NDCC na Ilha das Onças, trata-se do IP500-21, da fabricante Epever (Figura 4.3). A

energização do lado c.c. do inversor se deu mediante uma fonte de alimentação c.c. da fabricante Xantrex, modelo XDC 100-60, com capacidade de fornecer até 100 V e 60 A.

Tabela 4.2 – Cargas utilizadas no teste comparativo.

Carga	Fabricante	Modelo	Tensão nominal (V <sub>c.a.</sub> )	Potência nominal (W)
Lâmpada fluorescente compacta	G-Ligh	SHT	127	20
Lâmpada fluorescente compacta	Empalux	FE11516	127	15
Ventilador	Loren Sid	Tufão M2	127	160
Liquidificador	Arno	Clip pro juice	127	700
Furadeira	Bosch	GSB-16	127	850

Fonte: Autoria própria.

Figura 4.3 – Inversor Epever IP500-21.



Fonte: Opus Solar (2024).

Com a utilização de um conector múltiplo, criou-se um ponto comum onde foram alocadas as garras de tensão de ambos os equipamentos. Além disso, as sondas de corrente HR30 e MN193-BK foram postas em série no condutor de fase, na saída c.a. do inversor. A bancada de testes montada para a realização dos ensaios é mostrada na Figura 4.4.

Figura 4.4 – Bancada de testes.



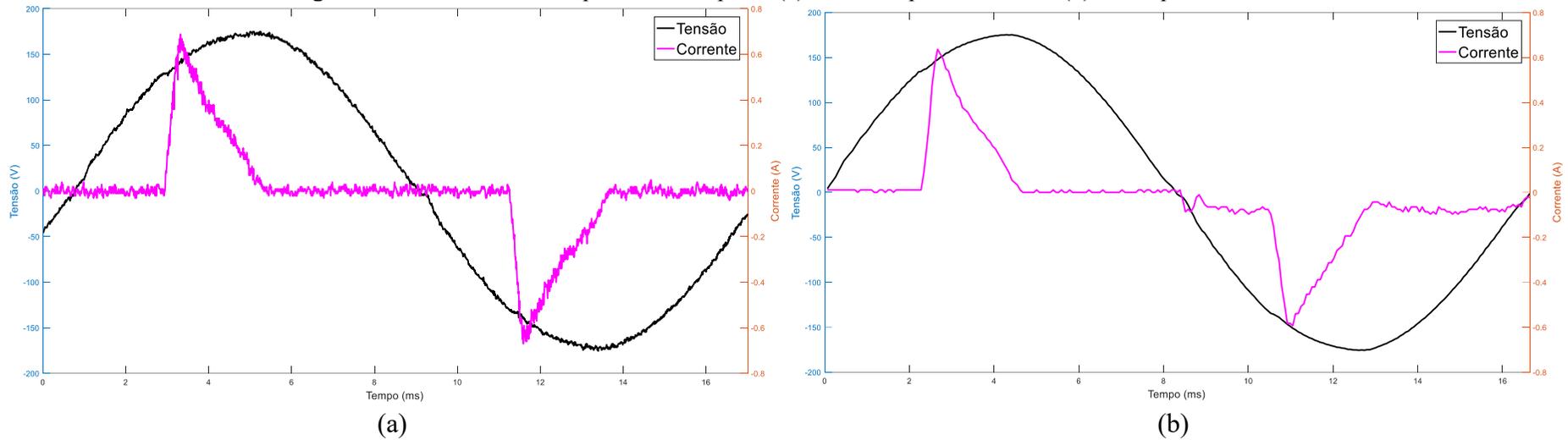
Fonte: Autoria própria.

Os resultados obtidos no teste comparativo realizado são apresentados nas Tabelas 4.3 a 4.10, sendo o desvio percentual calculado em relação ao osciloscópio digital. As formas de onda obtidas os ensaios utilizando os dois instrumentos estão apresentadas nas Figuras 4.5 a 4.12.

Cabe ressaltar que o analisador de qualidade de energia Powerpad 3945-B faz o salvamento de apenas um ciclo de onda por vez. Devido à diferença de taxa de amostragem entre os dois instrumentos de medição e buscando uma melhor comparação visual entre as formas de onda, utilizou-se para exibição somente um ciclo também para o osciloscópio digital 190-240s, mesmo que a captura deste tenha sido mais extensa. Todavia, os valores rms foram calculados usando todas as amostras coletadas pelo osciloscópio digital.

Outro ponto de destaque em relação à análise da coleta de dados dos instrumentos diz respeito aos valores de potência. Na Tabela 4.11 estas informações são apresentadas bem como o desvio entre os valores associados.

Figura 4.5 – Formas de onda para uma lâmpada: (a) Osciloscópio 190-240s e (b) Powerpad 3945-B.



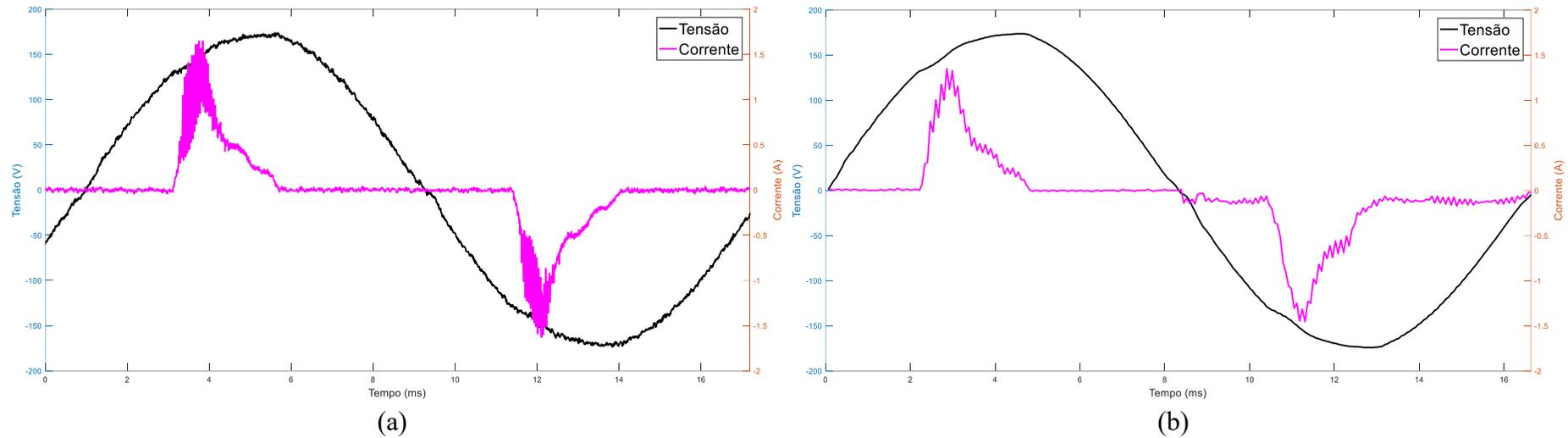
Fonte: Autoria própria.

Tabela 4.3 – Comparação entre as medições: uma lâmpada.

Instrumento	Três maiores leituras de tensão – pico positivo (V)	Três menores leituras de tensão – pico negativo (V)	Três maiores leituras de corrente – pico positivo (A)	Três menores leituras de corrente – pico negativo (A)	Tensão rms (Vrms)	Corrente rms (Arms)	Diferença percentual entre as tensões rms (%)	Diferença percentual entre as correntes rms (%)
Osciloscópio 190-240s	175,790 174,803 173,816	-175,605 -174,618 -173,631	0,727 0,687 0,667	-0,670 -0,660 -0,650	123,704	0,198	0,137	2,183
Powerpad 3945-B	174,967 174,636	-175,630 -175,298 -174,967	0,636 0,614 0,593	-0,593 -0,582 -0,539	123,874	0,194		

Fonte: Autoria própria.

Figura 4.6 – Formas de onda para duas lâmpadas: (a) Osciloscópio 190-240s e (b) Powerpad 3945-B.



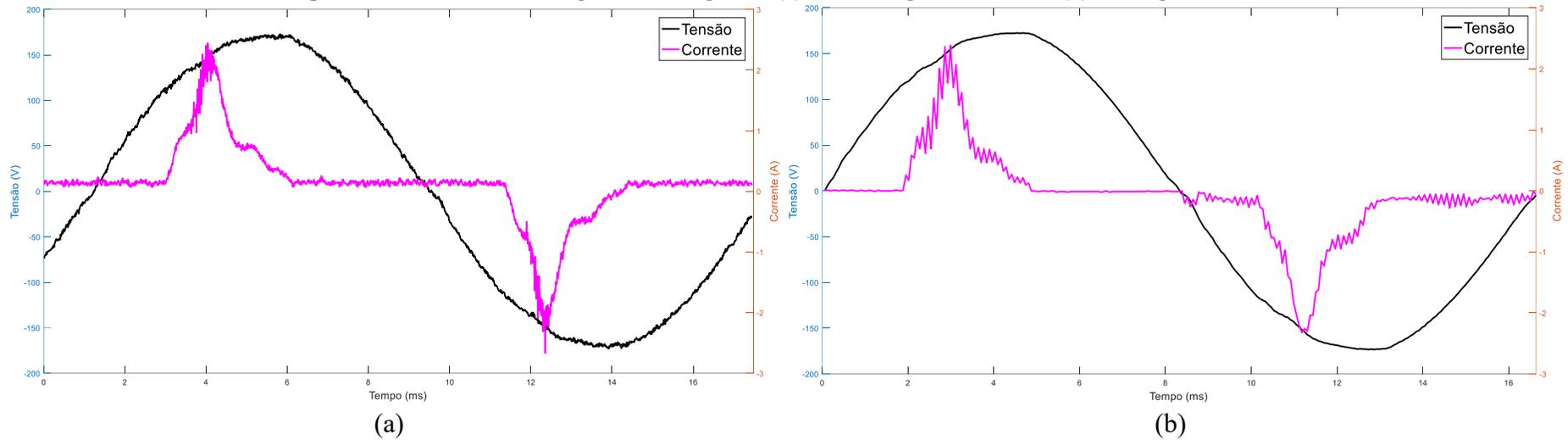
Fonte: Autoria própria.

Tabela 4.4 – Comparação entre as medições: duas lâmpadas.

Instrumento	Três maiores leituras de tensão – pico positivo (V)	Três menores leituras de tensão – pico negativo (V)	Três maiores leituras de corrente – pico positivo (A)	Três menores leituras de corrente – pico negativo (A)	Tensão rms (Vrms)	Corrente rms (Arms)	Diferença percentual entre as tensões rms (%)	Diferença percentual entre as correntes rms (%)
Osciloscópio 190-240s	174,819 173,831 172,844	-173,708 -172,721 -171,733	1,647 1,607 1,567	-1,629 -1,599 -1,589	123,259	0,392	0,375	5,168
Powerpad 3945-B	173,600 173,268 172,937	-174,263 -173,931 -173,600	1,348 1,326 1,175	-1,456 -1,445 -1,316				

Fonte: Autoria própria.

Figura 4.7 – Formas de onda para três lâmpadas: (a) Osciloscópio 190-240s e (b) Powerpad 3945-B.



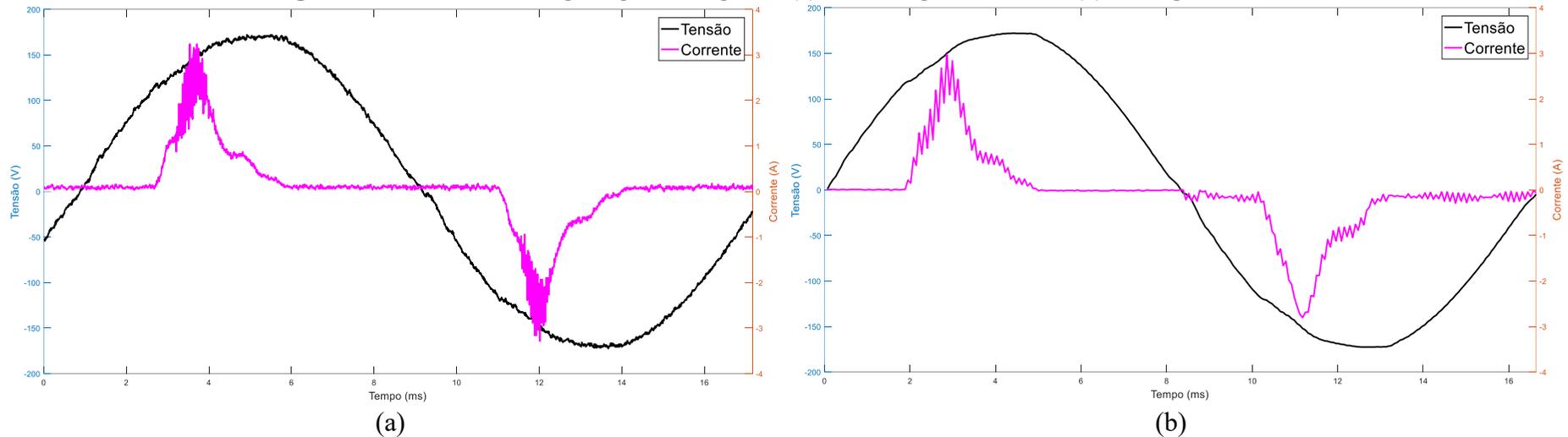
Fonte: Autoria própria.

Tabela 4.5 – Comparação entre as medições: três lâmpadas.

Instrumento	Três maiores leituras de tensão – pico positivo (V)	Três menores leituras de tensão – pico negativo (V)	Três maiores leituras de corrente – pico positivo (A)	Três menores leituras de corrente – pico negativo (A)	Tensão rms (Vrms)	Corrente rms (Arms)	Diferença percentual entre as tensões rms (%)	Diferença percentual entre as correntes rms (%)
Osciloscópio 190-240s	172,880 171,893 170,905	-172,695 -171,708 -170,720	2,522 2,442 2,402	-2,667 -2,309 -2,230	122,420	0,660	0,906	1,111
Powerpad 3945-B	172,564 172,232 171,901	-173,268 -172,937 -172,564	2,384 2,362 2,071	-2,319 -2,297 -2,254				

Fonte: Autoria própria.

Figura 4.8 – Formas de onda para quatro lâmpadas: (a) Osciloscópio 190-240s e (b) Powerpad 3945-B.



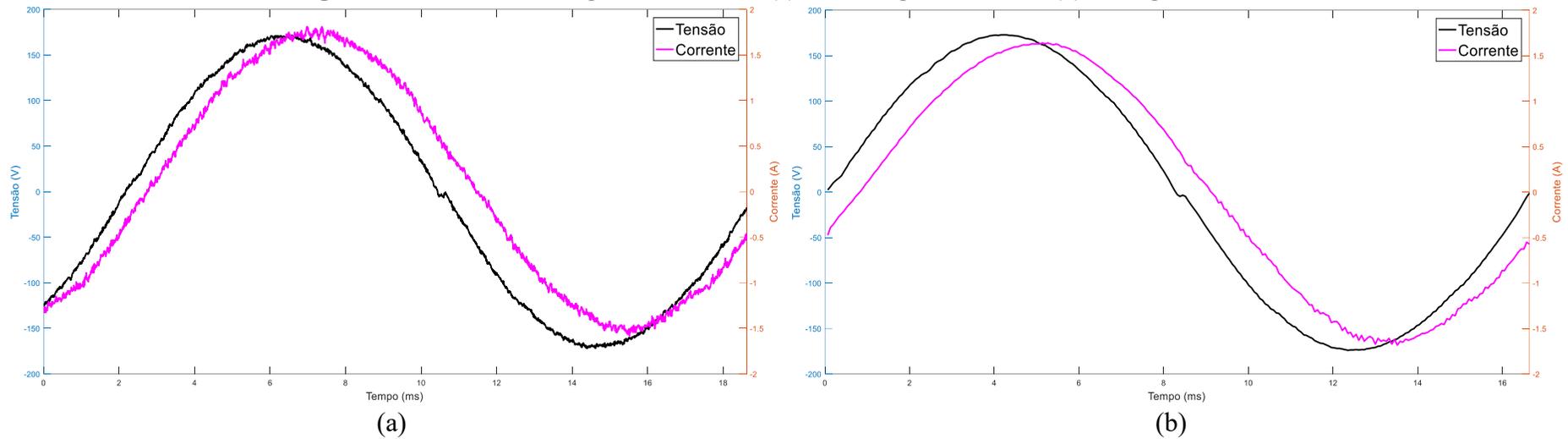
Fonte: Autoria própria.

Tabela 4.6 – Comparação entre as medições: quatro lâmpadas.

Instrumento	Três maiores leituras de tensão – pico positivo (V)	Três menores leituras de tensão – pico negativo (V)	Três maiores leituras de corrente – pico positivo (A)	Três menores leituras de corrente – pico negativo (A)	Tensão rms (Vrms)	Corrente rms (Arms)	Diferença percentual entre as tensões rms (%)	Diferença percentual entre as correntes rms (%)
Osciloscópio 190-240s	174,125 173,137 172,150	-172,459 -171,471 -170,484	3,319 3,299 3,240	-3,284 -3,165 -3,046	123,191	0,805	0,229	2,711
Powerpad 3945-B	172,232 171,901 171,570	-172,564 -172,232 -171,901	2,977 2,837 2,675	-2,805 -2,729 -2,686				

Fonte: Autoria própria.

Figura 4.9 – Formas de onda para o ventilador: (a) Osciloscópio 190-240s e (b) Powerpad 3945-B.



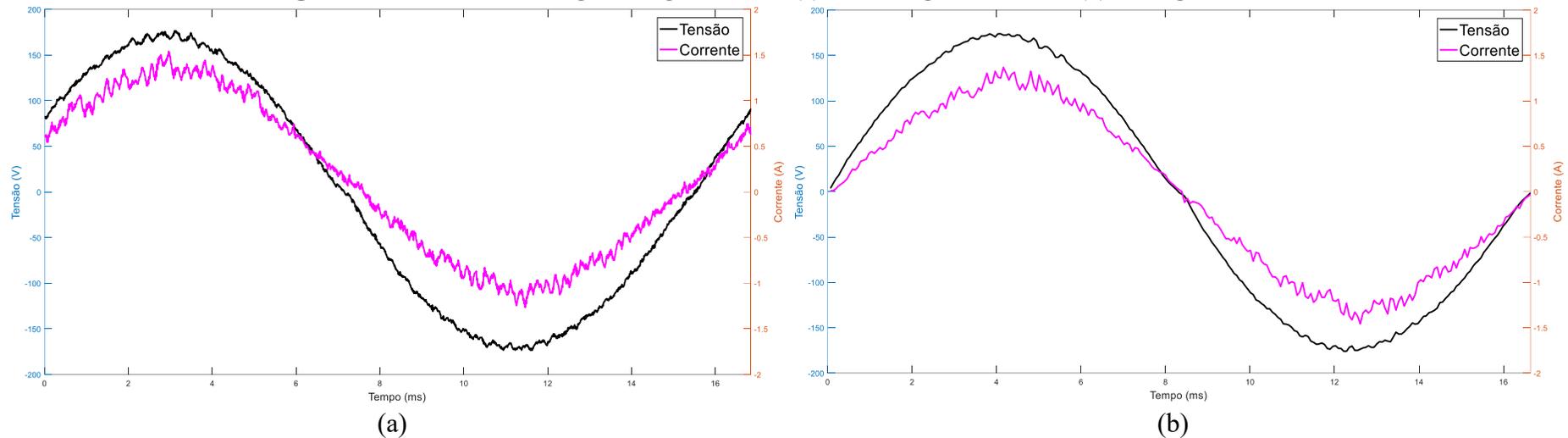
Fonte: Autoria própria.

Tabela 4.7 – Comparação entre as medições: ventilador.

Instrumento	Três maiores leituras de tensão – pico positivo (V)	Três menores leituras de tensão – pico negativo (V)	Três maiores leituras de corrente – pico positivo (A)	Três menores leituras de corrente – pico negativo (A)	Tensão rms (Vrms)	Corrente rms (Arms)	Diferença percentual entre as tensões rms (%)	Diferença percentual entre as correntes rms (%)
Osciloscópio 190-240s	172,745 171,760 170,775	-171,945 -170,960 -169,975	1,808 1,789 1,769	-1,564 -1,584 -1,544	119,352	1,130	2,666	1,942
Powerpad 3945-B	172,937 172,564 172,232	-173,931 -173,600 -173,268	1,639 1,629 1,618	-1,683 -1,650 -1,672	122,534	1,152		

Fonte: Autoria própria.

Figura 4.10 – Formas de onda para o liquidificador: (a) Osciloscópio 190-240s e (b) Powerpad 3945-B.



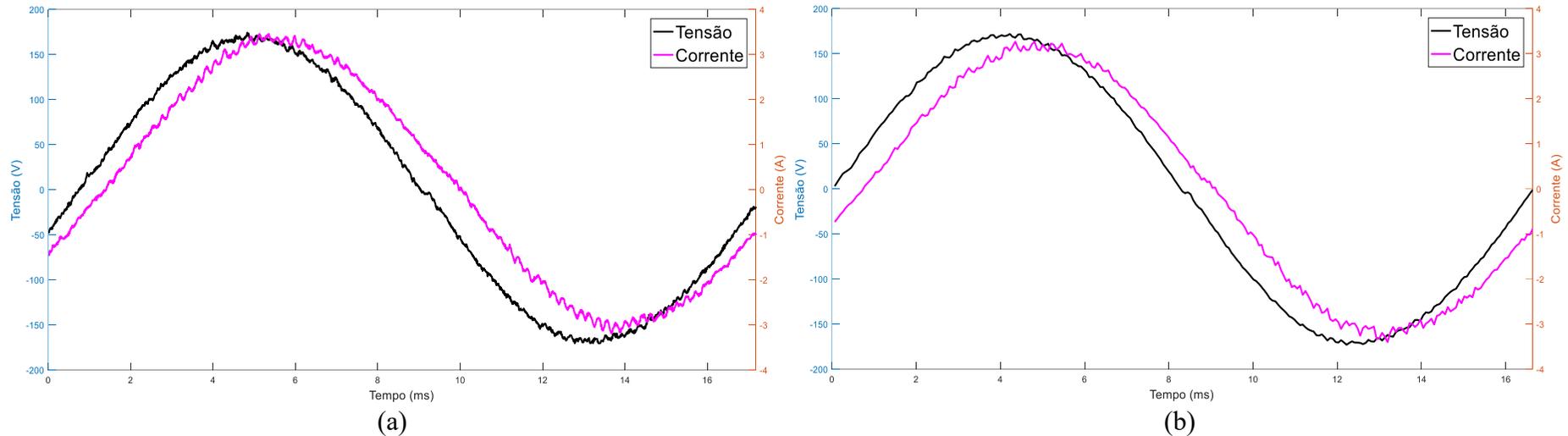
Fonte: Autoria própria.

Tabela 4.8 – Comparação entre as medições: liquidificador.

Instrumento	Três maiores leituras de tensão – pico positivo (V)	Três menores leituras de tensão – pico negativo (V)	Três maiores leituras de corrente – pico positivo (A)	Três menores leituras de corrente – pico negativo (A)	Tensão rms (Vrms)	Corrente rms (Arms)	Diferença percentual entre as tensões rms (%)	Diferença percentual entre as correntes rms (%)
Osciloscópio 190-240s	176,396 175,408 174,420	-173,309 -172,321 -171,333	1,541 1,521 1,501	-1,265 -1,245 -1,225	123,420	0,904	0,174	3,879
Powerpad 3945-B	173,931 173,600 172,937	-175,961 -174,967 -173,600	1,370 1,326 1,316	-1,456 -1,413 -1,370	123,206	0,869		

Fonte: Autoria própria.

Figura 4.11 – Formas de onda para o ventilador e liquidificador: (a) Osciloscópio 190-240s e (b) Powerpad 3945-B.



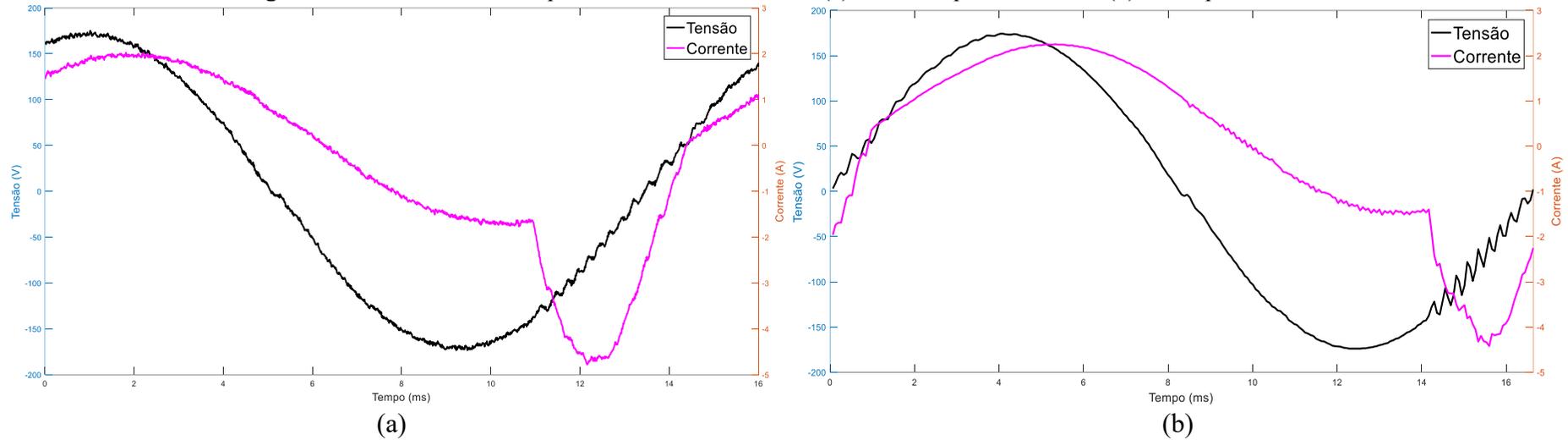
Fonte: Autoria própria.

Tabela 4.9 – Comparação entre as medições: ventilador e liquidificador.

Instrumento	Três maiores leituras de tensão – pico positivo (V)	Três menores leituras de tensão – pico negativo (V)	Três maiores leituras de corrente – pico positivo (A)	Três menores leituras de corrente – pico negativo (A)	Tensão rms (Vrms)	Corrente rms (Arms)	Diferença percentual entre as tensões rms (%)	Diferença percentual entre as correntes rms (%)
Osciloscópio 190-240s	174,266 173,275 172,285	-170,427 -169,437 -168,446	3,559 3,539 3,519	-3,186 -3,166 -3,146	120,318	2,253	0,066	0,769
Powerpad 3945-B	171,901 171,570 171,238	-172,937 -172,232 -170,865	3,268 3,225 3,204	-3,398 -3,333 -3,312	120,398	2,236		

Fonte: Autoria própria.

Figura 4.12 – Formas de onda para ventilador e furadeira: (a) Osciloscópio 190-240s e (b) Powerpad 3945-B.



Fonte: Autoria própria.

Tabela 4.10 – Comparação entre as medições: ventilador e furadeira.

Instrumento	Três maiores leituras de tensão – pico positivo (V)	Três menores leituras de tensão – pico negativo (V)	Três maiores leituras de corrente – pico positivo (A)	Três menores leituras de corrente – pico negativo (A)	Tensão rms (Vrms)	Corrente rms (Arms)	Diferença percentual entre as tensões rms (%)	Diferença percentual entre as correntes rms (%)
Osciloscópio 190-240s	176,247 175,256 174,266	-173,399 -172,408 -171,418	2,023 2,003 1,983	-4,782 -4,762 -4,742	119,843	1,821	2,215	4,740
Powerpad 3945-B	174,263 173,931 173,600	-173,931 -173,600 -173,268	2,254 2,244 2,233	-4,423 -4,337 -4,326	122,497	1,907		

Fonte: Autoria própria.

Tabela 4.11 – Comparação entre as medições: potência aparente, potência ativa e fator de potência.

Carga	Potência aparente (VA)		Potência ativa (W)		Fator de potência		Diferença percentual entre as potências aparentes (%)	Diferença percentual entre as potências ativas (%)	Diferença percentual entre os fatores de potência (%)
	Osciloscópio 190-240s	Powerpad 3945-B	Osciloscópio 190-240s	Powerpad 3945-B	Osciloscópio 190-240s	Powerpad 3945-B			
Uma lâmpada	24,537	24,034	14,528	16,595	0,592	0,690	2,04	14,23	16,62
Duas lâmpadas	48,416	51,110	28,251	33,657	0,583	0,658	5,56	19,13	12,86
Três lâmpadas	80,849	82,488	50,971	53,508	0,630	0,648	2,03	4,98	2,89
Quatro lâmpadas	99,255	102,179	60,921	65,404	0,613	0,640	2,95	7,36	4,28
Ventilador	134,960	141,249	129,444	135,278	0,959	0,957	4,66	4,51	0,14
Liquidificador	111,590	107,075	109,965	106,569	0,985	0,995	4,05	3,09	1,02
Ventilador e liquidificador	271,171	269,274	261,957	259,750	0,965	0,964	0,70	0,84	0,14
Ventilador e furadeira	218,266	233,675	164,510	171,471	0,753	0,733	7,18	4,23	2,64

Fonte: Autoria própria.

Apesar dos instrumentos possuírem algumas diferenças como taxa de amostragem e faixa de medição, visto que apenas no osciloscópio é possível ajustar o período em que a mesma acontece, mediante a análise dos resultados verificou-se que, mesmo com as incertezas das medições, a diferença entre os valores de tensão e corrente coletados pelo analisador de energia e pelo osciloscópio digital não possuem grande disparidade. Todavia, ao se analisar o conjunto completo dos dados coletados, devido às diferenças mencionadas, verifica-se um desvio um pouco mais acentuado no que diz respeito às potências ativas e fator de potência das cargas, especialmente para baixas potências, como o caso dos ensaios com uma e duas lâmpadas. Alguns fatores contribuem para isso como por exemplo pela diferença dos modelos de sensores utilizados em cada uma das sondas de corrente pelos respectivos fabricantes, bem como a escala de leitura do parâmetro elétrico.

Isto poderia ser uma limitação para a aplicação simultânea dos instrumentos na NDCC de Ilha das Onças se a monitoração fosse ser realizada com cargas de baixa potência. Além disso, cita-se como outra possível limitação, o tempo de resposta para um dado evento. Apenas com o osciloscópio digital é possível realizar o ajuste do período do ensaio, proporcionando um maior número de possibilidades para identificação de eventos. Nesta perspectiva, seria dificultoso a detecção simultânea de eventos em dois pontos distintos da rede com ambos os instrumentos. Por conseguinte, dadas as características de testes em campo, foi possível aplicá-los para coleta simultânea de tensão e corrente no lado c.a. para os ensaios realizados nas bombas d'água em regime permanente.

#### **4.4 Metodologia dos ensaios operacionais em campo**

Para avaliação dos impactos das cargas motrizes na NDCC, foram propostos os seguintes ensaios:

- Medição, com o osciloscópio digital, de parâmetros elétricos em corrente contínua no ponto de alimentação das residências: partida e regime permanente;
- Medição, com o osciloscópio digital, da partida das bombas d'água (no lado c.c. do inversor para os equipamentos c.a.) até que as mesmas atinjam o regime permanente;

- Medição em regime permanente das bombas d'água c.a. no lado c.c. do inversor e saída c.a. com o osciloscópio digital e saída do *soft starter* com o analisador de qualidade de energia Powerpad 3945-B.

Com os ensaios propostos buscou-se identificar eventos envolvendo qualidade de energia elétrica, especialmente afundamentos de tensão devido ao pico de demanda durante a partida das cargas motrizes, correntes de *inrush* e *ripple*. Além disso, por meio da coleta de dados em regime permanente foi possível a realização de cálculos envolvendo o consumo de energia elétrica, fundamental para o estudo de eficiência energética. Ainda sobre eficiência energética, as informações levantadas serviram para o estudo comparativo em termos de economia em relação ao uso de motobombas à combustível fóssil.

No capítulo subsequente são apresentados os esquemas de conexão para os ensaios desenvolvidos, bem como os dados coletados e as avaliações pertinentes.

## 5 ENSAIOS OPERACIONAIS E ESTUDO COMPARATIVO

### 5.1 Introdução

Este capítulo é dedicado à apresentação e avaliação dos dados coletados durante as campanhas de medição. Estas ocorreram no laboratório do GEDAE envolvendo uma geladeira c.c. e em campo, na Ilha das Onças, tanto para as cargas de refrigeração quanto para as bombas d'água. Dessa maneira, aborda-se sobre os ensaios bem como a avaliação dos dados apresentados. Ainda neste capítulo, descrevem-se alguns cenários tecnicamente possíveis para a operação da rede visando ao atendimento de cargas c.c., c.a. ou mistas na comunidade, envolvendo, com isso, um estudo comparativo tendo como principal propósito a avaliação da eficiência energética nos cenários considerados.

### 5.2 Ensaios operacionais no GEDAE/UFPA

No laboratório do GEDAE, como há uma unidade disponível do mesmo modelo de geladeira utilizado em campo, foram realizados ensaios buscando verificar previamente o comportamento desta carga motriz. Outra importante característica dos testes preliminares realizados foi a seleção da melhor configuração do osciloscópio digital buscando a captura dos eventos transitórios durante o acionamento das cargas. Sendo assim, utilizou-se, em campo, a função *trigger* com período de amostragem de 1 ms/divisão, sendo acionada na borda de subida da corrente. Já para a averiguação do regime permanente, empregou-se a função *recorder* e foram coletadas formas de onda ao longo da medição continuada.

Para simular um cenário mais próximo do encontrado em campo, fez-se medições empregando um controlador de carga XTRA3210N, do mesmo modelo presente nas residências em Ilha das Onças, e duas baterias estacionárias modelo 12MN55, da Fabricante Moura, conectadas em série, a fim de se obter a tensão nominal empregada na NDCC, 24 V<sub>c.c.</sub> Além disso, o condutor de alimentação utilizado possui 10 metros de comprimento, é manufaturado em cobre e tem 6 mm<sup>2</sup> de seção nominal.

Na Ilha das Onças, o comprimento do condutor até cada equipamento varia, mas são inferiores a 10 metros, dessa forma, buscou-se ainda verificar um cenário em que a carga esteja a uma distância considerável do ponto de alimentação para averiguar o efeito disso durante a partida e operação em regime permanente da mesma. Na Figura 5.1

mostra-se a disposição dos equipamentos para a realização do ensaio no laboratório do GEDAE/UFPA.

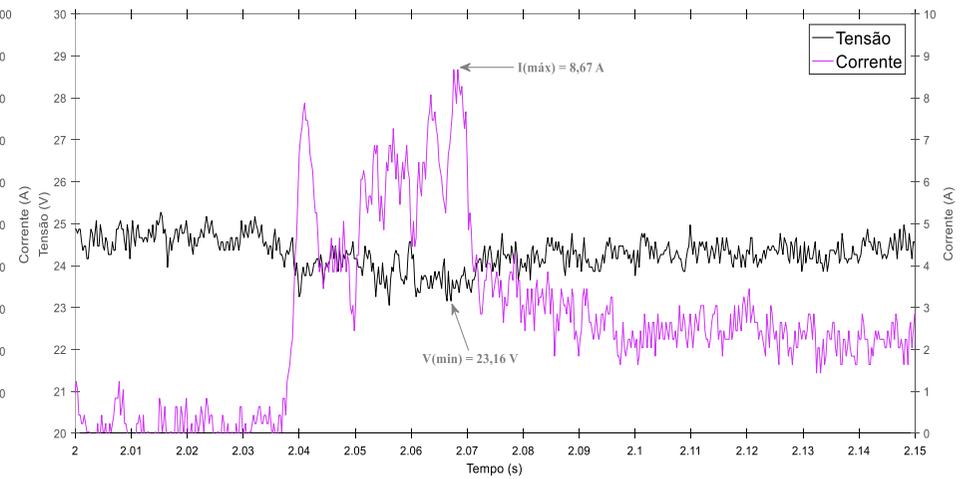
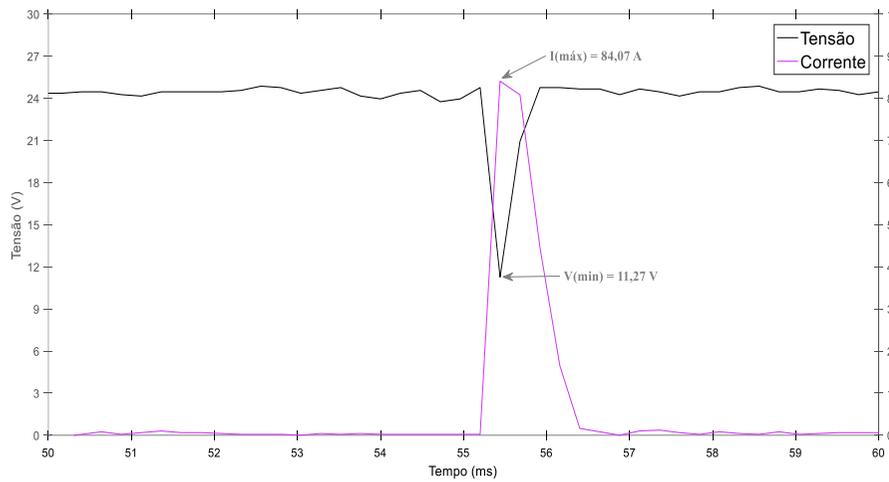
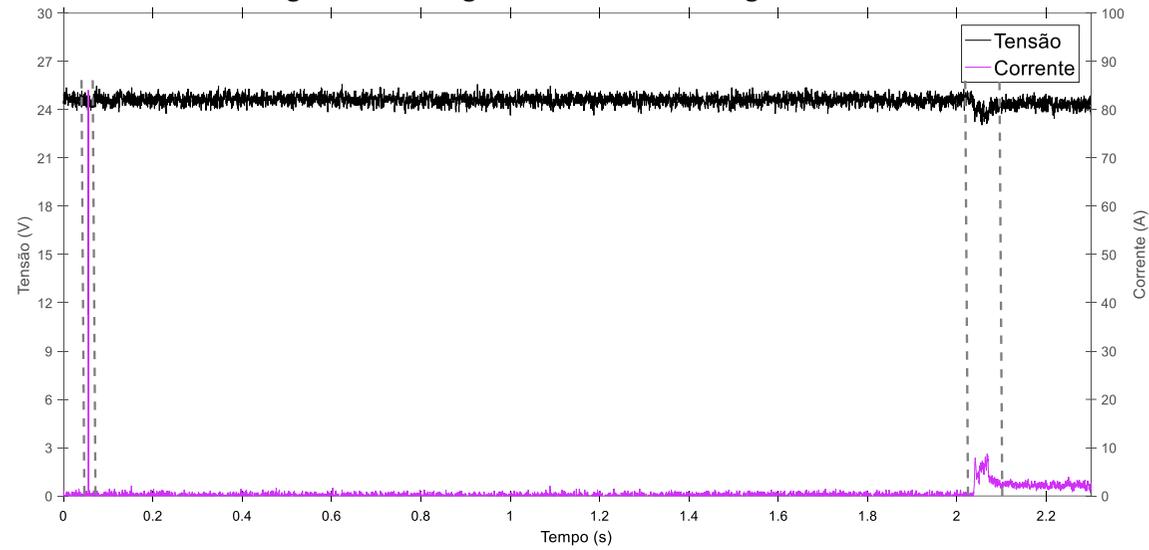
Figura 5.1 – Disposição dos equipamentos para testes iniciais da geladeira em laboratório.



Fonte: Autoria própria.

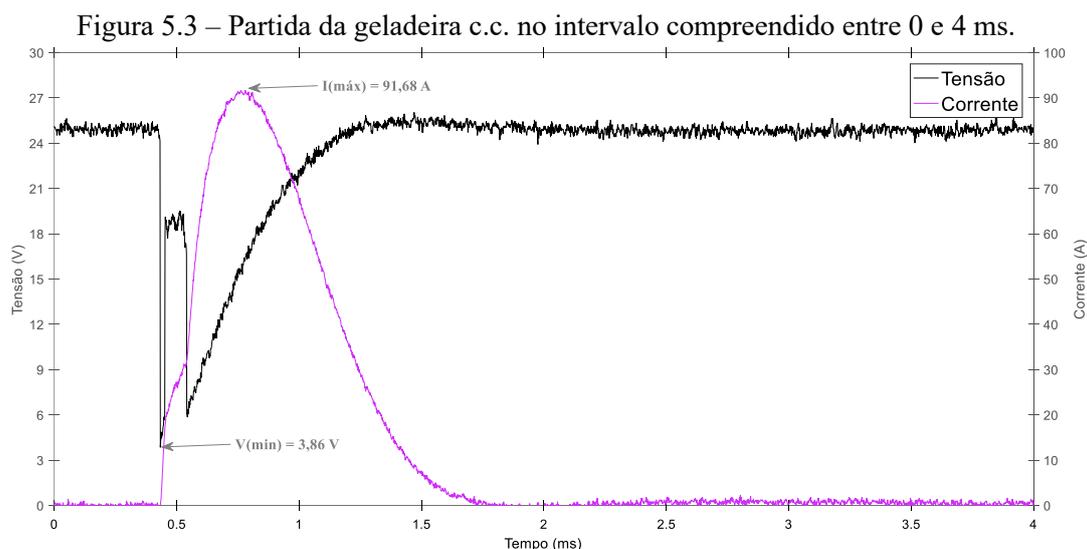
Verificou-se que o compressor da geladeira possui um estágio de energização inicial, onde uma corrente de elevada magnitude é demandada, causando, com isso, um afundamento de tensão. Posteriormente, a corrente diminui para valores da ordem de mA até que, efetivamente, o compressor entre em operação, causando uma pequena queda de tensão. Por fim, após determinado tempo o equipamento atinge o regime permanente. Todos os estágios mencionados são apresentados na Figura 5.2.

Figura 5.2 – Estágios de acionamento da geladeira c.c.



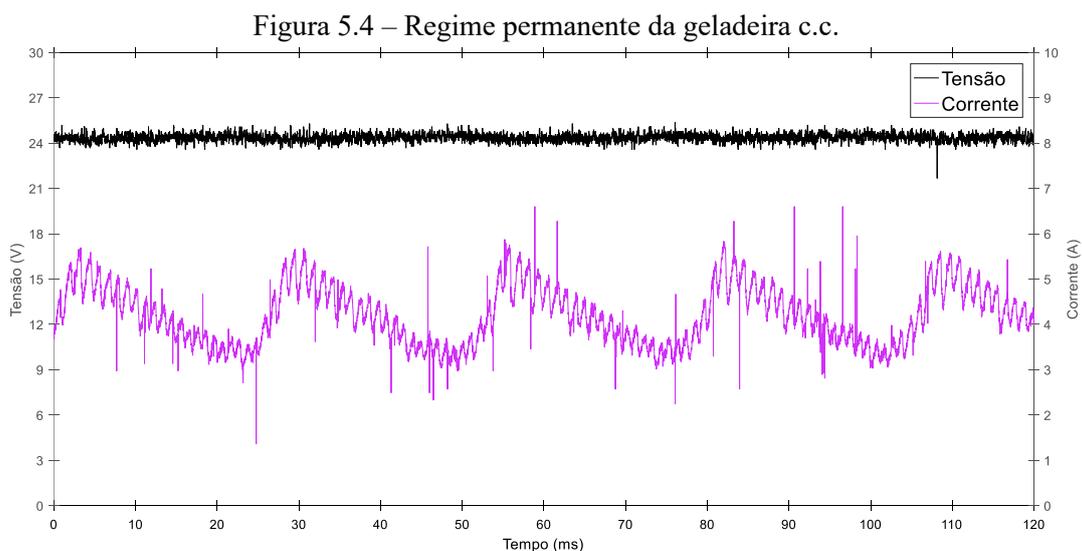
Fonte: Autoria própria.

Como o maior impacto da geladeira c.c. está atrelado ao estágio de energização inicial, devido ao pico de demanda, optou-se em analisar esta etapa de funcionamento do equipamento. Para capturar o evento transitório da melhor maneira, reduziu-se o período de medição do osciloscópio digital para a coleta de dados entre 0 e 4 milissegundos. Dessa forma, foi possível averiguar a real situação do afundamento de tensão ocasionado pela carga motriz, uma vez que há maior quantidade de amostras coletadas no intervalo selecionado. Apresenta-se, na Figura 5.3, as formas de onda de tensão e corrente no intervalo mencionado.



Fonte: Autoria própria.

Após o acionamento do compressor, durante o regime permanente da geladeira c.c., as formas de onda de tensão e corrente aquisitadas são mostradas na Figura 5.4.

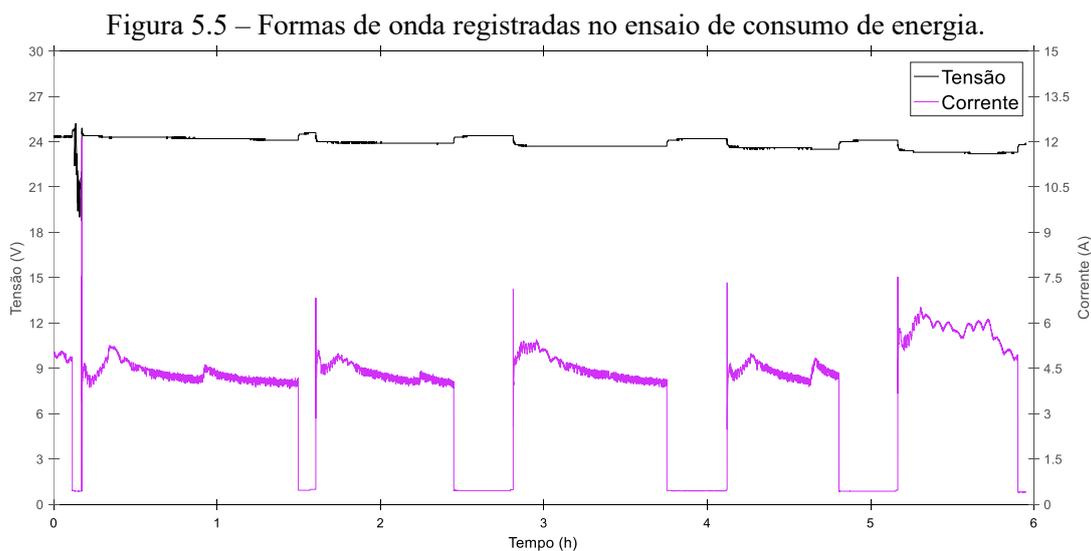


Fonte: Autoria própria.

Devido ao sistema eletrônico embarcado na geladeira, nota-se a presença de *ripple* na forma de onda de corrente. Os valores rms e médio de tensão são, respectivamente, 24,366 V e 24,365 V. Em relação à corrente, os valores rms e médio da forma de onda em regime são, respectivamente, 4,247 A e 4,199 A.

Ainda, repetiu-se o ensaio de partida da geladeira realizando o redimensionamento do cabo de alimentação conforme o critério de queda de tensão para o percentual máximo de 0,5%, considerando a corrente de projeto de 3 A, referindo-se à corrente em regime informada nos dados de placa para tensão de alimentação c.c. de 24 V, chegando a um condutor de 2,5 mm<sup>2</sup> e comprimento de 3 metros. Verificou-se uma menor corrente de pico, 63,99 A, em relação à anterior, 91,68 A, e conseqüentemente a tensão mínima foi maior do que a registrada no ensaio anterior, 10,06 V, contra 3,86 V.

Outro ensaio efetuado foi o monitoramento de forma contínua da geladeira, com coleta de dados a cada um segundo durante um período de seis horas (a duração não foi maior devido às limitações do banco de baterias utilizado). O intuito do referido ensaio foi a averiguação do consumo da carga durante o ensaio e a estimativa de consumo para uso 24 horas da carga. No entanto, sabe-se que as condições do teste não refletem a realidade em campo, uma vez que a geladeira estava com ausência de carga térmica em seu interior. O consumo no período foi de 523,42 Wh e as formas de onda são mostradas na Figura 5.5.



Fonte: Autoria própria.

Com os ensaios realizados no GEDAE, foi possível ajustar as melhores configurações do osciloscópio digital para identificação dos eventos transitórios a serem

buscados em campo na Ilha das Onças. Além disso, serviu também para visualização dos estágios de funcionamento das cargas motrizes de refrigeração. Além disso, observou-se os ciclos *on* e *off* da geladeira c.c., com períodos *on* variando de 20 minutos a 80 minutos.

### **5.3 Ensaios operacionais em Ilha das Onças**

Os ensaios operacionais em campo foram realizados em vários dias ao longo do ano de 2023, buscando acompanhar os equipamentos em diferentes condições meteorológicas a que a NDCC esteve submetida. Todavia, não foi possível, em todos os dias de medições, a coleta de dados gerais das cargas motrizes, considerando refrigeração e bombeamento de água devido a fatores como a não presença dos proprietários de algumas residências no local em dias que ocorreram as medições e, para o caso de bombeamento de água, o nível do rio adequado para acionamento das motobombas. Destaca-se que a NDCC se mostrou confiável e robusta, com isso, não foram observadas diferenças significativas entre os dias de medições, mesmo em condições climáticas de dias nublados.

#### **5.3.1 Ensaios operacionais com as cargas de refrigeração**

Durante as instalações da NDCC, preza-se para o maior nível de padronização possível, considerando alguns aspectos como a dimensão das residências e a disposição das cargas encontradas em cada uma delas. Dessa forma, no que diz respeito às geladeiras e *freezer*, os condutores de alimentação destas cargas motrizes são de cobre com seção nominal de 6 mm<sup>2</sup>, tal qual utilizado nos testes em laboratório no GEDAE.

Todavia, devido às características individuais das instalações elétricas de cada residência, há uma diferença no comprimento destes condutores até cada carga sendo discriminados na Tabela 5.1 a extensão aproximada destes. Cabe ressaltar que o comprimento mencionado compreende o ponto de conexão na NDCC, para energização da carga, até o ponto de medição, ou seja, o nível superior do disjuntor de acionamento da respectiva carga.

Tabela 5.1 – Comprimento aproximado do condutor de alimentação das geladeiras e *freezer* em cada residência.

Residência	Comprimento aproximado (m)
R.2	2
R.3	5
R.4	4
R.5	5
R.6	3
R.7	3
R.8	4

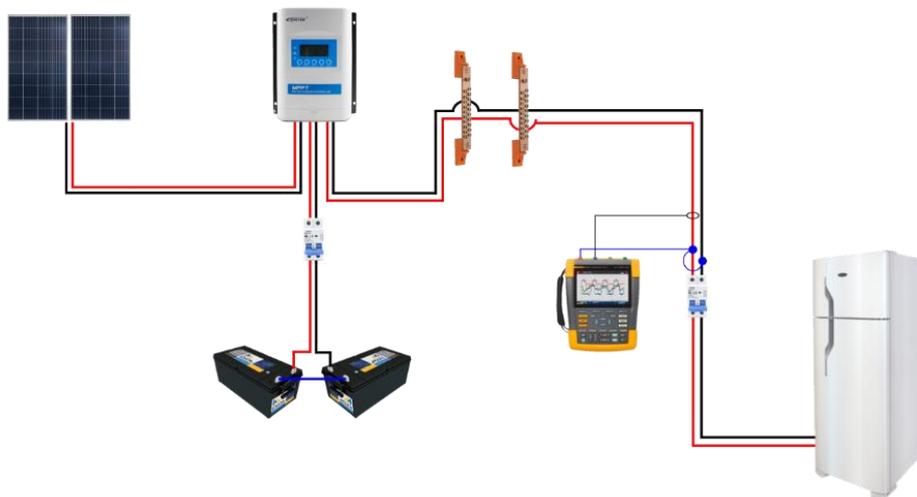
Fonte: Autoria própria.

No quadro formador de rede de cada subsistema da NDCC há um barramento c.c., onde são realizadas as conexões destes com a rede e de onde sai o ramal c.c. principal da edificação e deste são derivados os outros circuitos em corrente contínua em cada residência. Nos casos das residências R.2 e R.7, devido não possuírem SGA, é realizada a ligação direta da NDCC com o ramal c.c. principal, passando por um estágio de proteção contendo disjuntores e fusíveis. Para as demais, a interface de proteção é mais complexa devido ao maior número de componentes, mas estão presentes também os fusíveis e disjuntores.

As residências que contém SGA possuem disjuntores c.c. e fusíveis c.c. de, respectivamente, 32 A e 30 A para proteção, conexão e/ou desconexão dos BBs. Para acionamento das geladeiras e *freezer* há um disjuntor c.c. de 16 A em cada moradia. Apenas na residência R.8 a conexão da geladeira é realizada diretamente no barramento c.c. presente no quadro de formação de rede devido à proximidade entre os itens, sendo nas demais a conexão realizada nos respectivos ramais c.c. principais. Todas as coletas de dados foram realizadas antes do disjuntor de acionamento de cada geladeira, com o sinal de tensão coletado em cada borne e a sonda de corrente alocada no polo positivo.

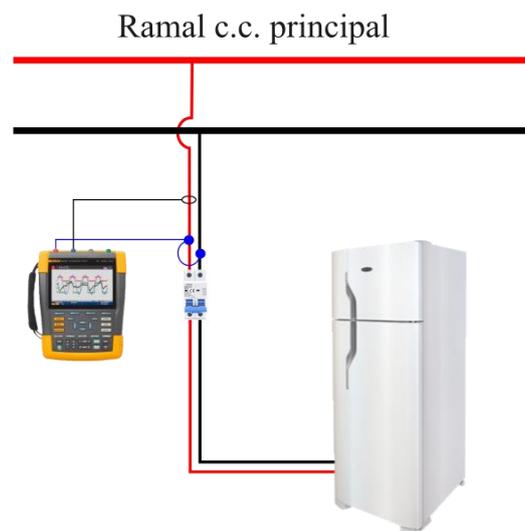
A Figura 5.6 apresenta um esquema simplificado, mostrando apenas os disjuntores de acionamento do BB e geladeira, de ligação dos componentes no quadro da residência R.8. Já na Figura 5.7 é possível verificar o esquema de conexão das demais cargas motrizes de refrigeração no ramal c.c. principal.

Figura 5.6 – Esquema simplificado de conexão no quadro da residência R.8.



Fonte: Autoria própria.

Figura 5.7 – Esquema de conexão das cargas motrizes de refrigeração nas demais residências.



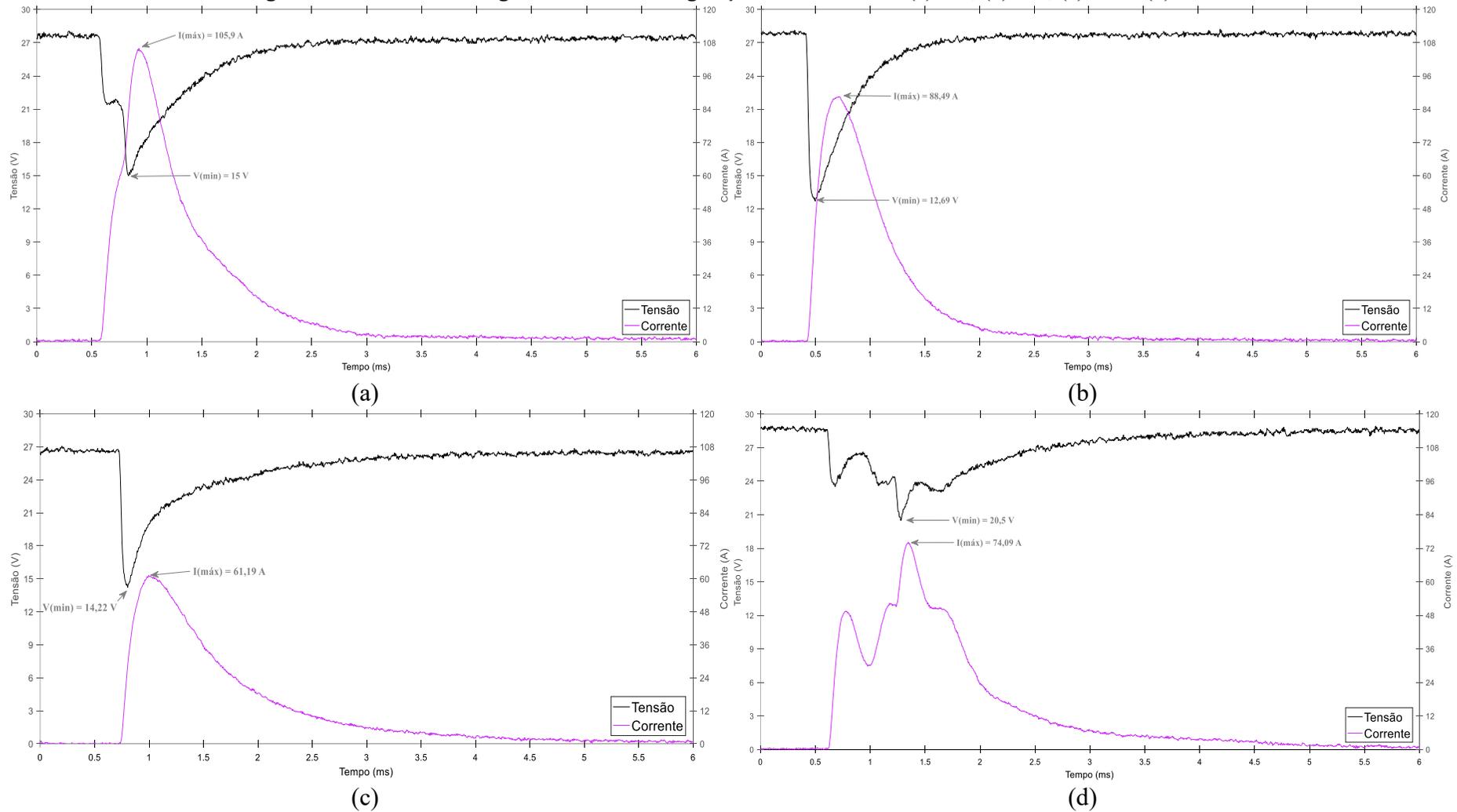
Fonte: Autoria própria.

Na configuração anteriormente mencionada para o osciloscópio digital, foram coletados dados de partida de todas as cargas motrizes de refrigeração, a fim de se verificar o afundamento de tensão causado por cada uma delas durante o pico de demanda. Sendo assim, na Figura 5.8 mostra-se, os perfis de tensão e corrente das residências (a) R.2, (b) R.3, (c) R.4 e (d) R.5, enquanto na Figura 5.9 são mostrados os mesmos parâmetros para as residências (a) R.6, (b) R.7 e (c) R.8.

Após a partida do compressor, com o equipamento em regime permanente, a configuração do osciloscópio foi alterada para o modo *free run*, com 2 A/div, 10 V/div e

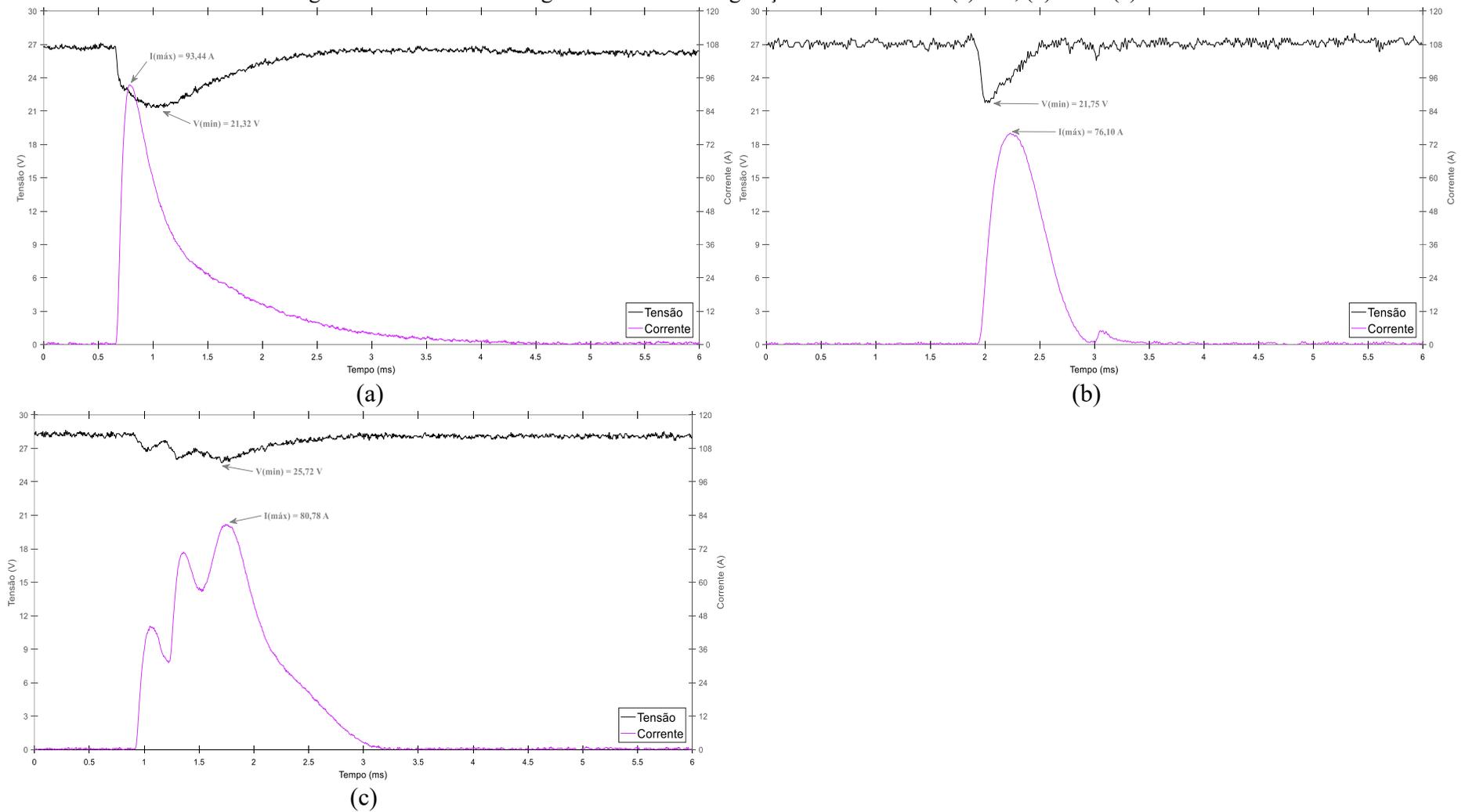
janela de medição de 10 ms. Os resultados são apresentados nas Figuras 5.10 e 5.11, seguindo a mesma ordem das figuras anteriores.

Figura 5.8 – Partida das cargas motrizes de refrigeração nas residências (a) R.2, (b) R.3, (c) R.4 e (d) R.5.



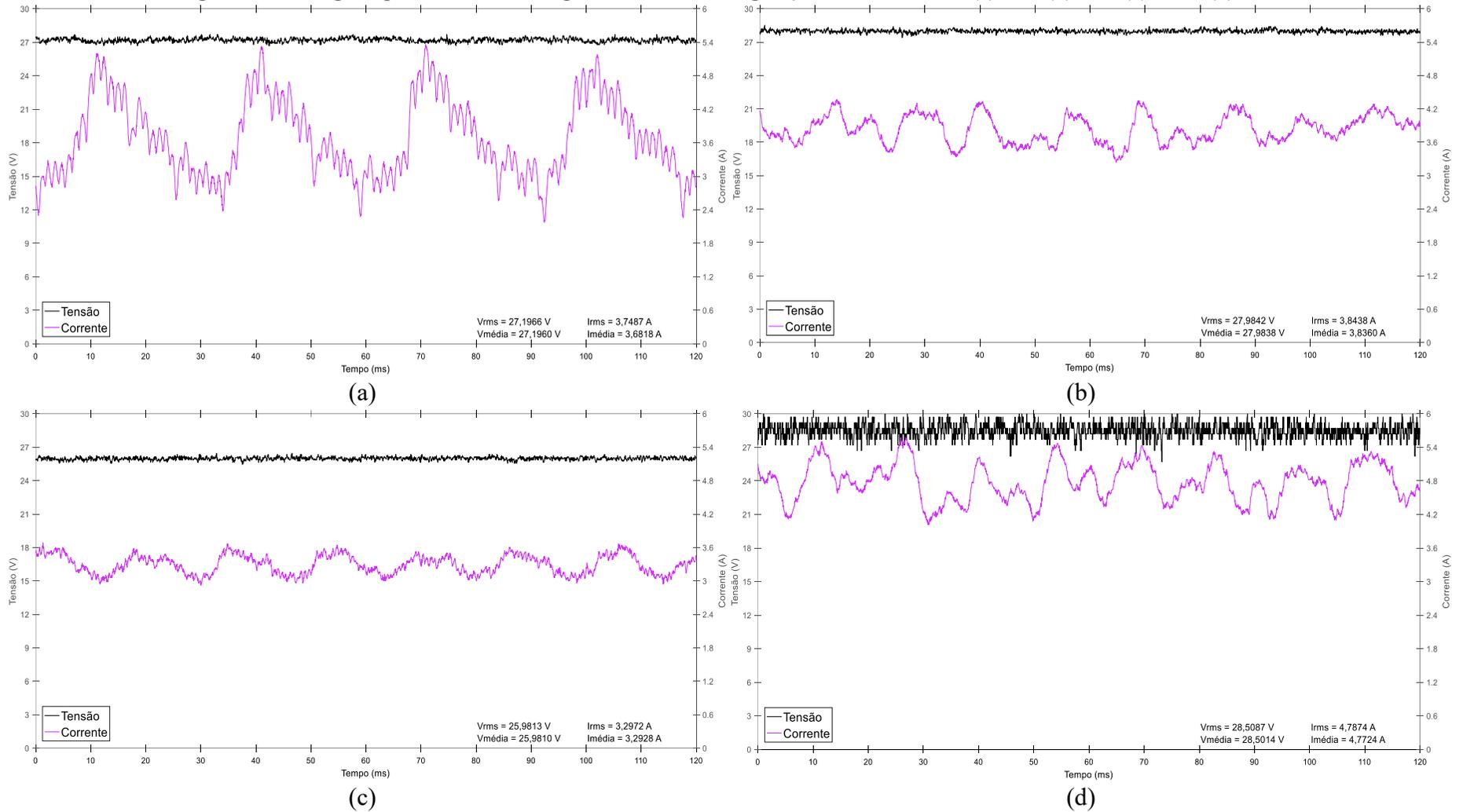
Fonte: Autoria própria.

Figura 5.9 – Partida das cargas motrizes de refrigeração nas residências (a) R.6, (b) R.7 e (c) R.8.



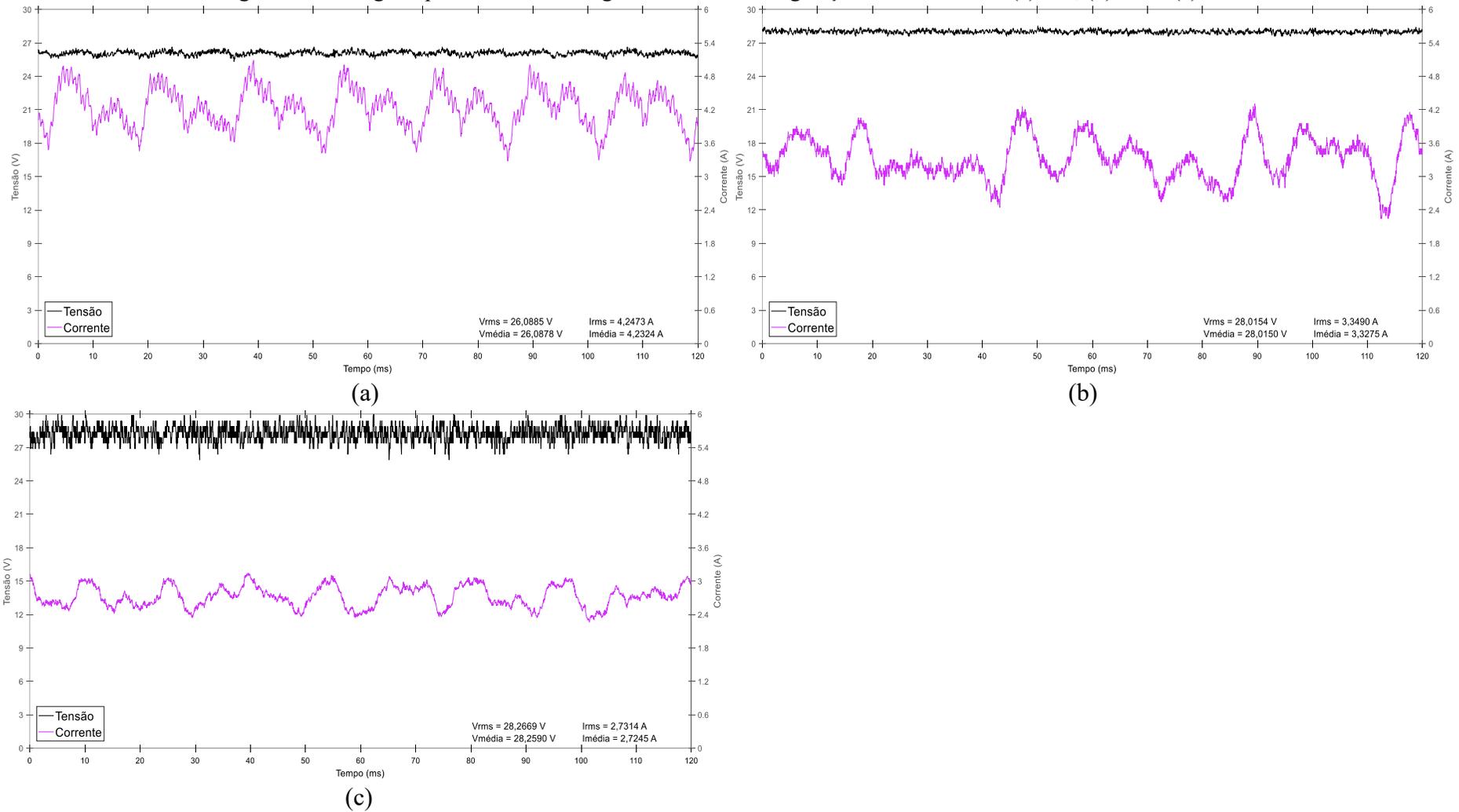
Fonte: Autoria própria.

Figura 5.10 – Regime permanente das cargas motrizes de refrigeração nas residências (a) R.2, (b) R.3, (c) R.4 e (d) R.5.



Fonte: Autoria própria.

Figura 5.11 – Regime permanente das cargas motrizes de refrigeração nas residências (a) R.6, (b) R.7 e (c) R.8.



Fonte: Autoria própria.

Analisando os dados verifica-se que todas as cargas ocasionaram afundamento de tensão durante o estágio de energização inicial. Apesar de se tratar de uma corrente de partida de elevada magnitude, dado o curto intervalo em que o evento ocorre, a energia perdida ou dissipada é muito pequena, ainda se forem consideradas várias partidas e computado o valor em uma base mensal. Além do mais, verifica-se a suportabilidade dos condutores da instalação visto que estes conseguem suportar uma corrente consideravelmente maior do que a nominal por um curto período. O afundamento de tensão pode impactar cargas sensíveis a este tipo de variação, todavia, durante os ensaios não foi constatado nenhum caso deste tipo.

A geladeira presente na residência R.3 teve o maior percentual de afundamento de tensão mesmo que não tenha demandado a maior corrente de partida. A maior corrente de partida foi demandada pela carga da residência R.2. Um dos motivos para esta ocorrência é o fato de que na residência R.3 há uma alta demanda de potência e energia, considerando o consumo médio da localidade, e na época em que os ensaios foram realizados, o BB que compõe o referido SGA necessitava ser trocado devido às baterias estarem com tensão abaixo da nominal.

Em contrapartida, o menor afundamento de tensão se deu na residência R.8, em que o banco de baterias se encontra próximo à carga. Adicionalmente, no período das campanhas de medição, o armazenamento de energia do SGA em questão havia sido reforçado com a adição de novas baterias, aumentando a capacidade. Na Tabela 5.2 são apresentados os parâmetros elétricos das cargas de refrigeração durante o estágio de energização inicial de cada uma delas bem como em regime permanente.

Tabela 5.2 – Parâmetros elétricos das cargas motrizes durante a partida e regime permanente.

Residência	Tensão média antes do acionamento (V)	Partida		Afundamento de tensão (%)	Regime permanente	
		Tensão mínima (V)	Corrente máxima (A)		Tensão média (V)	Corrente média (A)
R.2	27,63	15,00	105,90	43,67	27,19	3,68
R.3	27,85	12,69	88,49	54,43	27,98	3,83
R.4	26,64	14,22	61,19	46,62	25,98	3,29
R.5	28,68	20,50	74,09	28,52	28,50	4,77
R.6	26,63	21,32	93,44	19,94	26,09	4,23
R.7	27,05	21,75	76,10	19,59	28,02	3,32
R.8	28,24	25,72	80,78	8,92	28,26	2,72

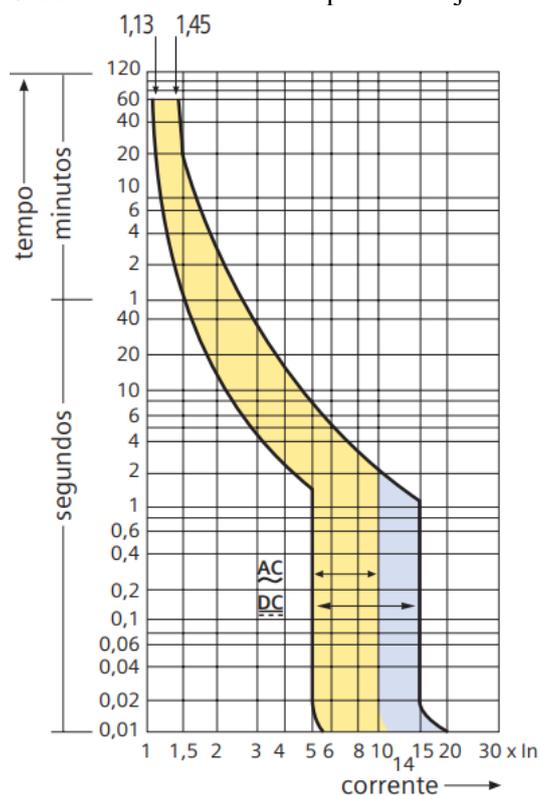
Fonte: Autoria própria.

O afundamento de tensão refere-se à diferença percentual entre a tensão média antes do acionamento e a tensão mínima registrada. Destaca-se, ainda, que durante as medições considerou-se as condições reais de operação dos equipamentos, não tendo sido padronizado a posição do termostato de cada carga.

A relação entre a corrente de pico na partida e a corrente nominal RMS em cada carga de refrigeração, seguindo a ordem das residências apresentadas anteriormente na Tabela 5.2, é de 28,24; 23,04; 18,54; 15,46; 21,98; 22,71 e 29,59. Com isso, é válido ressaltar que não houve a atuação dos respectivos disjuntores c.c. cuja corrente nominal é de 16 A, dado o curto tempo em que ocorre o evento.

A maior relação entre a corrente nominal do disjuntor (16 A) e a corrente de pico na partida da carga acontece na residência R.2 sendo de aproximadamente 6,62 vezes e, conforme verificado na Figura 5.12, o tempo para que a proteção atue nesta situação é da ordem de segundos, enquanto o pico de corrente ocorre no intervalo de milissegundos.

Figura 5.12 –Característica de disparo de disjuntor Curva C.



Fonte: Siemens (2018).

No que diz respeito ao *ripple*, a presença destas ondulações pode ocasionar perdas ao sistema, aquecimento de componentes, diminuição da vida útil de equipamentos devido ao desgaste em componentes eletrônicos. Ainda, nos sistemas com

armazenamento de energia, que é o caso da NDCC, alguns problemas associados são sobreaquecimento e a degradação das células causados pelas ondulações na forma de onda de corrente. Dentre as cargas motrizes para refrigeração, a presente na residência R.2 foi a que apresentou maior distorção referente. Verifica-se na Tabela 5.3 os parâmetros calculados utilizando as informações de corrente em regime permanente.

Tabela 5.3 – Indicadores envolvendo *ripple* nas cargas motrizes de refrigeração.

Residência	Fator rms do <i>ripple</i> (%)	Fator de pico do <i>ripple</i> (%)	RDF (%)	$\frac{I_{(rms)}}{I_{média}}$
R.2	19,167	86,368	25,708	1,0182
R.3	6,4415	29,467	8,8322	1,0021
R.4	5,1146	23,404	6,8219	1,0013
R.5	7,1939	32,483	9,9314	1,0031
R.6	8,4458	42,775	11,041	1,0036
R.7	11,362	61,926	15,666	1,0064
R.8	7,1566	32,698	9,6683	1,0025

Fonte: Autoria própria.

O *ripple* de corrente ocasionado pelas cargas de refrigeração, a curto prazo de monitoração e observação no local, não provoca impactos significativos na operação do sistema, dada as baixas magnitudes dos valores rms do *ripple* do espectro de amplitude da corrente.

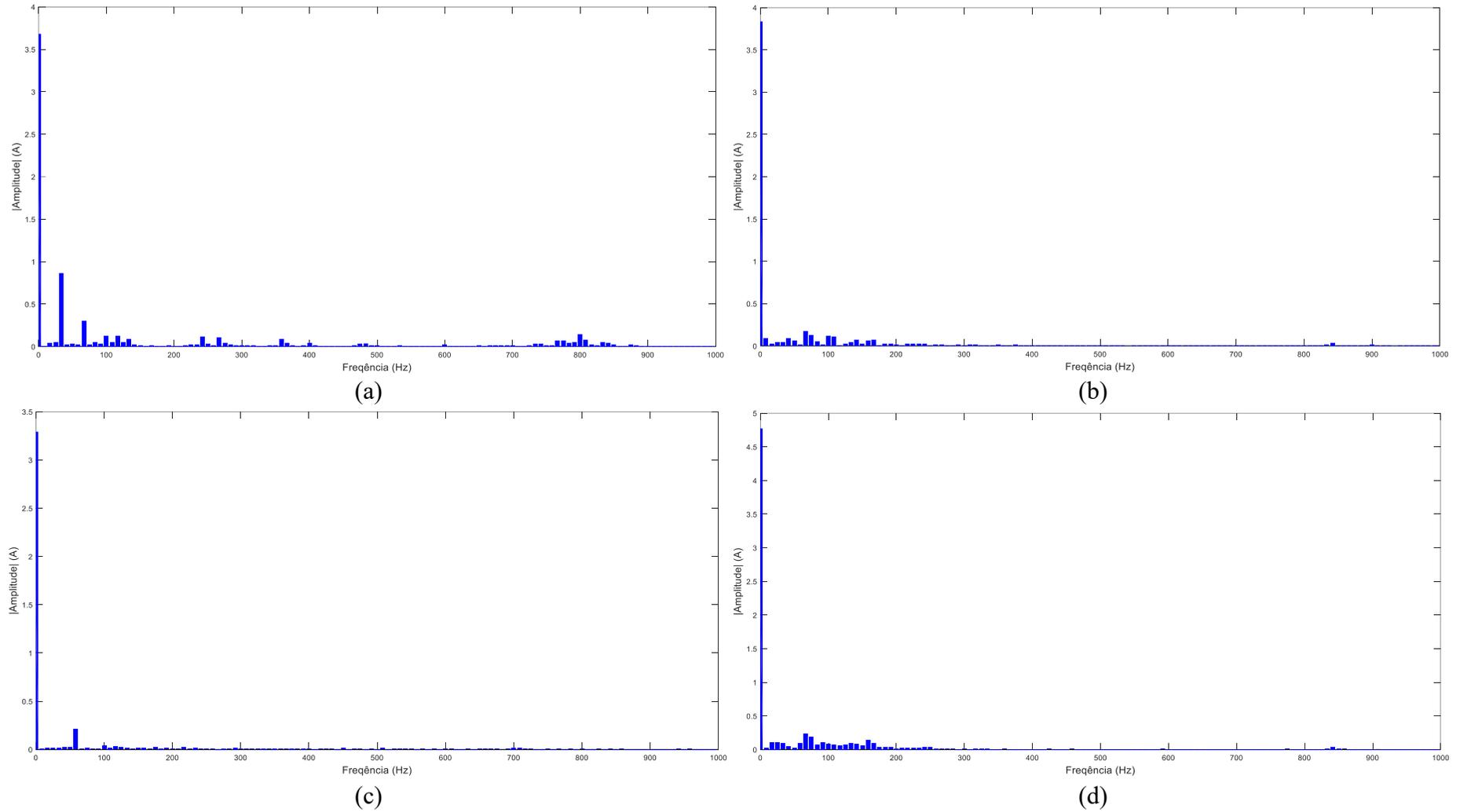
Ainda, verifica-se que a carga presente na residência R.2 possui o maior fator de pico do *ripple*, indicando uma variação considerável em relação ao valor médio. A NDCC é capaz de suprir esta magnitude de ondulação na corrente e trata-se de uma carga de baixa potência, porém, em sistemas de menor capacidade e menos estruturado esta distorção pode gerar impactos na operação.

Contudo, em todos os casos verificou-se alto fator de distorção do *ripple*, o que pode ser preocupante a longo prazo, especialmente considerando as consequências nas baterias, mencionadas anteriormente. No presente trabalho, considera-se apenas as cargas motrizes, mas a presença de *ripple* na rede é ainda intensificada se levado em consideração a totalidade das cargas conectadas ao longo da rede.

Conforme abordado no Capítulo 2, realizou-se a análise no domínio da frequência e os resultados da DFT para os sinais de corrente das residências R.2 a R.5 são apresentados na Figura 5.13, enquanto das residências R.6 a R.8 na Figura 5.14. Ressalta-se que se limitou o eixo da frequência a até 1 kHz para uma melhor visualização, uma vez que as amplitudes do espectro a partir da frequência mencionada são de magnitude muito

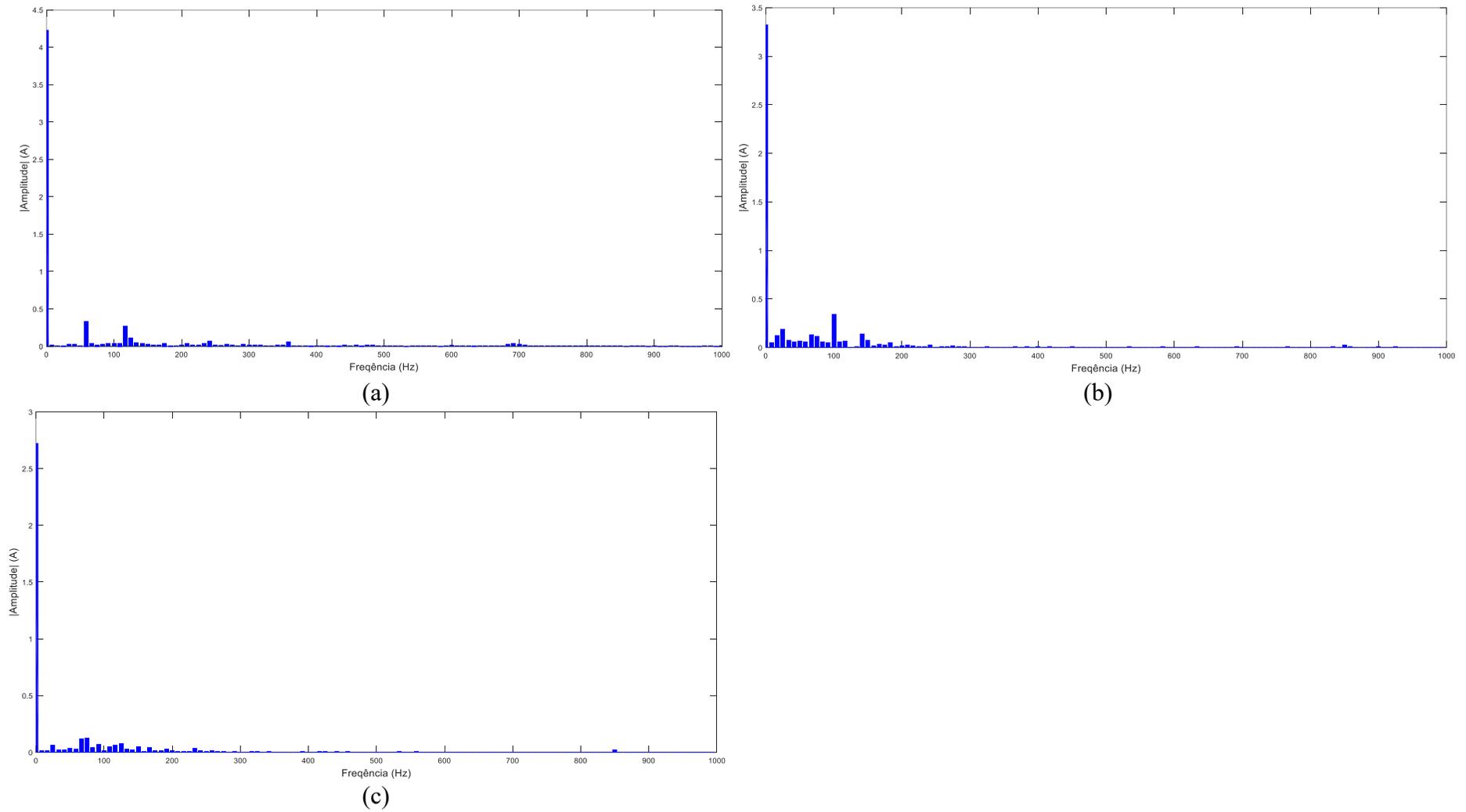
reduzida, não impactando significativamente na operação. Todavia, nos cálculos da RDF, discutidos posteriormente, considerou-se todo o espectro do sinal coletado, ou seja, frequências até 12,5 kHz.

Figura 5.13 – Espectro de amplitude de corrente para as formas de onda das cargas motrizes de refrigeração das residências (a) R.2, (b) R.3, (c) R.4 e (d) R.5.



Fonte: Autoria própria.

Figura 5.14 – Espectro de amplitude de corrente para as formas de onda das cargas motrizes de refrigeração das residências (a) R.6, (b) R.7 e (c) R.8.



Fonte: Autoria própria.

A componente c.c. corresponde, respectivamente, a 42,30%, 57,66%, 62,15%, 55,81%, 53,24%, 40,46% e 52,31% do conteúdo espectral das cargas motrizes de refrigeração das residências R.2, R.3, R.4, R.5, R.6, R.7 e R.8.

No que tange o consumo de energia, normalmente, em equipamentos semelhantes e em condições normais, o tempo diário de funcionamento do compressor é de 8 horas, podendo variar conforme alguns fatores como a temperatura ambiente, a frequência de abertura da porta, a carga térmica no interior, entre outros. Conforme informações do fabricante<sup>1</sup>, as geladeiras e o *freezer* possuem um ciclo de desligamento, controlado pelo termostato, de cerca de 30 minutos em condições normais, podendo variar com os fatores mencionados anteriormente. Dessa forma, foram constatados parâmetros próximos durante os ensaios realizados no GEDAE.

Assim, para estimar o consumo, fez-se uma extrapolação do ensaio realizado no GEDAE e adotou-se 15 horas/dias de funcionamento do compressor. Com isso, o consumo médio mensal entre os itens foi de aproximadamente 45,62 kWh. O consumo estimado total mensal dos aparelhos foi de cerca de 319,33 kWh. O modelo c.a. utilizado para comparação em tópicos subsequentes, DC35A, da fabricante Electrolux, para o mesmo intervalo diário de operação, tem consumo mensal de 48,6 kWh. Dessa maneira, os aparelhos com funcionamento em corrente contínua apresentaram, seguindo os critérios mencionados, maior eficiência em termos de consumo de energia elétrica.

### **5.3.2 Ensaios operacionais com as bombas d'água**

As campanhas de medições tendo como objeto de estudo as cargas motrizes para bombeamento de água ocorreram de duas formas, visto que foram aquisitados dados de equipamentos c.c. e c.a., como já mencionado anteriormente.

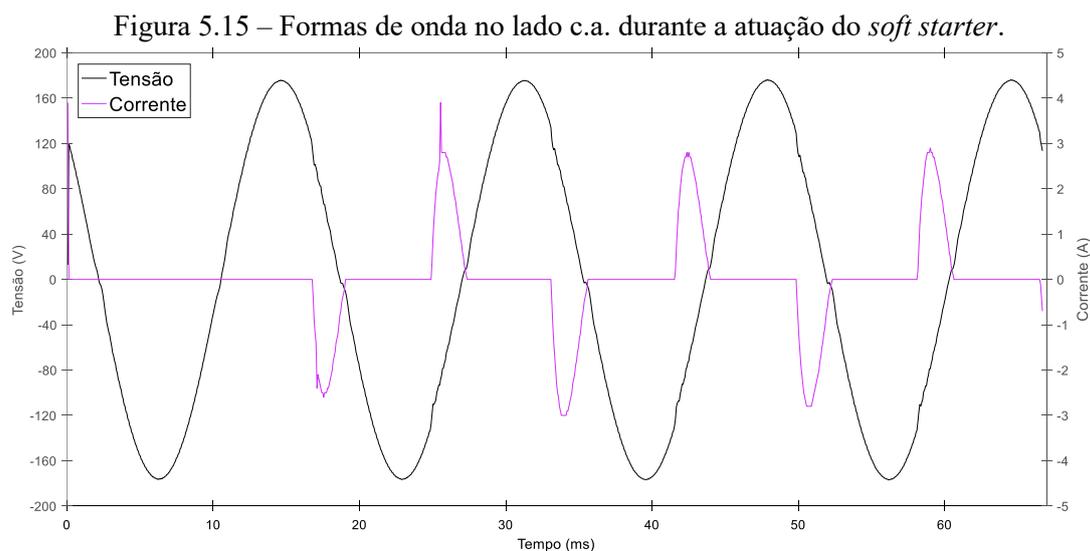
Em relação às motobombas presentes nas residências R.3, R.5 e R.8 (modelo anterior), as mesmas eram supridas por geradores à combustível fóssil e, após implementação da NDCC estas passaram a ser supridas por inversores. Todavia, verificou-se por meio de testes que o inversor EPEVER IP500-22 não suportava a energização direta das motobombas, devido às correntes de *inrush* dos equipamentos. O

---

<sup>1</sup> O contato ocorreu mediante aplicativo de troca de mensagens.

evento fazia com que fossem superados os 1.000 W de potência de surto do inversor dada a magnitude da corrente e com isso o inversor desligava, entrando em modo de proteção.

Visando contornar esta situação, foi inserido ao conjunto um *soft starter* para mitigação da corrente de partida. A atuação do dispositivo, Figura 5.15, foi capturada no lado c.a. do inversor por meio da função transiente do analisador de qualidade de energia em que são coletados quatro ciclos de onda com duração total do evento igual a 66,69 ms.

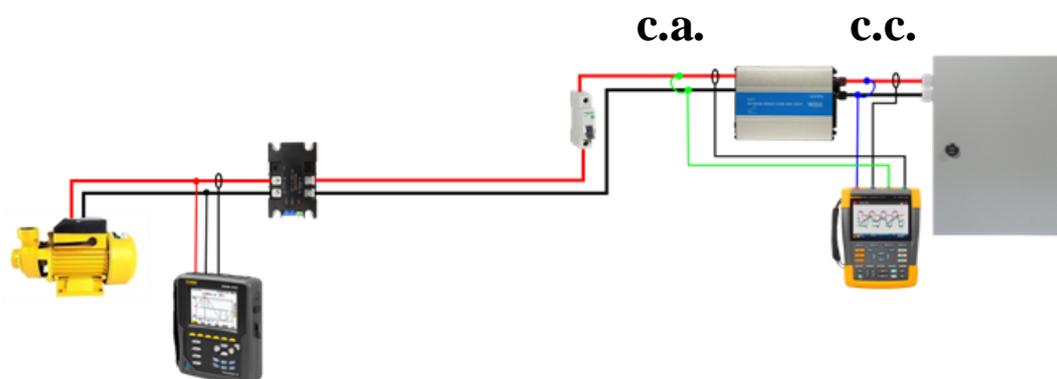


Fonte: Autoria própria.

O *soft starter* foi adicionado, em ambos os casos, nas residências R.3 e R.5, o mais próximo possível das respectivas bombas d'água. A distância entre os inversores e as motobombas atinentes é de aproximadamente 15 metros, sendo a distribuição de energia realizada por meio de condutores produzidos em cobre com seção transversal de 2,5 mm<sup>2</sup> na residência R.3 e cabo em alumínio com seção transversal de 10 mm<sup>2</sup> para a residência R.5. Já as motobombas c.c. são conectadas diretamente à NDCC por meio de condutores de cobre com seção de 4 mm<sup>2</sup>. Há, em todos os casos, disjuntores para proteção e acionamento dos equipamentos, estando seccionado o polo positivo para as motobombas c.c. e o condutor de fase, na saída do inversor, para as bombas c.a.

Na Figura 5.16 mostra-se o esquema de ligação elétrica com indicação dos pontos de medições das motobombas d'água c.a. das residências R.3 e R.5. Ressalta-se, ainda, que a residência R.8 fez uso deste mesmo esquema de conexão anterior, visto que previamente à troca para uma bomba d'água c.c., havia no local uma motobomba do mesmo modelo presente na residência R.3, suprida em corrente alternada.

Figura 5.16 – Esquema de ligação elétrica das bombas d’água presentes nas residências R.3 e R.5.



Fonte: Autoria própria.

Na Figura 5.17 está indicado o esquemático elétrico para alimentação das motobombas c.c. presentes nas residências R.4, R.8 (nova configuração) e R.12.

Figura 5.17 – Esquema de ligação elétrica das bombas d’água presentes nas residências R.4, R.8 e R.12.



Fonte: Autoria própria.

Fez-se, ainda, o levantamento das instalações hidráulicas de todas as residências consideradas no presente trabalho, a fim de se verificar a distância total desde o ponto de coleta de água até a caixa d’água, uma vez que isso altera o ciclo de funcionamento do equipamento. Essas informações, bem como as medições elétricas realizadas, são detalhadas nos dois subtópicos a seguir.

### 5.3.2.1 Bombas d’água c.a.

Para atendimento das residências R.3 e R.5 há, respectivamente, uma caixa d’água com volume de armazenamento de 1.500 litros e 1.000 litros. As ligações hidráulicas para as bombas d’água em questão são apresentadas nas Figura 5.18 e 5.19.

Figura 5.18 – Conexões hidráulicas da bomba d'água presente na residência R.3.



Fonte: Autoria própria.

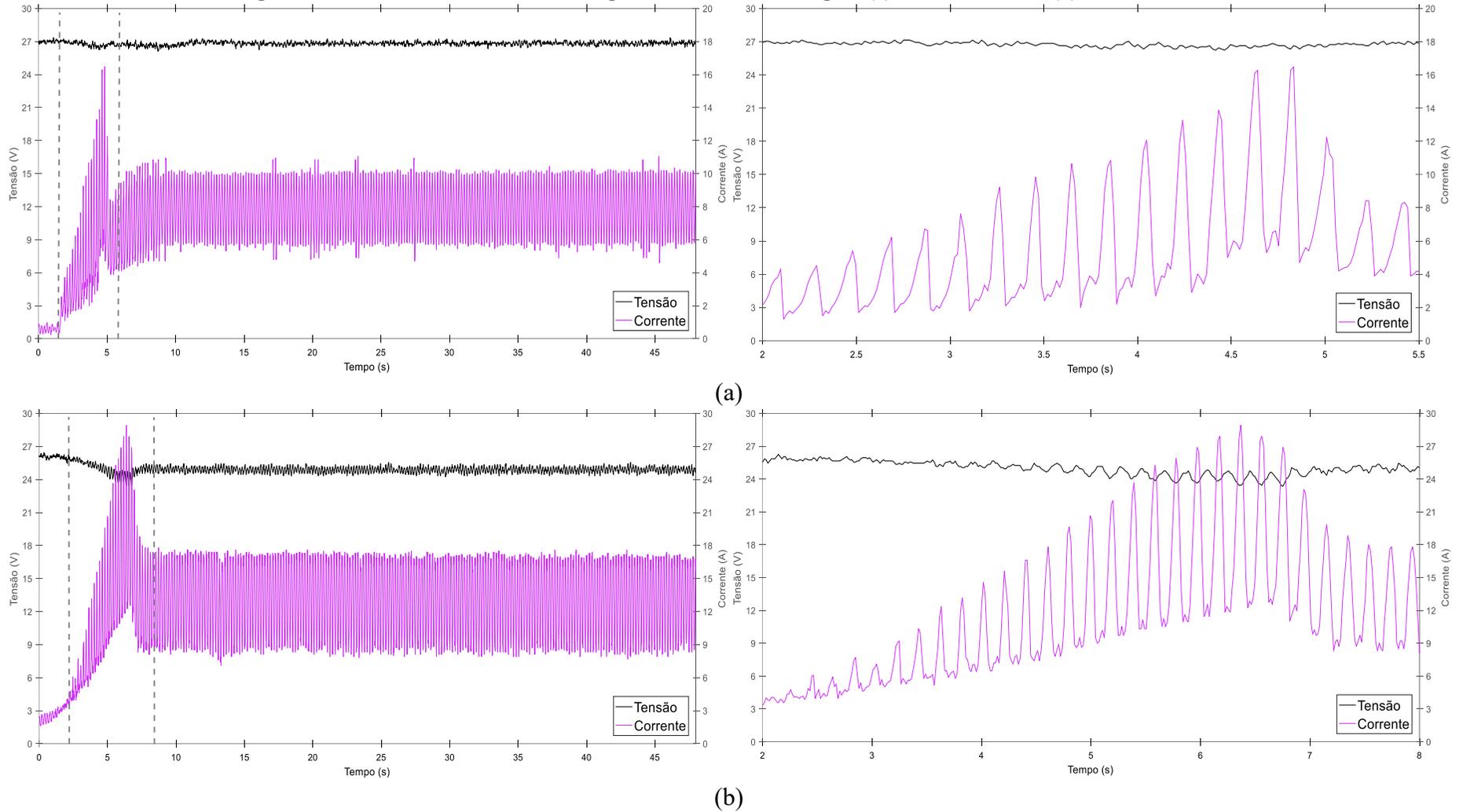
Figura 5.19 – Conexões hidráulicas da bomba d'água presente na residência R.5.



Fonte: Autoria própria.

Com o osciloscópio digital fez-se, no primeiro momento, a aquisição dos parâmetros elétricos no lado c.c. do inversor durante as partidas das bombas d'água. Na Figura 5.20, verifica-se a partida de ambas as cargas na janela de medição completa de partida e nos intervalos onde ocorrem a maior demanda de corrente.

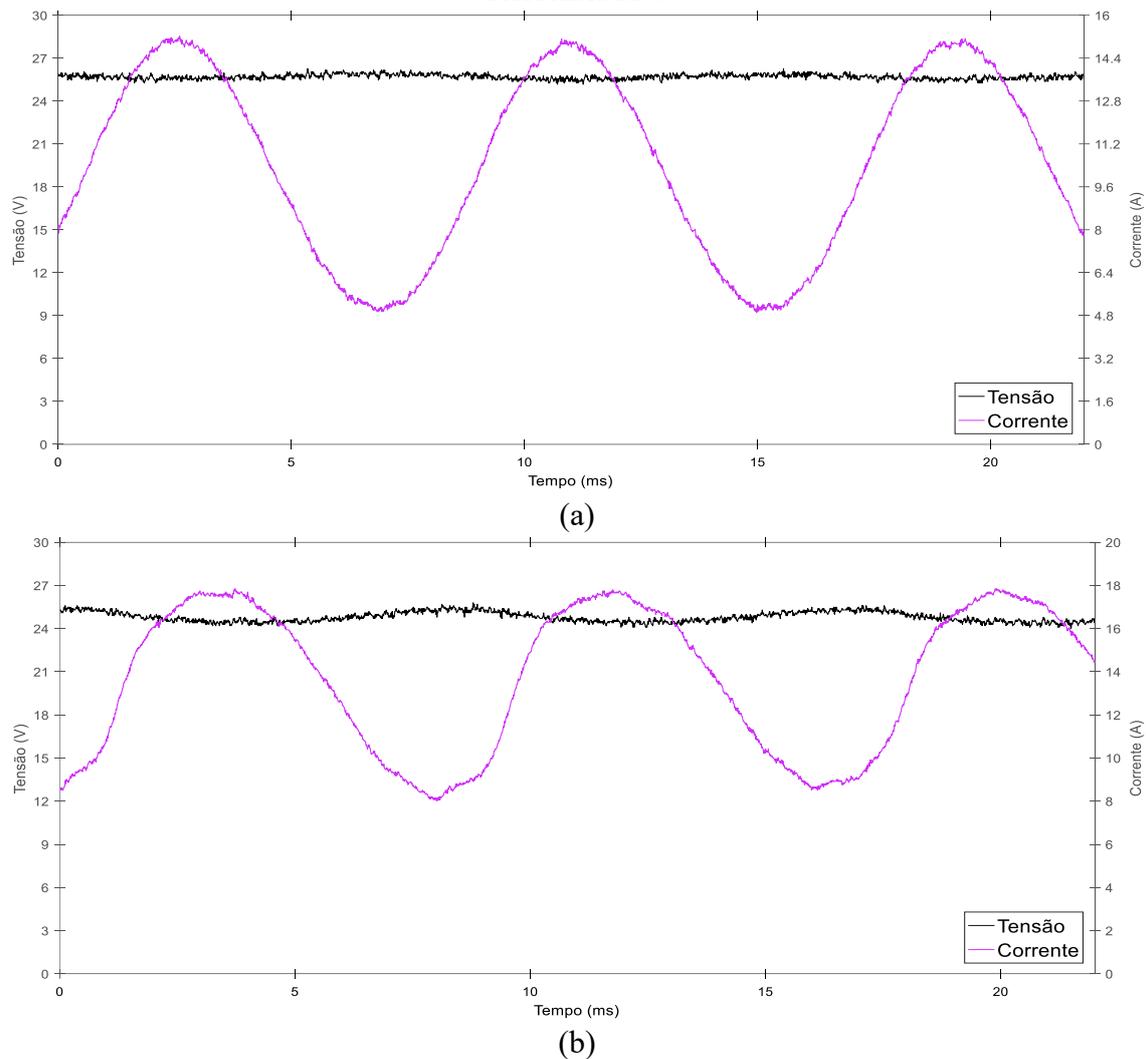
Figura 5.20 – Formas de onda durante a partida das bombas d’água: (a) residência R.3 e (b) residência R.5.



Fonte: Autoria própria.

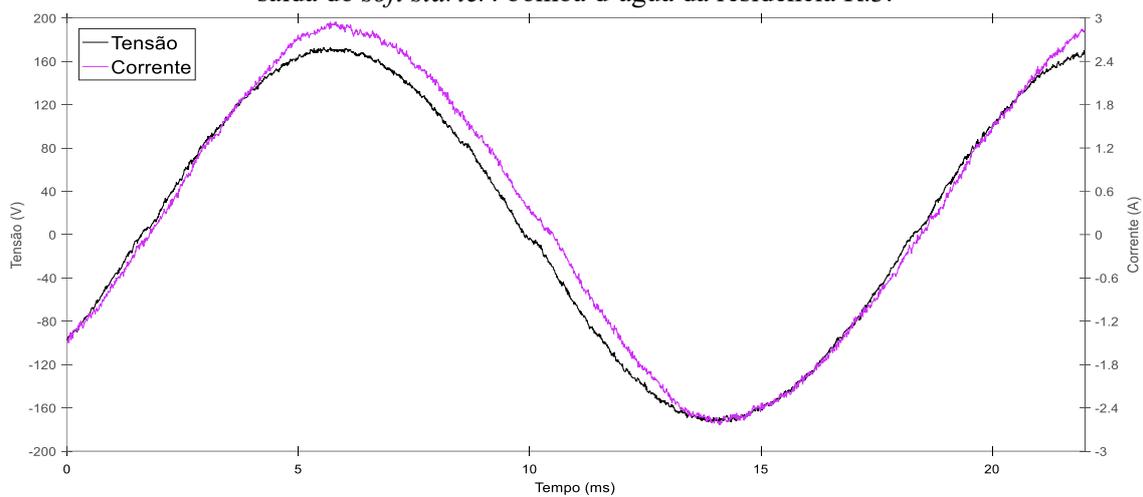
A segunda parte dos ensaios diz respeito aos dados em regime permanente, tanto do lado c.c. quanto c.a., com medição simultânea do osciloscópio digital e analisador de qualidade de energia. Os resultados são apresentados nas Figuras 5.21, 5.22 e 5.23. Ainda, na Figura 5.24 mostra-se o espectro de amplitude de corrente no lado c.c. para ambos os casos.

Figura 5.21 – Formas de onda em regime permanente no lado c.c. (a) residência R.3 e (b) residência R.5.

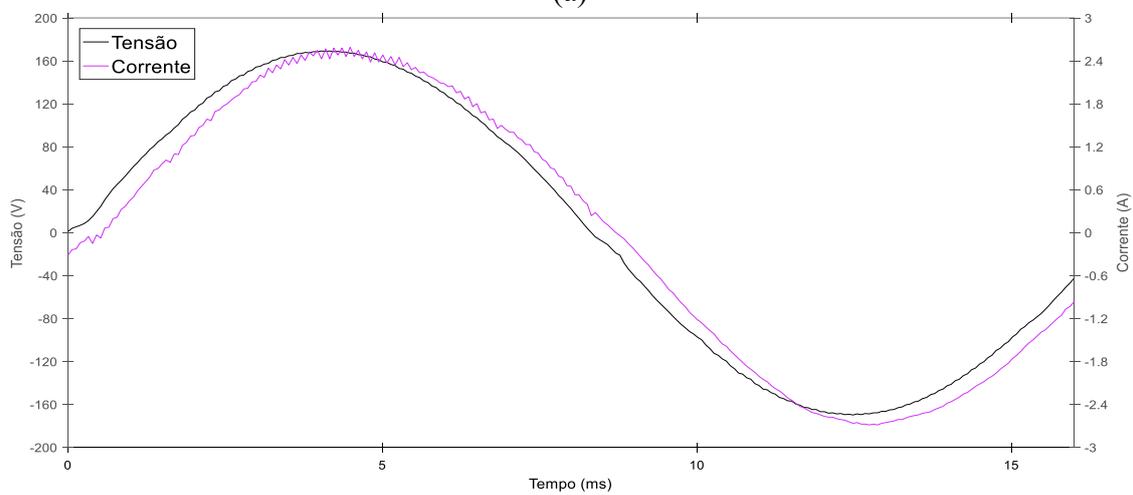


Fonte: Autoria própria.

Figura 5.22 – Formas de onda em regime permanente no lado c.a. (a) saída do inversor e (b) saída do *soft starter*: bomba d'água da residência R.3.



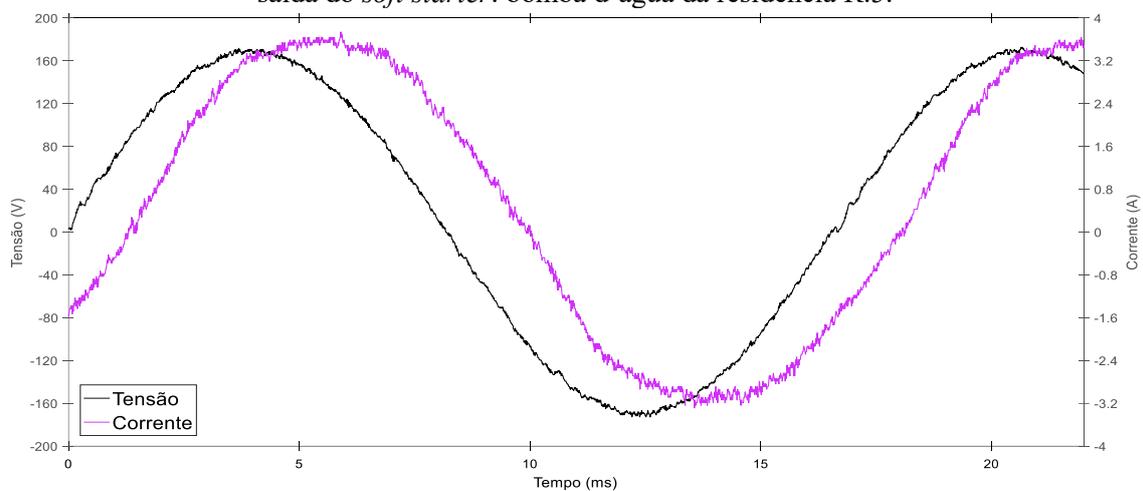
(a)



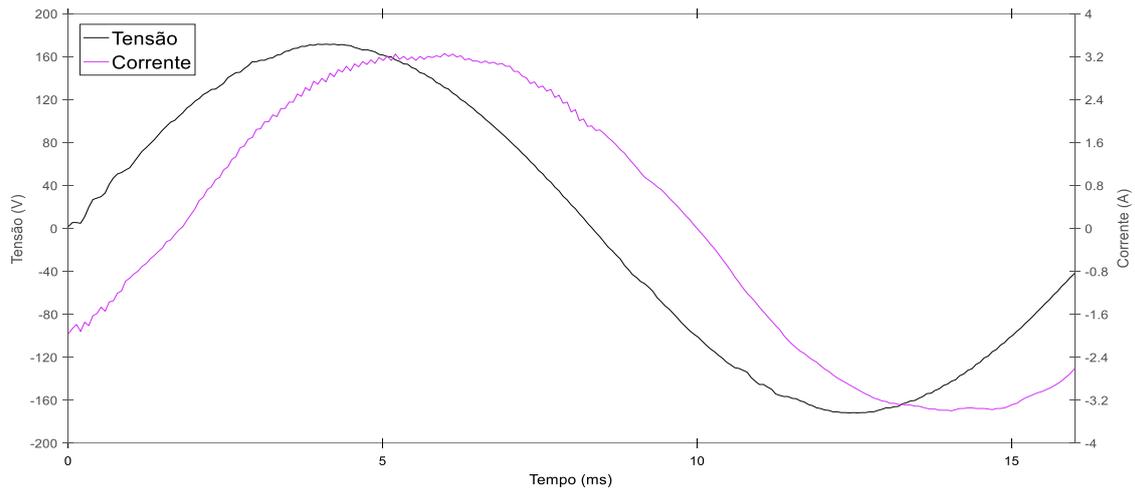
(b)

Fonte: Autoria própria.

Figura 5.23 – Formas de onda em regime permanente no lado c.a. (a) saída do inversor e (b) saída do *soft starter*: bomba d'água da residência R.5.



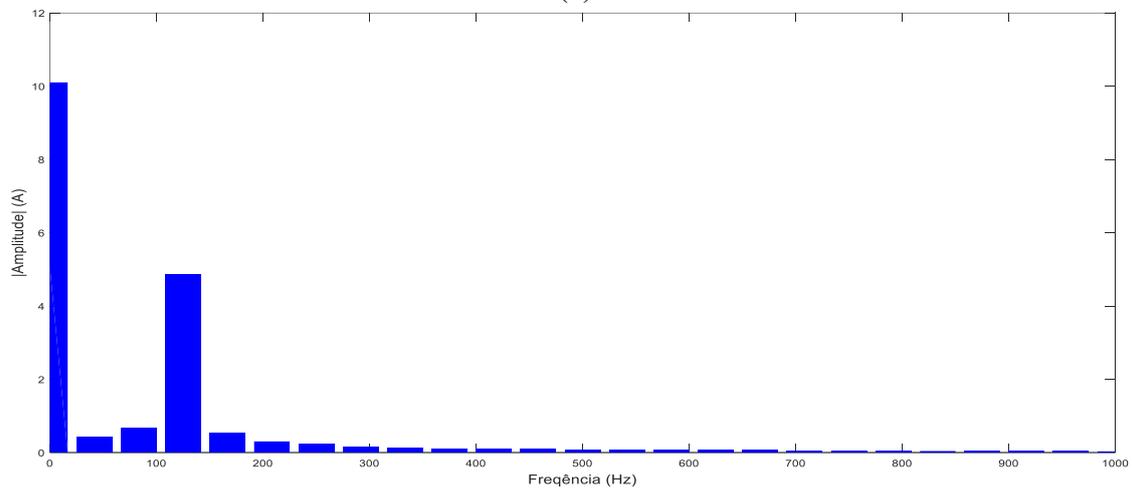
(a)



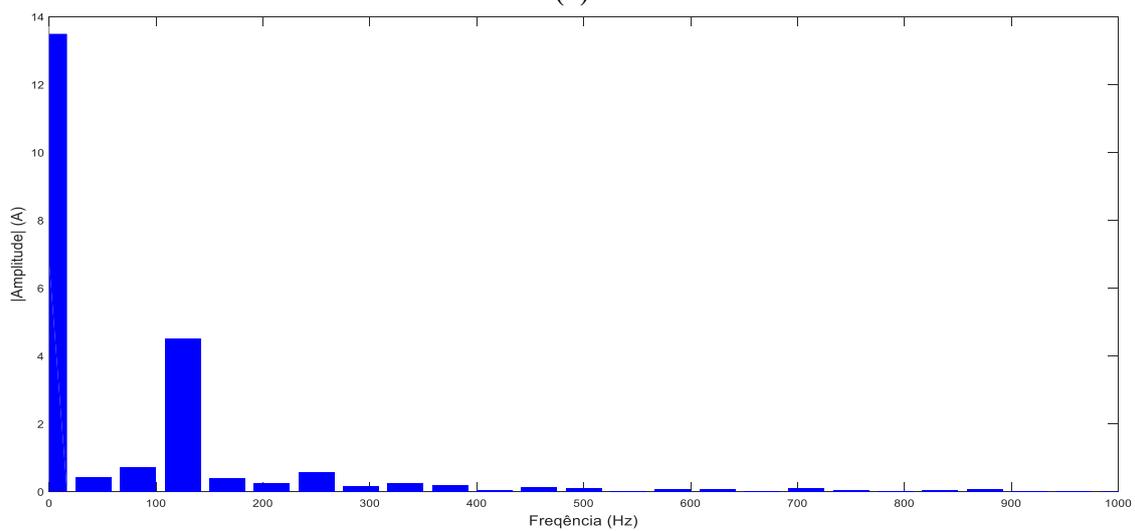
(b)

Fonte: Autoria própria.

Figura 5.24 – Espectro de amplitude de corrente para as formas de onda no lado c.c. (a) residência R.3 e (b) residência R.5.



(a)



(b)

Fonte: Autoria própria.

Por meio dos resultados obtidos, observou-se uma leve queda de tensão da ordem de 0,8 V, durante os 5,5 segundos iniciais de operação da bomba d'água presente na residência R.3. Neste intervalo, há a maior demanda por corrente elétrica por parte do equipamento, chegando ao valor máximo de 16,48 A. Em relação à bomba d'água da residência R.5, a corrente máxima registrada foi de 29,91 A no intervalo de até oito segundos, enquanto a queda de tensão foi mais acentuada, da ordem de 2,72 V.

Um ponto de destaque é o fato de que a implementação do *soft starter* se mostrou economicamente e tecnicamente viável. O modelo selecionado é de relativo baixo custo e a inserção do mesmo no sistema requer um investimento monetário menor do que, por exemplo, a substituição do inversor por um de maior potência para atendimento da potência de surto da motobomba. Do ponto de vista técnico, os aparelhos foram capazes de reduzir as correntes de *insrush* para um valor que os inversores suportem, mesmo durante a utilização simultânea de outras cargas presentes nas residências.

Dentre as bombas d'água utilizadas neste trabalho, a presente na residência R.5 é a mais antiga. O exato modelo não se encontra mais no catálogo do fabricante, fazendo com que a manutenção seja dificultada. Conforme informações dadas pelo proprietário e constatação em campo, o motor possui certa dificuldade em iniciar o movimento de rotação do eixo e isso ocasiona um maior consumo de energia para o estágio inicial de operação. Observa-se também que quando o equipamento está em regime permanente, a carga provoca uma ondulação de tensão mais evidente do que em relação à bomba d'água presente na residência R.3. A quantificação do fator de pico *ripple*, ocasionada pela operação dos equipamentos foi realizada fazendo-se uso da Equação 2.2.

Nas Tabelas 5.4 e 5.5 estão representados, respectivamente, os dados adquiridos no lado c.c. e c.a. dos inversores. Ressalta-se, ainda, que a eficiência apresentada na Tabela 5.5 diz respeito aos equipamentos individualmente e não a eficiência global.

Tabela 5.4 – Parâmetros elétricos no lado c.c. dos inversores.

Residência	Tensão rms (V)	Corrente rms (A)	Potência aparente (VA)	Potência ativa (W)	Fator de pico do <i>ripple</i> (%)
R.3	26,10	10,40	271,30	255,40	102,10
R.5	24,80	13,69	339,66	327,90	73,00

Fonte: Autoria própria.

Tabela 5.5 – Parâmetros elétricos no lado c.a. dos inversores.

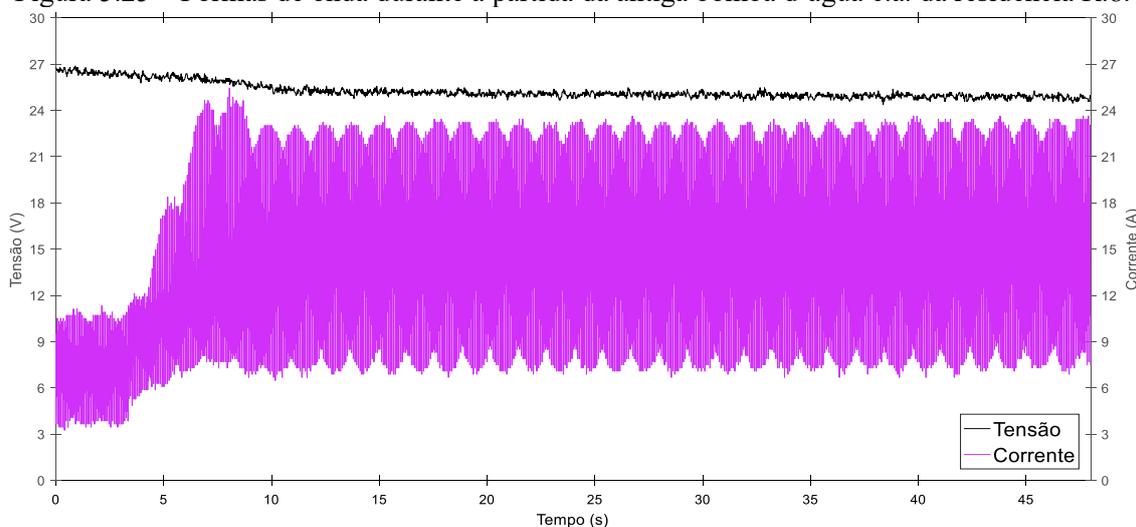
<b>Inversor</b>					
<b>Residência</b>	<b>Tensão rms (V)</b>	<b>Corrente rms (A)</b>	<b>Potência aparente (VA)</b>	<b>Potência ativa (W)</b>	<b>Eficiência (%)</b>
R.3	119,48	1,87	224,11	222,28	87,03
R.5	121,18	2,47	300,27	254,81	77,71
<b>Soft starter</b>					
R.3	119,16	1,84	219,40	217,45	97,82
R.5	120,83	2,44	295,04	242,80	95,28

Fonte: Autoria própria.

O tempo para enchimento das caixas d'água, apesar de capacidades diferentes, é o mesmo, aproximadamente 30 minutos. Baseado nas informações repassadas pelos residentes, o bombeamento de água é realizado todos os dias. Por conseguinte, o consumo mensal de energia da NDCC por estes equipamentos são, para as residências R.3 e R.5, respectivamente 3,83 kWh e 4,92 kWh.

Em relação à residência R.8, salienta-se que durante o início dos ensaios operacionais envolvendo as bombas d'água coincidiu com o período de transição de equipamentos na residência, com a substituição do modelo c.a. Acquaflow para o c.c. TP ci. Dessa forma, não há dados no lado c.a. do inversor e na configuração do osciloscópio para aquisição das formas de onda seguindo ao que foi mostrado na Figura 5.21 (escala de tempo 2 ms/div). Na Figura 5.25 mostram-se as formas de onda de partida até o regime na configuração do osciloscópio para escala de tempo de 4 s/div, tal qual ilustrado na Figura 5.20.

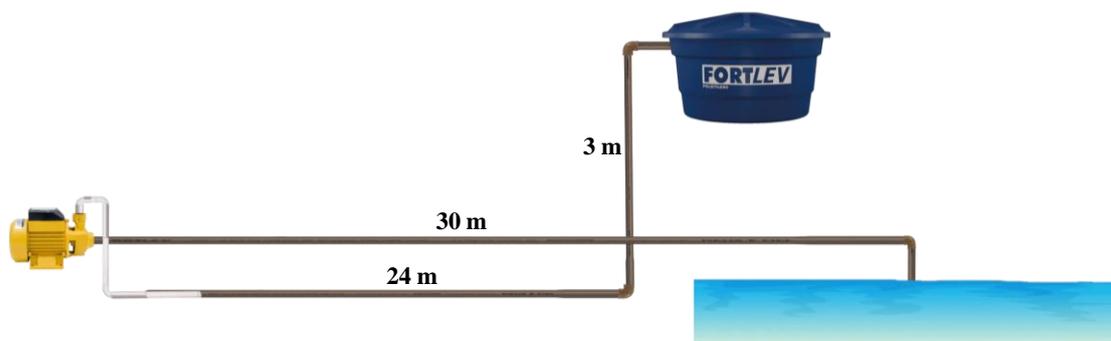
Figura 5.25 – Formas de onda durante a partida da antiga bomba d'água c.a. da residência R.8.



Fonte: Autoria própria.

A operação da bomba d'água ocasionou uma queda de tensão de 1,10 V no lado c.c. do inversor e durante o pico de demanda, a corrente máxima registrada foi de 23,63 A. As potências aparente e ativa registradas para o equipamento foram de, respectivamente, 405,82 VA e 379,56 W. Dentre as bombas d'água c.a. esta era a que mais demandava potência e energia da NDCC, dado que a instalação hidráulica presente, conforme esquemático da Figura 5.26, é a mais longa da comunidade atendida pela nanorrede, fazendo com que o tempo para enchimento da caixa d'água de 1.500 litros fosse de aproximadamente 1h20m. Com isso, o consumo de energia da rede era de 15,14 kWh mensais, já que, assim como nas demais residências, o bombeamento de água é realizado todos os dias.

Figura 5.26 – Esquemático da instalação hidráulica na residência R.8 durante o ensaio.



Fonte: Autoria própria.

A configuração das conexões hidráulicas presentes na residência R.8 foram alteradas e isto está abordado no subtópico subsequente.

### 5.3.2.2 Bombas d'água c.c.

Devido às vantagens em relação aos modelos atendidos em corrente alternada, a intenção é que futuramente todos os aparelhos para bombeamento de água sejam c.c. A primeira bomba d'água c.c., modelo TP ci, implementada foi na residência R.4 que era, até o período dos ensaios operacionais, uma das extremidades da NDCC. Na residência em questão, há uma caixa d'água de 1.500 litros para abastecimento interno e o tempo de utilização diária da bomba d'água é de 30 minutos.

A indicação das conexões hidráulicas, seguindo o mesmo padrão das figuras anteriores, está apresentada na Figura 5.27.

Figura 5.27 – Conexões hidráulicas da bomba d'água presente na residência R.4.



Fonte: Autoria própria.

A segunda residência contemplada com a bomba d'água c.c., modelo TP ci, foi a R.8, neste caso, houve a substituição da motobomba c.a., modelo Acquaflo. Apresenta-se na Figura 5.28 o esquema de conexão hidráulica na residência R.8.

Figura 5.28 – Conexões hidráulicas da bomba d'água presente na residência R.8.



Fonte: Autoria própria.

Na ocasião da substituição da bomba d'água, houve ainda a implantação de um sistema de captação de água da chuva com a inclusão de uma nova caixa d'água de 1.000 litros, que junto com a outra já em utilização somam 2.500 litros de capacidade total de

armazenamento de água. No período com altos índices de chuva, o reservatório ligado ao sistema de captação é preenchido rapidamente e, então pode ser realizado o bombeamento para a caixa d'água principal de 1.500 litros. Nos meses de baixos volumes de chuva, o bombeamento de água para a caixa secundária e principal é feito do rio. A seleção do percurso a ser percorrido pelo líquido é selecionado mediante registros do tipo esfera acrescentados no sistema hidráulico. O tempo necessário para completar as duas caixas d'água é de 2h40min.

A residência R.12, até a conclusão deste trabalho, está no final de rede elétrica da NDCC. Nela, devido à extensão da rede e o fato de as baterias que compõem o referido SGA (até a data de produção deste trabalho) estarem no final de suas vidas úteis, normalmente possui uma tensão inferior às outras residências apresentadas. A instalação hidráulica é a mais simples, conforme indicado na Figura 5.29. O volume da caixa d'água é de 2.000 litros e o tempo necessário para enchê-la é de 2 horas.

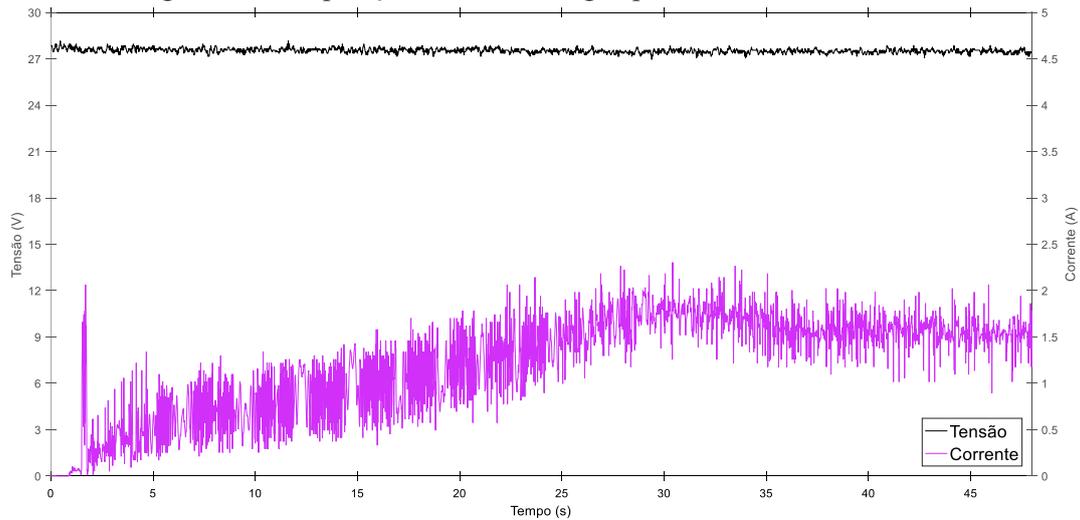
Figura 5.29 – Conexões hidráulicas da bomba d'água presente na residência R.12.



Fonte: Autoria própria.

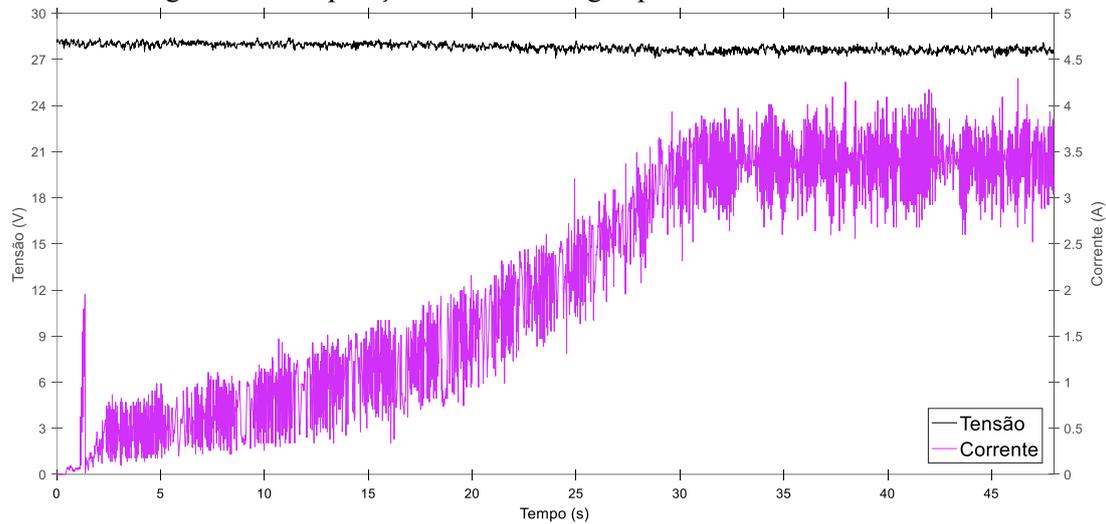
Nas Figuras 5.30, 5.31 e 5.32 estão apresentados, respectivamente, as formas de onda durante a operação das bombas c.c. das residências R.4, R.8 e R.12.

Figura 5.30 – Operação da bomba d'água presente na residência R.4.



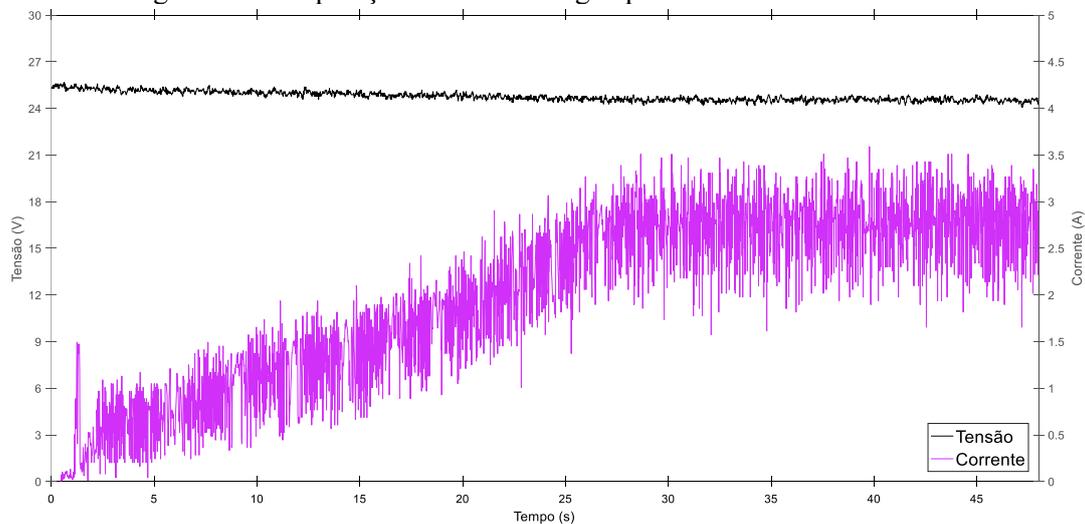
Fonte: Autoria própria.

Figura 5.31 – Operação da bomba d'água presente na residência R.8.



Fonte: Autoria própria.

Figura 5.32 – Operação da bomba d'água presente na residência R.12.



Fonte: Autoria própria.

Verifica-se que os perfis de onda possuem certa semelhança devido à atuação do mecanismo de MPPT embutido no equipamento. Vale ressaltar ainda que, apesar de um pico inicial de corrente, este é de magnitude consideravelmente inferior àqueles ocasionados pelas bombas c.a., causando impactos menos severos na rede durante a partida e em regime permanente. A queda de tensão na rede durante a operação das bombas d'água nas residências R.4, R.8 e R.12, respectivamente, foi de 0,9 V, 1,2 V e 1,21 V. Especifica-se na Tabela 5.6 os parâmetros elétricos dos equipamentos durante o regime permanente de funcionamento de cada instrumento.

Tabela 5.6 – Parâmetros elétricos durante operação das bombas d'água c.c.

Residência	Máxima corrente registrada (A)	Tensão rms (V)	Corrente rms (A)	Potência aparente (VA)	Potência ativa (W)
R.4	2,30	27,49	1,56	43,02	42,80
R.8	4,29	27,60	3,42	94,67	94,30
R.12	3,59	24,54	2,79	68,50	67,96

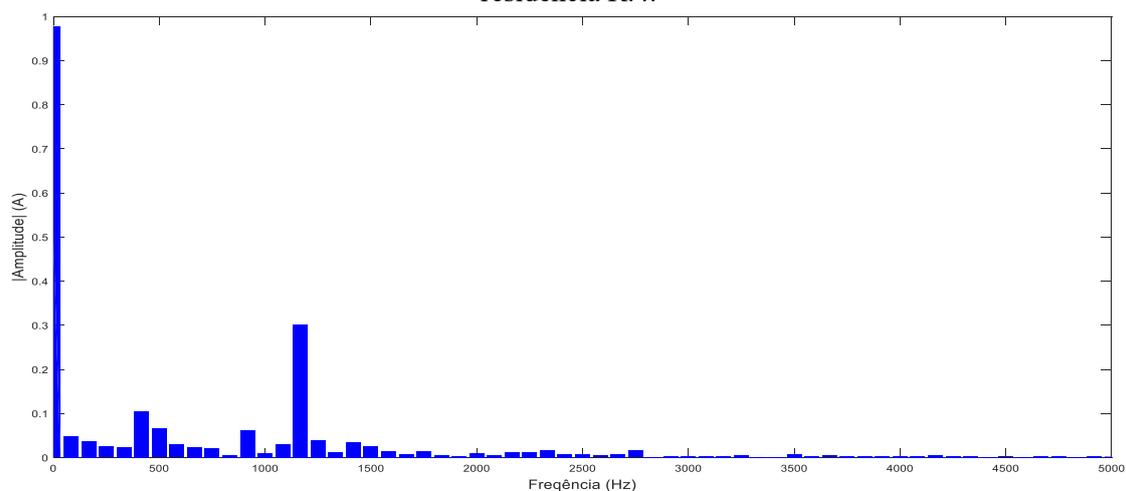
Fonte: Autoria própria.

O consumo mensal de energia da NDCC de cada bomba d'água é de 0,657 kWh, 6,59 kWh e 4,07 kWh para as residências R.4, R.8 e R.12, respectivamente. Com isso, além dos menores impactos à qualidade de energia da NDCC, verifica-se a maior eficiência energética no que diz respeito ao consumo de energia das bombas c.c. quando comparadas às bombas c.a., mesmo que estas não estejam operando em sua tensão nominal de catálogo.

As motobombas c.c., devido ao chaveamento do conversor eletrônico embutido, também introduzem componentes c.a. na NDCC. Todavia, cabe ressaltar que o chaveamento se dá em frequências elevadas, porém com baixa magnitude, fazendo com que as perdas relacionadas não sejam tão acentuadas.

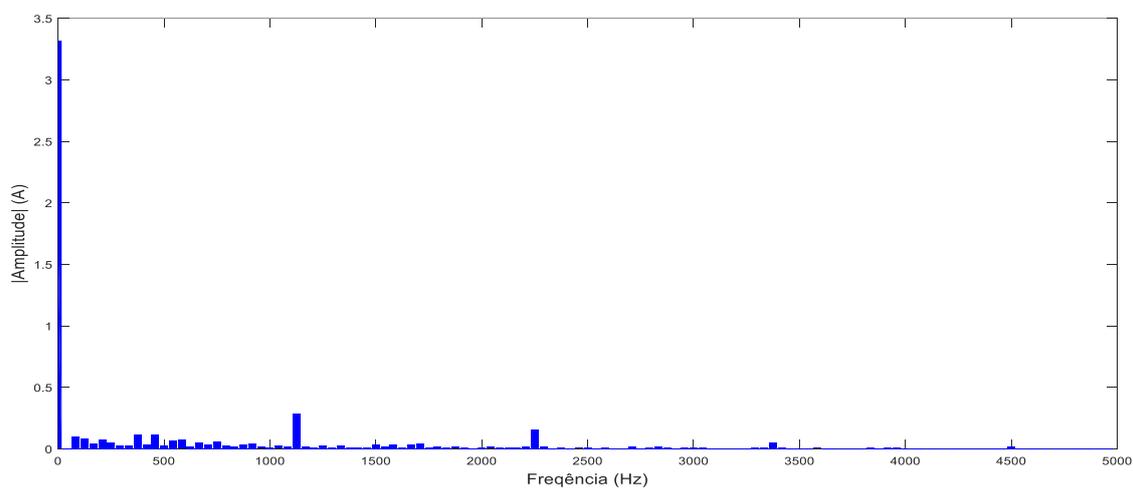
Nas Figuras 5.33, 5.34 e 5.35 são apresentados, respectivamente, os espectros de amplitude de corrente (limitados no eixo da frequência) para a operação em regime permanente das motobombas presentes nas residências R.4, R.8 e R.12. Ademais, na Tabela 5.7, estão especificados os indicadores envolvendo *ripple* durante a operação das motobombas nas residências supracitadas considerando todo o espectro do sinal nos cálculos.

Figura 5.33 – Espectro de amplitude de corrente da operação da bomba d'água presente na residência R.4.



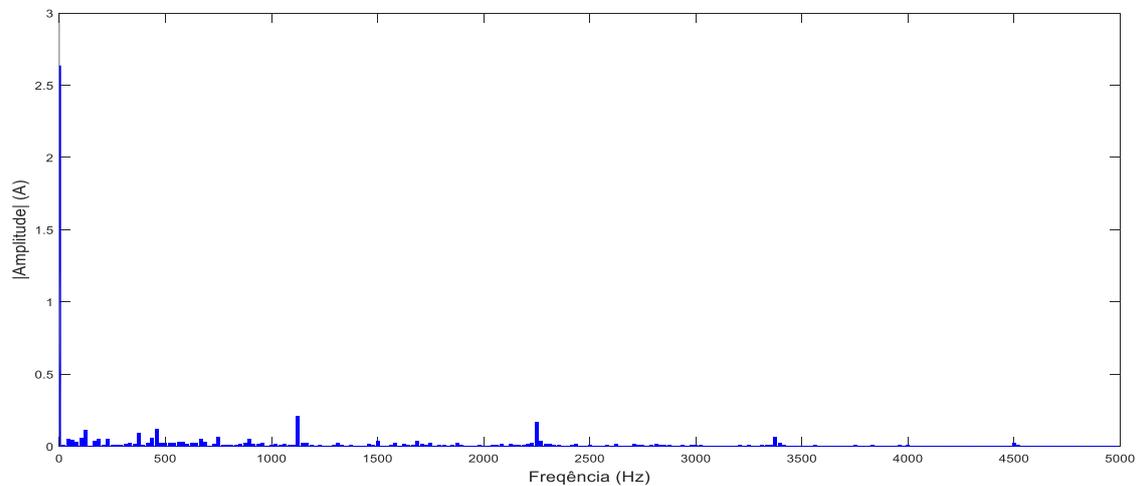
Fonte: Autoria própria.

Figura 5.34 – Espectro de amplitude de corrente da operação da bomba d'água presente na residência R.8.



Fonte: Autoria própria.

Figura 5.35 – Espectro de amplitude de corrente da operação da bomba d'água presente na residência R.12.



Fonte: Autoria própria.

Tabela 5.7 – Indicadores envolvendo *ripple* nas motobombas das residências R.4, R.8 e R.12.

Residência	Fator rms do <i>ripple</i> (%)	Fator de pico do <i>ripple</i> (%)	RDF (%)	$\frac{I_{rms}}{I_{média}}$
R.4	25,592	113,59	35,892	1,0322
R.8	9,7167	48,823	8,6038	1,0047
R.12	11,266	66,739	9,3403	1,0063

Fonte: Autoria própria.

Mediante visualização dos dados apresentados na Tabela em questão, contata-se que a motobomba da residência R.4 é a que apresenta a maior distorção e fator de pico do *ripple*. Este mesmo equipamento é o que opera com menor corrente entre as três motobombas c.c. supridas pela NDCC. Além disso, a porcentagem correspondente da componente c.c. nos espectros de amplitude para as motobombas das residências R.4, R.8 e R.12 são, respectivamente, 35,48%, 49,87% e 49,38%.

#### 5.4 Estudo comparativo de eficiência energética

Esta seção se destina a realizar um estudo comparativo de três cenários tecnicamente possíveis para a NDCC, sendo o primeiro considerando que todas as cargas das residências estudadas operam em corrente contínua; o segundo utilizando cargas mistas c.c. e c.a., como é atualmente e, por fim, uma configuração em que todas as cargas operem em corrente alternada e sejam supridas por um inversor de maior potência. Para tanto, fez-se um levantamento de todas as cargas instaladas nas residências citadas na elaboração deste trabalho. As cargas levantadas, bem como o tipo de energização seguem conforme o apresentado na Tabela 5.8. Na Figura 5.36 é indicada a potência total, considerando os dados de placa dos equipamentos, de cargas motrizes por residência.

Tabela 5.8 – Levantamento de carga instalada (continua).

Residência	Carga	Tipo de energização	Potência nominal (W)	Quantidade	Potência total (W)
R.2	Geladeira	c.c.	72	1	72
	Lavadora de roupa	c.a.	400	1	400
	Ventilador	c.a.	140	1	140
	Liquidificador	c.a.	1.000	1	1.000
	Lâmpadas	c.c.	8	4	32
	Televisão	c.a.	100	1	100
<b>Total c.c.</b>					<b>104</b>
<b>Total c.a.</b>					<b>1.640</b>

Tabela 5.8 – Levantamento de carga instalada (continuação).

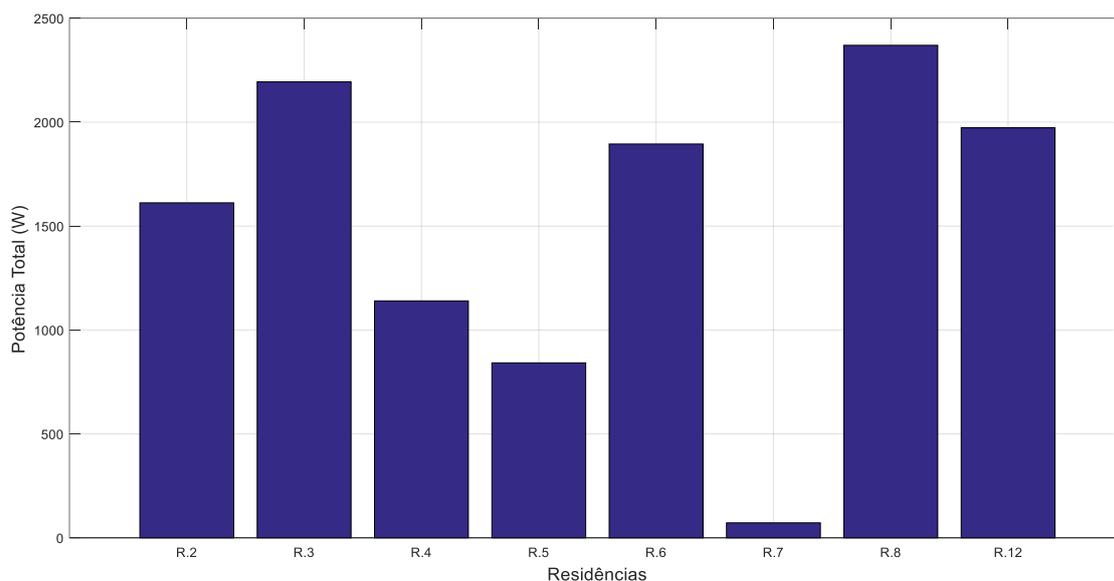
Residência	Carga	Tipo de energização	Potência nominal (W)	Quantidade	Potência total (W)
R.3	Geladeira	c.c.	72	1	72
	Bomba d'água	c.a.	370	1	370
	Ventilador	c.a.	126	2	252
	Batedeira de açai	c.c.	300	1	300
	Liquidificador	c.a.	500	1	500
	Batedeira	c.a.	700	1	700
	Televisão	c.a.	100	1	100
	Lâmpadas	c.c.	8	6	48
<b>Total c.c.</b>					<b>420</b>
<b>Total c.a.</b>					<b>1.922</b>
R.4	Geladeira	c.c.	72	1	72
	Ventilador	c.a.	126	1	126
	Bomba d'água	c.c.	272	1	272
	Lavadora de roupa	c.a.	370	1	370
	Liquidificador	c.a.	300	1	300
	Televisão	c.a.	275	1	275
	Lâmpadas	c.c.	8	6	48
	Refletor	c.a.	20	1	20
<b>Total c.c.</b>					<b>392</b>
<b>Total c.a.</b>					<b>1.091</b>
R.5	Geladeira	c.c.	72	1	72
	Bomba d'água	c.a.	370	1	370
	Batedeira de açai	c.a.	-	-	-
	Ventilador	c.a.	160	1	160
	Lavadora de roupa	c.a.	240	1	240
	Televisão	c.a.	100	1	100
	Lâmpadas	c.c.	8	6	48
<b>Total c.c.</b>					<b>120</b>
<b>Total c.a.</b>					<b>870</b>
R.6	Geladeira	c.c.	72	1	72
	Batedeira de açai	c.a.	300	1	300
	Ventilador	c.a.	126	1	126
	Ventilador	c.a.	47	1	47
	Lavadora de roupa	c.a.	400	1	400
	Liquidificador	c.a.	550	1	550
	Batedeira	c.a.	400	1	400
	Televisão	c.a.	100	1	100
	Lâmpada	c.c.	8	3	24
<b>Total c.c.</b>					<b>96</b>
<b>Total c.a.</b>					<b>1.923</b>

Tabela 5.8 – Levantamento de carga instalada (conclusão).

R.7	Freezer	c.c.	72	1	72
	Lâmpadas	c.c.	8	2	16
	Televisão	c.a.	100	1	100
	Rádio	c.c.	3	1	3
	<b>Total c.c.</b>				<b>91</b>
<b>Total c.a.</b>				<b>100</b>	
R.8	Geladeira	c.c.	72	1	72
	Bomba d'água	c.c.	272	1	272
	Ventilador	c.a.	50	2	100
	Ventilador	c.a.	126	1	126
	Máquina de costura	c.a.	100	1	100
	Lavadora de roupa	c.a.	400	1	400
	Liquidificador	c.a.	1.100	1	1.100
	Batedeira	c.a.	200	1	200
	Televisão	c.a.	100	1	100
	Lâmpadas	c.c.	8	7	56
	<b>Total c.c.</b>				<b>400</b>
<b>Total c.a.</b>				<b>2.126</b>	
R.12	Bomba d'água	c.c.	272	1	272
	Liquidificador	c.a.	400	1	400
	Batedeira	c.a.	400	1	400
	Lavadora de roupa	c.a.	450	1	450
	Batedeira de açáí	c.a.	367	1	367
	Ventilador	c.a.	42	2	84
	Televisão	c.a.	100	1	100
	Lâmpadas	c.c.	8	3	24
<b>Total c.c.</b>				<b>296</b>	
<b>Total c.a.</b>				<b>1.801</b>	

Fonte: Autoria própria.

Figura 5.36 – Potência total de cargas motrizes por residência.

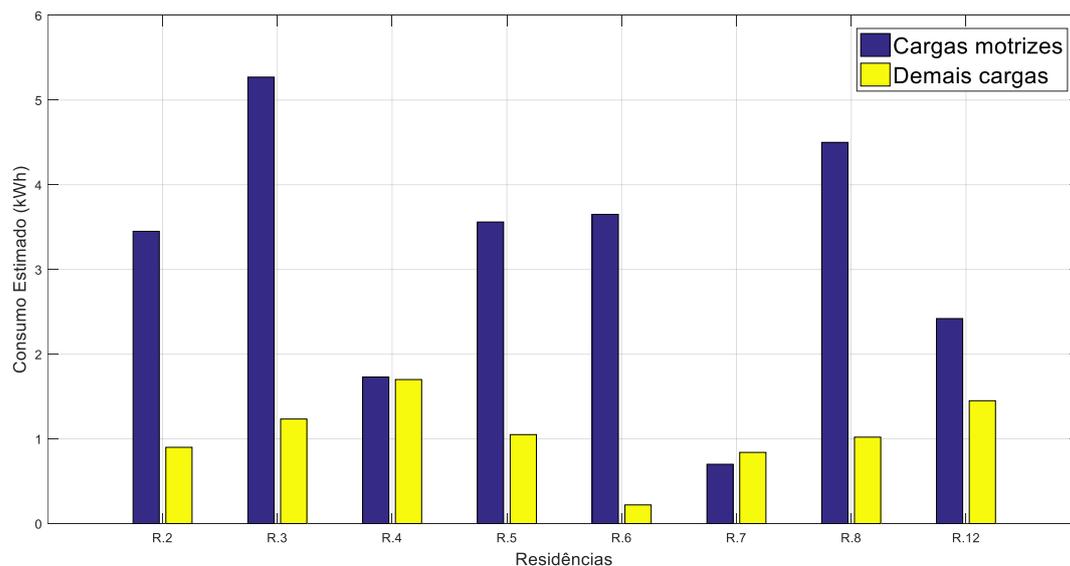


Fonte: Autoria própria.

É possível verificar que a maior parte da potência nominal referente a equipamentos nas residências corresponde às cargas motrizes. As cargas motrizes representam 92,43%, 93,68%, 76,87%, 85,05%, 93,86%, 47,64 %, 93,82% e 94,09% da potência instalada das residências R.2, R.3, R.4, R.5, R.6, R.7, R.8 e R.12, respectivamente. Cabe ressaltar, porém, que nem todas estas cargas são supridas pela NDCC, como é o caso da lavadora de roupa da residência R.4 e a bateadeira de açaí da residência R.5, onde ambas são acionadas fazendo o uso de geradores à diesel.

Para estimar o consumo de energia das cargas, fez-se uma entrevista com cada morador responsável pelas residências, a fim de se entender o uso de cada uma delas. É sabido que nem todas as cargas são utilizadas todos os dias e, por isso, durante a entrevista considerou-se uma situação hipotética em que tudo fosse usado ao longo do dia. Com isso, o consumo diário estimado em cada residência é apresentado na Figura 5.37.

Figura 5.37 – Consumo diário estimado por residência.



Fonte: Autoria própria.

Baseado no levantamento de carga, foi possível selecionar cargas equivalentes c.c. àquelas c.a. para o primeiro cenário, bem como modelos de inversores para suprir a demanda no cenário três, considerando todas as cargas em corrente alternada. Além disso, para o último caso, considera-se um inversor capaz de suportar a corrente de *inrush* da bomba d'água.

#### 5.4.1 Cenário 1

Como alternativas às cargas: televisão, ventilador, máquina de lavar e liquidificador que operam em corrente alternada, após pesquisas no mercado nacional e internacional, selecionou-se os equipamentos apresentados na Tabela 5.9. Ressalta-se que todos possuem tensão nominal de 24 V<sub>c.c.</sub>

Tabela 5.9 – Cargas c.c. consideradas no estudo de eficiência.

Carga	Modelo	Fabricante	Potência nominal (W)
Televisão	RV-TV	Sylvox	< 50
Ventilador	Supreme	Khurshid fans	21 - 115
Máquina de lavar	DQB25-G201	Heno/Oem	180
Liquidificador	BlenderX	MC Modern Comfort	150

Fonte: Autoria própria.

Dos instrumentos, apenas o liquidificador não possui a capacidade do correspondente em corrente alternada. Todavia, mesmo aumentando o tempo de uso, verifica-se uma menor consumo de energia da NDCC. Normalmente, cargas em corrente contínuas são mais eficientes pois efetuam as mesmas tarefas demandando menos

energia. Para além disso, há a diminuição de perdas por conversão c.c./c.a. durante a energização do instrumento.

Outro fator positivo na aplicação de cargas c.c. na NDCC é a maior estabilidade em regime permanente dada a baixa magnitude da componente c.a. injetada na rede. Como foi mostrado, verifica-se, por exemplo, que em regime permanente as bombas d'água supridas por inversores causam ondulação de tensão. Além disso, quando há inversor no sistema, deve-se levar em consideração o carregamento do mesmo, para que seja atingido a maior eficiência possível. Referente às cargas c.c., vale ressaltar que algumas possuem conversores c.c./c.c. e este é normalmente projetado para operar em um ponto com eficiência elevada suprimindo a demanda específica a que se destina.

Um fator ainda impeditivo para a difusão do uso de cargas em corrente contínua é o custo de aquisição. Os equipamentos mencionados na Tabela 5.8 são produzidos por fabricantes estrangeiros que não possuem representação oficial no Brasil, elevando ainda mais os custos, se considerada logística de importação e impostos.

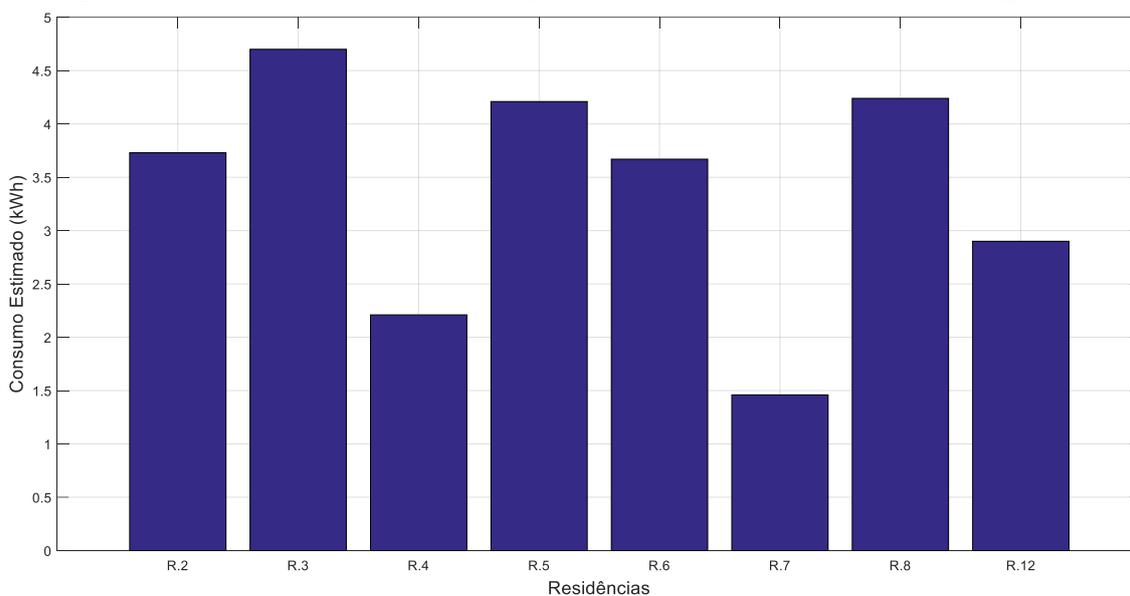
A título de exemplificação, a geladeira c.c. implementada nas residências custam cerca R\$ 4.655, enquanto o modelo equivalente em c.a. custa R\$ 2.500. Outro exemplo é a televisão, enquanto uma de 32 polegadas operante em corrente alternada, encontrada na maioria das residências, custa no mercado nacional cerca de R\$ 1.000, o modelo c.c. equipolente indicado se aproxima de R\$ 5.000, desde a compra até a entrega. O ventilador, por sua vez, enquanto os modelos c.a. presentes nas residências custam abaixo de R\$ 300,00, a aquisição do modelo c.c. equivalente custa cerca de R\$ 1.768,06. O liquidificador possui custo de aquisição relativamente próximo do modelo c.a., contudo, possui capacidade volumétrica consideravelmente inferior e, por fim, referente à máquina de lavar c.c. mencionada, o fornecedor só realiza a venda mediante quantidade mínima de 180 unidades, dificultando ainda mais a aquisição por parte do consumidor final. Todos os valores mencionados referem-se às cotações realizadas no início de março de 2024.

Dessa forma, um quesito importante é a adaptação de cargas para operação em corrente contínua. Neste aspecto, o GEDAE trabalha com algumas configurações de cargas adaptadas, como exemplo, lâmpadas com a inserção de um conversor c.c./c.c. e bateadeiras de açaí, conforme mostrado em Filho (2021).

Na Figura 5.38 é apresentado o consumo estimado de energia para o cenário em questão. É adequado ressaltar que não foi encontrado um modelo em corrente contínua

de bateadeira para bolo e devido a isso, considerou-se a potência c.c. equivalente ao modelo c.a. de cada residência, a título de cálculos e ilustração. Além disso, como o modelo de liquidificador c.c. possui menor capacidade, fora acrescido nos cálculos uma hora extra de uso. Por fim, em relação ao ventilador, devido às características climáticas da região, considerou-se o uso na potência máxima.

Figura 5.38 – Consumo estimado diário por residência considerando todas as cargas c.c.



Fonte: Autoria própria.

## 5.4.2 Cenário 2

Na atual configuração da NDCC verifica-se que mesmo ela sendo resiliente e capaz de suprir as residências conectadas, há algumas limitações, especialmente quanto ao uso do inversor. Na residência R.5, por exemplo, não é possível utilizar o ventilador durante o bombeamento de água, mesmo quando a bomba d'água está operando em regime permanente. Além disso, destaca-se a inserção do estágio de partida suave da bomba para diminuir a corrente de *inrush* nas residências R.3 e R.5, que apesar de possuir alta eficiência é um novo item, que naturalmente acrescenta perdas e custos ao sistema. Outro caso é o fato de que equipamentos como o liquidificador não podem ser utilizados em sua potência máxima, visto que o inversor não suporta.

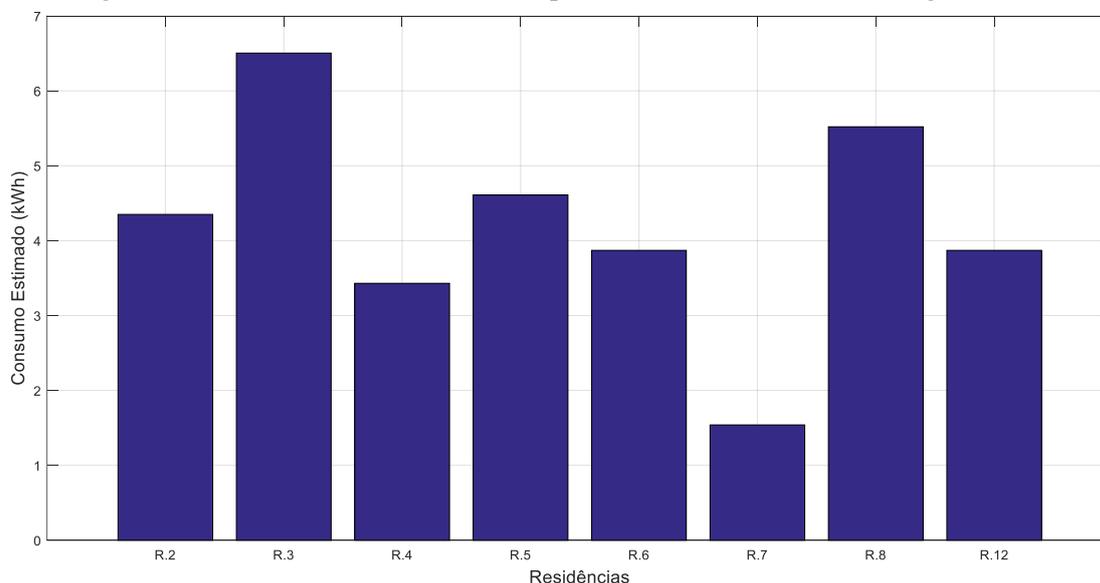
Apesar das limitações citadas, a rede em seu estado atual possui benefícios como maior adaptabilidade e resiliência mesmo na presença de ondulações de tensão. Além disso, no geral, os custos com infraestrutura são menores mesmo que alguns itens, como

os dispositivos de proteção c.c., possuem custos maiores. Além disso, há ainda um custo inferior ao cenário 1 dado a aquisição de equipamentos c.c.

Com cargas mistas, em uma situação de queda de tensão, o inversor pode ser desligado devido ao nível de tensão de entrada. Porém, algumas cargas em corrente contínua como a geladeira por exemplo, podem não deixar de operar visto que, apesar de possuir tensão nominal de  $24 V_{c.c.}$ , há uma faixa de operação do controle e do compressor. Nesta situação, apenas algumas cargas são afetadas e não a totalidade.

Na Figura 5.39 mostra-se o consumo estimado diário por residência para o dado cenário.

Figura 5.39 – Consumo estimado diário por residência considerando cargas mistas.



Fonte: Autoria própria.

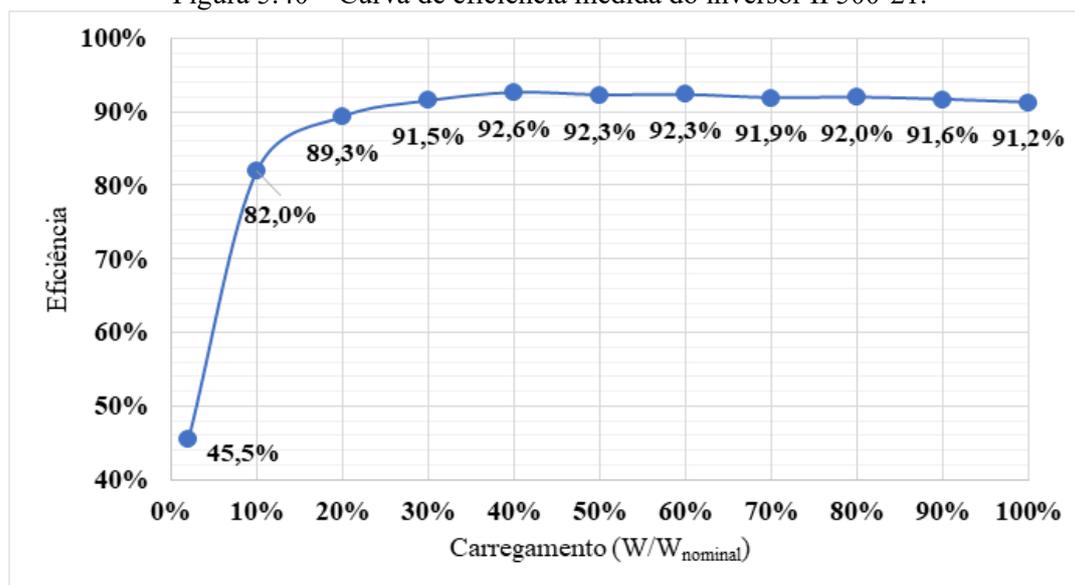
### 5.4.3 Cenário 3

Para um cenário em que todas as cargas estejam operando em corrente alternada o maior benefício é o custo relacionado à aquisição e manutenção dos equipamentos. Além disso, há uma ampla disponibilidade de modelos no mercado nacional dos itens utilizados nas residências. Além disso, encontra-se uma literatura mais avançada no aspecto de controle e gerenciamento para aplicações em redes com cargas em corrente alternada.

Todavia, cabe ressaltar que há um custo extra na aquisição de inversores de maior potência capazes de atender todas as cargas. Ademais, o inversor apresentará uma capacidade ociosa durante boa parte do tempo, devido ao baixo carregamento, uma vez

que nem todas as cargas são utilizadas simultaneamente o que implica em menor eficiência. Para que o inversor opere nos pontos de maior eficiência, é necessário que seu carregamento esteja na faixa de 30% a 90%. Ratificando esta informação, na Figura 5.40 é apresentado a curva de eficiência do inversor IP500-21 da fabricante Epever, que está presente nas residências supridas pela NDCC em Ilha das Onças. O levantamento desta curva foi por meio de ensaio em laboratório no GEDAE/UFPA (GEDAE, 2023).

Figura 5.40 – Curva de eficiência medida do inversor IP500-21.



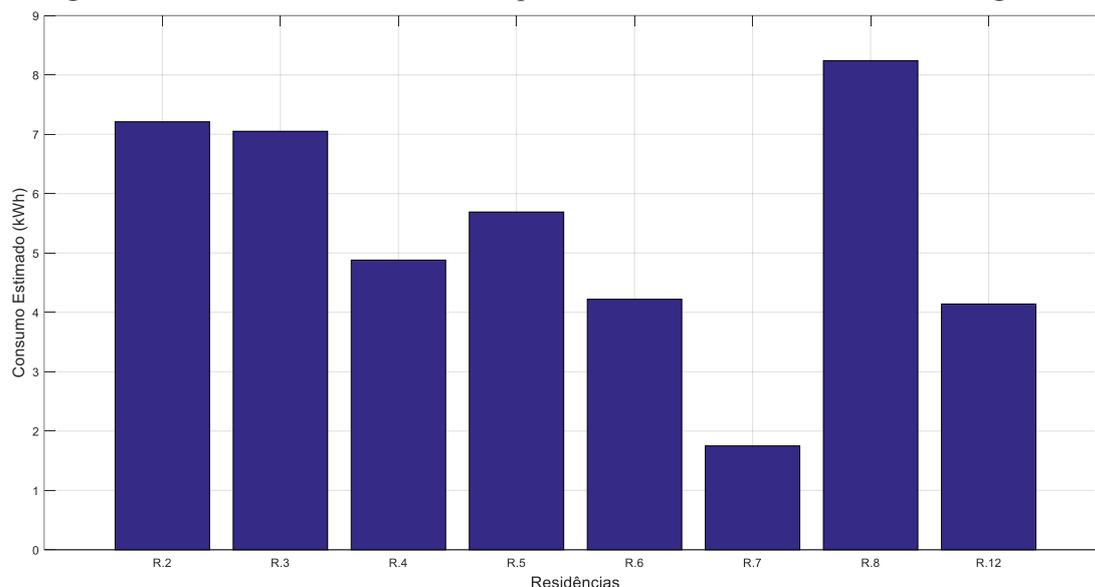
Fonte: GEDAE (2023).

Inversores também são fontes para introdução de correntes com conteúdo harmônico circulando na rede c.c., acrescentando perdas além das de conversão c.c./c.a. Ainda, como mencionado anteriormente, em caso de queda de tensão na rede todas as cargas presentes podem ser atingidas.

Sendo assim, para este cenário são considerados dois sub cenários, um considerando a presença do *soft starter* para acionamento das bombas e outro elevando a capacidade do inversor para que consiga suprir a carga sem este estágio intermediário. Além disso, neste caso para estimar o consumo de todos os equipamentos, considerando o funcionamento na totalidade em c.a., levou-se em consideração os dados de placa de cada carga, não mais considerando a limitação do inversor atual em relação à potência.

Para esta configuração de todas as cargas c.a. supridas por inversores, o consumo estimado por residência segue o apresentado na Figura 5.41. Além disso, as cargas equivalentes em c.a. utilizadas para este cenário são apresentadas na Tabela 5.10.

Figura 5.41 – Consumo diário estimado por residência considerando todas as cargas c.a.



Fonte: Autoria própria.

Tabela 5.10 – Cargas c.a. consideradas no estudo de eficiência.

Carga	Modelo	Fabricante	Potência nominal (W)
Bomba d'água	Aquaflow	Ferrari	370
Geladeira	DC35A	Electrolux	108
Batedeira de açaí	DG.20	Metvisa	367
Lâmpada LED tipo bulbo com soquete padrão E27	-	Avant	9

Fonte: Autoria própria.

Como as residências possuem diferentes potências instaladas, foi dimensionado um inversor para cada caso, a fim de melhor compatibilização do equipamento com a carga. Dessa forma, tem-se maior eficiência devido à redução da potência ociosa do inversor, além de levar a menores custos de aquisição.

No primeiro momento, considera-se que as bombas d'água contam com o estágio intermediário para partida suave e diminuição da corrente de *inrush*. Outrossim, para a seleção dos inversores seguiu-se alguns critérios: os equipamentos devem possuir disponibilidade oficial no mercado nacional; a eficiência do inversor deve ser a maior possível; o equipamento deve ser compatível com o sistema da NDCC nos quesitos de tensão c.c. de entrada e tensão c.a. de saída igual a 127 V. Somado a isso, empregou-se as informações de utilização das cargas ao longo do dia coletadas por meio das entrevistas com os moradores, conforme mencionado anteriormente. A seleção dos inversores é apresentada na Tabela 5.11.

Tabela 5.11 – Inversores selecionados para cada residência considerando as bombas com *soft starter*.

Residência	Modelo	Fabricante	Potência nominal (W)	Máxima eficiência (%)
R.2	IP2000	Epever	2.000	94
R.3	IP2000	Epever	2.000	94
R.4	IP1500	Epever	1.500	93
R.5	IP2000	Epever	2.000	94
R.6	IP1500	Epever	1.500	93
R.7	IP500-21	Epever	500	91
R.8	IP2000	Epever	2.000	94
R.12	IP1500	Epever	1.500	93

Fonte: Autoria própria.

Para as residências R.3, R.8 e R.12 a potência total das cargas presentes é superior à potência do inversor. Todavia, o pico de demanda, respectivamente, para as residências mencionadas é de 1.417 W, 1.467 W e 1.115,4 W e a capacidade de fornecimento de forma contínua dos modelos IP2000 e IP1500 é de 1.600 W e 1.200 W, respectivamente. Dessa forma, os inversores selecionados são capazes de realizar o atendimento das residências. Em relação à residência R.5, há um maior sobredimensionamento do inversor, visto que o pico de demanda da residência supera a capacidade de fornecimento de modo contínuo do inversor IP1500 e, portanto, o modelo escolhido foi o IP2000.

No que diz respeito a eficiência, o fabricante não fornece a curva de eficiência dos inversores, portanto, é adotado o perfil mostrado na Figura 5.40, assim, considera-se a eficiência máxima no inversor no intervalo de carregamento de 40% a 80%. Para as residências R.2, R.3, R.4, R.5, R.6, R.7, R.8 e R.12, respectivamente, durante o pico de demanda, os máximos carregamentos estimados são, respectivamente, 65,40%, 70,85%, 71,56%, 64,10%, 78,43%, 41,60%, 73,35% e 77,02%. Cabe ressaltar, contudo, que as máximas eficiências dos inversores são atingidas apenas por um curto intervalo do dia, operando com potência ociosa ou baixo carregamento durante o resto do dia, impactando consideravelmente na eficiência do equipamento.

Para uma circunstância em que não há o estágio intermediário de partida suave, considera-se a corrente de *inrush* da motobomba durante o período de utilização. Como o acionamento das motobombas não é fixo, uma vez que depende do nível da água do rio, para os cálculos de dimensionamento considerou-se a energização no momento de maior demanda da residência. Devido às elevadas potências de surto dos inversores IP1500 e IP2000, sendo estas 2.400 W e 3.200 W, respectivamente, não há a necessidade de

substituição por outro inversor de maior potência pois estes conseguem suprir a operação das bombas no referido cenário de operação.

A comparação dos cenários é importante para o entendimento dos pontos positivos e negativos das possibilidades técnicas de operação da NDCC. Todavia, observa-se que em termos de eficiência energética o cenário 1 se destaca, visto que, além dos cálculos teóricos relacionados ao consumo de energia elétrica, em escala real há a redução de perdas conforme já mencionado no presente trabalho. Na Tabela 5.12 estão apresentados os dados estimados em todos os cenários, verificando-se o menor consumo para o cenário 1.

Tabela 5.12 – Consumo de energia mensal para cada cenário.

<b>Residência</b>	<b>Consumo de energia: cenário 1 (kWh)</b>	<b>Consumo de energia: cenário 2 (kWh)</b>	<b>Consumo de energia: cenário 3 (kWh)</b>
R.2	111,9	130,5	216,3
R.3	141	195	211,5
R.4	66,3	102,9	146,4
R.5	126,3	138,3	170,7
R.6	110,1	116,1	126,6
R.7	43,8	46,2	52,5
R.8	127,2	165,6	247,2
R.12	87	116,1	124,2
<b>Total</b>	<b>813,6</b>	<b>1010,7</b>	<b>1295,4</b>

Fonte: Autoria própria.

### 5.5 Uso de motobomba à gasolina

A realização de bombeamento de água por intermédio de equipamentos à combustíveis fósseis, apesar de bem comuns em comunidades não atendidas pela rede elétrica convencional, ocasiona diversos impactos, econômicos e ambientais. Assim, este tópico busca apresentar uma breve relação entre a utilização da NDCC e um modelo de motobomba à gasolina na residência R.8.

O tempo médio de utilização da bomba d'água energizada por combustível fóssil por parte dos moradores da residência era de 30 minutos. Sendo assim, o consumo médio de combustível pelo equipamento era da ordem de 0,45 l/dia. Em relação aos custos de manutenção, seguindo o manual do fabricante Toyama (2020), é indicado a substituição de alguns componentes ao decorrer do tempo. Dessa forma, baseado neste manual, em 4 anos, tempo médio para a troca das baterias, o custo extra com troca de itens é de R\$ 310,00. Já em relação à compra de combustível, considerando o uso na residência, o valor economizado no período é de R\$ 5.256,00. Para o cálculo da economia, utilizou-se o valor

base de R\$ 8,00 para o litro da gasolina, valor médio na região até a finalização do presente trabalho.

Com o montante poupado é possível investir na manutenção e reforço da NDCC. Por exemplo, com o valor mencionado pode-se adquirir novas baterias. De acordo com pesquisas no mercado nacional, é possível realizar a compra de três baterias com capacidade de 234 Ah. Com três novas baterias é possível a reposição do BB ficando uma unidade de reserva ou ainda, sob outra perspectiva, os moradores completariam o valor necessário para a obtenção de uma nova bateria, totalizando quatro. Com isso, há a possibilidade de elevar a capacidade do BB.

O exposto apresenta dados de apenas uma residência, mas a situação fica ainda mais crítica se forem consideradas todas as que realizam bombeamento de água proveniente de motobombas à combustíveis fósseis. Após a implementação da NDCC e consequentemente diminuição do uso destes modelos de motobomba e também dos geradores à diesel que outrora supriam as residências energeticamente, houve a diminuição da emissão de gases de efeito estufa e da poluição do ar e sonora. Com isto, residentes relataram o reaparecimento de algumas espécies de animais na região, especialmente pássaros.

Ainda referentes aos impactos ambientais, analisando o consumo mensal e anual de energia para funcionamento da motobomba à gasolina que estão estimados em, respectivamente, 61,51 kWh, e 738,12 kWh. Considerando o funcionamento diário do equipamento, é possível estimar de forma simplificada a emissão de CO<sub>2</sub> equivalente, baseado no exposto em Kamimura *et al.* (2020). Dessa forma, apenas para a residência R.8, os fatores de emissão de CO<sub>2</sub> por queima de combustível é da ordem de 186,36  $\frac{kg \times CO_2}{kWh}$  por ano, apenas para o uso de uma motobomba à gasolina.

Tomando como referência que em cada residência na Ilha das Onças residem 5 pessoas, o número presumido de moradias é de 660. Em uma conjuntura em que o abastecimento de água se dê no mesmo perfil da residência R.8, o fator anual de emissão de CO<sub>2</sub> salta para 123  $\frac{t \times CO_2}{kWh}$ . Estes indicadores ressaltam a importância de uma transição energética mais sustentável, visto possíveis impactos negativos causados ao meio ambiente.

A NDCC é fruto de um projeto de pesquisa e os equipamentos instalados na comunidade não foram adquiridos pelos moradores. No entanto, o sistema mostra-se viável tecnicamente e economicamente, especialmente por fazer uso de equipamentos amplamente encontrados no mercado (desde a geração, armazenamento e cargas), contribuindo ainda para a replicabilidade em outras localidades remotas sem acesso à energia elétrica. A atual configuração da rede, com cargas mistas c.c. e c.a., se mostra vantajosa porque introduz os benefícios do aumento de eficiência, quando as cargas são nativamente em corrente contínua e a disponibilidade no mercado de equipamentos em corrente alternada. Por fim, vários benefícios são entregues com a implantação da NDCC no local, portanto, projetos desta natureza são de extrema importância para o aprimoramento da qualidade de vida de pessoas que vivem em comunidades remotas.

## CONCLUSÕES

O presente trabalho compreendeu a análise de eventos de QEE durante a operação de cargas motrizes na NDCC implementada pelo GEDAE na Ilha das Onças. As cargas motrizes foram selecionadas como objeto de estudo dada a importância de sua utilização em atividades diárias que impactam no incremento de qualidade de vida dos moradores. Além disso, identifica-se que a maior parte da potência instalada nas residências, diz respeito às cargas motrizes.

Por meio da instrumentação apropriada foi possível adquirir dados de parâmetros elétricos para averiguação dos seguintes eventos: corrente de *inrush* durante a partida das motobombas c.a.; *ripple* nas formas de onda de corrente durante o regime permanente dos equipamentos supridos por inversor e equipamentos que operam em corrente contínua, devido ao conjunto eletrônico embarcado nas referidas cargas; afundamento de tensão durante a partida das cargas motrizes de refrigeração.

Devido à magnitude da corrente elétrica de *inrush* das motobombas c.a., a proteção do inversor foi ativada em razão da extrapolação do valor da potência de surto do equipamento e, devido a isso, foi implementado um estágio intermediário para a partida suave. A adição desse novo equipamento não ocasionou perdas significativas na rede, visto que mediante análise dos dados coletados o mesmo apresenta eficiência de operação acima de 90%. Mesmo com a partida suave das motobombas c.a., elas causam uma queda de tensão na rede superior àquelas causadas pelas motobombas c.c.

Verificou-se, ainda, em relação aos eventos supracitados, um alto fator de distorção de *ripple* em todas as cargas c.c. monitoradas, o que pode a longo prazo acarretar problemas ao sistema de armazenamento eletroquímico, bancos de baterias, devido à circulação de corrente com tais ondulações. Também, constatou-se que há injeção de componente c.a. na NDCC provenientes destas cargas em corrente contínua, todavia, em altas frequências e baixa magnitude. O *ripple* é maior para o caso das motobombas c.a. com a utilização de inversor e *soft starter*.

No estágio inicial de energização das cargas motrizes de refrigeração é demandada uma corrente de elevada magnitude, sendo a maior registrada de 105,9 A, capaz de ocasionar um afundamento de tensão no ponto de conexão da carga. Apesar das correntes registradas serem muito superior à nominal do equipamento, não houve o acionamento

dos disjuntores de proteção pois o evento ocorre em um intervalo muito pequeno, inferior à resposta dos disjuntores. Devido à duração do evento de afundamento de tensão, não foi observado impactos na operação de outras cargas, como lâmpadas, por exemplo.

Em relação à eficiência energética, verifica-se que as motobombas c.c., mesmo não operando nas condições nominais, são mais eficientes no quesito de consumo de energia. O tempo necessário para bombeamento de água se equipara aos modelos c.a. porém, é demandado menos energia da NDCC.

Além disso, nos cenários operacionais apresentados, verifica-se que a configuração atual com cargas mistas se mostra vantajosa. Isso acontece porque mesmo que o cenário 1, onde todas as cargas das residências operam em corrente contínua seja o mais eficiente, também é o que requer maior investimento monetário uma vez que a escala de produção fabril de cargas c.c. ainda não se equipara aos modelos de corrente alternada, reduzindo a disponibilidade no mercado, especialmente o nacional.

Já em uma perspectiva onde todas as cargas operam em corrente alternada, há a necessidade de sobredimensionamento dos inversores para atendimento dos picos de demanda nas residências, fazendo com que o inversor opere a maior parte do tempo com baixo carregamento e, conseqüentemente, maiores perdas de energia são adicionadas devido à operação com baixa eficiência.

Ainda, com a realização do presente trabalho estimou-se de forma simplificada a redução de emissões de gases de efeito estufa, bem como a diminuição do gasto com combustível para utilização em grupos geradores à gasolina para suprimento de motobombas para realização do bombeamento de água. No período médio de vida útil de uma bateria, é possível realizar a substituição do banco de baterias em uma residência, utilizando o recurso economizado com a não aquisição de gasolina.

De maneira geral, conclui-se que trabalhos envolvendo redes em corrente contínua de pequeno porte são de extrema importância para a difusão do sistema dentro e fora da academia. Os acadêmicos devem contribuir para a sociedade e, por isso, o GEDAE/UFPA já desenvolveu e continua a desenvolver diversos projetos relacionados à utilização de fontes renováveis de energia visando à eletrificação de comunidades remotas ou de difícil acesso, com o objetivo de melhoria de qualidade de vida dos moradores.

A utilização de nanorredes c.c. para suprimento energético destas localidades não atendidas pela rede elétrica convencional apresenta diversas vantagens técnicas como a diminuição de perdas, flexibilidade do sistema, inserção das fontes renováveis dentre outras. Além disso, a NDCC na Ilha das Onças apresenta considerável replicabilidade em condições semelhantes de operação ou condições diferentes mediante adaptações técnicas necessárias.

A continuidade de pesquisas nesta linha de conhecimento é imprescindível e, portanto, como sugestões para trabalhos futuros elenca-se:

- Medição simultânea em pontos distintos da NDCC durante a operação de cargas motrizes;
- Realização de um estudo termográfico visando avaliar o impacto da temperatura na operação das cargas motrizes;
- Monitoramento de outras cargas motrizes empregadas, como ventilador e máquina de açaí, por exemplo;
- Emprego de modelos e realização de simulações envolvendo a operação de cargas motrizes na NDCC, buscando desenvolver soluções para mitigação dos impactos na rede;
- Monitoramento continuado para levantamento de dados reais de consumo de energia das cargas motrizes em diferentes épocas no local, visando o refinamento do estudo de eficiência energética.

**REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

ALAM, M. S., *et al.* **Planning and Protection of DC Microgrid: A Critical Review on Recent Developments.** Engineering Science and Technology, an International Journal, v. 41. 2023, doi: 10.1016/j.jestch.2023.101404.

ALVES, V. P. O., *et al.* **Nanorredes em Corrente Contínua: Principais Configurações e um Caso Prático Aplicado na Amazônia.** Revista Científica Semana Acadêmica, v. 12. 2024, doi: 10.35265/2236-6717-242-12928.

ANEEL. **Resolução Normativa ANEEL nº 1000.** Agência Nacional de Energia elétrica, 2021. Disponível em < <https://www.in.gov.br/en/web/dou/-/resolucao-normativa-aneel-n-1.000-de-7-de-dezembro-de-2021-368359651>>. Acesso em 09 de março de 2024.

AUGUSTINE, S., *et al.* **DC Microgrid Protection: Review and Challenges.** Sandia Report. 2018, doi: 10.2172/1465634.

BALAJI, B., *et al.* **Sliding Mode Controlled DC Microgrid System With Enhanced Response.** Journal of Control and Decision, v. 9. 2022, doi: 10.1080/23307706.2022.2120556.

BALONG, R. S., KREIN, P. T. **Bus Selection in Multibus DC Microgrids.** IEEE Transactions on Power Electronics, v. 26, pp 860-867. 2011, doi: 10.1109/TPEL.2010.2094208.

BARROS, J., APRÁIZ, M., DIEGO, R. I. **Power Quality in DC Distribution Networks.** Energies, v. 12, pp 1-13. 2019, doi:10.3390/en12050848.

BP. **bp Statistical Review of World Energy.** BP, 2022.

BROECK, G. V., STUYTS, J., DRIESEN, J. **A Critical Review of Power Quality Standards and Definitions Applied to DC Microgrids.** Applied Energy, v. 229, pp 281-288. 2018, doi: 10.1016/j.apenergy.2018.07.058.

BROWN, E., *et al.* **Feasibility of Hybrid In-Stream Generator–Photovoltaic Systems for Amazonian Off-Grid Communities.** PNAS Nexus, v. 1 (3), pp. 1-9. 2022, doi: 10.1093/pnasnexus/pgac077.

BUKIRWA, Patience P. **Açaí Processing Through Solar Microgrids in Remote Communities in The Amazonian Region of Brazil.** Master of Science in Sustainable Energy Futures. Imperial College London, London, 2019.

- BURMESTER, D., *et al.* **A Review of Nanogrid Topologies and Technologies.** *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 67, pp 760-775. 2017, doi: 10.1016/j.rser.2016.09.073.
- CALZADILLA, T. C., *et al.* **Is It Feasible a Massive Deployment of Low Voltage Direct Current Microgrids Renewable-Based? A Technical and Social Sight.** *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 161. 2022, doi: 10.1016/j.rser.2022.112198.
- CCEE. **Balanço 2022.** Câmara de Comercialização de Energia Elétrica, 2023.
- CENELEC. **Railway applications - Rolling stock - Electronic equipment.** European Standard 50155. CENELEC, 2017.
- CENELEC. **Railway applications - Supply voltages of traction systems.** European Standard 50163. CENELEC, 2020.
- CHANDRA, A., SINGH, G. K., PANT V. **Protection Techniques for DC Microgrid- A Review.** *Electric Power Systems Research*, v. 187. 2020, doi: 10.1016/j.epsr.2020.106439.
- CHARADI, S., *et al.* **Efficiency And Energy-Loss Analysis For Hybrid AC/DC Distribution Systems and Microgrids: A Review.** *International Transaction on Electrical Energy Systems*, v. 31. 2021, doi: 10.1002/2050-7038.13203.
- CLOTEA, L., SCORTARU, P., NISTOR, C. **A Novel Start-Up Method for Full-Bridge Isolated DC-DC Converter in RES Applications.** In *International Conference on Optimization of Electrical and Electronic Equipment (OPTIM) & 2017 Intl Aegean Conference on Electrical Machines and Power Electronics (ACEMP)*. 2017, doi: 10.1109/OPTIM.2017.7975027.
- COSTA, A. F. P. **Desenvolvimento de Ferramenta Para a Análise Operacional de Uma Nanorrede de Distribuição em Corrente Contínua Utilizando Software de Business Intelligence.** Trabalho de Conclusão de Curso. Graduação em Engenharia Elétrica. UFPA, Belém, Pará: 2022.
- COSTA, T. O. **Modelagem e Simulação em Ambiente Simulink de uma Nanorrede de Distribuição em Corrente Contínua.** Trabalho de Conclusão de Curso. Graduação em Engenharia Elétrica. UFPA, Belém, Pará: 2021.
- CVETKOVIC, I., *et al.* **A Testbed for Experimental Validation of a Low-Voltage DC Nanogrid for Buildings.** In *15th International Power Electronics and Motion Control*

Conference (EPE/PEMC). 2012, pp LS7c.5-1-LS7c.5-8, doi: 10.1109/EPEPEMC.2012.6397514.

DASTGEER, F., *et al.* **Analyses of Efficiency/Energy-Savings of DC Power Distribution Systems/ Microgrids: Past, Present And Future.** *Electrical Power and Energy Systems*, v. 104, pp 89-100. 2019, doi: 10.1016/j.ijepes.2018.06.057.

DONG, D., *et al.* **A Two-Stage High Power Density Single-Phase AC-DC Bi-Directional PWM Converter for Renewable Energy Systems.** In *IEEE Energy Conversion Congress and Exposition*. 2010, pp. 3862-3869, doi: 10.1109/ECCE.2010.5617767.

ENERGY INSTITUTE. **Statistical Review of World Energy.** Energy Institute, 2023.

EPE. **Atlas da Eficiência Energética Brasil | 2023 Relatório de Indicadores.** Empresa de Pesquisa Energética, 2023.

EPE. **Brazilian Energy Balance.** Empresa de Pesquisa Energética, 2023.

ETSI. **Environmental Engineering (EE); Power Supply Interface at the Input to Telecommunications and Datacom (ICT) Equipment; Part 2: Operated by - 48 V Direct Current (dc).** European Standard 300 132-2. ETSI, 2019.

FAN, H., YU, W., XIA, S. **Review of Control Strategies for DC Nano-Grid.** *Frontiers in Energy Research*, v. 8. 2021, doi: 10.3389/fenrg.2021.644926.

FERNANDES, J. S. N. **Política de Assistência Social na Amazônia: Problematizando o Acesso das Famílias Ribeirinhas da Ilha das Onças, Barcarena/PA.** Dissertação de Mestrado. Mestrado em Serviço Social. UFSC, Florianópolis, Santa Catarina: 2020.

FILHO, J. A. A. V. **Desenvolvimento de uma Batedeira de Açaí em Corrente Contínua e Monitoramento de sua Aplicação em uma Edificação Ribeirinha na Amazônia Suprida por Sistema Fotovoltaico Isolado.** Dissertação de Mestrado. Dissertação de Mestrado. Mestrado em Engenharia Elétrica. Mestrado em Engenharia Elétrica. UFPA, Belém, Pará: 2021.

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

FONSECA, A. C. **Qualidade da Energia Elétrica em uma Nanorrede de Distribuição em Corrente Contínua.** Trabalho de Conclusão de Curso. Graduação em Engenharia Elétrica. UFPA, Belém, Pará: 2021.

FREGOSI, D., *et al.* **A Comparative Study Of DC And AC Microgrids In Commercial Buildings Across Different Climates And Operating Profiles.** In IEEE International Conference on DC Microgrids (ICDCM). 2015, doi: 10.1109/ICDCM.2015.7152031.

GALHARDO, M. A. B. **Contribuições ao Estudo da Compensação de Harmônicos em Sistemas de Energia Elétrica.** Tese de Doutorado. Doutorado em Engenharia Elétrica. UFPA, Belém, Pará: 2006.

GANESAN, S. I., *et al.* **Control Scheme For a Bidirectional Converter in a Self-Sustaining Low-Voltage DC Nanogrid.** IEEE Transactions on Industrial Electronics, v. 62, pp. 6317-6326. 2015, doi: 10.1109/TIE.2015.2424192.

GEDAE. **Ensaio de Análise da Curva de Eficiência do Inversor Epever (Ip500-21).** Relatório Interno do GEDAE. 2023.

GHOSH, A., ZARE, F. **Harmonic in Electrical and Electronic Systems.** Control of Power Electronic Converters with Microgrid Applications, pp. 465-500. 2023, doi: 10.1002/9781119815464.ch11.

GIULIANI, F., *et al.* **Soft-Starting Procedure For Dual Active Bridge Converter.** In IEEE Workshop on Control and Modeling for Power Electronics (COMPEL). 2015, doi: 10.1109/COMPEL.2015.7236516.

HANLIN, Z., *et al.* **Voltage Harmonic And Interharmonic Detection Method for DC Microgrid Based on Hanning Window Interpolation.** Journal of Physics: Conference Series, v. 1346. 2019, doi: 10.1088/1742-6596/1346/1/012020.

IEA. **Electricity Market Report 2023.** International Energy Agency, 2023a.

IEA. **SDG7: Data and Projections Access to Electricity.** International Energy Agency, 2022a. Disponível em: <https://www.iea.org/reports/sdg7-data-and-projections/access-to-electricity>. Acesso em 18 de maio de 2023.

IEA. **Solar PV.** International Energy Agency, 2023c. Disponível em: <https://www.iea.org/energy-system/renewables/solar-pv>. Acesso em 25 de novembro de 2023.

IEA. **World Energy Outlook.** International Energy Agency, 2022b.

IEA. **World Energy Outlook.** International Energy Agency, 2023b.

IEC. **Electric Vehicle Conductive Charging System - Part 1: General Requirements.** International Standard 61851-1. IEC, 2017.

**IEC. Electromagnetic Compatibility (EMC) - Part 2: Environment - Section 1: Description of the Environment - Electromagnetic Environment for Low-Frequency Conducted Disturbances and Signalling in Public Power Supply Systems.** International Standard 61000-2-1. IEC TR, 1990.

**IEC. Electromagnetic compatibility (EMC) - Part 3-16: Limits - Limits for Harmonic Currents Produced by the Inverter of Inverter-type Electrical Energy-Supplying Equipment with a Reference Current Less than or Equal to 75 A per Phase Connected to Public Low-Voltage Systems.** International Standard 61000-3-16. IEC TS, 2023.

**IEC. Electromagnetic Compatibility (EMC) - Part 3-2: Limits - Limits for Harmonic Current Emissions (Equipment Input Current  $\leq 16$  A Per Phase).** International Standard 61000-3-2. IEC, 2018.

**IEC. Electromagnetic compatibility (EMC) - Part 4-11: Testing And Measurement Techniques - Voltage Dips, Short Interruptions and Voltage Variations Immunity Tests for Equipment With Input Current Up To 16 A Per Phase.** International Standard 61000-4-11. IEC, 2020.

**IEC. Electromagnetic compatibility (EMC) - Part 4-14: Testing and Measurement Techniques - Voltage Fluctuation Immunity Test for Equipment with Input Current Not Exceeding 16 A Per Phase.** International Standard 61000-4-14. IEC, 2009.

**IEC. Electromagnetic Compatibility (EMC) - Part 4-17: Testing and Measurement Techniques - Ripple on D.C. Input Power Port Immunity Test.** International Standard 61000-4-17. IEC, 1999.

**IEC. Electromagnetic Compatibility (EMC) - Part 4-29: Testing and Measurement Techniques - Voltage Dips, Short Interruptions and Voltage Variations on D.C. Input Power Port Immunity Tests.** International Standard 61000-4-29. IEC CEI, 2000.

**IEC. Electromagnetic Compatibility (EMC) - Part 4-7: Testing and Measurement Techniques - General Guide on Harmonics and Interharmonics Measurements and Instrumentation, For Power Supply Systems and Equipment Connected Thereto.** International Standard 61000-4-7. IEC, 2002.

**IEC. IEC Standard Voltages.** International Standard 60038. IEC CEI, 2009.

**IEC. International Electrotechnical Vocabulary IECV 161-02-25.** International Standard 60050. IEC, 1990.

IEC. **Low-Voltage Electrical Installations – Part 1 Fundamental Principles, Assessment of General Characteristics, Definitions.** International Standard 60364-1. IEC CEI, 2005.

IEC. **LVDC Systems - Assessment of Standard Voltages and Power Quality Requirements.** International Standard 63282. IEC TR, 2020.

IEC. **LVDC: Electricity for the 21<sup>st</sup> Century.** International Electrotechnical Commission, 2017.

IEEE. **IEEE Guide for Analysis and Definition of DC Side Harmonic Performance of HVDC Transmission Systems.** IEEE Std 1124. IEEE, 2003.

IEEE. **IEEE Recommended Practice for 1 kV to 35 kV Medium-Voltage DC Power Systems on Ships.** IEEE Std 1709. IEEE, 2018.

IEEE. **IEEE Recommended Practice for Monitoring Electric Power Quality.** IEEE Std 1159. IEEE, 2019.

IEEE. **IEEE Recommended Practices for Modulating Current in High-Brightness LEDs for Mitigating Health Risks to Viewers.** IEEE Std 1789. IEEE, 2015.

IEEE. **IEEE Standard for Harmonic Control in Electric Power Systems.** IEEE Std 519. IEEE, 2022.

IEEE. **IEEE Standard for Interconnection and Interoperability of Distributed Energy Resources with Associated Electric Power Systems Interfaces.** IEEE Std 1547. IEEE, 2018.

ILYUSHIN, P., *et al.* **State-Of-The-Art Literature Review of Power Flow Control Methods for Low-Voltage AC and AC-DC Microgrids.** *Energies*, v. 16, 3153. 2023, doi: 10.3390/en16073153.

ITU-T. **ITU Standard L.1200: Direct Current Power Feeding Interface Up To 400 V at the Input to Telecommunication and ICT Equipment.** International Telecommunication Union, 2012.

JOLHE, S. P., DHOMANE, G. A., KARALKAR, M. D. **Design of Protection and Control Scheme for Hybrid Nanogrid.** *Protection and Control of Modern Power Systems*, v. 6. 2021, doi: 10.1186/s41601-021-00213-y.

JUNIOR, I. R. P. **Avaliação Operacional dos Efeitos do Perfil de Demanda de Quatro Sistemas de Microgeração Fotovoltaica Conectados à Rede.** Dissertação de Mestrado. Mestrado em Engenharia Elétrica. UFPA, Belém, Pará: 2018.

JYOTHI, B., *et al.* **A Review on Various DC-DC Converters for Photo Voltaic Based DC Micro Grids.** In *Emerging Trends in Industry 4.0 (ETI 4.0)*. 2021, doi: 10.1109/ETI4.051663.2021.9619280.

KAMIMURA, A. M., *et al.* **Relatório: Fatores de Conversão de Energia Elétrica e Térmica em Energia Primária e em Emissões de Dióxido de Carbono a Serem Usados na Etiquetagem de Nível de Eficiência Energética de Edificações.** 2020.

KIM, S., *et al.* **Improving Energy Efficiency in DC Microgrids with Integrated Energy Storage.** In *International Conference and Exhibition on Electricity Distribution*. 2021, doi: 10.1049/icp.2021.1848.

KUMAR, D., *et al.* **DC Microgrid Technology: System Architectures, AC Grid Interfaces, Grounding Schemes, Power Quality, Communication Networks, Applications and Standardizations Aspects.** *IEEE Access*, v. 5, pp 12230-12256. 2017, doi: 10.1109/ACCESS.2017.2705914.

KUMAR, J., AGARWAL, A., AGARWAL, V. **A Review on Overall Control of DC Microgrids.** *Journal of Energy Storage*, v. 21, pp 113-138. 2019, doi: 10.1016/j.est.2018.11.013.

KWAK, B., KIM, M., KIM, J. **Inrush Current Reduction Technology of DAB Converter for Low-Voltage Battery Systems and DC Bus Connections in DC Microgrids.** *IET Power Electronics*, v. 13, pp 1528-1536. 2020, doi: 10.1049/iet-pel.2019.0506.

LENG, M., *et al.* **Impedance-Based Stability Evaluation for Multibus DC Microgrid Without Constraints on Subsystems.** *IEEE Transactions on Power Electronics*, v. 37, pp 932-943. 2022, doi: 10.1109/TPEL.2021.3093372.

LI, H., *et al.* **A Comparison of Energy Efficiency in AC and DC Microgrid with New Energy.** In *International Conference on New Energy and Sustainable Development*. 2020, doi: 10.1088/1755-1315/619/1/012057.

LI, Y., *et al.* **A Comparative Study on Power Quality Standards and Interaction Analysis for LVDC Systems.** In *IEEE Industry Applications Society Annual Meeting (IAS)*. 2022, doi: 10.1109/IAS54023.2022.9939714.

LÖFGREN, I. **Interharmonic Analysis of Sustainable Energy Sources and Loads.** Degree Project Thesis. Bachelor of Science in Engineering. Dalarna University, Falun, Sweden: 2020.

MARISCOTTI, A. **Methods for Ripple Index Evaluation in DC Low Voltage Distribution Networks**. In IEEE Instrumentation & Measurement Technology Conference (IMTC). 2007, doi: 10.1109/IMTC.2007.379205.

MARISCOTTI, A. **Power Quality Phenomena, Standards, and Proposed Metrics for DC Grids**. *Energies*, v. 14(20), 6453. 2021, doi: 10.3390/en14206453.

MAYORAL, E. H., *et al.* **A Comprehensive Review on Power-Quality Issues, Optimization Techniques, and Control Strategies of Microgrid Based on Renewable Energy Sources**. *Sustainability*, v. 15, 9847. 2023, doi: 10.3390/su15129847.

MENG, J., *et al.* **Design and Implementation of Hardware-In-The-Loop Simulation System for Testing Control and Operation of DC Microgrid With Multipledistributed Generation Units**. *IET Generation, Transmission & Distribution*, v. 11, pp 3065-3072. 2017, doi: 10.1049/iet-gtd.2016.1571.

MENG, L., *et al.* **Review on Control of DC Microgrids and Multiple Microgrid Clusters**. *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, v. 5, pp 928-948. 2017, doi: 10.1109/JESTPE.2017.2690219.

MISHRA, M., *et al.* **A Systematic Review On DC-Microgrid Protection And Grounding Techniques: Issues, Challenges And Future Perspective**. *Applied Energy*, v. 313. 2022, doi: 10.1016/j.apenergy.2022.118810.

MME. **Especificações Técnicas dos Programas para Atendimento às Regiões Remotas dos Sistemas Isolados no âmbito do Programa Luz para Todos**. Ministério de Minas e Energia, 2017.

MME. **Programa Luz para Todos**. Ministério de Minas e Energia, [s.d.]a. Disponível em < <https://www.gov.br/mme/pt-br/destaques/Programa%20Luz%20para%20Todos>>. Acesso em 09 de março de 2024.

MME. **Programa Mais Luz para a Amazônia**. Ministério de Minas e Energia, [s.d.]b. Disponível em < <https://www.gov.br/mme/pt-br/destaques/Programa%20Luz%20para%20Todos>>. Acesso em 09 de março de 2024.

MODU, B., *et al.* **Dc-Based Microgrid: Topologies, Control Schemes, and Implementations**. *Alexandria Engineering Journal*, v. 70, pp 61-92. 2023, doi: 10.1016/j.aej.2023.02.021.

- MOHAMMADI, J., AJAELI, F. B., STEVENS, G. **Grounding the DC Microgrid**. IEEE Transactions on Industry Applications, v. 55, pp. 4490-4499. 2019, doi: 10.1109/TIA.2019.2928278.
- MOHANTY, R., PRADHAN, K. **DC Ring Bus Microgrid Protection Using the Oscillation Frequency and Transient Power**. IEEE System Journal, v. 13, pp 875-884. 2019, doi: 10.1109/JSYST.2018.2837748.
- MOUSSA, S., GHORBAL, J-B., SLAMA-BELKHODJA, I. **DC Voltage Level Choice In Residential Remote Area**. In International Renewable Energy Congress (IREC). 2018, doi: 10.1109/IREC.2018.8362444.
- MULLERIYAWAGE, U. G. K., SHEN, W. **A Review of Battery Energy Storage Systems for Residential DC Microgrids and Their Economical Comparisons**. In Joint International Conference on Energy, Ecology and Environment (ICEEE). 2018, doi: 10.12783/dteees/iceee2018/27856.
- NASCIMENTO, R. **Composição Florística de Quintais Agroflorestais na Ilha Das Onças, Barcarena – PA**. Trabalho de Conclusão de Curso. Graduação em Engenharia Florestal. UFRA, Belém, Pará: 2022.
- OSTROWSKA, A., *et al.* **Power Quality Assessment in a Real Microgrid-Statistical Assessment of Different Long-Term Working Conditions**. Energies, v. 15, 8089. 2022, doi: 10.3390/en15218089.
- PIRES, V. F., PIRES, A., CORDEIRO, A. **DC Microgrids: Benefits, Architectures, Perspectives and Challenges**. Energies, v. 16, 1217. 2023, doi: 10.3390/en16031217.
- PRABHALA, V, A., *et al.* **An Overview of Direct Current Distribution System Architectures & Benefits**. Energies, v. 11, 2463. 2018, doi: 10.3390/en11092463.
- RAZMI, D., LU, T. **A Literature Review of the Control Challenges of Distributed Energy Resources Based on Microgrids (MGs): Past, Present and Future**. Energies, v. 15, 4676. 2022, doi: 10.3390/en15134676.
- RODRIGUEZ, P., ROUZBEHI, K. **Multi-Terminal DC Grids: Challenges and Prospects**. Journal of Modern Power Systems and Clean Energy, v. 5, pp 515-523. 2017, doi: 10.1007/s40565-017-0305-0.
- SABRY, A., H. **DC-Based Smart PV-Powered Home Energy Management System Based on Voltage Matching And RF Module**. PLoS ONE, v. 12(9). 2017, doi: 10.1371/journal.pone.0185012.

SABRY, A., H., *et al.* **Compatibility of Household Appliances With DC Microgrid For PV Systems.** *Heliyon*, v. 6. 2020, doi: 10.1016/j.heliyon.2020.e05699.

SANTORO, D., *et al.* **Local Power Distribution – A Review of Nanogrid Architectures, Control Strategies, and Converters.** *Sustainability*, v. 15, pp 2759. 2023, doi: 10.3390/su15032759.

SATHISHKUMAR, P., *et al.* **Digital Soft Start Implementation for Minimizing Start Up Transients in High Power DAB-IBDC Converter.** *Energies*, v. 11(4), 956. 2018, doi: 10.3390/en11040956.

SECHILARIU, M., LOCMET, F., WANG, B. **Photovoltaic Electricity for Sustainable Building. Efficiency and Energy Cost Reduction for Isolated DC Microgrid.** *Energies*, v. 8, pp 7945-7967. 2015, doi: 10.3390/en8087945.

SEO, H. C. **Development of New Protection Scheme in DC Microgrid Using Wavelet Transform.** *Energies*, v. 15. 2022, doi: 10.3390/en15010283.

SEPASI, S., *et al.* **Power Quality in Microgrids: A Critical Review of Fundamentals, Standards, and Case Studies.** *IEEE Access*, v. 11, pp 108493-108531. 2023, doi: 10.1109/ACCESS.2023.3321301.

SIEMENS. **Minidisjuntores 5SL, 5SY e 5SP A Proteção Adequada Para Cada Tipo de Projeto.** 2018.

SIRSI, R., AMBEKAR, Y. **Efficiency of DC Microgrid on DC Distribution System.** In *IEEE Innovative Smart Grid Technologies - Asia (ISGT ASIA)*. 2015, doi: 10.1109/ISGT-Asia.2015.7387055.

THIVES, L. P., GHISI, E., JÚNIOR, J. J. T. **Regional Inequalities in Electricity Access Versus Quality of Life in Brazil.** *Ambiente Construído*, v. 22(3), pp. 47-65. 2022, doi: 10.1590/s1678-86212022000300609.

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

TOYAMA. **Gasoline Engine Water pump 4T Owner's Manual.** 2020

US Department of Defense. **Interface Standart MIL-STD-704F.** US Department of Defense, 2004.

WANG, H., *et al.* **Definitions and Influencing Factors of Power Quality in DC Mcrogrids.** In International Electrical and Energy Conference (CIEEC). 2021, doi: 10.1109/CIEEC50170.2021.9510638.

WHAITE, S., GRAINGER, B., KWASINSKI, A., **Power Quality in DC Power Distribution Systems and Microgrids.** *Energies*, v. 8, pp 4378-4399. 2015, doi: 10.3390/en8054378.

WOUDSTRA, JB. *et al.* **An Introduction to Direct Current Distribution Grids.** In Industrial And Commercial Use Of Energy (ICUE). 2013.

XU, L. *et al.* **Multi-Terminal DC Transmission Systems for Connecting Large Offshore Wind Farms.** In IEEE Power and Energy Society General Meeting - Conversion and Delivery of Electrical Energy in the 21st Century. 2008, doi: 10.1109/PES.2008.4596508.

ZHANG, Z., *et al.* **A Protection System for Improved Ring-Bus DC Microgrids.** *Energies*, v. 12, 3778. 2019, doi: 10.3390/en12193778.