

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
ESCOLA DE ENGENHARIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA**

Wellinton Marcio Albino Agostinho

**CONTROLE BASEADO EM POTÊNCIA APLICADO A GERADORES
DISTRIBUÍDOS CONECTADOS EM UMA MICRORREDE**

Belo Horizonte
2022

Wellinton Marcio Albino Agostinho

**CONTROLE BASEADO EM POTÊNCIA APLICADO A GERADORES
DISTRIBUÍDOS CONECTADOS EM UMA MICRORREDE**

Versão final

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Minas Gerais como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica.

Orientador: Victor Flores Mendes

Coorientador: Clodualdo Venício de Souza

Belo Horizonte
2022

A275c

Agostinho, Wellinton Marcio Albino.

Controle baseado em potência aplicado a geradores distribuídos conectados em uma microrrede [recurso eletrônico] / Wellinton Marcio Albino Agostinho. - 2022.

1 recurso online (110 f. : il., color.) : pdf.

Orientador: Victor Flores Mendes.

Coorientador: Clodualdo Venício de Souza.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia.

Bibliografia: f. 105-110.

Exigências do sistema: Adobe Acrobat Reader.

1. Engenharia Elétrica - Teses. 2. Energia Elétrica – Distribuição – Teses. 3. Conversores – Teses. I. Mendes, Victor Flores. II. Souza, Clodualdo Venício de. III. Universidade Federal de Minas Gerais. IV. Escola de Engenharia. V. Título.

CDU: 621.3(043)

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO Nº 1276

**CONTROLE BASEADO EM POTÊNCIA APLICADO A GERADORES
DISTRIBUÍDOS CONECTADOS EM UMA MICRORREDE**

WELLINTON MARCIO ALBINO AGOSTINHO

DATA DA DEFESA: 20/06/2022



UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
ESCOLA DE ENGENHARIA
COLEGIADO DO CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

FOLHA DE APROVAÇÃO

"Controle Baseado Em Potência Aplicado A Geradores Distribuídos Conectados Em Uma Microrrede"

WELLINTON MARCIO ALBINO AGOSTINHO

Dissertação de Mestrado defendida e aprovada, no dia 20 de junho de 2022, pela Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Minas Gerais constituída pelos seguintes professores:

Prof. Dr. Waner Wodson Aparecido Gonçalves Silva ((UNIFEI))

Prof. Dr. Clodualdo Venicio de Sousa - Coorientador ((UNIFEI))

Prof. Dr. Danilo Iglesias Brandão (DEE (UFMG))

Prof. Dr. Victor Flores Mendes - Orientador (DEE (UFMG))

Belo Horizonte, 20 de junho de 2022.



Documento assinado eletronicamente por **Victor Flores Mendes, Professor do Magistério Superior**, em 20/06/2022, às 16:13, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://sei.ufmg.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **1532759** e o código CRC **7C03D117**.

Às minhas filhas, Giovanna e Mariana.

Agradecimentos

Agradeço primeiramente a Deus por ter me fortalecido e direcionado nessa caminhada.

Aos meus pais, José Agostinho e Maria de Fátima, sinônimos de humildade e amor, são minha base inspiradora, e meu irmão, Wesley, pelos incentivos e torcidas constantes.

Às minhas filhas, Giovanna e Mariana, que por tantas vezes me viram incansavelmente comprometido e mesmo sem saber exatamente o que acontecia, entendiam que era algo importante que o pai delas buscava e à Daiara pelo suporte com as meninas.

Ao orientador professor Victor Flores Mendes, pela paciência, compreensão e confiança no meu trabalho, que mesmo com minha pouca disponibilidade de dedicação, forneceu todo apoio e incentivo durante todos os momentos.

Ao co-orientador professor Clodualdo Venício de Souza, pelo engajamento neste trabalho, desde o processo seletivo até a conclusão, pela confiança e motivação e pela oportunidade de acesso ao laboratório de Geração de Energia da UNIFEI.

Faço meus sinceros agradecimentos aos professores e pesquisadores do laboratório de Geração de Energia da UNIFEI Itabira, Goevanne Luciano Reis, o qual tive o privilégio de trabalhar em conjunto neste projeto, pelas inúmeras oportunidades de aprendizado adquiridos e ao professor Waner, pelas constantes ideias enriquecedoras e ajuda durante o comissionamento do protótipo.

Ao meu amigo Paulo Henrique Vieira Soares pela oportunidade.

Agradeço à UFMG, à UNIFEI e todos os servidores destas instituições, que de forma direta ou indireta contribuíram para que eu pudesse concluir este curso.

”Seja forte e corajoso! Não se apavore nem desanime, pois o Senhor, o seu Deus, estará com você por onde você andar”.

JOSUÉ 1:9

Resumo

A transformação atual nos sistemas de energia elétrica consiste na modernização das tecnologias de geração, transmissão, distribuição e uso final da energia elétrica, possibilitando ao usuário final maior participação no planejamento e operação do sistema. Microrredes são partes significativas desta transformação em diversos níveis de tensão de operação. Este trabalho tem como objetivo promover a regulação do fluxo de potência ativa e reativa no ponto de acoplamento comum (PAC) de uma microrrede c.a. e a rede de distribuição de baixa tensão. Esta regulação é realizada através de uma estrutura hierárquica de controle, onde a técnica de controle centralizado *power-based control* (PBC) é aplicada no segundo nível de controle da microrrede. O objetivo da utilização da técnica de controle baseado em potência na microrrede desenvolvida é promover o compartilhamento de potência proporcional entre os recursos energéticos distribuídos (REDs), permitir a operação no modo ilhado e conectado e assegurar o controle de potência ativa e reativa da rede. A arquitetura da microrrede proposta é composta por seis conversores monofásicos na configuração *full-bridge*, sendo três conectados entre fase-neutro e três com conexão fase-fase com o sistema de distribuição. Os resultados foram obtidos através de simulações computacionais e validados em um protótipo experimental desenvolvido em laboratório, onde foi possível verificar o compartilhamento de potência proporcional entre os REDs, com a microrrede operando no modo conectado e ilhado e observou-se a capacidade de realização do controle de potência ativa e reativa no PAC, alcançando os objetivos propostos pelo trabalho de pesquisa.

Palavras-chaves: Controle do fluxo de potência, Geração distribuída, Microrredes, Gerenciamento de energia, Conversor de potência.

Abstract

The current transformation in electric power systems consists of modernizing the technologies of generation, transmission, distribution, and end use of electric power, enabling end users to participate more in the planning and operation of the system. Microgrids are significant parts of this transformation at various voltage levels of operation. This work aims to promote the regulation of active and reactive power flow in the point of common coupling (PCC) of an AC micro-grid and the low voltage distribution network. This regulation is performed through a hierarchical control structure, where the centralized power-based control (PBC) technique is applied at the second control level of the microgrid. The objective of using the power-based control technique in the developed microgrid is to promote proportional power sharing among the distributed energy resources (DERs), enable operation in islanded and connected mode, and ensure active and reactive power control of the grid. The architecture of the proposed microgrid is composed of six single-phase converters in full-bridge configuration, three connected between phase-neutral and three with phase-phase connection to the distribution system. The results were obtained through computer simulations and validated in an experimental prototype developed in the laboratory, where it was possible to verify the proportional power sharing between the DERs, with the micro-grid operating in connected and islanded mode and it was observed the ability to perform the active and reactive power control in the PCC, reaching the objectives proposed by the research work.

Keywords: Power flow control, Distributed generation, Microgrids, Energy management, Power converter.

Lista de Figuras

Figura 1 – Microrrede CA. (Fonte: Autoria própria.)	28
Figura 2 – Exemplo de transição de geração centralizada para geração distribuída. (Fonte: Autoria Própria.)	30
Figura 3 – Arquitetura da microrrede. (Fonte: Autoria própria.)	34
Figura 4 – Estrutura de Controle Hierárquico (Fonte: Autoria própria.)	35
Figura 5 – Estrutura geral de controle de um inversor monofásico conectado à rede. (Fonte: Autoria própria.)	37
Figura 6 – Diagrama de Bode (Fonte: Autoria própria.)	40
Figura 7 – Diagrama do conversor da UI. (Fonte: Autoria própria.)	41
Figura 8 – Diagrama de Bode do filtro LCL. (Fonte: Autoria própria.)	42
Figura 9 – Diagrama do SOGI-PLL. (Fonte: Adaptada de (Teodorescu; Liserre; Rodriguez, 2011).	43
Figura 10 – Estrutura de controle empregada. (Fonte: Autoria própria.)	44
Figura 11 – Estrutura de controle do conversor UI em modo ilhado. (Fonte: Autoria própria.)	45
Figura 12 – Diagrama de blocos do conversor monofásico conectado a rede. (Fonte: Autoria própria.)	46
Figura 13 – Diagrama de Bode do sistema. (Fonte: Autoria própria.)	47
Figura 14 – Diagrama de Bode do sistema em malha fechada.(Fonte: Autoria própria.)	48
Figura 15 – Resposta ao degrau do sistema em malha fechada.(Fonte: Autoria própria.)	48
Figura 16 – Diagrama de blocos da função de transferência das malhas de potência P e Q. (Fonte: Autoria própria.)	50
Figura 17 – Diagrama de Bode das malhas de corrente e de potência. (Fonte: Autoria própria.)	51
Figura 18 – Resposta da malha de potência em malha fechada ao degrau unitário. (Fonte: Autoria própria.)	51
Figura 19 – Diagrama de blocos do conversor controlado em tensão. (Fonte: Autoria própria.)	52
Figura 20 – Diagrama de Bode dos controladores da UI.(Fonte: Autoria própria.) .	53
Figura 21 – Resposta em malha fechada da malha de tensão.(Fonte: Autoria própria.)	53
Figura 22 – Fluxo de potência ativa e reativa de saída do RED_1 . (Fonte: Autoria própria.)	54
Figura 23 – Corrente de saída do RED_1 e tensão no PAC com injeção de somente potência ativa. (Fonte: Autoria própria.)	56
Figura 24 – Corrente de saída para injeção de potência ativa e reativa. (Fonte: Autoria própria.)	56

Figura 25 – Corrente de saída para injeção de potência ativa e absorção de potência reativa. (Fonte: Autoria própria.)	57
Figura 26 – Potência ativa e reativa durante variação da frequência da tensão rede. (Fonte: Autoria própria.)	58
Figura 27 – Potência ativa e reativa de saída do conversor durante a queda de tensão da rede em $t = 0,2$ s a $0,3$ s. (Fonte: Autoria própria.)	59
Figura 28 – Estrutura da microrrede utilizada na simulação. (Fonte: Autoria própria.)	60
Figura 29 – Resultados do fluxo de potência. De cima para baixo: a) Fluxo de potência ativa na rede; b) Fluxo de potência por fase no PAC; c) Fluxo de potência por fase injetada pelos REDs; d) Demanda de potência ativa total da microrrede; e) Fluxo de potência por fase na UI. (Fonte: Autoria própria.)	62
Figura 30 – Resultados de correntes na microrrede. De cima para baixo: a) corrente no PAC; b) corrente na UI; c) corrente na rede e d) tensão no PAC. (Fonte: Autoria própria.)	63
Figura 31 – Resultados do fluxo de potência reativa na microrrede. De cima para baixo: a) Fluxo de potência na rede; b) Fluxo de potência reativa no PAC; c) Potência reativa total demandada pelas cargas da microrrede; d) Potência reativa injetada. e) Fluxo de potência reativa na UI. (Fonte: Autoria própria.)	64
Figura 32 – Algoritmo PBC. (Fonte: Autoria própria.)	67
Figura 33 – Sentido do fluxo de potência entre o PAC e a microrrede. (Fonte: Autoria própria.)	70
Figura 34 – Estrutura da microrrede utilizada na simulação do algoritmo PBC. (Fonte: Autoria própria.)	73
Figura 35 – Resultados do fluxo de potência ativa por fase com carga equilibrada. De cima para baixo: a) Fluxo de potência ativa na rede; b) Fluxo de potência no PAC; c) Fluxo de potência injetada pelos REDs; d) Demanda de potência ativa total da microrrede; e) Fluxo de potência ativa na UI. (Fonte: Autoria própria.)	74
Figura 36 – Coeficientes de referência de potência ativa e reativa com carga equilibrada: a) para os REDs; b) para a UI. (Fonte: Autoria própria.) .	75
Figura 37 – Resultados do fluxo de potência reativa por fase com carga equilibrada. De cima para baixo: a) Fluxo de potência reativa na rede; b) Fluxo de potência reativa no PAC; c) Fluxo de potência reativa injetada pelos REDs; d) Demanda de potência reativa total da microrrede; e) Fluxo de potência reativa na UI. (Fonte: Autoria própria.)	79

Figura 38 – Correntes envolvidas na operação da microrrede e tensão no PAC com carga equilibrada. De cima para baixo: a) Correntes no PAC; b) Correntes na UI; c) Correntes na rede; d) Tensões no PAC. (Fonte: Autoria própria.)	81
Figura 39 – Visão geral do protótipo da microrrede. (Fonte: Autoria própria.)	82
Figura 40 – Detalhes da parte interna do painel. (Fonte: autoria própria.)	83
Figura 41 – Módulo de controle dos conversores. (Fonte: Autoria própria.)	84
Figura 42 – Módulo de potência. (Fonte: Supplier.)	86
Figura 43 – Conversores fase-fase. (Fonte: Autoria própria.)	87
Figura 44 – Controlador central. (Fonte: Autoria própria.)	88
Figura 45 – Estrutura da rede de comunicação. (Fonte: Autoria própria.)	89
Figura 46 – Corrente de saída do conversor. (Fonte: Autoria própria.)	91
Figura 47 – Fluxo de potência no PAC para os resultados experimentais. (Fonte: Autoria própria.)	92
Figura 48 – Fluxo de potência ativa no PAC - primeiro experimento. (Fonte: Autoria própria.)	93
Figura 49 – Potência ativa injetada pelos REDs e seus respectivos coeficientes escalares - primeiro experimento. (Fonte: Autoria própria.)	94
Figura 50 – Potência reativa no PAC - primeiro experimento. (Fonte: Autoria própria.)	96
Figura 51 – Fluxo de potência ativa no PAC - segundo experimento. (Fonte: Autoria própria.)	97
Figura 52 – Potência ativa entregue pelos REDs - segundo experimento. (Fonte: Autoria própria.)	98
Figura 53 – Potência reativa no PAC - segundo experimento. (Fonte: Autoria própria.)	99
Figura 54 – Potência reativa nos REDs - segundo experimento. (Fonte: Autoria própria.)	100

Lista de Tabelas

Tabela 1 – Parâmetros dos conversores eletrônicos.	38
Tabela 2 – Parâmetros do filtro LCL	41
Tabela 3 – Parâmetros do controlador de corrente	47
Tabela 4 – Parâmetros dos controladores de potência	50
Tabela 5 – Parâmetros dos controladores de corrente da UI	52
Tabela 6 – Parâmetros dos controladores de tensão da UI	52
Tabela 7 – Dados nominais de operação da microrrede por fase	60
Tabela 8 – Dados nominais de operação da microrrede	73
Tabela 9 – Potência ativa nos REDs e na UI	78
Tabela 10 – Potência reativa nos REDs e na UI	80
Tabela 11 – Características dos elementos do módulo de potência SPCIQ 1000-80-20	86
Tabela 12 – Características do conversor PHB	87
Tabela 13 – Distribuição dos coeficientes escalares.	94
Tabela 14 – Potência ativa (W) nos REDs - primeiro experimento	95
Tabela 15 – Fluxo de potência reativa (var) no PAC - primeiro experimento	96
Tabela 16 – Potência ativa (W) nos REDs - segundo experimento	99
Tabela 17 – Fluxo de potência reativa (var) nos REDs - segundo experimento	100

Lista de Abreviações e Siglas

RED	Recurso Energético Distribuído
PBC	Controle Baseado em Potência (<i>"Power-Based Control"</i>)
PAC	Ponto de Acoplamento Comum
DSP	Processador Digital de Sinais (<i>"Digital Signal Processor"</i>)
GD	Geração Distribuída
TIC	Tecnologia de Informação e Comunicação
UI	Interface de Usuário (<i>"Utility Interface"</i>)
CC	Corrente Contínua
CA	Corrente Alternada
PWM	Modulação Por Largura de Pulso (<i>"Pulse Width" Modulation</i>)
ONS	Operador Nacional do Sistema Elétrico
CEP	Conversor Eletrônico de Potência
CFR	Conversor Formador de Rede
CAR	Conversor Alimentador de Rede
CSR	Conversor de Suporte à Rede
OSD	Operador do Sistema de Distribuição
MAS	Sistema Multi-Agente (<i>"Multi-Agent System"</i>)
BT	Baixa Tensão
TCP/IP	<i>Transmission Control Protocol/Internet Protocol</i>

SCADA	Sistema de Controle e Aquisição de Dados
L	Indutor
LC	Indutor-Capacitor
LCL	Indutor-Capacitor-Indutor
CSI	Inversor Fonte de Corrente (<i>"Current Source Inverter"</i>)
VSI	Inversor Fonte de Tensão (<i>"Voltage Source Inverter"</i>)
PLL	<i>Phase Locked Loop</i>
SOGI-PLL	Integrador Generalizado de Segunda Ordem - PLL
QSG	Gerador de Sinais em Quadratura (<i>"Quadrature Signal Generator"</i>)
SFR-PLL	<i>Synchronous Reference Frame</i> - PLL
PI	Proporcional-Integral
A/D	Conversor Analógico-Digital
THD	Taxa de Distorção Harmônica Total
PQ	Potência ativa e potência reativa

Lista de Símbolos e Variáveis

*	Valores de referência
T_x	Transformador x
D_x	Disjuntor x
I_f	Corrente no indutor de saída do conversor
V_g	Tensão de saída do conversor
V_{DC}	Tensão no barramento CC
f_g	Frequência da rede
R_f	Resistência parasita do indutor
L_f	Indutância do filtro do conversor
C_f	Capacitância do filtro do conversor
f_s	Frequência de chaveamento
I_n	Corrente nominal do conversor
H_i	Ganho do sensor de corrente
H_v	Ganho do sensor de tensão
ΔI_{pp}	Corrente de ondulação na saída do conversor
f_{res}	Frequência de ressonância do filtro de saída
R_d	Resistência de amortecimento do filtro LCL
v'_α	Componente em fase da tensão da rede
v'_β	Componente em quadratura com tensão da rede

k_{pll}	ganho do filtro adaptativo da PLL
ζ	coeficiente de amortecimento
t_s	tempo de estabilização
ω'	largura de banda do SOGI-PLL
t_s	tempo de estabilização
k_{ppll}	Ganho proporcional do SOGI-PLL
k_{ipll}	Ganho integral do SOGI-PLL
k_{pi}	Ganho proporcional do controlador de corrente
k_{ii}	Ganho integral do controlador de corrente
k_{pp}	Ganho proporcional do controlador de potência ativa
k_{ii}	Ganho integral do controlador de potência ativa
k_{pq}	Ganho proporcional do controlador de potência reativa
k_{iq}	Ganho integral do controlador de potência reativa
k_{piUI}	Ganho proporcional do controlador de corrente da UI
k_{iiUI}	Ganho integral do controlador de corrente da UI
k_{pv}	Ganho proporcional do controlador de tensão da UI
k_{iv}	Ganho integral do controlador de tensão da UI
$C_{iUI}(s)$	Função de transferência do controlador de corrente da UI
$C_{vUI}(s)$	Função de transferência do controlador de tensão da UI

$C_i(s)$	Função de transferência do controlador de corrente do conversor
$C_v(s)$	Função de transferência do controlador de tensão do conversor
$C_P(s)$	Função de transferência do controlador de potência ativa do conversor
$C_Q(s)$	Função de transferência do controlador de potência reativa do conversor
P_o	Potência ativa de saída do conversor
Q_o	Potência reativa de saída do conversor
T	Período da tensão da rede
$v_g(t)$	Sinal em fase com a tensão da rede
$v_g^\perp(t)$	Sinal deslocado de 90° da tensão da rede
ω	Frequência angular da tensão da rede
f_c	Frequência de cruzamento de ganho
T_s	Período de amostragem do conversor A/D
$G_{cI}(s)$	Função de transferência do controlador de corrente
$G_i(s)$	Função de transferência de malha aberta do conversor
$T_i(s)$	Função de transferência de malha fechada da malha de corrente
θ'	Ângulo de fase da tensão da rede
k	ciclo de controle atual do algoritmo PBC
j	Número do RED ($j = 1, 2, 3 \dots 6$)
m	Fase correspondente ($m = a, b, c$)
P_{Gj}	Potência ativa do RED j

P_{UIm}	Potência ativa da UI na fase m
Q_{Gj}	Potência reativa do RED j
Q_{UIm}	Potência reativa da UI na fase m
P_{Gj}^{max}	capacidade máxima de injeção de potência ativa do RED j
$P_{UI}^{max}, Q_{UI}^{max}$	capacidade máxima de injeção de potência ativa e reativa da UI
P_{Aj}^{max}	capacidade máxima de absorção de potência ativa pelo RED j
P_{AUI}^{max}	capacidade máxima de absorção de potência ativa pela UI
S_{Gj}	Potência aparente nominal do RED j
S_{UI}	Potência aparente nominal da UI
P_{Gmt}	Potência ativa total por fase injetada pelos REDs
P_{Gmt}^{max}	Potência ativa máxima total que pode ser injetada dos REDs
P_{Amt}^{max}	Potência ativa máxima total que pode ser absorvida dos REDs
Q_{Gmt}^{max}	Potência reativa máxima total que pode ser injetada dos REDs
Q_{Amt}^{max}	Potência reativa máxima total que pode ser absorvida dos REDs
V_{REDEm}, I_{REDEm}	Tensão e corrente da rede da fase m
P_{Lmt}, Q_{Lmt}	Demanda de potência ativa e reativa das cargas da fase m
P_{PAC}, Q_{PAC}	Potência ativa e reativa no PAC
α_{Pm}, α_{Qm}	Coefficiente escalar de potência ativa e reativa para os REDs
$\alpha_{PmUI}, \alpha_{QmUI}$	Coefficiente escalar de potência ativa e reativa para UI

Conteúdo

1	INTRODUÇÃO	22
1.1	Motivação	22
1.2	Objetivos	25
1.2.1	Objetivos específicos	26
1.3	Metodologia	26
1.4	Organização do Texto	27
2	ESTRUTURA DE MICRORREDES	28
2.1	Revisão bibliográfica	28
2.2	Arquitetura da Rede Proposta	33
2.3	Considerações do Capítulo	36
3	ESTRUTURA DOS CONVERSORES	37
3.1	Topologia dos Conversores Monofásicos CC-CA	37
3.1.1	Filtro LC de saída	38
3.2	Topologia do Conversor Formador de Rede	40
3.3	Sincronismo - <i>SOGI-PLL</i>	42
3.4	Estratégia de controle	44
3.4.1	Sintonia do controlador de corrente	46
3.4.2	Sintonia da Malha externa de potência	49
3.4.3	Sintonia dos controladores do conversor UI	52
3.5	Resultados de simulação	54
3.5.1	Controle Individual do conversor monofásico	54
3.5.2	Variação de amplitude e frequência da rede	57
3.5.3	Operação da microrrede sem controle do fluxo de potência no PAC	60
3.6	Conclusões do Capítulo	64
4	CONTROLE BASEADO EM POTÊNCIA	66
4.1	Introdução	66
4.2	Descrição do Algoritmo PBC	66
4.2.1	Recepção dos dados	68
4.2.2	Processamento de dados	68
4.2.3	Cálculo dos coeficientes escalares e envio aos REDs e a UI	71
4.3	Resultados de simulação	72
4.3.1	Controle do fluxo de potência	73
4.4	Conclusões do capítulo	81

5	RESULTADOS EXPERIMENTAIS	82
5.1	Protótipo experimental utilizado	82
5.1.1	Módulo de controle dos conversores	84
5.1.2	Módulos de Potência	85
5.1.3	Controle central e coordenação dos REDs	88
5.2	Controle do fluxo de potência	91
5.2.1	Controle de potência ativa	93
5.2.2	Controle de potência ativa e reativa	97
5.2.3	Conclusões do capítulo	101
6	CONCLUSÃO	102
6.1	Proposta de Continuidade	104
6.2	Publicações relacionadas	104
	REFERÊNCIAS	105

1 Introdução

Este capítulo situa o trabalho desenvolvido no contexto de microrredes, apresenta seus avanços tecnológicos e os desafios enfrentados para sua implementação e operação, além de mostrar a importância de seus estudos e investigações, devido a crescente utilização de novas tecnologias como a geração distribuída (GD) associadas aos recursos renováveis e suas interfaces com o sistema elétrico. Inicia-se com os conceitos fundamentais envolvendo microrredes, fornecendo uma visão geral sobre o assunto. Em seguida, são apresentados os serviços que podem ser prestados junto à concessionária local e os níveis de controle hierárquico da microrrede bem como a importância a tecnologia de informação e comunicação (TIC). Por último, as justificativas para a elaboração deste trabalho e quais os objetivos a serem alcançados são apresentados.

1.1 Motivação

Nos últimos anos, o sistema de energia elétrica desde a geração, passando pela transmissão e distribuição até chegar ao consumidor final, sofreu poucas modificações. Embora verifica-se um crescimento contínuo de usuários, aumento da produção de energia e da expansão de sua estrutura física, não houve mudanças significativas para encarar os desafios das novas tecnologias que estão sendo conectadas ao mesmo. Este crescimento significativo de demanda levanta diversas questões sobre o estado atual do sistema elétrico, a composição da matriz energética e a sua capacidade de atender o volume de energia requerido. Soma-se a estes fatores, outros itens como confiabilidade, disponibilidade, qualidade e sustentabilidade dessa energia, em uma sociedade cada vez mais dependente social e economicamente da eletricidade (Oliveira, 2016). Dentro deste contexto, a geração distribuída (GD) tem chamado a atenção nos últimos anos.

Devido a sua localização próxima ao usuário final, a GD tem surgido como uma opção promissora para atender às crescentes necessidades dos clientes de energia elétrica com ênfase em confiabilidade e qualidade de energia, proporcionando diferentes soluções econômicas, ambientais e benefícios técnicos (Lasseter; Paigi, 2004).

A GD consiste na aplicação de várias fontes de produção de energia locais, empregando, em sua maioria, fontes de energia renováveis como: energia solar fotovoltaica, energia eólica, biogás ou pequenas centrais hidrelétricas, com a possibilidade de integração com unidades de armazenamento de energia (UAEs) de forma descentralizada. Esse conjunto de fontes de energias renováveis e UAEs, constituem os chamados recursos energéticos distribuídos (REDs), (Ton; Smith, 2012).

Embora possa reduzir potencialmente a necessidade de expansão do sistema elétrico tradicional, um grande número de fontes de geração conectadas à rede elétrica, cria um novo desafio para operar e controlar o sistema elétrico com segurança e eficiência. Como por exemplo, o aumento da microgeração pode impactar significativamente no equilíbrio de potência e na frequência ao longo dos anos (Fathima et al., 2018). Portanto, é necessário uma arquitetura de controle e gerenciamento para facilitar a plena integração da microgeração e gerenciamento ativo da carga no sistema.

Neste cenário, as microrredes se tornam uma forma promitente para realizar de maneira eficiente esta integração. Como o próprio nome indica, microrredes são redes elétricas relativamente menores (em relação à rede elétrica convencional), que englobam dentro de suas fronteiras, geração, distribuição e consumo de eletricidade, integrando vários REDs associados à eletrônica de potência com métodos avançados de controle para fornecer eletricidade local e que podem operar ilhadas ou conectadas à rede elétrica convencional (Fathima et al., 2018) e (Hatziargyriou et al., 2007).

As primeiras microrredes que surgiram, continham pequenos geradores instalados próximos aos centros de carga e forneciam eletricidade para as residências e comércios nos arredores através de linhas de distribuição curtas. Como por exemplo, o sistema de iluminação de Paris, na França, de 1878, usava dínamos posicionados em porões que eram conectados às lâmpadas por cabos subterrâneos e diversas outras aplicações foram concebidas em diversos países da Europa e também em várias cidades dos Estados Unidos (Bowers, 1982).

Entretanto, nos anos 1970, as intensas crises do petróleo impactaram significativamente todo o mundo e fizeram com que diversos países buscassem novas soluções para garantir a segurança energética (Hamilton, 2011). A partir de então, tecnologias como os REDs, eletrônica de potência e fontes ininterruptas de energia (UPS), foram progredindo rapidamente e abriram as fronteiras para o nascimento das microrredes modernas (Coelho, 2000).

As microrredes tem sido pesquisadas há mais de duas décadas e seu conceito foi introduzido pelo *Consortium for Electric Reliability Technology Solutions* (CERTS) no ano 2000 para melhorar a confiabilidade e a eficiência dos sistemas elétricos modernos (Lasseter, 2002) e (Lasseter et al., 2002). Desde então, as pesquisas e projetos de microrredes progrediram significativamente. Em todo o mundo, as microrrede estão em fase iniciais de desenvolvimento, sobretudo, os projetos pilotos experimentais (Dato; Durmaz; Pommeret, 2020). Mas ainda, há barreiras comuns e fatores finais de sucesso para a implementação de uma microrrede, o que mostra a existência de um grande potencial a ser explorado, tanto nas questões técnicas, quanto nas questões regulatórias e comerciais. Existem trabalhos para compreender e desenvolver melhor suas partes constituintes, como os REDs e a eletrônica de potência associada, suas técnicas de controle, sua operação em geral, o

gerenciamento de energia, a conexão com a rede, seus dispositivos de proteção, seus meios de comunicação, entre outros diversos fatores (Junior; Freitas, 2020).

Além da possibilidade de operação conectada à rede ou ilhada, é esperado que as microrredes realizem: o controle sobre o fluxo de potência elétrica entre os REDs (i.e., compartilhamento de potência) e o controle sobre o fluxo de potência para a rede principal (ou seja, operação como uma entidade única e controlável) (IEEE, 2018). Além de outras funções que são necessárias para garantir que o sistema elétrico, da geração ao consumo, funcione de forma adequada, como: compensação de reativos e desbalanços, detecção de ilhamento, equalização do estado-de-carga das UAEs, entre outras funcionalidades, chamadas de serviços ancilares, que aumentam a confiabilidade e a qualidade de energia da microrrede (Hatziaargyriou, 2014).

Sendo uma parte crítica para o futuro das *smart grids* por causa de sua inteligência local, automação, interoperabilidade e capacidade de REDs (Júnior, 2018), estratégias de controle avançadas são componentes vitais para a operação das microrredes.

Os sistemas de controle de microrrede, possui como variáveis principais o nível de tensão, a frequência e as potências, e podem ser classificados em dois grupos principais: centralizado e descentralizado (ou distribuídos), (Olivares et al., 2014). Na estratégia de controle centralizada, os elementos da microrrede são comandados por um único dispositivo supervisor central que troca informações com eles através de um *link* de comunicação e determina quanto será produzido por cada um e como se configurarão suas saídas em tensão e frequência. Este modelo depende, assim, de linhas de comunicação robustas. O sistema de controle descentralizado, são os próprios REDs que empenham a direção de suas saídas elétricas, fazendo monitoramentos e cálculos internos, sem qualquer comunicação entre unidades. Um caso popular desta categoria é o método de controle *droop* (Coelho; Cortizo; Garcia, 2002). Nele, os conversores fazem medições locais de tensão e corrente para determinar as potências ativa e reativa geradas por eles. A referência de tensão da unidade é, então, criada obtendo-se valores de frequência e de tensão pela aplicação de equações de *droop* nos dados de potências, o que permite o paralelismo entre os REDs e o compartilhamento adequado das cargas entre eles automaticamente e sem comunicação.

Uma tendência amplamente difundida é o controle hierárquico. Sob esta perspectiva, os controles são divididos em quatro níveis (Bidram; Davoudi, 2012).

- Controle interno: O nível de controle interno tem a função de operar os conversores eletrônicos internos dos REDs baseado em medições locais. Geralmente possuem como objetivo o controle da corrente ou da tensão de saída. Dependendo do tipo de controle utilizado, estes conversores podem assumir características de fonte de tensão ou fonte de corrente. Como fontes de tensão, são vistos pelo sistema como uma fonte de tensão ideal de baixa impedância e geralmente são empregadas uma malha

interna de corrente e outra externa de tensão. Operando como fontes de corrente, estes são vistos como fonte ideal com alta impedância e empregam uma única malha de controle de corrente (Rocabert et al., 2012).

- Controle primário: O controle primário estabelece a operação básica no modo ilhado, abordando o compartilhamento de potências, o paralelismo das unidades e a geração de referências de tensão e de frequência.
- Controle secundário: O segundo nível de controle pode ser implementado nos próprios REDs em se tratando de uma arquitetura descentralizada ou em um controlador central, no caso de uma arquitetura centralizada. Neste último, realiza o compartilhamento de potência ativa e reativa entre as unidades distribuídas participantes da microrrede de forma proporcional às suas disponibilidades de potência e de acordo com suas capacidades máximas, além de regular o fluxo de potência no PAC. Além disso, o nível de controle secundário assegura a compensação dos desvios de tensão e frequência da microrrede após cada alteração na carga ou na alimentação. É também responsável por serviços ancilares.
- Controle terciário: otimiza a operação da microrrede no modo conectado ou ilhado, sincroniza e conecta a microrrede com a rede principal e controle o fluxo de potência entre elas. A escala de tempo é da ordem de minutos ou orientada por eventos.

Entretanto, ainda é necessário explorar melhor a solução técnica de controle de microrrede. Existem diversas técnicas de controle primário empregadas, a exemplo o controle *droop* que causa desvios de tensão e frequência. Esses desvios podem ser solucionados através da implementação de um controle secundário, utilizando meios físicos de comunicação (Morstyn; Hredzak; Agelidis, 2015).

A proximidade torna prático para os sinais de controle serem trocados entre os conversores com potencial de fornecer melhor controlabilidade em termos de rápida resposta a mudança de carga, melhor regulação de tensão e compartilhamento de potência (Meng et al., 2015). A tecnologia de comunicação sem fio possui o menor custo, são mais flexíveis quanto à instalação e é mais adequada em áreas remotas Setiawan et al. (2015). Um sistema de comunicação baseado na tecnologia *ZigBee* para microrredes é proposto em Setiawan et al. (2015). Nesse sistema os dados são transferidos entre os REDs e a microrrede, sendo o controlador central responsável por enviar valores de tensão, magnitude e frequência a cada RED.

1.2 Objetivos

Este trabalho tem como objetivo principal a aplicação da estratégia de controle centralizada empregando o algoritmo PBC em uma microrrede de baixa tensão, assistida

por uma infraestrutura de comunicação, afim de regular o fluxo de potência no PAC e permitir o compartilhamento proporcional de potência entre os REDs. A microrrede do estudo de caso é composta por seis REDs monofásicos que quando em modo de operação conectado à rede, operam injetando potência ativa e injetando ou absorvendo potência reativa da rede de forma proporcional através do algoritmo PBC.

1.2.1 Objetivos específicos

Para alcançar os objetivos propostos para esta dissertação, alguns objetivos específicos são propostos:

- Controlar o fluxo de potência ativa e reativa no PAC;
- Prover o compartilhamento proporcional de potência entre REDs.
- Simular a operação da microrrede em modo ilhado;

1.3 Metodologia

Para alcançar os objetivos propostos, são realizadas as seguintes etapas:

- Projeto, montagem e comissionamento do protótipo da microrrede;
- Implementação do retificador ativo trifásico para regular a tensão do barramento CC;
- Implementação dos controladores de corrente e de potência ativa e reativa dos conversores monofásicos;
- Implementação do algoritmo de controle PBC no controlador central;
- Modelagem e simulação dos conversores eletrônicos;
- Projeto dos controladores dos conversores;
- Simulação da microrrede em estudo incluindo o controle do fluxo de potência no PAC utilizando o algoritmo PBC;
- Validação de resultados experimentais realizados no protótipo da microrrede desenvolvido durante a elaboração desta dissertação.

1.4 Organização do Texto

Esta dissertação está organizada em seis capítulos. No capítulo 2 é apresentado uma contextualização do trabalho no cenário atual além de trazer uma revisão geral sobre o conceito de microrredes. O capítulo 3 apresenta uma revisão das técnicas de controle dos conversores e a estratégia de controle empregada neste trabalho. Ao final do capítulo, são apresentados resultados de simulação da operação dos conversores individuais e conectados à rede. No capítulo 4 é apresentado o algoritmo de controle PBC e resultados de simulação da operação da microrrede em modo conectado e ilhado. Já o capítulo 5 apresenta os resultados experimentais obtidos através do protótipo da microrrede. É apresentado as características construtivas do protótipo e os resultados do controle do fluxo de potência ativa e reativa no PAC. O capítulo 6 apresenta a conclusão do trabalho e oportunidades para trabalhos futuros, além das citações de trabalhos publicados durante o desenvolvimento desta dissertação.

2 Estrutura de Microrredes

Neste capítulo é apresentado uma revisão bibliográfica acerca de trabalhos estudados sobre topologias, operação e controle de microrredes que reforçam a motivação para a elaboração deste trabalho. É apresentada a arquitetura do protótipo em estudo com a representação de sua topologia, a disposição dos REDs, a localização do PAC, além da representação da proposta de integração de um conversor trifásico da UI. Ao final, é discutido o controle hierárquico e a atribuição de cada nível de controle.

2.1 Revisão bibliográfica

Em [Samad and Annaswamy \(2017\)](#), microrredes são definidas como um grupo de cargas, REDs e armazenadores de energia, interligados que atuam como uma entidade única controlável capaz de operar em modo conectado ou isolado. A Figura 1 mostra um exemplo de uma arquitetura de microrrede com barramento em corrente alternada (CA).

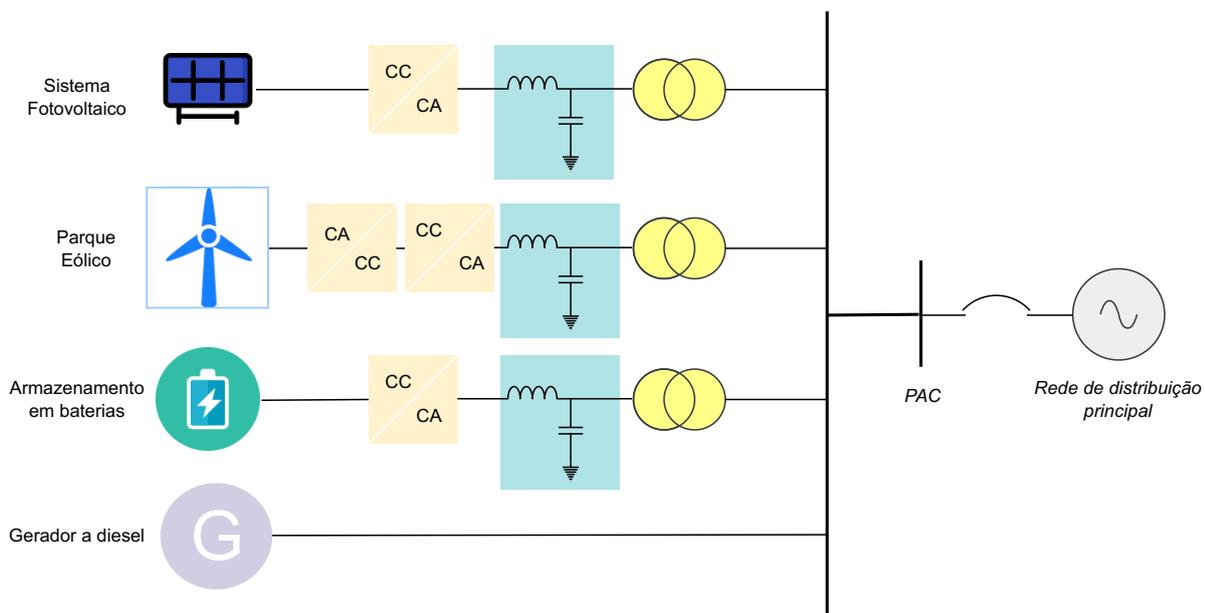


Figura 1 – Microrrede CA. (Fonte: Autoria própria.)

Nesta arquitetura, o barramento é em corrente alternada e todas as microfuentes com tensão e frequência variável de saída CA são ligados ao barramento através de conversores eletrônicos CA-CC-CA. As fontes com saída CC são ligadas ao barramento CA através de conversores CC-CA. Caso a geração seja baseada em geradores à diesel, a conexão com o barramento CA pode ser direta ([Li et al., 2017](#)). O transformador de acoplamento utilizado tem a potência conforme a capacidade dos conversores e possui como objetivo

a adequação do nível de tensão da microgeração com a rede elétrica local. Conforme a potência instalada, este transformador é necessário ou não (PRODIST, 2012). As fontes de produção de energia são concentradas próximas aos centros de maior consumo ou em locais próximos às grandes cargas. Isso minimiza quedas de tensão e perdas de energia, agregando maior segurança.

No modo conectado, a rede principal define a amplitude e frequência para a microrrede. Além disso, é necessário uma unidade central de controle para a gestão da energia entre a microrrede e a rede principal. Quando há energia suficiente disponível a partir das fontes de produção de energia, todas as cargas locais são alimentadas pela própria microrrede. Quando surge uma condição de insuficiência de energia da microrrede, a rede principal contribui com complemento de potência para a microrrede, com o objetivo de realizar o balanço de potência, visto que a demanda da microrrede é maior do que a oferta. Em caso de disponibilidade de energia excedente da microrrede, esta energia pode ser despachada de forma controlada para a rede principal, precedido de contratos estabelecidos com a concessionária. Todos estes controles são fornecidos através de uma unidade de controle central (Fathima et al., 2018).

Em modo isolado, a microrrede deve garantir o compartilhamento de energia entre as fontes de produção e o controle da tensão e frequência, garantindo assim, uma operação estável. Neste caso, as cargas devem ser divididas em tipos de carga normal e crítica. Quando há energia suficiente disponível, todas as cargas podem ser alimentadas. Na insuficiência de energia, as cargas críticas têm prioridade. Para efeitos de estabilização da frequência da microrrede, é necessário um sistema de armazenamento de energia suficiente para atendimento à demanda da microrrede (Vandoorn et al., 2013).

Para inserir micro e pequenas unidades de geração de energia utilizando fontes não convencionais, o sistema elétrico está passando por uma transição, migrando de uma configuração baseada em grandes fontes geradoras centralizadas para um modelo descentralizado baseado em GD, integrando um novo participante do sistema elétrico chamado de prosumidor, ou seja, aquele que produz sua própria energia elétrica, tornando-se independente da energia oferecida pela rede pública podendo ainda exportar energia para o sistema de distribuição, conforme exibido na Figura 2 (Ipakchi; Albuyeh, 2009).

Os conversores eletrônicos de potência (CEP) realizam a interface entre a fonte primária de energia e a rede de distribuição, podendo ainda possuir unidades de armazenamento de energia e possivelmente um módulo de comunicação (Ferreira, 2018a).

Esses conversores de interface podem ser classificados como:

- Conversor formador de rede (CFR): Conversor controlado como fonte de tensão ideal e fornece a referência de amplitude e frequência para um sistema isolado (Ferreira, 2018b). Os REDs que possuem esta topologia devem ser despacháveis, já que a

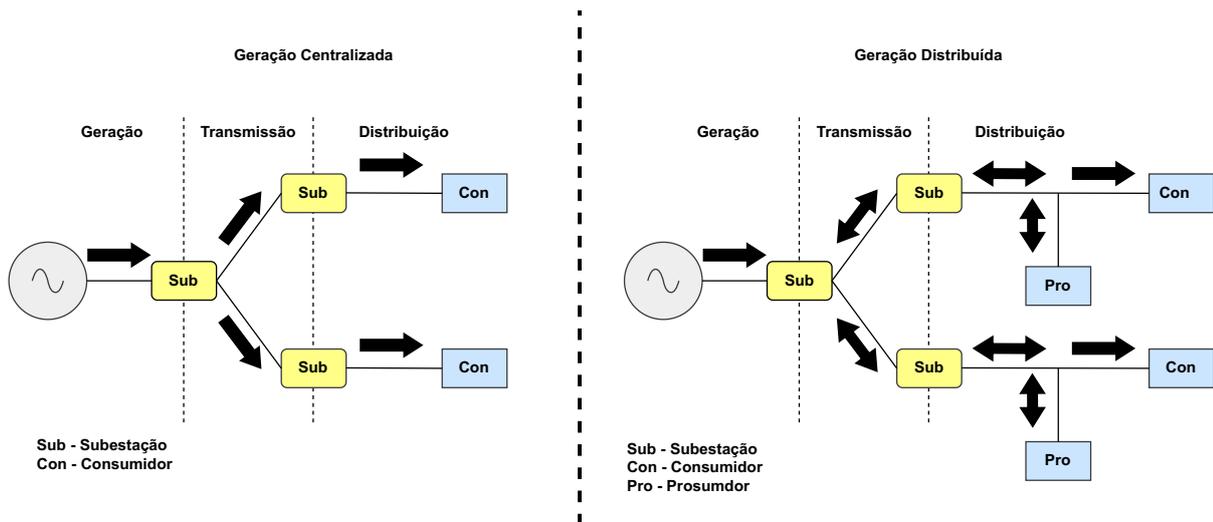


Figura 2 – Exemplo de transição de geração centralizada para geração distribuída. (Fonte: Autoria Própria.)

operação de toda microrrede, ao menos em modo ilhado, será condicionada por estes controles.

- Conversor alimentador de rede (CAR): Conversor controlador como fonte de corrente ideal, operando com uma dada referência de corrente correspondente a uma dada potência. Recebe este nome por injetar potência na microrrede de uma fonte primária (fotovoltaica, eólica, célula combustível, biogás, etc.) (Monshizadeh et al., 2015). Os REDs deste tipo de controle usualmente são aqueles que integram técnicas de MPPT e têm regimes variáveis e intermitentes de geração, como os sistemas fotovoltaicos e as turbinas eólicas.
- Conversor de suporte à rede (CSR): Atua absorvendo ou injetando potência ativa e reativa para regular o nível de tensão e frequência no local em que está instalado (Rocabert et al., 2012).

A correta operação dos REDs permite ganhos consideráveis com relação à perda de energia na rede elétrica, possibilita o fluxo de energia bidirecional, além de aumentar a confiabilidade e reduzir, ou até mesmo, eliminar investimentos em redes de transmissão e distribuição de energia elétrica. (Nunes, 2017).

Entretanto, dependendo da tecnologia empregada, das características do sistema de distribuição e do nível de penetração dos REDs, a inclusão de vários recursos energéticos no sistema elétrico pode trazer diversos problemas relacionados à estabilidade e a segurança da rede (Bellido, 2018).

Além disso, podem surgir problemas com a qualidade de energia como por exemplo, aumento dos níveis de tensão da rede devido a baixa razão entre reatância e resistência X/R , variação de tensão devido a variação de potência ativa injetada pelos REDs, além

do consequente aumento nas perdas na distribuição de energia (Katiraei; Agüero, 2011), sobrecarga em equipamentos elétricos e problemas provenientes da inversão no sentido do fluxo de energia (e.g., desafios para o sistema de proteção), (Nunes, 2017).

Para contornar estes problemas e garantir a operação eficiente do sistema e a qualidade da energia, normalmente é empregado dispositivos como, bancos de capacitores, transformadores de *tap* variável, filtros passivos sintonizados ou filtros ativos, porém estes dispositivos demandam alto investimento e aumentam o grau de complexidade de operação do sistema (Ferreira, 2018a).

Com o avanço da eletrônica de potência e a forte utilização das fontes renováveis, surgiram outras funcionalidades nos CEPs existentes nos REDs. Além de processarem potência ativa, podem desempenhar diversos serviços ancilares, como regulação de tensão e frequência, compensação de reativos, filtragem harmônica e *low voltage ride-through*, contribuindo assim para melhorar a qualidade da energia elétrica na rede (Junior, 2020).

Para que estes serviços ancilares sejam realizados, é necessário adotar perspectivas locais e globais, sendo estas últimas mais adequadas por incluir uma operação coordenada entre todos os agentes participantes da microrrede buscando alcançar um objetivo global (Ferreira et al., 2019).

Conforme (Olivares et al., 2014), as estruturas de controle de microrredes podem ser classificadas em dois grupos principais: centralizado e descentralizado (ou distribuídos). Na estratégia de controle centralizada, os elementos da microrrede são comandados por um único dispositivo supervisor central que troca informações com eles através de um *link* de comunicação e determina quanto será produzido por cada um e como se configurarão suas saídas em tensão e frequência. Esta estrutura depende, então, de linhas de comunicação robustas. No sistema de controle descentralizado, os próprios REDs empenham a direção de suas saídas elétricas, fazendo monitoramentos e cálculos internos, sem qualquer comunicação entre unidades. Um caso popular desta categoria é o método de controle *droop* convencional (Coelho; Cortizo; Garcia, 2002). Nele, os conversores realizam medições locais de tensão e corrente para determinar as potências ativa e reativa geradas por eles. A referência de tensão da unidade é, então, criada obtendo-se valores de frequência e de tensão pela aplicação de equações de *droop* nos dados de potências, o que permite o paralelismo entre os REDs e o compartilhamento adequado das cargas entre eles automaticamente e sem comunicação.

Em Souza (2019) é proposto um sistema de controle centralizado do gerenciamento do fluxo de potência baseado em otimização de custos operacionais causados pelo desvio do fator de potência, levando-se em conta as limitações da injeção de potência ativa de modo a evitar desperdícios energéticos na fonte primária. Outro aspecto proposto, é a negociação de injeção de potência reativa permitindo que a microrrede possa ser utilizada pela concessionária para controlar a rede de distribuição, empregando os próprios REDs

localizados na microrrede.

Matos (2014) propõe uma estratégia de controle de potência em uma microrrede CA isolada composta por um conversor formador de rede com banco de baterias e outro conversor alimentador de rede acoplado a um emulador de turbina eólica. O objetivo é controlar a potência injetada na microrrede de forma que a tensão no banco de baterias não ultrapasse os limites de operação determinados pelo fabricante. Em operação normal, a microrrede é controlada pela estratégia *droop*. Caso haja excesso de geração, o excedente é armazenado no banco de baterias até atingir sua capacidade máxima para não haver sobretensão no mesmo. Em condições de insuficiência de geração, o banco de baterias pode fornecer potência para atendimento da carga e manter a microrrede em operação. O autor ainda prevê o controle da amplitude e da frequência da tensão da microrrede durante os períodos transitórios e em regime permanente.

Já em Brandão et al. (2018b), é proposto o algoritmo PBC para realizar o controle do fluxo de potência no PAC através da coordenação das unidades distribuídas. É empregada uma arquitetura de controle centralizada do tipo mestre-escravo, onde o mestre é um controlador central responsável por coletar as informações do PAC bem como de todos os agentes da microrrede e os escravos são os REDs operando como fontes de corrente. Um conversor formador de rede, chamado também de *utility interface* (UI) é alocado em paralelo com o PAC e opera gerando referências de tensão e frequência, quando a microrrede está operando em modo ilhado. Em modo conectado, a UI é capaz de operar dando suporte de tensão no caso de interconexão e mitigando distúrbios de corrente como um filtro ativo de potência.

Em Ferreira (2018a) é proposto um modelo de otimização multiobjetivo para o papel de maximização da injeção de potência ativa por meio de REDs monofásicos e manutenção da controlabilidade sobre o desbalanço no PAC, e conseqüentemente sobre o desequilíbrio de tensão. Esse algoritmo propõe manter níveis de qualidade de energia elevados em termos de fator de potência e fatores de desbalanço mesmo com alta penetração de geração distribuída monofásica, além de permitir a operação *plug-and-play* da estratégia e o serviço ancilar de troca de energia entre as fases da microrrede por meio de um conversor UI.

Em Xiao et al. (2010) uma estrutura de controle hierárquico multi-agente (MAS) com três níveis para a gestão e operação de uma microrrede de baixa tensão é proposta. O nível mais alto consiste na estação de distribuição mestre responsável principalmente por monitorar as operações em execução de rede de distribuição em uma cidade envolvendo uma série de subestações de energia e várias microrredes em diferentes bairros. O segundo nível trata dos agentes de subestação de distribuição e prestam serviço para todas as microrredes conectadas a uma subestação de baixa tensão (BT). Adotam o controle centralizado para resolver um problema de otimização, e o objetivo é minimizar as diversas perdas através de

controle flexível. O nível mais baixo consiste no nível de terminal de distribuição, na qual os agentes são capazes de detectar e controlar componentes ou dispositivos da microrrede, como disjuntores, REDs, dispositivos de armazenamento de energia, cargas controláveis, etc. Os autores utilizam o protocolo TCP/IP para estabelecer a comunicação entre os diversos níveis. Através de simulações os autores mostram a viabilidade do sistema, como por exemplo, quando a subestação de BT falha, o MAS pode isolar imediatamente a microrrede da subestação de BT para garantir a estabilidade de operação do sistema elétrico; quando a falha da subestação de BT é eliminada, o MAS também pode habilitar a microrrede e a subestação de BT para funcionar no modo conectado à rede.

2.2 Arquitetura da Rede Proposta

Nesta dissertação, é proposta o desenvolvimento de um protótipo experimental de uma microrrede, cujos objetivos são proporcionar recursos para auxiliar o desenvolvimento de pesquisas científicas acerca do controle e operação de microrredes.

A estrutura é composta por seis REDs monofásicos com conexão ao PAC através de transformadores isoladores (T_2 a T_7), sendo três conectados entre fase-neutro e outros três entre fases na seguinte distribuição: fase an: RED_1 ; fase bn: RED_2 ; fase cn: RED_3 ; fases ab: RED_4 ; fases bc: RED_5 e fases ca: RED_6 .

Possui interface com a rede trifásica (220 V) e o barramento CC com o nível de tensão de 400 V. A Figura 3 apresenta o diagrama da microrrede.

A conexão da microrrede com o sistema de distribuição é realizada através do transformador de distribuição trifásico (T_1) a montante do PAC e faz a conexão da rede principal com o PAC entre a rede CA e a microrrede, devendo os disjuntores D_1 a D_8 permanecerem fechados. Esse transformador possui fechamento delta-estrela aterrado com tensão nominal igual a 220 V e relação de transformação 1:1 na frequência de 60 Hz. Na simulação do modo ilhado, os disjuntores D_1 e D_2 estão abertos e o conversor UI opera como formador de rede fornecendo referência de amplitude e frequência para os REDs, devendo o disjuntor D_9 permanecer fechado. Em modo conectado, todos os conversores incluindo a UI são controlados em modo de corrente sincronizados com a rede, cuja estratégia de controle será vista no capítulo 3. No modo ilhado, a UI é controlada em modo de tensão, sendo controlado por uma malha interna de corrente e outra malha externa de tensão.

Toda a estrutura é controlada por meio do controlador central embarcado no DSP da *Texas Instruments* TMS320F28379/D. É responsável por reunir informações compartilhadas por cada RED e da UI, coletar e processar informações do PAC e processar o algoritmo PBC, determinando a contribuição necessária de cada RED, além de transmitir via a rede *CAN 2.0* os coeficientes de referência de potência para as malhas de controle

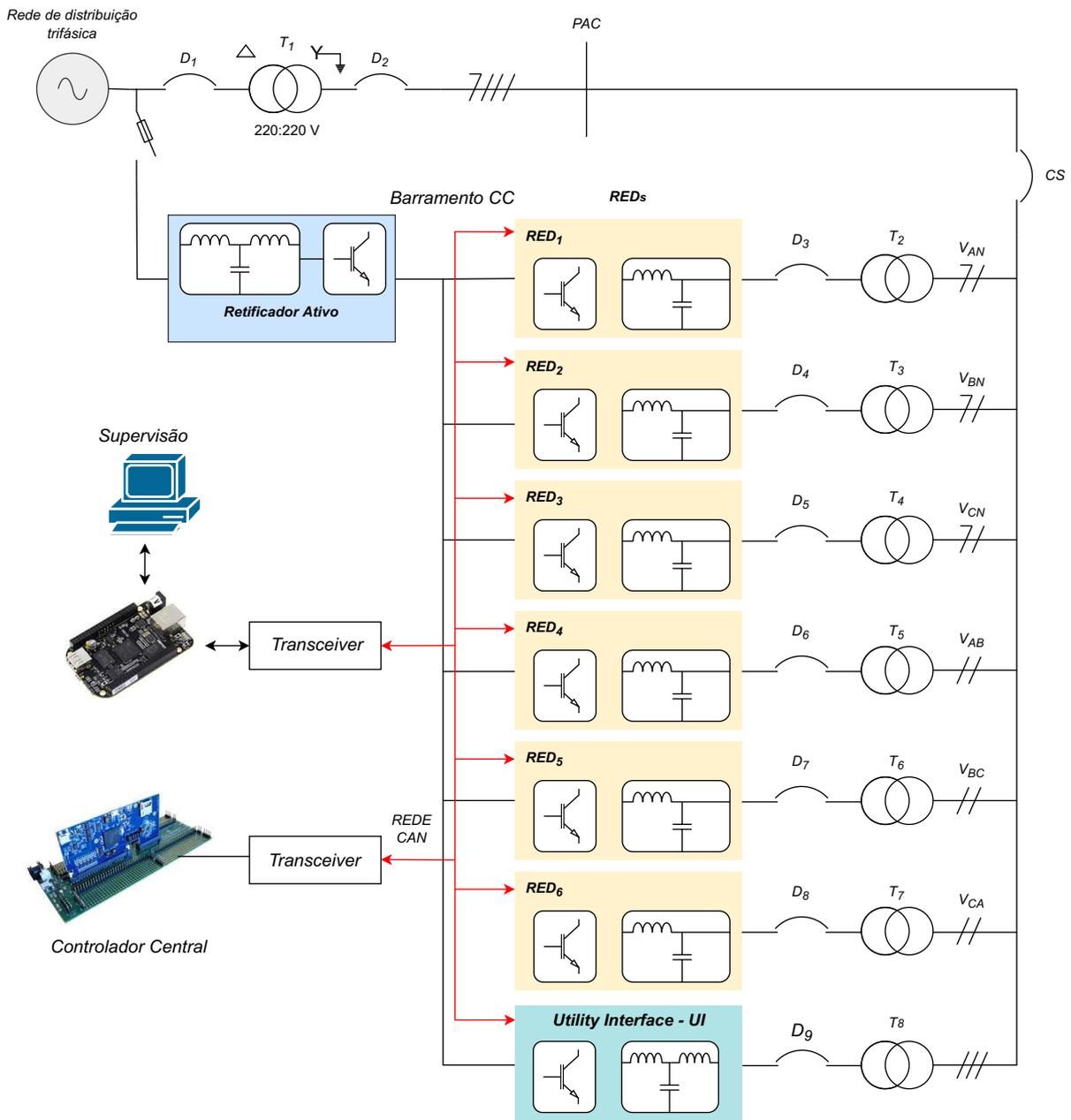


Figura 3 – Arquitetura da microrrede. (Fonte: Autoria própria.)

interna dos CEP.

A comunicação interna entre os conversores da microrrede e o controlador central é feita pelo barramento de comunicação *CAN 2.0* conforme descrito em [Silva \(2020\)](#). Um mini-computador baseado na placa *Beagle bone*, realiza a interface da microrrede com o sistema supervisor, proporcionando o acesso remoto.

O conversor trifásico formador de rede, conectado ao PAC, foi utilizado nas simulações no modo ilhado. Até a data de defesa desta dissertação, este conversor não havia sido incorporado ao protótipo.

É desejado que a acomodação de diferentes fontes de energia renováveis em uma

estrutura de microrrede tenha capacidade de operação *plug-and-play*. Todas as eventuais situações possíveis que possam ocorrer durante o funcionamento devem ser consideradas com bastante antecedência e um algoritmo de controle deve estar disponível para lidar com tais eventos específicos.

O controle hierárquico e o controle baseado em *droop* são as duas principais estratégias de controle aplicadas para o controle de microrredes em diferentes modos de operação (Planas et al., 2013). O controle hierárquico inicia-se no nível interno e estende-se até um nível mais elevado, desempenhando a tarefa de compartilhamento da carga, gestão de energia, e operação eficiente. A Figura 4 apresenta os diferentes níveis e operações relacionadas através de um diagrama. Os diferentes níveis são descritos da seguinte forma (Katiraei et al., 2008):

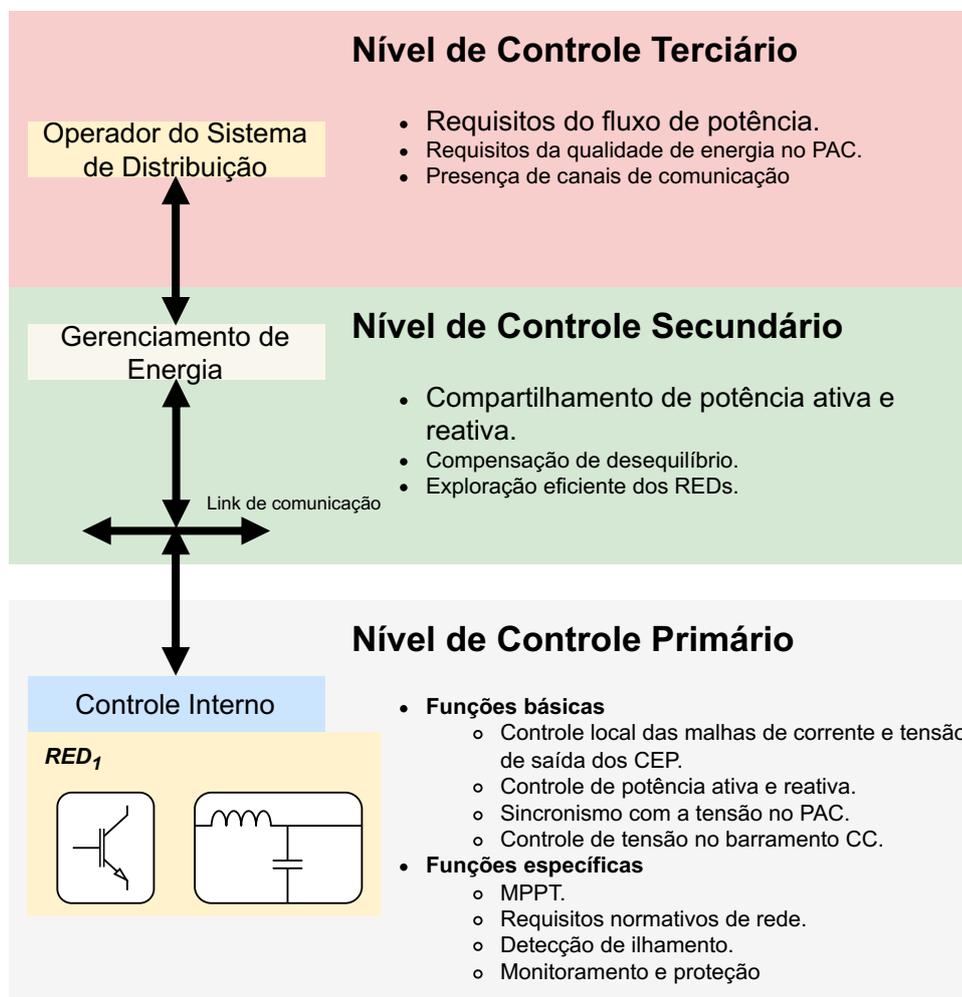


Figura 4 – Estrutura de Controle Hierárquico (Fonte: Autoria própria.)

1. O nível de controle primário tem como objetivo manter a operação da microrrede no modo conectado coordenado pelo controlador central e é responsável pelas funções básicas, específicas, serviços ancilares, requerimentos de códigos de rede e necessidades

locais. São definidas as estratégias de controle dos conversores dos REDs (controle interno) e o modo de operação. Os REDs são conversores que operam como fontes de corrente e possuem como estratégia de controle uma malha de corrente interna e outras duas malhas de potência externa. A estrutura de controle dos conversores será detalhada no Capítulo 3. A UI, quando em modo conectado

2. Já o nível de controle secundário é implementado no controlador central. É responsável pelo controle do fluxo de potência no PAC e garantir um compartilhamento de potência ativa e reativa efetivo entre os REDs. O controle secundário da microrrede será executado através do PBC, que enviará, através do controlador central, os coeficientes escalares aos REDs. Sua implementação e suas funcionalidades serão tratadas no capítulo 4.
3. O nível de controle terciário executa rotinas globais de controle e é responsável pela interação entre a microrrede e um agente externo, como por exemplo, o centro de operação da distribuição nas concessionárias de energia, e define a potência de referência para o PAC que será informada ao nível secundário de controle. O controlador pode ser integrado a um sistema de controle e aquisição de dados (SCADA) organizado em duas camadas de programa, onde as referências para o fluxo de potência no PAC são determinadas e a coordenação dos REDs ativos são realizados através do algoritmo PBC.

Uma infraestrutura de comunicação baseada no protocolo *CAN 2.0* é empregada para realizar a troca de informações entre os REDs e o controlador central, que realiza a coleta de informações do estado da rede e a capacidade disponível de cada RED, para então coordená-los no sentido de alcançar o fluxo de potência desejado no PAC. Ressalta-se que em eventual falha de comunicação com o controlador central, a microrrede é automaticamente desconectada da rede.

2.3 Considerações do Capítulo

Esse capítulo apresentou de forma sintetizada a estrutura da microrrede utilizada neste trabalho, onde são discutidas as funções gerais dos principais dispositivos atuantes. São apresentados os posicionamentos dos REDs, da UI e o controlador central e sua forma de comunicação e os requisitos necessários para a operação da microrrede. Então, a estrutura de controle hierárquico de microrrede foi apresentado situando o tipo de controle proposto neste trabalho destacando as funções para as quais cada nível hierárquico foi projetado. No próximo capítulo será apresentado a estrutura dos conversores e o projeto de sintonia.

3 Estrutura dos Conversores

Este capítulo apresenta a estrutura dos conversores monofásicos utilizados na construção do protótipo experimental para obtenção dos resultados do estudo de caso desta dissertação. Inicia-se com a apresentação da topologia do estágio de potência dos conversores e a especificação dos componentes do filtro LC de saída. Na seção 3.3 é apresentado o tipo de algoritmo empregado para sincronizar a corrente de saída dos conversores com a tensão da rede elétrica CA e seus parâmetros empregados na sua implementação. É também apresentado o conversor formador de rede que foi utilizado nas simulações em modo ilhado. Por fim, é apresentado o projeto das malhas de controle interna de corrente e externa de potência e os resultados de simulação realizados no *software* PLECS versão 4.1.2 são discutidos.

3.1 Topologia dos Conversores Monofásicos CC-CA

Existem várias topologias diferentes de inversores monofásicos. Com base no número de chaves, os inversores podem ser classificados como inversores de meia ponte ou inversores de ponte completa (ponte-H). Ainda, dependendo do tipo da fonte de entrada, estes podem ser classificados como fontes de corrente (CSI) ou fontes de tensão (VSI) (Rashid, 2014). Nesta dissertação, são empregados inversores VSI em ponte-H, conectados à rede controlados em modo de corrente conforme mostrado na Figura 5.

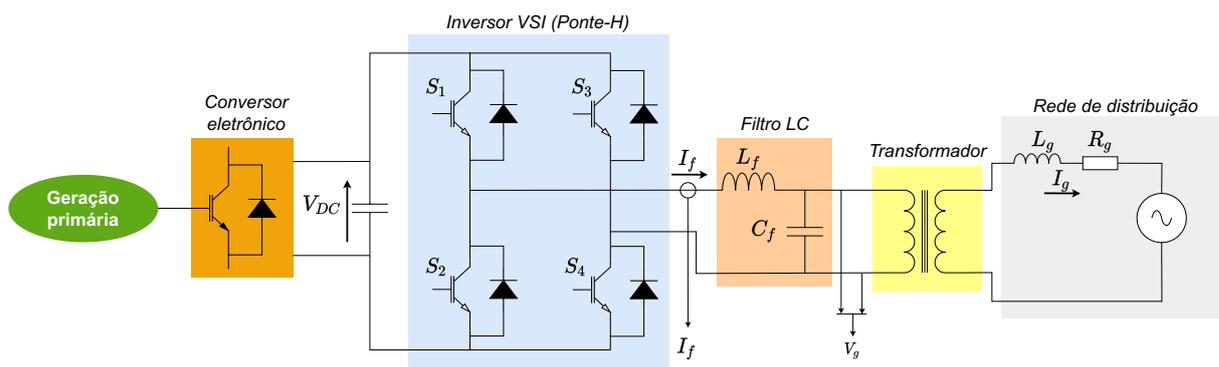


Figura 5 – Estrutura geral de controle de um inversor monofásico conectado à rede. (Fonte: Autoria própria.)

Este tipo de sistema é normalmente usado na integração de fontes de energia renováveis (geração primária) que necessitam de um conversor de energia para gerar uma tensão CA de saída a partir de uma tensão CC. Tendo em conta as diferentes naturezas das fontes de energia renováveis, o seu comportamento estocástico e a exigência de manter uma qualidade mínima de energia, a integração de fontes de energia renováveis pode exigir

um conversor eletrônico do lado da rede, o que será determinado conforme o fluxo de energia e a natureza da fonte de primária utilizada (Abu-Rub; Malinowski; Al-Haddad, 2014).

Nesta configuração, o inversor opera como um conversor alimentador de rede, ou seja, é visto pela rede como uma fonte de corrente controlada com alta impedância de saída, acoplado à rede através de um filtro LC e um transformador de isolamento. Este filtro permite obter na saída do CEP formas de onda de tensão e corrente com baixa distorção harmônica, além de impedir que as ondulações do chaveamento contaminem a tensão no PAC. A corrente no indutor, I_f e a tensão sobre o capacitor, V_g , são medidas e realimentadas para a implementação do controle de corrente e potência. A Tabela 1 apresenta as características dos conversores.

Tabela 1 – Parâmetros dos conversores eletrônicos.

Parâmetro	Símbolo	Valor FN	Valor FF
Tensão barramento CC	V_{DC}	400V	400V
Tensão da rede	V_g	220V	220V
frequência da rede	f_g	60Hz	60Hz
Resistência parasita do indutor	R_f	0,1 Ω	-
Indutor do filtro	L_f	3,6 mH	-
Capacitor do filtro	C_f	15 μF	-
frequência de chaveamento	f_s	18kHz	15,36kHz
Potência máxima	$P_{G_j}^{max}$	1,0 kW	1,4/0,7kW
Corrente nominal	I_n	13,12A	6,81A/3,63A
ganho do sensor de corrente	H_i	1/10AA ⁻¹	1/10AA ⁻¹
ganho do sensor de tensão	H_v	10000 V/mA	10000 V/mA

Como o foco deste trabalho é a conexão entre a etapa de inversão e a rede elétrica, a fonte de energia primária associado ao seu conversor eletrônico (caso houver necessidade) são simplificados e representados como uma fonte de tensão CC ideal.

3.1.1 Filtro LC de saída

O sinal de saída do inversor não é uma senoide perfeita e frequências harmônicas aparecem como bandas laterais centradas em torno da frequência de chaveamento e seus múltiplos (Vitorino, 2019). Este conteúdo harmônico deverá ser atenuado através de um filtro passa-baixa de saída, podendo ser do tipo L, LC ou LCL para reduzir o nível de harmônicos injetados na rede à valores abaixo dos limites estipulados pelas normas e obter um sinal de saída na frequência fundamental. Conforme o padrão IEEE Std 1547 (2018), a distorção harmônica total da corrente injetada pela geração distribuída não deve ser superior a 5%.

O filtro de tipo L, consiste apenas de um indutor. Em toda a faixa de frequências possuem uma atenuação de -20 dB/dec. A fim de suprimir os harmônicos presentes na

corrente de saída, é necessário um indutor de alto valor e conseqüentemente conduz a um filtro de maior tamanho e custo mais elevado. A alta queda de tensão sobre o indutor prejudica a dinâmica do sistema (Cha; Vu, 2010). O filtro LC é um filtro de segunda ordem com uma atenuação de -40 dB/dec (Dong, 2009). A vantagem em relação ao filtro do tipo L, é que permite trabalhar com uma indutância menor e conseqüentemente, de menor valor. O filtro LC é adequado para inversores monofásicos devido ao seu tamanho compacto e bom desempenho de atenuação. O filtro LCL de terceira ordem, é amplamente utilizado com inversores trifásicos conectados à rede devido à sua elevada atenuação acima da frequência de ressonância (Cha; Vu, 2010).

Neste trabalho, é empregado um filtro LC e o procedimento para seu dimensionamento é baseado nos critérios descritos em Shah and Pels (2015) e Seo, Cho and Lee (2016). Os parâmetros dos conversores utilizados para o projeto do filtro LC, estão listados na Tabela 1.

A tensão nominal da rede V_g é 220 V, sendo três conversores conectados fase-neutro, com tensão igual a 127 V e outros três conectados fase-fase com tensão 220 V. Foram empregados conversores fase-neutro construídos com os módulos de potência fabricados pela empresa Supplier, operando com frequência de chaveamento de 18 kHz e inversores solares da PHB com frequência de chaveamento igual a 15,36 kHz. Os conversores fase-neutro foram limitados à uma potência ativa máxima de 1000 W, com potência aparente nominal igual à 1500 VA, enquanto os conversores fase-fase são dois conversores de 1400 W e 1500 VA e um terceiro de 700 W e 800 VA.

A indutância do filtro (L_f) deve ser escolhida para limitar a corrente de ondulação (ΔI_{pp}) do lado do conversor entre 10-30% da corrente fundamental (3.1). Considerando a máxima corrente de ondulação igual a 20% da corrente máxima, a indutância mínima do filtro L_f é dada em 3.2.

$$\Delta I_{pp} = 0,2 \cdot \frac{1500}{127} \cdot \sqrt{2} = 3,34A \quad (3.1)$$

$$L_f = \frac{2.400}{4.18000 \cdot 3,34} = 3,32mH \quad (3.2)$$

O capacitor do filtro deve ser determinado baseado na potência reativa absorvida e esta deve ficar entre 5-15% da potência nominal (kVA). Considerando o valor mínimo o capacitor pode ser determinado em 3.3.

$$C_f = \frac{0,05 \cdot 1500}{127^2 \cdot 2\pi \cdot 60} = 12,33\mu F \quad (3.3)$$

Foram adotados valores comerciais mais próximos para o capacitor, C_f , e para o indutor, L_f , iguais à 15 μF e 3,6 mH, respectivamente.

A frequência de ressonância deve estar dentro da região indicada em 3.4,

$$10f_g < f_{res} < \frac{f_s}{2}, \quad (3.4)$$

ou seja, deve ser 10 vezes maior que a frequência da rede (f_g) e menor que a metade da frequência de chaveamento (f_s), (Tang et al., 2011).

A frequência de ressonância do filtro desprezando a resistência intrínseca do indutor determinada pela equação 3.5 é de 684,89 Hz.

$$f_{res} = \frac{1}{2\pi \cdot \sqrt{L_f \cdot C_f}} \quad (3.5)$$

A Figura 6 mostra o diagrama de Bode do filtro LC construído. Observa-se a frequência de ressonância dentro da faixa desejada e a atenuação de -40 dB/década após a frequência de ressonância.

3.2 Topologia do Conversor Formador de Rede

O objetivo da integração do conversor UI nas simulações é permitir a operação da microrrede no modo ilhado, fornecendo referência de amplitude e frequência para a microrrede. É constituída por um conversor CC-CA trifásico conforme exibido na Figura 7. Este conversor é conectado ao PAC após o disjuntor D_2 que está acoplado aos terminais de baixa tensão do transformador de distribuição que faz a conexão com a rede de distribuição.

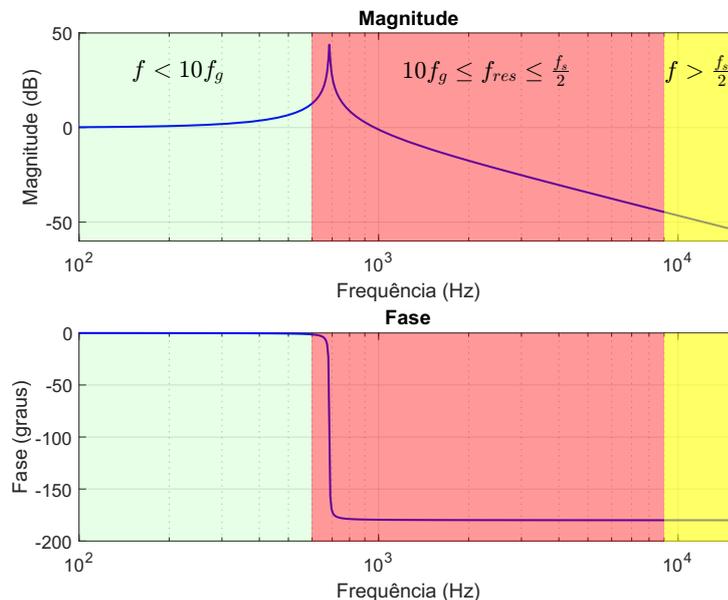


Figura 6 – Diagrama de Bode (Fonte: Autoria própria.)

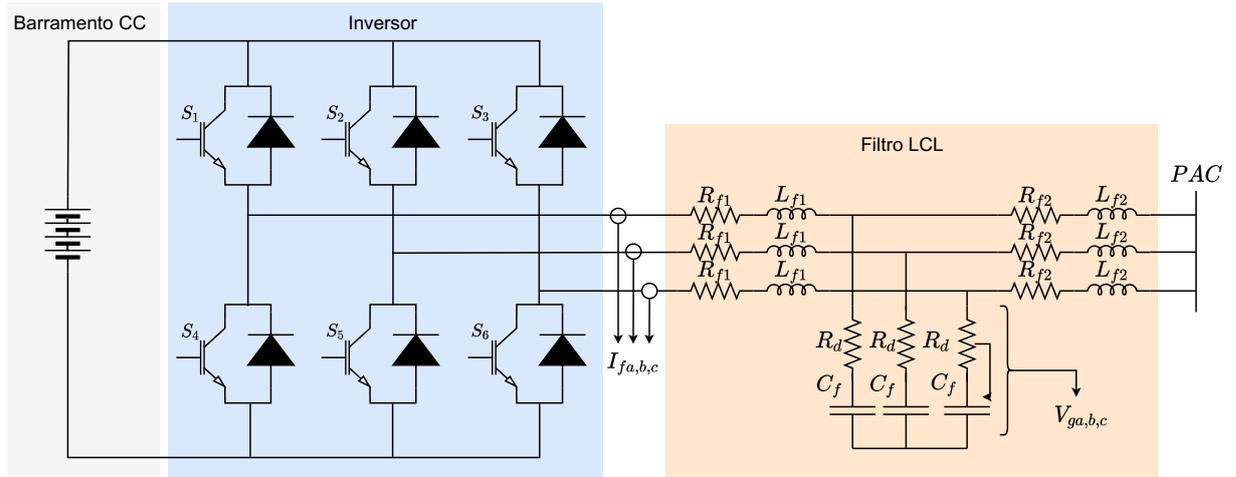


Figura 7 – Diagrama do conversor da UI. (Fonte: Autoria própria.)

Em modo conectado, de acordo com objetivos de operação estabelecidos, a UI pode contribuir com o complemento de potência para a microrrede, diminuindo a dependências da rede de distribuição e ainda oferecer serviços auxiliares relacionados à qualidade de energia, compensação de desequilíbrio etc..

Já no modo ilhado, funciona como um conversor formador de rede, fornecendo referência de amplitude e frequência para a microrrede. Um filtro do tipo LCL com um resistor de amortecimento, R_d , é empregado para reduzir o nível de componentes harmônicas na saída do conversor. A Tabela 2 mostra os valores dos elementos do filtro, a sua potência nominal e a frequência de chaveamento.

Tabela 2 – Parâmetros do filtro LCL

S_n	3 kVA
f_s	18 kHz
L_{f1}	2mH
L_{f2}	2mH
R_{f1}	0,001Ω
R_{f2}	0,001Ω
C_f	15μF
R_d	0.4Ω

A função de transferência do filtro LCL é dada pela equação 3.6.

$$\frac{I_g(s)}{V_g(s)} = \frac{R_d \cdot C_f \cdot s + 1}{C_f \cdot L_{f2} \cdot L_{f1} \cdot s^3 + R_d \cdot C_f \cdot (L_{f1} + L_{f2}) \cdot s^2 + (L_{f1} + L_{f2})s} \quad (3.6)$$

A frequência de ressonância desconsiderando o resistor de amortecimento, R_f é dada pela equação.

$$f_{res} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{L_{f1} + L_{f2}}{L_{f1} \cdot L_{f2} \cdot C_f}} \quad (3.7)$$

A frequência de ressonância calculada através da equação 3.7 é igual a 1300 Hz. A Figura 8 mostra o diagrama de Bode do filtro e verifica-se que a frequência está dentro da faixa estabelecida pela equação 3.4.

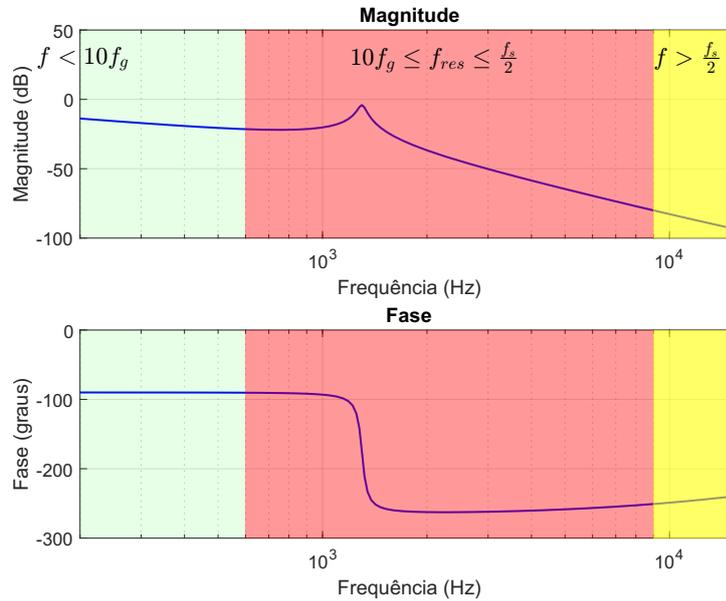


Figura 8 – Diagrama de Bode do filtro LCL. (Fonte: Autoria própria.)

3.3 Sincronismo - SOGI-PLL

Para conectar várias fontes geradoras em paralelo umas com as outras em um ponto de acoplamento comum, a tensão e a frequência das fontes devem ser exatamente iguais. Com o intuito de sincronizar o grupo gerador com o barramento comum energizado, um sistema de sincronismo é empregado para levar o gerador em questão a obter em sua saída, a mesma amplitude, frequência e ângulo de fase do barramento comum antes que o disjuntor do respectivo gerador possa ser fechado (Corbelino, 2012).

A sincronização da rede é uma tarefa de monitoramento da rede que contribuirá fortemente para o desempenho dinâmico e a estabilidade de todo o sistema de controle. Diferentes métodos podem ser empregados para obter as informações de tensão da rede como o método de cruzamento por zero, o método de filtragem de tensão da rede e as técnicas de PLL (*Phase Locked Loop*) (Teodorescu; Liserre; Rodriguez, 2011) e (Blaabjerg et al., 2006). Neste trabalho foi utilizado o algoritmo *SOGI-PLL* (*Integrador Generalizado de Segunda Ordem - PLL*) proposto em Ciobotaru, Teodorescu and Blaabjerg (2006) exibido na Figura 9.

Nesta estrutura, um integrador generalizado de segunda ordem para geração de sinais em quadratura (*SOGI-QSG*) é responsável por gerar as componentes em fase (v'_α) e em quadratura (v'_β) com a tensão da rede. Esses sinais são transformados para o referencial síncrono através da transformada de *Park* e então, um SRF-PLL (*Synchronous Reference*

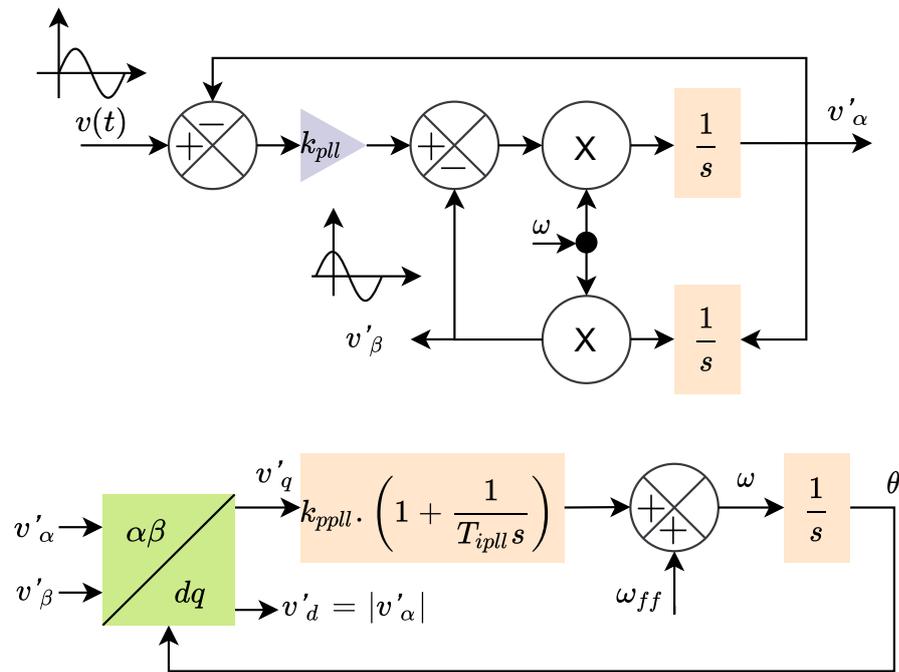


Figura 9 – Diagrama do SOGI-PLL. (Fonte: Adaptada de (Teodorescu; Liserre; Rodriguez, 2011)).

Frame - PLL) é usado para obter o ângulo e a frequência fundamental da tensão da rede. Essa frequência é usada para realimentar o *SOGI-QSG* a fim de tornar o detector adaptativo em frequência.

O valor do ganho k_{pll} do bloco *SOGI-QSG* está relacionado com o tempo de estabilização e limitação de sobressinal máximo. Foi escolhido um fator de amortecimento $\zeta = 0,7$ e um tempo de estabilização igual a $t_s = 20 \text{ ms}$. Conforme Kathushiko (2011), para o critério de erro igual a 5%, resulta em uma largura de banda para a malha de controle do SOGI-PLL igual a : $[\omega' = 142,857 \text{ rad/s}]$ (ver equação 3.8).

$$t_s = \frac{3}{\zeta \omega_n} \quad (3.8)$$

A função de transferência do *SRF-PLL* pode ser obtida como um sistema típico de segunda ordem conforme a equação 3.9, sendo k_{ppll} e k_{ipll} sendo o ganho proporcional e integral do controlador PI do filtro passa baixas (FPB), respectivamente.

$$G_{pll} = \frac{2\zeta\omega_n s + \omega_n^2}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2} = \frac{k_{ppll}s + k_{ipll}}{s^2 + k_{ppll}s + k_{ipll}} \quad (3.9)$$

$$k_{ipll} = \omega_n^2 \quad (3.10)$$

$$k_{ppll} = 2\zeta\omega_n \quad (3.11)$$

Comparando o denominador da função de transferência 3.9 com a equação característica de segundo grau $s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2$ pode-se obter os ganhos do controlador conforme as equações 3.10 e 3.11. Com base no fator de amortecimento ζ e na largura de banda ω' definidas anteriormente, resulta nos ganhos [$k_{ppl} = 200$ e $k_{ipll} = 20408$].

3.4 Estratégia de controle

A implementação da estratégia de controle do inversor monofásico conectado à rede pode ser feito em diferentes coordenadas, como por exemplo o referencial síncrono (dq), estacionário ($\alpha\beta$), ou ainda o referencial natural (abc). Uma abordagem destes diferentes métodos de controle pode ser encontrado em Costa et al. (2021). Neste trabalho, é empregado um sistema de controle de potência baseado em controladores do tipo Proporcional-Integral (PI) implementados em coordenadas naturais (abc).

O sistema de controle empregado nos REDs monofásicos é exibido na Figura 10. Consiste em duas malhas de controle, empregando controladores do tipo PI. A malha interna, consiste em uma malha de corrente com dinâmica mais rápida, responsável por controlar a corrente de saída do conversor, $C_i(s)$, e a segunda, duas malhas com dinâmicas mais lentas do que a malha interna de corrente, $C_P(s)$ e $C_Q(s)$, responsáveis pelo controle da potência ativa e reativa de saída dos conversores, respectivamente.

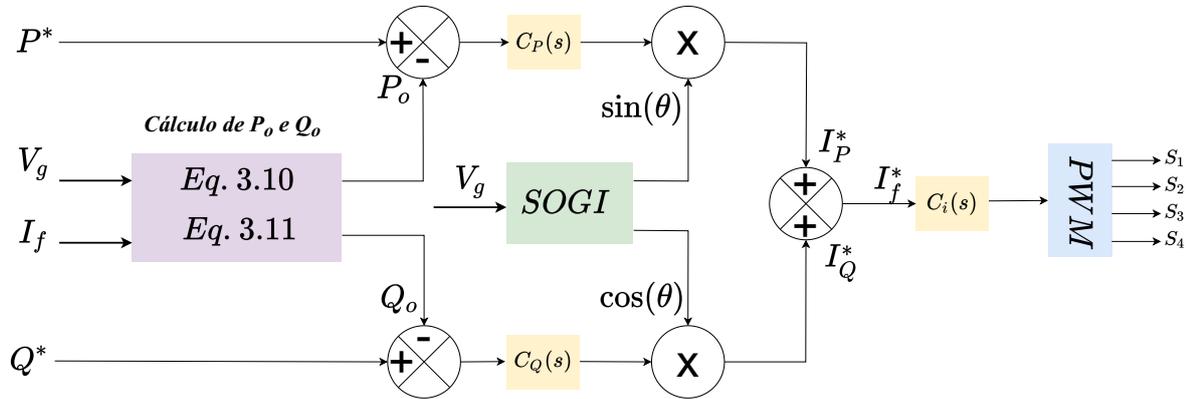


Figura 10 – Estrutura de controle empregada. (Fonte: Autoria própria.)

A potência ativa P_o e a potência reativa Q_o são definidas de acordo com a teoria da potência instantânea conforme Tenti, Paredes and Mattavelli (2010) e podem ser através das equações 3.12 e 3.13.

$$P_o = \frac{1}{T} \int_0^t v_g(t) \cdot i_f(t) dt \quad (3.12)$$

$$Q_o = \frac{1}{T} \int_0^t v_g^\perp(t) \cdot i_f(t) dt \quad (3.13)$$

Onde T é o período da tensão em s^{-1} e $v_g^\perp(t)$ é o sinal de $v_g(t)$ deslocado de 90° e pode ser determinado através da equação 3.14.

$$v_g^\perp = \left[\int_0^t v_g(t) dt - \frac{1}{T} \int_{\tau-t}^t \left(\int_0^t v_g(t) dt \right) \right] \cdot \omega, \quad (3.14)$$

onde ω é a frequência angular da tensão $v_g(t)$.

No modo ilhado, a estratégia de controle empregada para o conversor formador de rede consiste em três malhas de controle independentes uma para cada fase, constituídas por duas malhas de controle, sendo uma malha interna de corrente e uma malha externa de tensão conforme exibido na Figura 11.

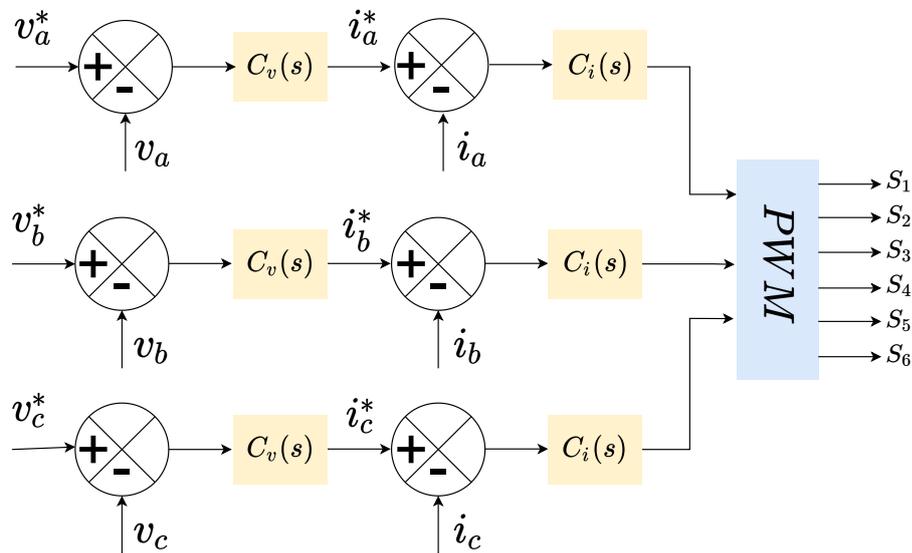


Figura 11 – Estrutura de controle do conversor UI em modo ilhado. (Fonte: Autoria própria.)

Destaca-se que, a utilização deste tipo de controlador é somente nas simulações, uma vez que, a tentativa de rastrear as três correntes medidas (i_a , i_b e i_c) de um conversor real com três fios e três braços, poderá levar à operação intermitente, podendo levar à perda do controle do conversor (Matakas Junior, 2012). Desta forma, para efeitos de resultados nesta dissertação, será utilizado apenas cargas equilibradas e é considerado um modelo de conversor ideal e ganhos dos sensores idênticos.

3.4.1 Sintonia do controlador de corrente

A largura de banda do sistema de controle é limitada pela frequência de ressonância do filtro LC, uma vez que o filtro atenua os sinais em frequências mais altas, limitando a capacidade de atuação do controlador. Assim, a frequência de cruzamento de ganho (f_c) escolhida para projetar o controlador de corrente é 600 Hz.

Outro fator importante para do controlador de corrente para o desempenho e estabilidade do sistema é margem de fase. Valores reduzidos podem levar o sistema à instabilidade, caso haja alguma variação nos parâmetros dos componentes. Por outro lado, uma margem de fase muito elevada implica em uma resposta mais lenta (Nise, 2013). Uma boa margem de fase se situa na faixa entre 45° e 75° (Barbi, 2014). A Figura 12 mostra o diagrama de blocos de controle para o inversor monofásico conectado à rede conforme mostrado na Figura 5.

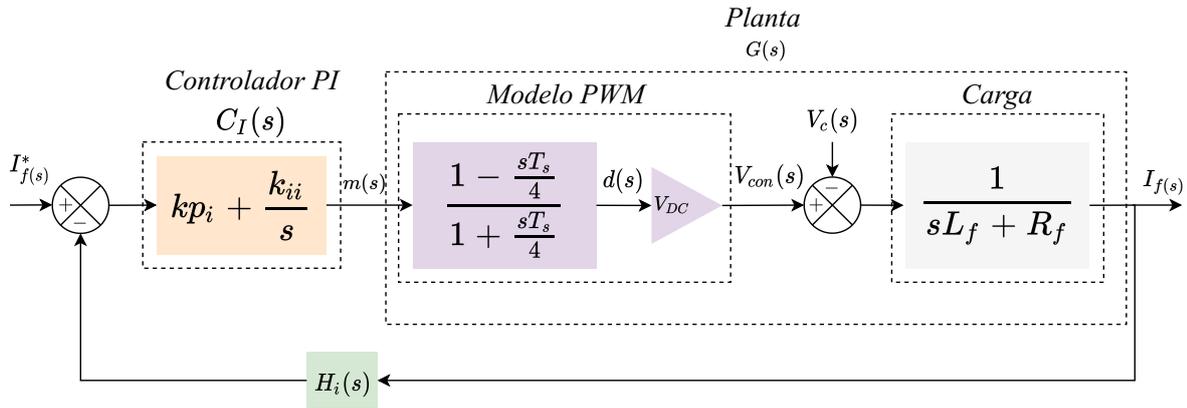


Figura 12 – Diagrama de blocos do conversor monofásico conectado a rede. (Fonte: Autoria própria.)

A sintonia do controlador de corrente $G_{CI}(s)$ é baseada no método descrito em Buso and Mattavelli (2015). A função de transferência em malha aberta $G_{MAI}(s)$ que relaciona a corrente do indutor $I_f(s)$ com a corrente de referência $I_f(s)^*$ pode ser determinada através da equação 3.15.

$$G_{MAI}(s) = \left(K_{pi} + \frac{K_{ii}}{s} \right) H_i(s) \cdot \frac{1 - \frac{sT_s}{4}}{1 + \frac{sT_s}{4}} \cdot V_{DC} \cdot \frac{1}{sL_f + R_f} \quad (3.15)$$

Onde K_{pi} é o ganho proporcional e K_{ii} é o ganho integrativo do controlador de corrente respectivamente e H_i é o ganho do sensor de corrente definido na Tabela 1. A partir da equação 3.15, os parâmetros do controlador k_{pi} e k_{ii} são determinados impondo que a magnitude da função de transferência seja igual a 1 na frequência de cruzamento desejada, ω_c e sua margem de fase (MF°) esteja entre 45° e 75° na frequência de cruzamento, ω_c conforme as equações 3.16 e 3.17 respectivamente.

$$k_{pi} = \frac{1}{V_{DC}} \cdot \frac{R_f}{H_i} \cdot \sqrt{1 + \left(\omega_c \cdot \frac{L_f}{R_f} \right)^2} \quad (3.16)$$

$$k_{ii} = \frac{\omega_c \cdot k_p}{\tan \left[-\frac{\pi}{2} + MF^\circ + 2 \cdot \text{atan} \left(\omega_c \cdot \frac{T_s}{4} \right) + \text{atan} \left(\omega_c \cdot \frac{L_f}{R_f} \right) \right]} \quad (3.17)$$

A frequência de cruzamento f_c desejada para o controlador de corrente, $C_i(s)$, é de 600 Hz com uma margem de fase igual a 60° . Desta forma, os parâmetros obtidos para o controlador são mostrados na Tabela 3.

Tabela 3 – Parâmetros do controlador de corrente

f_c	666 Hz
k_{pi}	0,33
k_{ii}	580,98 rad.s^{-1}

A Figura 13 exibe o diagrama de Bode da função de transferência em malha aberta da planta $G_i(s)$ sem o controlador PI e do sistema compensado com o controlador PI, $G_c i(s)$. Observa-se que o controlador PI aumenta o ganho em baixas frequências e ajusta a frequência de cruzamento para 666 Hz e margem de fase para 60° conforme os critérios de projeto.

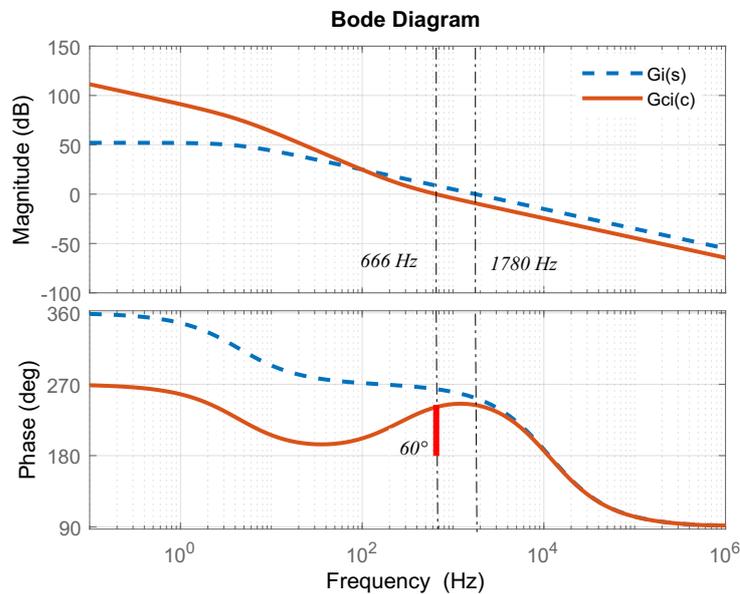


Figura 13 – Diagrama de Bode do sistema. (Fonte: Autoria própria.)

A Figura 14 mostra a dinâmica do controle de corrente em malha fechada. Nesse caso, o ganho é aproximadamente unitário para frequências até 100 Hz, mas para frequências mais altas ele insere uma amplitude e diferença de fase no sistema.

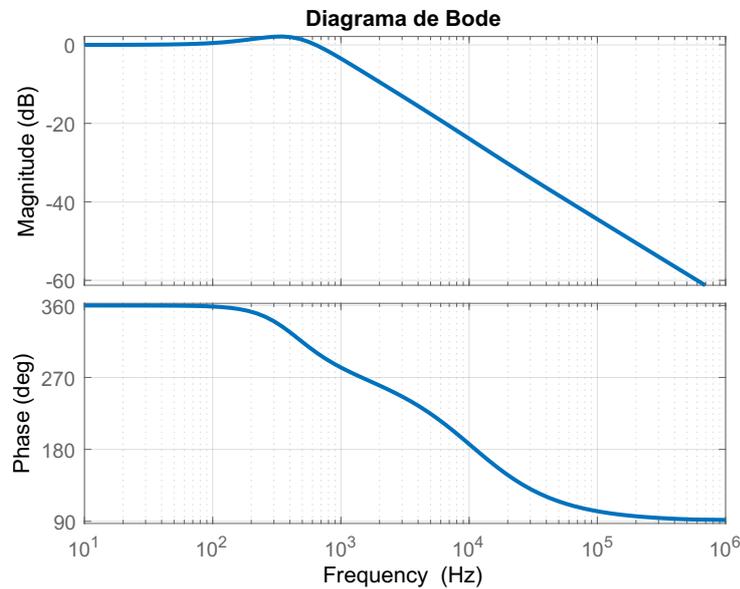


Figura 14 – Diagrama de Bode do sistema em malha fechada.(Fonte: Autoria própria.)

A resposta ao degrau unitário é mostrada na Figura 15. O tempo de subida é de 0,35 ms, com um sobressinal de 21,2% e tempo de acomodação de aproximadamente 2 ms.

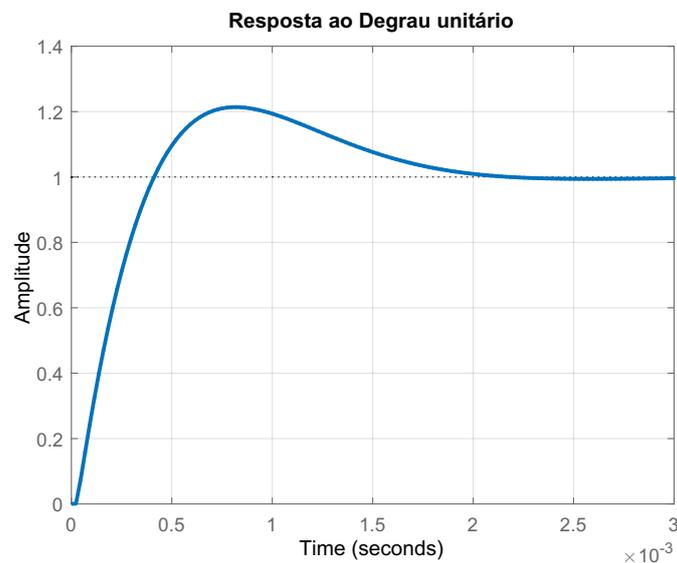


Figura 15 – Resposta ao degrau do sistema em malha fechada.(Fonte: Autoria própria.)

3.4.2 Sintonia da Malha externa de potência

Conforme a equação 3.18 a corrente de referência i_f^* pode ser dividida em duas parcelas, i_P^* em fase com a tensão de saída, $v_g(t)$, portanto, corresponde a parcela de potência ativa e i_Q^* em quadratura com a tensão de saída que representa a parcela de potência reativa, sendo indutiva ou capacitiva dependendo do deslocamento do ângulo com relação a tensão $v_g(t)$ e são obtidas através das equações 3.19 e 3.20. As componentes I_P^* e I_Q^* representa os valores de pico das correntes ativa e reativa, respectivamente, θ é o ângulo de fase da tensão da rede e V_g o valor eficaz da tensão da rede. Com os valores de referência de potência ativa e potência reativa, a corrente de referência de saída do conversor pode ser obtida através da equação 3.22.

$$i_f^* = i_P^* + i_Q^* \quad (3.18)$$

$$i_P^* = I_P^* \cdot \sin(\theta) \quad (3.19)$$

$$i_Q^* = I_Q^* \cdot \cos(\theta) \quad (3.20)$$

$$i_f^* = I_P^* \cdot \sin(\theta) + I_Q^* \cdot \cos(\theta) \quad (3.21)$$

$$i_f^* = \sqrt{2} \left(\frac{P^* \cdot \sin\theta}{V_g} + \frac{Q^* \cdot \cos\theta}{V_g} \right) \quad (3.22)$$

O projeto das malhas externas de controle de potência $C_P(s)$ e $C_Q(s)$ tem como objetivo regular o fluxo de potência ativa (P_o) e reativa (Q_o) na saída dos conversores de forma independente. Os valores das potências P_o e Q_o são valores médios calculados conforme as equações 3.12 e 3.13, respectivamente. Desta forma, um simples controlador PI é suficiente para garantir o rastreamento da referência de potência e garantir erro em regime permanente nulo (Mukherjee; Shamsi; Ferdowsi, 2016). As malhas de potência são seguidas pela malha de corrente interna, $C_i(s)$, formando um sistema de controle em cascata ou multi-malhas conforme exibido no diagrama de blocos da função de transferência das malhas de controle de P e Q da Figura 16.

Nesta estrutura de controle, as malhas de P e Q são idênticas, portanto, para o projeto dos controladores $C_P(s)$ e $C_Q(s)$ serão adotados os mesmos parâmetros. Como pode ser visto, o controle das parcelas ativa e reativa são independentes, o que permite atender as demandas da microrrede e da rede de distribuição conforme às necessidades específicas.

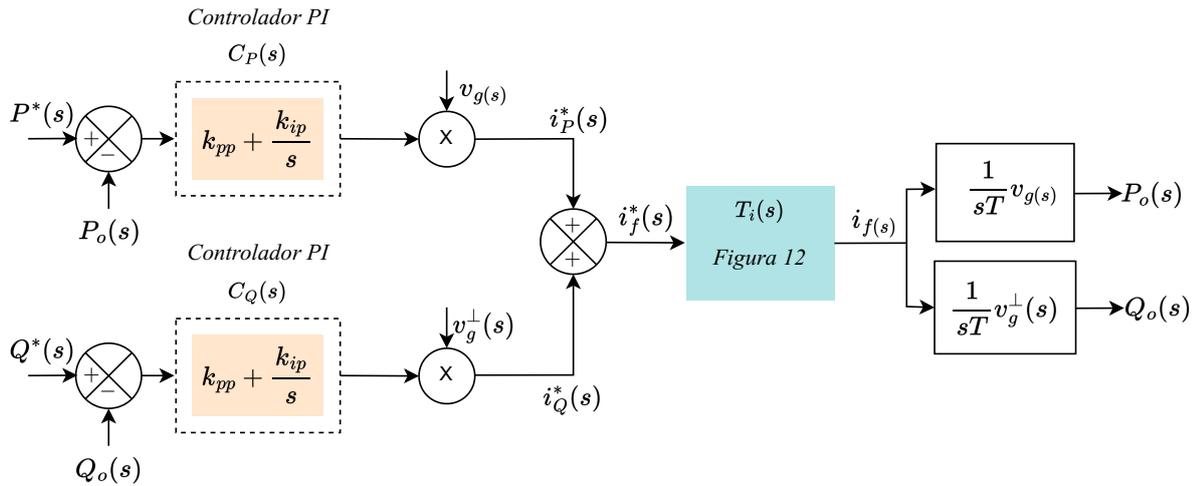


Figura 16 – Diagrama de blocos da função de transferência das malhas de potência P e Q. (Fonte: Autoria própria.)

A função $T_i(s)$ é igual a função de transferência de malha fechada da estrutura de controle da corrente interna exibido na Figura 12 da seção 3.4.1. Para a correta operação do sistema de controle, a largura de banda da malha externa deverá ser suficientemente menor do que a largura de banda da malha interna. Isto assegura que a dinâmica da malha externa não é influenciada pela dinâmica da malha interna. Como critério de projeto, busca-se obter uma frequência de cruzamento de ganho inferior a dez vezes menor do que a frequência de cruzamento de ganho da malha interna de corrente, ou seja, inferior à 60 Hz. Desta forma, os valores encontrados para os controladores $C_P(s)$ e $C_Q(s)$ são exibidos na Tabela 4.

Tabela 4 – Parâmetros dos controladores de potência

f_c	30 Hz
$k_{pp}; k_{pq}$	0,025
$k_{ip}; k_{iq}$	0,0034 $rad.s^{-1}$

A Figura 17 mostra o diagrama de Bode das funções de transferência em malha aberta das malhas de corrente, $G_{ci}(s)$, e de potência, $G_{cp}(s)$. Nota-se que a frequência de cruzamento da malha interna de corrente interna de corrente, $G_{ci}(s)$ e sua margem de fase não foram afetadas na presença da malha de potência, mantendo-se em 655 Hz e 60° respectivamente. A frequência de cruzamento de ganho da malha de potência é de 30 Hz.

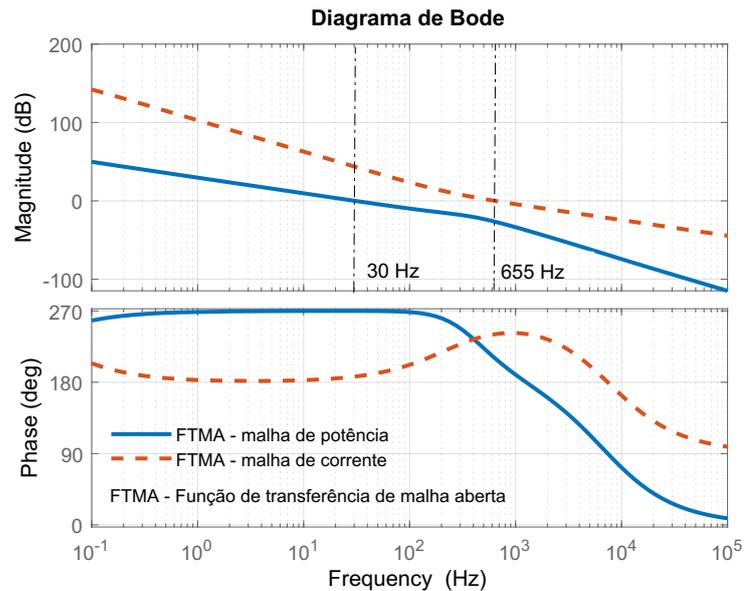


Figura 17 – Diagrama de Bode das malhas de corrente e de potência. (Fonte: Autoria própria.)

A Figura 18 mostra a resposta da malha de controle de potência em malha fechada para uma entrada em degrau unitário. Observa-se que o sistema não apresenta sobressinal e possui um tempo de acomodação de aproximadamente 25 ms, apresentando erro nulo em regime permanente. Desta forma, o sistema de controle permite rastrear as referências de potências ativa e reativa garantindo erro nulo em regime permanente sem impactar a dinâmica da malha de corrente. Que por sua vez, também irá garantir a corrente de saída igual ao valor determinado pelas malhas de potência conforme cada parcela correspondente à potência ativa e reativa conforme será apresentado no capítulo 4.

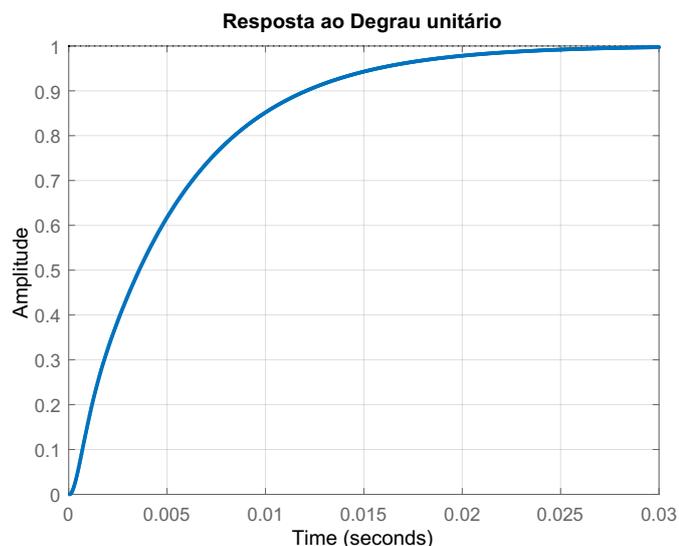


Figura 18 – Resposta da malha de potência em malha fechada ao degrau unitário. (Fonte: Autoria própria.)

3.4.3 Sintonia dos controladores do conversor UI

Uma vez que os controladores são independentes, o procedimento de projeto das malhas de controle de corrente é o mesmo adotado para os REDs monofásicos descrito na seção 3.4.1. A frequência de cruzamento de ganho para o controlador de corrente é de 800 Hz, situada dentro da faixa estabelecida conforme a Figura 8. Os valores dos parâmetros dos controladores de corrente, $C_iUI(s)$, exibidos na Tabela 5.

Tabela 5 – Parâmetros dos controladores de corrente da UI

f_c	800 Hz
k_{p_iUI}	0,397
k_{i_iUI}	802,32 $rad.s^{-1}$

Para as malhas de tensão o procedimento é o mesmo utilizado nas malhas de potência dos REDs, porém, as malhas de tensão não podem ser tão lentas quanto as malhas de potência devido a dinâmica da tensão ser mais rápida do que a potência. Normalmente um faixa típica situa-se entre 400 a 600 Hz. A Figura 19 exhibe o diagrama de blocos do conversor controlado em modo de tensão.

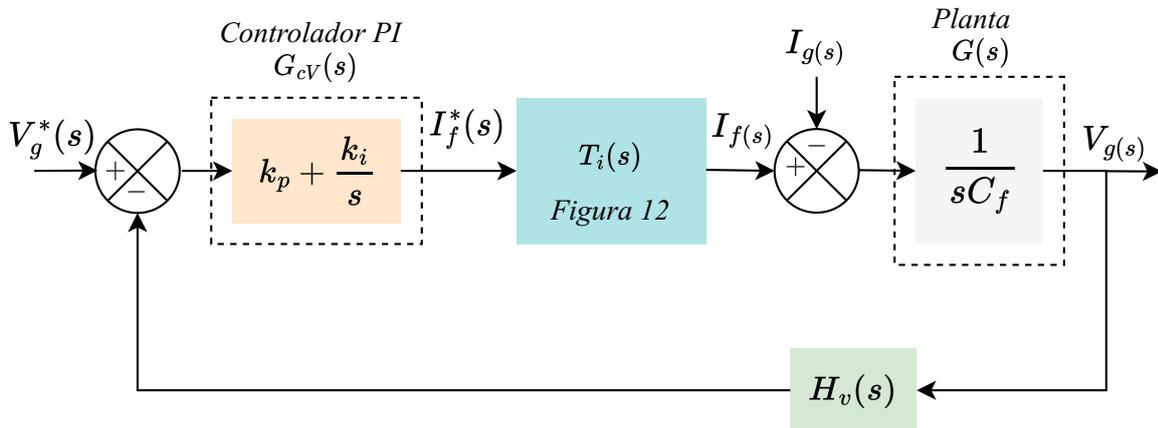


Figura 19 – Diagrama de blocos do conversor controlado em tensão. (Fonte: Autoria própria.)

Os parâmetros do controlador de tensão da UI, C_vUI são exibidos na Tabela 6.

Tabela 6 – Parâmetros dos controladores de tensão da UI

f_c	468 Hz
k_{p_vUI}	0,0351
k_{vUI}	0,005 $rad.s^{-1}$

A Figura 20 exhibe o diagrama de Bode dos sistemas de controle em modo conectado, $G_{ci}UI(s)$ e em modo ilhado, $G_{cv}UI(s)$. Verifica-se que a frequência de cruzamento de ganho em modo ilhado é aproximadamente 468 Hz com uma margem de fase de 62° . No modo conectado, a frequência de cruzamento de ganho situa-se em torno de 813 Hz com

uma margem de fase de 60° . A Figura 21 exibe a resposta do sistema de controle no modo ilhado para uma entrada em degrau unitário. O tempo de subida é de 0,7 ms e o tempo de acomodação aproximadamente 2,5 ms.

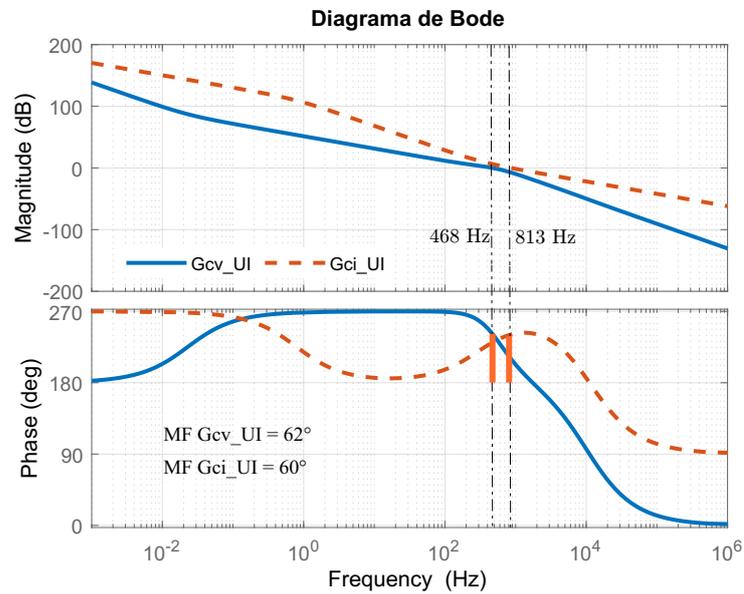


Figura 20 – Diagrama de Bode dos controladores da UI.(Fonte: Autoria própria.)

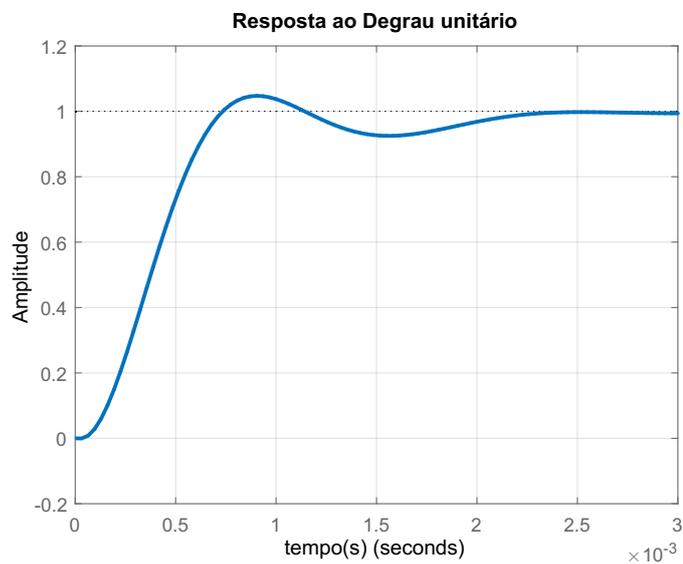


Figura 21 – Resposta em malha fechada da malha de tensão.(Fonte: Autoria própria.)

3.5 Resultados de simulação

A arquitetura da microrrede apresentada na Figura 3 foi simulada no *software* PLECS versão 4.1.2 em dois cenários diferentes. A primeira abordagem consiste na simulação apenas do RED_1 conectado à rede, para avaliação individual do controle de injeção de potências ativa e reativa na rede e da capacidade de rejeição do sistema de controle às variações de amplitude e frequência da rede. Na segunda abordagem, é realizada a simulação da microrrede incluindo os três REDs com conexão fase-neutro, a UI e cargas passivas equilibradas, onde será avaliado a operação da microrrede nos modos conectado e ilhado em regime permanente.

3.5.1 Controle Individual do conversor monofásico

Na primeira abordagem, o conversor é controlado pela malha interna de corrente e pela malha externa de potência conforme discutido na seção 3.4. A Figura 22 mostra o fluxo de potência ativa e reativa fornecida pelo RED_1 de em função da variação em degrau nas suas referências. De acordo com o referencial adotado, valores positivos de P ou Q , correspondem a injeção de potência pelo RED, enquanto valores negativos referem-se à absorção de potência pelo RED. Do lado da rede, valores positivos de P ou Q correspondem ao fornecimento de potência por parte da rede, enquanto valores negativos referem-se ao caso os conversores fornecem potência para a rede.

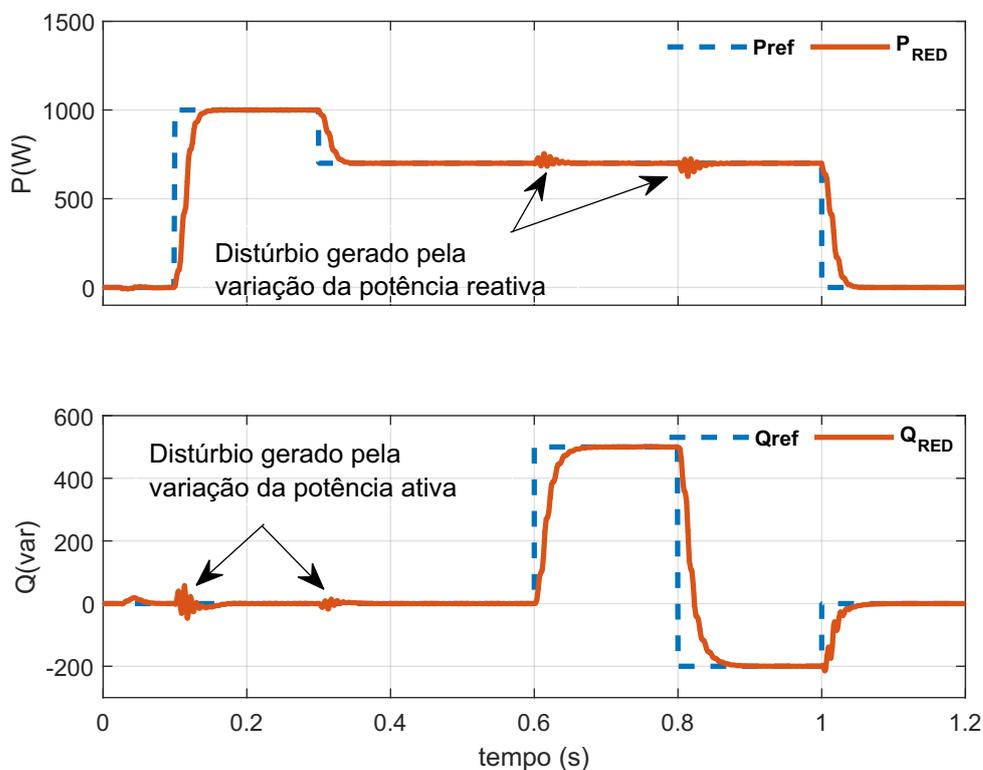


Figura 22 – Fluxo de potência ativa e reativa de saída do RED_1 . (Fonte: Autoria própria.)

Durante o intervalo $t = 0,1$ s a $0,3$ s, a referência de potência ativa, P_{ref} , recebe um comando em degrau de 0 a 1000 W e observa-se que o valor da potência ativa aumenta rapidamente atingindo o valor de referência em aproximadamente 23 ms, enquanto a referência de potência reativa, Q_{ref} , é mantida igual a 0 var. Durante $t = 0,3$ s a 1 s, P_{ref} , a referência de potência ativa é reduzida para 700 W.

No instante $t = 0,6$ s a $0,8$ s, a referência de potência reativa recebe um comando em degrau de 0 var a 500 var e observa-se que a potência reativa injetada segue a referência, estabilizando em 500 var, em aproximadamente 24 ms. Neste instante, o RED_1 passa a injetar potências ativa e reativa na rede simultaneamente.

Em $t = 0,6$ s, a malha de potência reativa recebe um comando de -200 var, ou seja, o conversor passa a absorver 200 var da rede. Pode ser observado que tanto na injeção quanto na absorção de potência reativa, o sistema de controle acompanha o sinal de referência, podendo atender às necessidades específicas da rede. No instante $t = 1$ s, as referências P_{ref} e Q_{ref} recebem simultaneamente um comando em degrau de 0 W e 0 var respectivamente.

Nos instantes em que há variação da injeção de potência ativa, observa-se oscilações na potência reativa e também oscilações na potência ativa quando ocorre variação na injeção de potência reativa. Estas oscilações são devidas ao acoplamento entre as malhas de potência P e Q através da impedância da rede, que neste trabalho possui característica indutiva ($X_g \gg R_g$). As oscilações na potência ativa possuem uma amplitude de 17,71% da potência injetada com um período de estabilização aproximadamente de 5 ms. Já as oscilações na potência reativa possuem uma amplitude da ordem de 2,85% da potência reativa disponível com um tempo de estabilização de aproximadamente 5,8 ms. O efeito do acoplamento neste trabalho é desprezado, mas podem ser empregadas técnicas para realizar o desacoplamento entre as malhas, como por exemplo, o emprego da impedância virtual conforme desenvolvido em [Correa \(2018\)](#).

As formas de onda da corrente em uma escala $10x$ e da tensão do PAC para as variações de potência mostradas na Figura 22 são apresentadas na Figura 23 para o instante $t = 0,2$ s a $0,4$ s. A corrente de pico de saída é igual à 11,10 A de pico para o intervalo $t = 0,2$ s a $0,3$ s.

No instante $t = 0,3$ s, a corrente varia de 11,10 A de pico para 7,78 A de pico devido a variação da potência de saída de 1000 W para 700 W. Nota-se que a corrente de saída está praticamente acoplada à sua referência, devido à dinâmica rápida imposta pelo controlador de corrente. A THD da corrente de saída para o instante $t = 0,1$ s a $0,3$ s é de 0,204%.

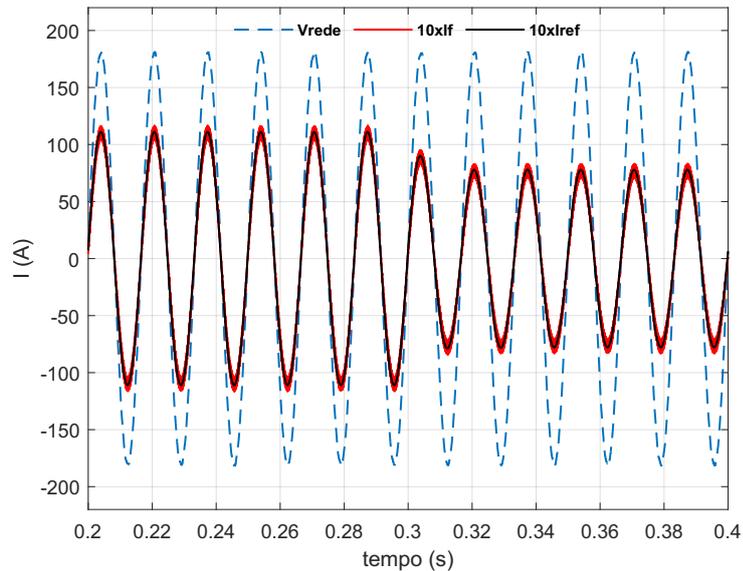


Figura 23 – Corrente de saída do RED_1 e tensão no PAC com injeção de somente potência ativa. (Fonte: Autoria própria.)

Na Figura 24 é exibida a forma de onda da corrente de saída do RED_1 a partir do instante $t = 0,55$ s a $t = 0,65$ s. Enquanto a Figura 25 exibe a corrente no intervalo $t = 0,78$ s à $t = 0,85$ s.

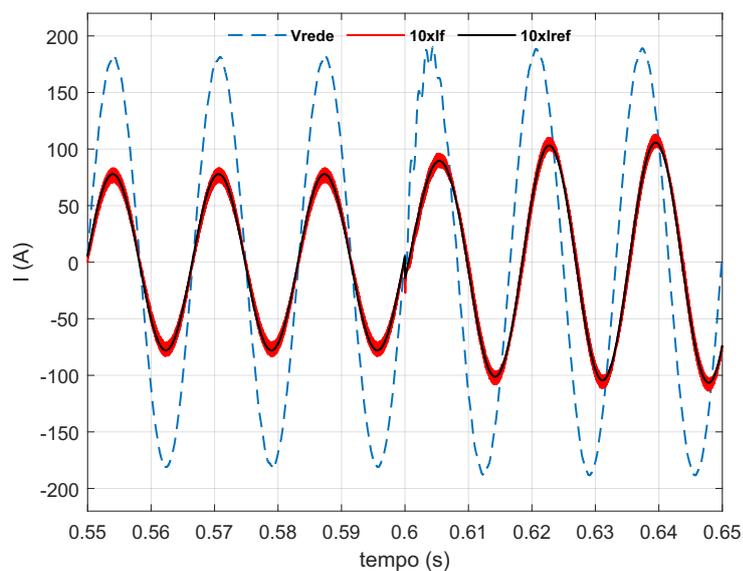


Figura 24 – Corrente de saída para injeção de potência ativa e reativa. (Fonte: Autoria própria.)

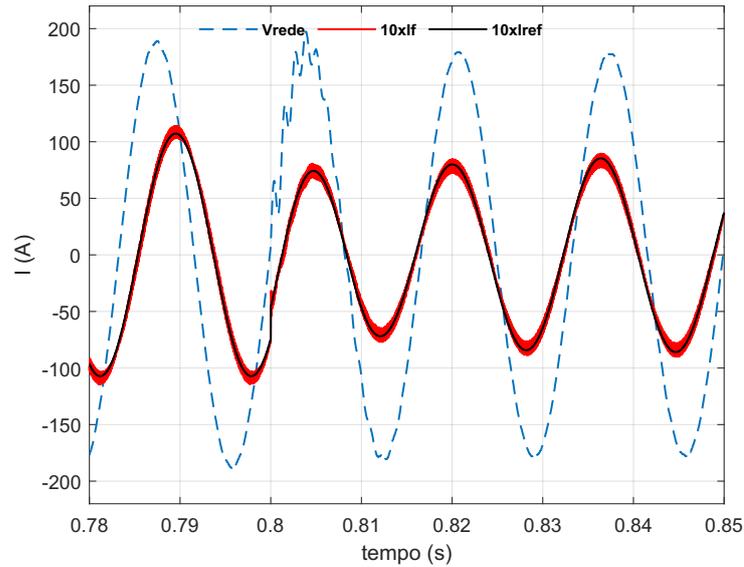


Figura 25 – Corrente de saída para injeção de potência ativa e absorção de potência reativa. (Fonte: Autoria própria.)

Em ambos os casos, quando há variação na potência reativa, é observado uma variação na tensão da rede. Os valores encontrados em percentuais do valor nominal (+4,76% quando injetando potência reativa e -0,91% quando absorvendo) estão dentro dos limites recomendados pelo padrão [IEEE Std 1547 \(2018\)](#), que determina que gerador distribuído deve ser controlado para manter a tensão no PAC na faixa de 95% a 105% da tensão nominal da rede elétrica.

3.5.2 Variação de amplitude e frequência da rede

Conforme os procedimentos de distribuição para acesso de micro e minigeração distribuída ao sistema de distribuição descrito em [PRODIST \(2012\)](#), a rede de distribuição pode operar em diversas condições de falha, como por exemplo, a frequência pode variar ligeiramente entre 59,5 Hz e 60,5 Hz, a amplitude da tensão pode reduzir até 90% ou elevar-se até 110% da tensão nominal eficaz e também, pode conter conteúdos harmônicos de ordem superior. A Figura 26 mostra as potências ativa e reativa de saída do conversor mediante variações na frequência da tensão da rede.

No instante $t = 0,2$ s a $0,35$ s, a frequência da rede varia de 60 Hz para 60,5 Hz. Nota-se que o sistema de controle mantém a potência média de saída igual à referência com uma oscilação de frequência igual ao dobro da frequência da rede, 121 Hz e com amplitude igual a $P_{ref} \pm 7$ W para potência ativa e $Q_{ref} \pm 5,74$ var para potência reativa.

No instante $t = 0,35$ s a $0,5$ s, a frequência reduz de 60,5 Hz à 59,8 Hz. Neste caso, a de potência de saída apresenta oscilação com amplitude igual a $P_{ref} \pm 2,5$ W para a potência ativa e $Q_{ref} \pm 2,01$ var para a potência reativa, ambas com uma frequência de 119,6 Hz.

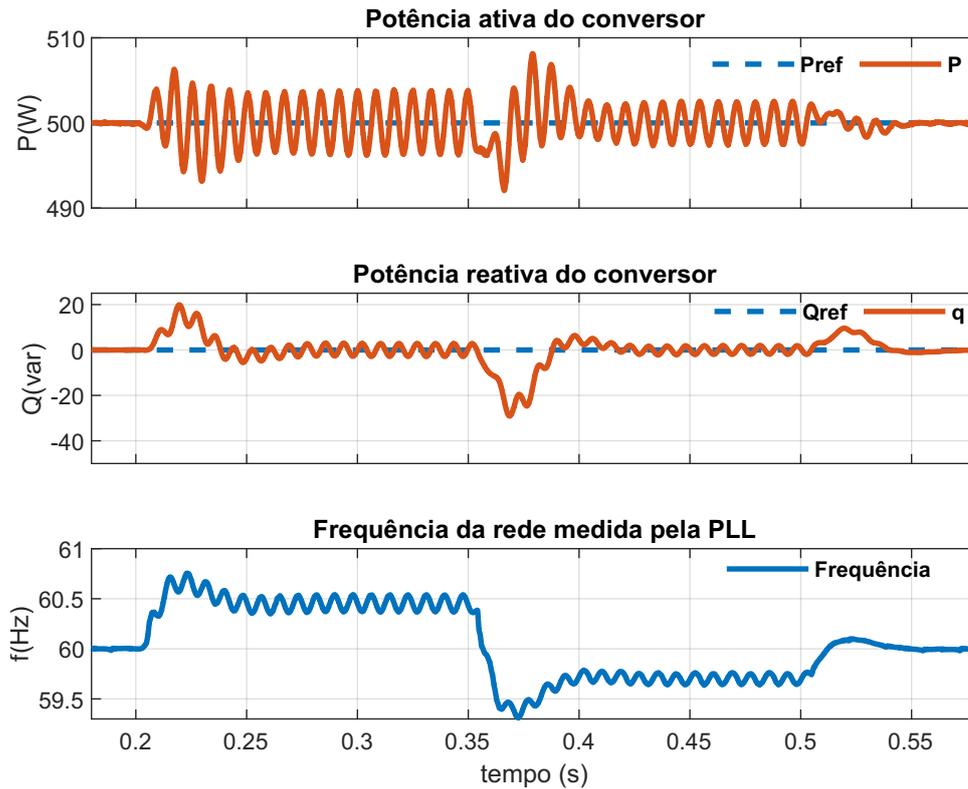


Figura 26 – Potência ativa e reativa durante variação da frequência da tensão rede. (Fonte: Autoria própria.)

Em $t = 0,5$ s a frequência retorna ao valor nominal 60 Hz e a potência é mantida constante e igual à referência.

As oscilações presentes na resposta simulada são resíduos da componente de 120Hz presente no sinal de potência instantânea, não atenuados completamente pelos filtros passa baixas. Os valores de regime permanente obtidos para P e Q através da simulação estão de acordo com os valores previstos nas equações.

Desta forma, é desejável que o filtro passa baixas possua alguma atenuação em torno da frequência fundamental de forma que estas oscilações na frequência e fase sejam evitadas.

Para a frequência de 60,5 Hz a THD da corrente é de 0,94%, enquanto que na frequência de 59,8 Hz a THD é de 0,25%.

A Figura 27 mostra a operação do conversor durante uma queda de tensão na rede de 10% do valor nominal na frequência nominal. No instante $t = 0,2$ s, a tensão da rede cai para 90% e permanece até o instante $t = 0,3$ s. No instante da queda de tensão, há uma oscilação na potência de saída do conversor, atingindo o valor de 462 W, sendo restabelecida em seu valor de referência em aproximadamente 49 ms. Da mesma forma, quando a tensão da rede retorna ao seu valor nominal, a potência de saída atinge 541 W durante o transitório e retorna para seu valor de referência em aproximadamente 49 ms.

No caso da potência reativa, no instante da queda em $t = 0,2$ s, ocorre uma oscilação com duração em torno de 50 ms, com amplitude variando entre -36,12 à 38,54 var. Após o transitório, os valores de potência ativa e reativa seguem a referência de potência imposta ao conversor mesmo com tensão da rede inferior ao seu valor nominal.

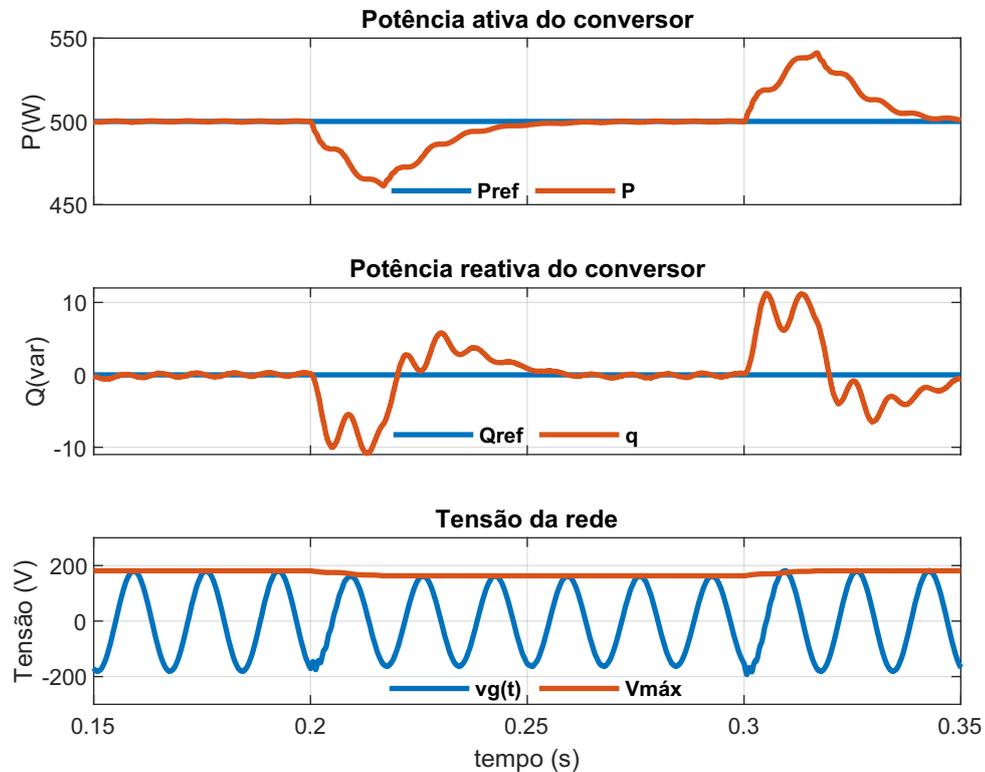


Figura 27 – Potência ativa e reativa de saída do conversor durante a queda de tensão da rede em $t = 0,2$ s a $0,3$ s. (Fonte: Autoria própria.)

Sendo assim, pode-se constatar pelas simulações, que as oscilações de potência resultantes da variação momentânea da tensão em 10%, não resultam em perda de sincronismo e portanto, assegura a operação estável da rede.

3.5.3 Operação da microrrede sem controle do fluxo de potência no PAC

Nesta seção é apresentado os resultados de simulação da microrrede operando com os REDs de conexão fase-neutro, o conversor UI e um conjunto de cargas passivas conforme o diagrama da Figura 28. O objetivo é verificar a capacidade de interação entre a microrrede e a rede principal, onde variações na solicitação de demanda de carga e na capacidade de injeção de potência dos REDs serão realizadas para verificar os fluxos de potência na microrrede. A Tabela 7 apresenta as características elétricas dos elementos participantes da microrrede.

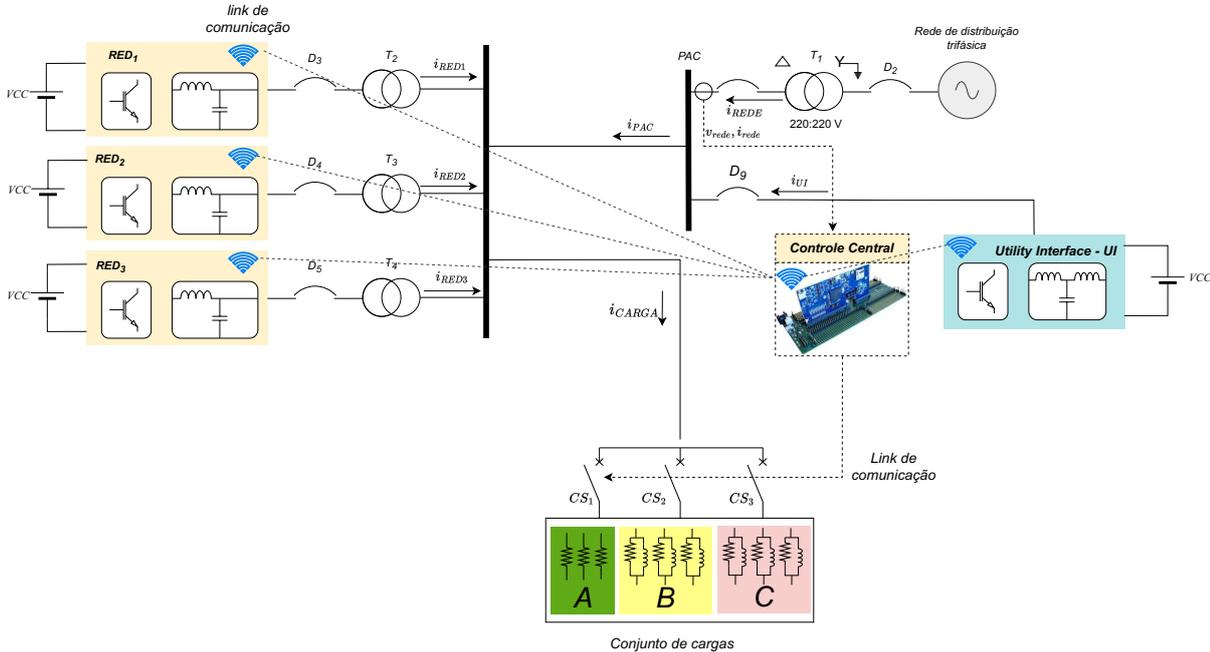


Figura 28 – Estrutura da microrrede utilizada na simulação. (Fonte: Autoria própria.)

Tabela 7 – Dados nominais de operação da microrrede por fase

Parâmetro	Símbolo	Valor
Capacidade máxima da UI	S_{UI}^{max}	1 kVA
Potência ativa total injetada pelos REDs	P_{Gj}^{max}	1 kW
Potência Carga A	$P_{LA} + jQ_{LA}$	500 W
Potência Carga B	$P_{LB} + jQ_{LB}$	762 W + 323 var
Demanda total de potência ativa por fase	P_{Lmt}	1272 W
Demanda total de potência reativa por fase	Q_{Lmt}	323 var

A UI é um conversor eletrônico dotado de armazenador de energia, capaz de realizar a troca de potência com a microrrede durante um intervalo de tempo determinado pela sua autonomia. Caso ocorra insuficiência de geração e a UI já esteja operando em sua capacidade nominal, algumas das cargas ou REDs terão de ser reajustadas para manter o equilíbrio de potência. Para isto, as cargas devem estar bem localizadas e serem seccionáveis (C_{S2} , e C_{S3}) a partir de comandos provenientes da UI, como exemplificado na Figura 28.

Nesta simulação, o conversor da UI é conectado em paralelo com o PAC e alimentado pelo barramento CC comum aos REDs. Sua função é operar como formador de rede e oferecer referência de amplitude e frequência para operação da microrrede em modo ilhado e garantir o complemento necessário para a operação da microrrede. Já no modo conectado, opera como um seguidor de rede no modo de tensão e atua como suporte para rede, aliviando as perturbações no PAC durante as transições de conexão, desconexão. Outras funcionalidades da UI podem ser encontradas em [Oliveira \(2015\)](#).

Os resultados de simulação para a operação da microrrede são exibidos nas Figuras 29 e 30. A Figura 29 mostra os fluxos de potência na microrrede e o estabelecimento do equilíbrio de potência entre geração e consumo, enquanto que na Figura 30, são exibidas formas de onda das correntes envolvidas e a tensão no PAC.

A microrrede encontra-se no modo ilhado e sem a conexão dos REDs, quando em $t = 0,01$ s, a carga A é conectada demandando uma potência igual à 500 W. Neste instante, a UI alimenta a carga até a entrada dos REDs. Logo em seguida, os REDs são acionados em $t = 0,05$ s com uma referência de potência ativa em rampa de 5000 W/s e em $t = 0,15$ s, injetam uma potência igual à 500 W suprindo a demanda total da carga. Em $t = 0,1$ s, a microrrede é conectada na rede elétrica CA e os REDs já estão injetando uma potência igual à 500 W para atender a demanda da carga. Após o transitório inicial a potência ativa na rede, no PAC e na UI, são iguais à, $[P_{REDE} = 16, P_{PAC} = 11, e P_{UI} = -5,7]$ W, respectivamente, e representam as perdas ao longo da microrrede.

Em $t = 0,3$ s, ocorre um ilhamento. Como a potência injetada é igual à demanda solicitada, a UI permanece sem injetar potência, fornecendo apenas referência de amplitude e frequência para a microrrede. No instante $t = 0,5$ s a 0,6 s, a potência ativa injetada pelos REDs aumentam em rampa para de 500 W para 600 W. Durante este intervalo, a disponibilidade dos REDs supera a demanda da microrrede e como consequência, o conversor UI passa absorver o excedente de geração, $[P_{UI} = -84]$ W.

No instante $t = 0,8$ s, a carga B é conectada e a demanda de potência ativa é igual à, $P_{Lmt} = 1268,13$ W. Esta potência ultrapassa a capacidade de injeção pelos REDs, $[PG_j^{max} = 600]$ W. Então a UI complementa a demanda da carga mantendo a operação adequada da microrrede. A potência entregue pela UI é igual à, $P_{UI_m} = 670,52$ W estabelecendo o equilíbrio de potência.

Em $t = 1$ s, a capacidade máxima dos REDs aumenta de 600 W para 800 W, então a UI responde diminuindo sua injeção de potência para 475,18 W. Em $t = 1,4$ s, ocorre a reconexão da rede, conseqüentemente a UI reduz sua injeção de potência à zero e a rede passa a injetar o complemento para atendimento à solicitação de demanda da carga, $[P_{REDE} = 483,22]$ W.

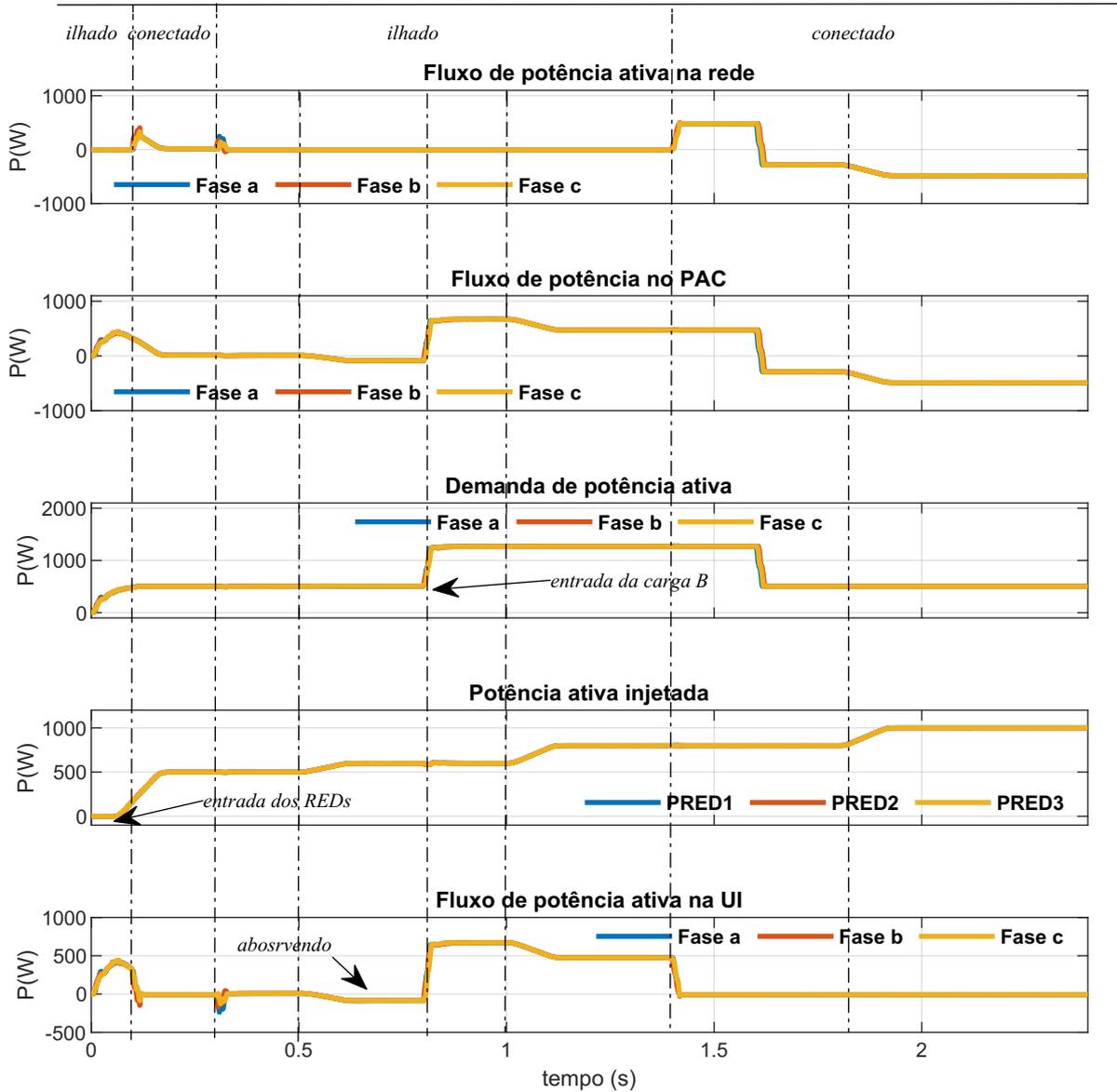


Figura 29 – Resultados do fluxo de potência. De cima para baixo: a) Fluxo de potência ativa na rede; b) Fluxo de potência por fase no PAC; c) Fluxo de potência por fase injetada pelos REDs; d) Demanda de potência ativa total da microrrede; e) Fluxo de potência por fase na UI. (Fonte: Autoria própria.)

No instante $t = 1,6$ s, a carga B é desconectada e a demanda da microrrede passa a ser $[P_{Lmt} = 506]$ W. Durante este intervalo, a microrrede exporta o excedente de forma não despachável para a rede principal, $[P_{REDE} = -282,793]$ W. Quando a injeção de potência pelos REDs atinge seu valor máximo em $t = 1,8$ s, são exportando 482 W para a rede, devido ao excesso de geração.

A Figura 30 mostra o comportamento das correntes na microrrede e na rede principal. As simulações no modo ilhado ocorrem com a chave principal existente no PAC aberta. Neste modo, a UI opera como formador de rede sincronizada com a rede, fornecendo referência de amplitude, frequência e fase para a microrrede.

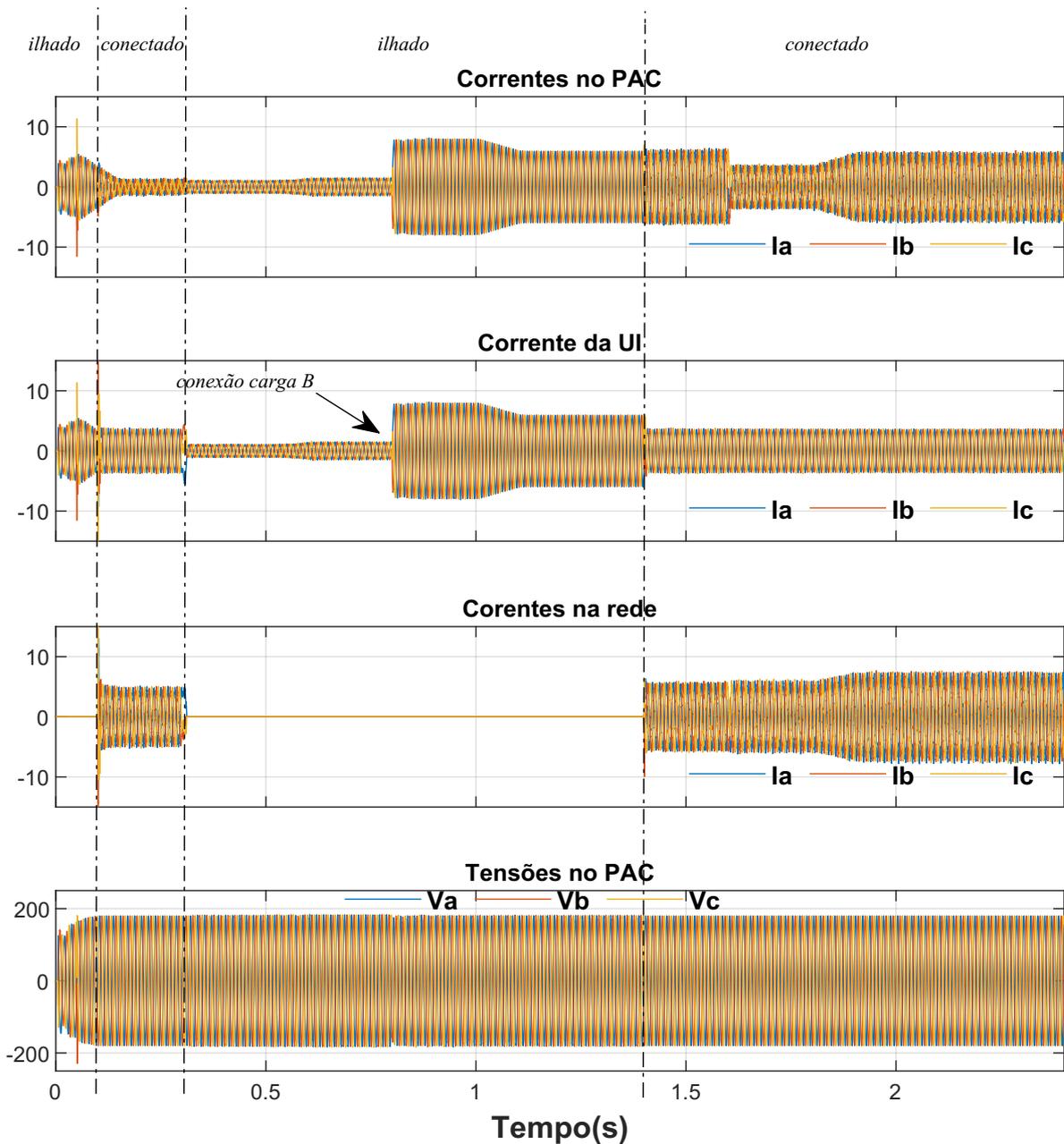


Figura 30 – Resultados de correntes na microrrede. De cima para baixo: a) corrente no PAC; b) corrente na UI; c) corrente na rede e d) tensão no PAC. (Fonte: Autoria própria.)

O fluxo de potência reativa é exibido na Figura 31. Nesta simulação, os conversores não injetam potência reativa na microrrede. Nota-se que no instante $t = 0,1$ s, quando ocorre a conexão com a rede, os conversores trocam potência reativa com a rede, devido à capacitância de saída do filtro LC e LCL. A UI está injetando 315 var na rede enquanto, pelo PAC é entregue à rede 91 var. A potência reativa na rede é igual à 406 var.

Quando ocorre a desconexão em $t = 0,3$ s, a potência reativa é trocada entre os conversores dos REDs e a UI, a potência reativa absorvida pela UI é igual à -90,38 var e o fluxo de potência reativa no PAC é igual à -90,76 var.

Quando a carga B é conectada, no instante $t = 0,8$ s, a solicitação de potência reativa é igual à, $[Q_{Lmt} = 324, 12]$ var e a UI fornece 236,91 var, enquanto potência reativa trocada com a rede é igual à 0 var. Em $t = 1,6$ s, a carga B é desconectada da microrrede.

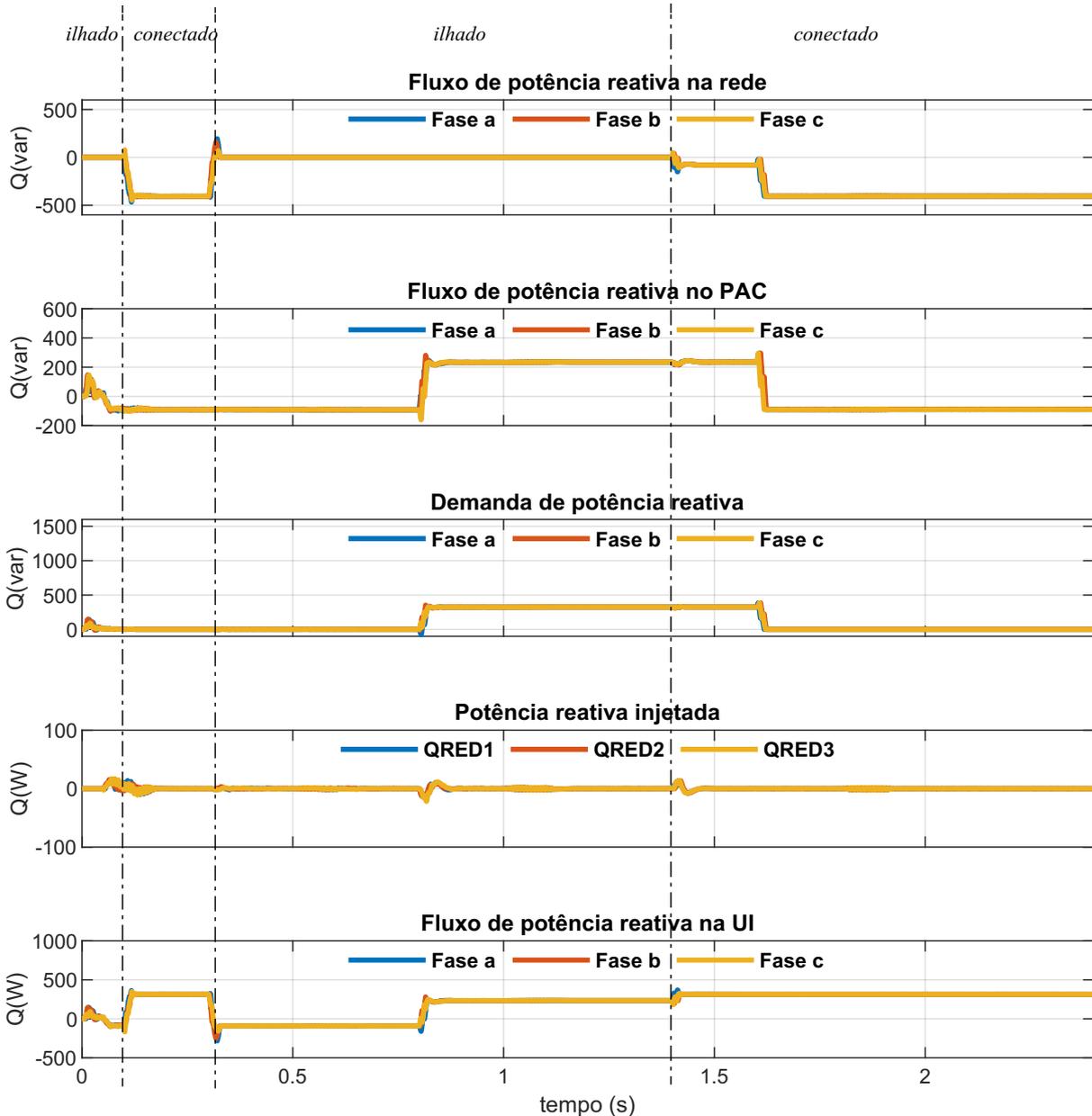


Figura 31 – Resultados do fluxo de potência reativa na microrrede. De cima para baixo: a) Fluxo de potência na rede; b) Fluxo de potência reativa no PAC; c) Potência reativa total demandada pelas cargas da microrrede; d) Potência reativa injetada. e) Fluxo de potência reativa na UI. (Fonte: Autoria própria.)

3.6 Conclusões do Capítulo

Neste capítulo, foi apresentado o projeto e a estratégia de controle dos conversores monofásicos em ponte-H e do conversor UI. Através de simulações, foi verificado que as malhas de controle de potência e corrente rastreiam o sinal de referência na presença de

perturbações na amplitude e na frequência da tensão da rede, desde que esteja dentro dos limites especificados por normas, mantendo seu valor médio de saída igual à referência. Através dos resultados de simulação utilizando o *software* PLECS, observa-se que o controlador de potência rastreia a referência mediante variações em degrau e rampa, tanto injetando quanto absorvendo potência. Verificou-se alterações transitórias nas potências devido ao acoplamento existente entre as potências P e Q. Além disso, o sistema realiza a troca de potência com o PAC com THD inferior ao recomendado pelo padrão [IEEE Std 1547 \(2018\)](#). Foi verificada a capacidade de operação da microrrede nos modos conectado e ilhado, com o conversor UI fornecendo suporte para controle do fluxo de potência no PAC e também com um algoritmo para controle de cargas com objetivo de manter o equilíbrio de potências na microrrede. Com base nos resultados de simulação, é possível concluir que a estratégia de controle apresenta comportamento desejado para operação da microrrede, devido à rápida interação do sistema de controle com a rede. No capítulo seguinte será apresentado os resultados da operação da microrrede com o controle do fluxo de potência e o compartilhamento proporcional de potência entre os REDs.

4 Controle Baseado em Potência

4.1 Introdução

Este capítulo apresenta o algoritmo de controle baseado em potência (PBC) empregado como estratégia para regular fluxo de potência ativa e reativa no PAC. Sua implementação é realizada em um controlador central, no qual as informações de todos os REDs participantes da microrrede são enviadas através de um *link* de comunicação de baixa velocidade e após o processamento dos dados e execução do algoritmo, o controlador central envia à todos os REDs os valores de referência para a suas contribuições individuais conforme as necessidades da microrrede. Resultados de simulação da operação da microrrede em modo conectado e isolado com o controle PBC serão exibidos ao final do capítulo.

4.2 Descrição do Algoritmo PBC

O controle baseado em potência foi inicialmente proposto por [Caldognetto et al. \(2015\)](#). Em sua primeira versão, realiza o compartilhamento proporcional de potência ativa e reativa entre os REDs a partir de dois coeficientes escalares, (α_P e α_Q). Posteriormente, foi estendido para o controle de REDs monofásicos em sistemas trifásicos, proporcionando o compartilhamento proporcional de potência ativa e reativa entre os REDs que estão conectados na mesma fase (m), através de seis coeficientes escalares, (α_{Pm} e α_{Qm}), ([Brandão et al., 2017](#)). E na sua terceira versão, o PBC é aplicado à sistema trifásicos de quatro fios e realiza o compartilhamento proporcional entre os REDs, através de oito coeficientes escalares, (α_{Pm} e α_{Qm}) e ($\alpha_{P3\phi}$ e $\alpha_{Q3\phi}$), com os REDs trifásicos operando de forma equilibrada, ([Brandão et al., 2018a](#)).

A estratégia de controle PBC consiste na coordenação dos REDs realizada por um controlador central, localizado no PAC. Apresenta como principais características a baixa complexidade de implementação pois não exige conhecimento prévio dos parâmetros da rede, trabalha com sistemas de comunicação de baixa velocidade, que permite a integração de soluções de baixo custo e permite a operação *plug-in-play* de novos REDs ([Brandão et al., 2020](#)).

As redes de baixa velocidade são caracterizada por redes que trabalham com velocidades entre 10 Kpbs a 125 Kpsb. Enquanto, redes que trabalham com velocidades entre 125 Kpbs a 1 Mbps são consideradas redes de alta velocidade, ([ISO 11898-1, 2003](#)) e ([ISO 11898-2, 2003](#)).

Ambos os padrões especificam as camadas física e de dados, respectivamente 1 e 2

se considerado o padrão de comunicação OSI de 7 camadas. As demais camadas, da 3 à 7, são especificadas por outros padrões, cada qual relacionado a uma aplicação específica.

Como pode ser visto na Figura 32, o algoritmo pode ser dividido em três etapas distintas, sendo:

- solicitação dos dados;
- processamento de dados (passos 1 a 3);
- cálculo e envio dos coeficientes escalares para os REDs (passo 4).

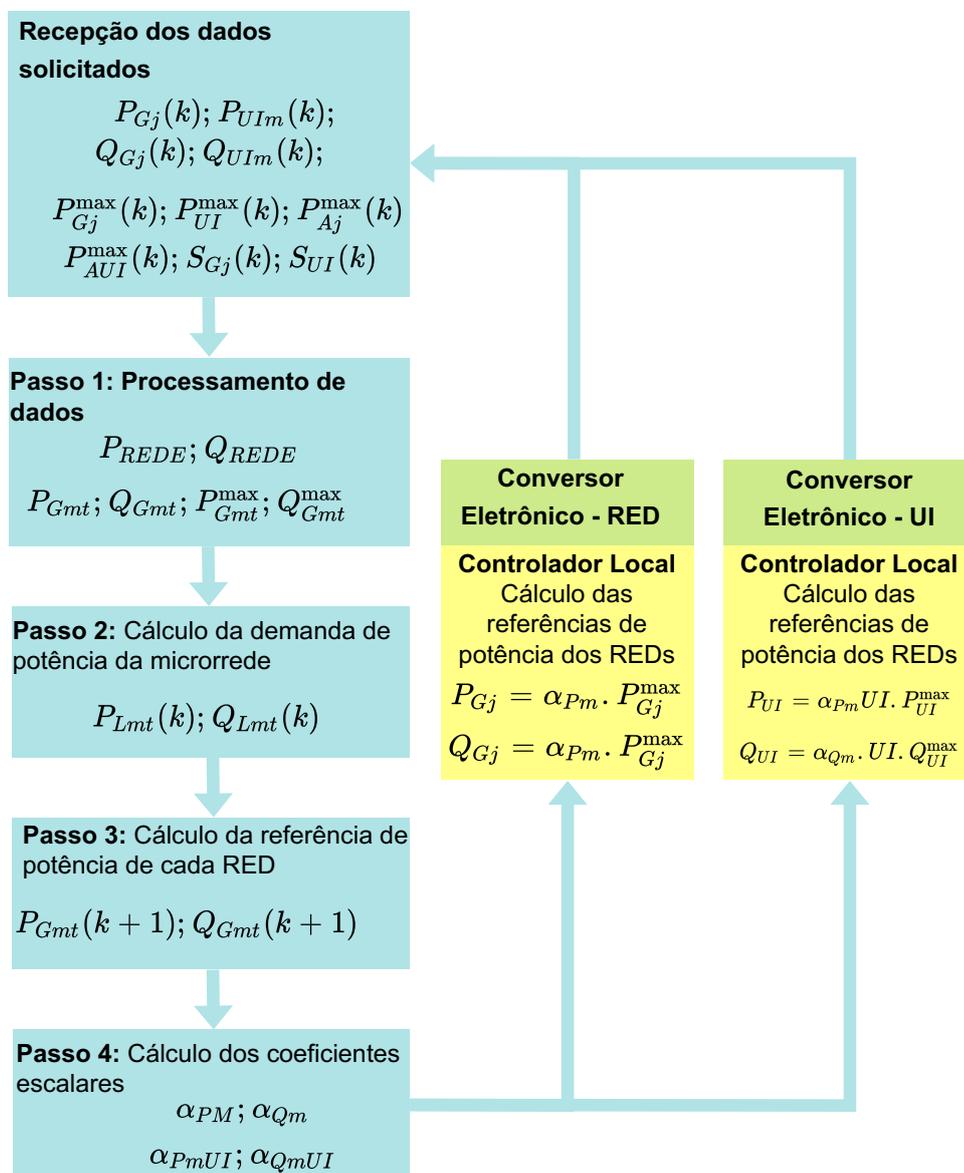


Figura 32 – Algoritmo PBC. (Fonte: Autoria própria.)

4.2.1 Recepção dos dados

No início de cada ciclo de controle k , o controlador central envia uma requisição de dados a todos os REDs presentes na microrrede. Dessa forma, o j -ésimo RED ($j = 1, 2, 3, \dots, J$, onde J representa o número do último RED na microrrede participante do PBC) envia ao controlador central um pacote de dados contendo:

- $P_{Gj}(k)$, – potência ativa do RED j no ciclo de controle atual (k);
- $P_{UI_m}(k)$ - potência ativa da UI na fase m no ciclo de controle atual (k);
- $Q_{Gj}(k)$ - potência reativa do RED j no ciclo de controle atual (k);
- $Q_{UI_m}(k)$ – potência reativa da UI no ciclo de controle atual (k);
- $P_{Gj}^{max}(k)$ - capacidade máxima de injeção de potência ativa do RED j ;
- P_{UI}^{max} - capacidade máxima de injeção de potência ativa da UI;
- $P_{Aj}^{max}(k)$ - capacidade máxima de absorção de potência ativa pelo RED j ;
 P_{AUI}^{max} - capacidade máxima de absorção de potência ativa pela UI;
- $S_{Gj}(k)$ – Potência aparente nominal do RED.
- $S_{UI}(k)$ – Potência aparente nominal da UI.

Para que o PBC execute uma adequada compensação de desbalanço de potência no PAC, é necessário o conhecimento prévio da fase em que cada RED encontra-se conectado. Existem técnicas para reconhecimento da localização dos REDs e sua conexão, como por exemplo, o controlador central pode enviar uma informação extra solicitando os dados de acesso, desta forma, o novo RED fica mapeado em uma lista de registro para então realizar o processo de ingresso ao algoritmo PBC. Neste trabalho, como se trata de um número fixo e reduzido de REDs, a localização e a fase ou fases em que se encontram estão previamente programados no controlador central.

4.2.2 Processamento de dados

Após receber as informações provenientes dos REDs, o controlador central realiza o processamento do algoritmo PBC. As etapas de execução são descritas a seguir.

1. Primeiramente é realizado o processamento dos dados de toda microrrede baseado em quantidades de potência total por fase injetada pelos REDs no ciclo de controle atual k , $[P_{Gmt}(k), Q_{Gmt}(k)]$ conforme as equações 4.1 e 4.2.

$$P_{Gmt}(k) = \sum_{j=1}^J P_{Gj}(k) \quad (4.1)$$

$$Q_{Gmt}(k) = \sum_{j=1}^J Q_{Gj}(k) \quad (4.2)$$

2. Após a potência ativa máxima e mínima total por fase no ciclo de controle atual, k , $[P_{Gmt}^{max}(k), P_{Amt}^{max}(k)]$ é determinada conforme as equações 4.3 e 4.4.

$$P_{Gmt}^{max}(k) = \sum_{j=1}^J P_{Gj}^{max}(k) \quad (4.3)$$

$$P_{Amt}^{min}(k) = \sum_{j=1}^J P_{Aj}^{max}(k) \quad (4.4)$$

3. Do mesmo modo, calcula-se potência reativa máxima total por fase que os REDs podem processar no instante atual de controle k , $Q_{Gmt}^{max}(k)$ conforme a equação 4.5. Para tanto, faz-se necessário calcular a potência reativa máxima disponível de cada j -ésimo RED, $Q_{Gj}^{max}(k)$ através da equação 4.6.

$$Q_{Gmt}^{max}(k) = \sum_{j=1}^J Q_{Gj}^{max}(k) \quad (4.5)$$

$$Q_{Gj}^{max}(k) = \sqrt{S_{Gj}(k)^2 - P_{Gj}(k)^2} \quad (4.6)$$

4. Aplicando a lei de Kirchhoff no circuito da Figura 33, estima-se a demanda de potência ativa e reativa solicitada pelas cargas da microrrede no ciclo atual de controle, k , $P_{Lmt}(k)$ e $Q_{Lmt}(k)$:

$$P_{Lmt}(k) = P_{REDE}(k) + P_{Gmt} + P_{UIm}(k) \quad (4.7)$$

$$Q_{Lmt}(k) = Q_{REDEm}(k) + Q_{Gmt} + Q_{UIm}(k) \quad (4.8)$$

5. Conforme a demanda de potência solicitada pela microrrede $[P_{Lmt}(k)$ e $Q_{Lmt}(k)]$, o controlador central calcula as referências de potência necessárias para que os REDs possam garantir o fluxo de potência desejado na microrrede para o próximo ciclo de controle, $k + 1$, $[P_{Gmt}^*(k + 1)$ e $Q_{Gmt}^*(k + 1)]$, através das equações 4.9 e 4.10.

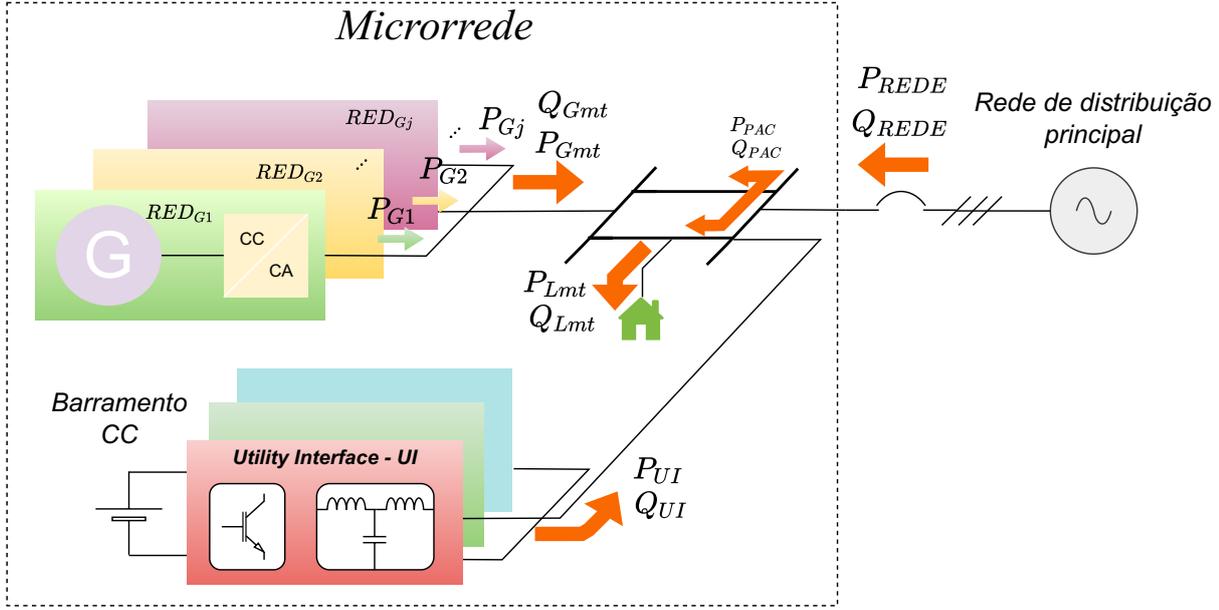


Figura 33 – Sentido do fluxo de potência entre o PAC e a microrrede. (Fonte: Autoria própria.)

$$P_{Gmt}^*(k+1) = P_{Lmt}(k) - P_{UI}^*(k+1) - P_{REDEm}^*(k+1) \quad (4.9)$$

$$Q_{Gmt}^*(k+1) = Q_{Lmt}(k) - Q_{UI}^*(k+1) - Q_{REDEm}^*(k+1) \quad (4.10)$$

P_{REDEm}^* e Q_{REDEm}^* são, respectivamente, as referências de potência ativa e reativa para a m -ésima fase da rede de distribuição principal no próximo ciclo de controle do algoritmo. Controlando estas variáveis, um fluxo de potência regulável na microrrede pode ser obtido, sendo possível controlar a injeção de potência ativa e reativa por parte da rede. São definidas através de estratégias de gestão de energia ou definidos iguais à 0 em modo ilhado.

6. O próximo passo é determinar as referências de potência ativa e reativa para a UI. De acordo com os sentidos dos fluxos de potência da exibidos na Figura 33, as referências de potência ativa $P_{UI}^*(k+1)$ e $Q_{UI}^*(k+1)$ podem ser determinadas através das equações 4.11 e 4.12.

$$P_{UI}^*(k+1) = P_{PAC}^*(k+1) - P_{REDE}^*(k+1) \quad (4.11)$$

$$Q_{UI}^*(k+1) = Q_{PAC}^*(k+1) - Q_{REDE}^*(k+1) \quad (4.12)$$

4.2.3 Cálculo dos coeficientes escalares e envio aos REDs e a UI

A última etapa do processamento do controlador central é determinar os coeficientes escalares α_{P_m} e α_{Q_m} , que serão enviados para as malhas de controle de potência ativa e reativa dos REDs. Os sinais negativo e positivo significam, respectivamente, absorvendo e gerando potência ativa e potência reativa. Para tanto, faz-se necessário observar os limites dos máximos de potência dos REDs. Dessa forma deve-se levar em consideração algumas restrições deste trabalho para o cálculo de α_{P_m} .

- Para os casos onde a referência de potência ativa é inferior à capacidade de absorção de potência ativa pelos REDs, $[P_{Gmt}(k+1)^* < P_{Amt}^{m\acute{a}x}(k+1)]$, determina-se $[P_{Gmt}(k+1)^* = P_{Amt}^{m\acute{a}x}(k+1)]$ e α_{P_m} é igual a -1 .

Isso implica que para manter o fluxo de potência ativa no PAC conforme a solicitação, é necessário uma maior capacidade de absorção de potência ou de uma maior capacidade de armazenamento de energia. Neste trabalho, seria necessário uma maior capacidade de troca de energia com o barramento CC. Não tendo esta disponibilidade, não será possível atender a demanda de fluxo de potência ativa naquele instante. Nesta dissertação, nas simulações o barramento CC é utilizado para realizar a troca de potência com a microrrede e garantir o balanço de potência. Já na realização dos testes experimentais no protótipo físico, experimental, como há limitação do barramento CC e este não conta com armazenadores de energia, faz-se a potência máxima de absorção de potência da rede igual a zero $[P_{Amt}^{max}(k) = 0]$ e α_{P_m} é igual à 0.

- Para os casos em que a referência para o fluxo de potência ativa encontra-se entre zero e a capacidade máxima de injeção dos REDs, α_{P_m} é calculado por:

$$\alpha_{P_m} = \frac{P_{Gmt}^*(k+1)}{P_{Gmt}^{max}(k)} \quad (4.13)$$

- Nas situações em que a referência para o fluxo de potência ativa é maior do que a disponibilidade dos REDs, faz-se $P_{Gmt}^*(k+1) = P_{Gj}^{max}(k)$ e $\alpha_{P_m} = 1$.

Os limites para processamento de potência reativa capacitiva e indutiva necessariamente são iguais durante o cálculo de α_{Q_m} . Assim os intervalos reduzem-se a $[-1, 1]$. Quando a referência para o fluxo de potência reativa encontra-se entre os limites dos REDs $[-Q_{Gmt}^{max}(k) \leq Q_{Gmt}^*(k+1) \leq Q_{Gmt}^{max}(k)]$ α_{Q_m} é determinado pela equação 4.14.

$$\alpha_{Q_m} = \frac{Q_{Gmt}^*(k+1)}{Q_{Gmt}^{max}(k)} \quad (4.14)$$

Quando a referência é superior ou inferior aos valores máximo e mínimo, o coeficiente α_{Q_m} é automaticamente saturado em ± 1 . Note que essa limitação feita no próprio

controlador central evita sobrecarga dos REDs, contudo não elimina a necessidade de saturação dinâmica nas malhas de controle do nível hierárquico primário.

Por fim, os coeficientes escalares são transmitidos por mensagem *broadcast* aos REDs participantes do PBC. Os REDs, ao receberem os coeficientes escalares, calculam as referências para as suas malhas de controle de potência ativa e reativa. Para tanto, as equações 4.15 e 4.16 devem ser embarcadas em seus DSPs.

$$P_{Gj}^* = \alpha_{Pm} \cdot P_{Gj}^{max} \quad (4.15)$$

$$Q_{Gj}^* = \alpha_{Qm} \cdot Q_{Gj}^{max} \quad (4.16)$$

Os limites calculados para α_{Pm} são correspondentes à potência ativa máxima disponível no RED, portanto, deve estar corretamente ajustada para a correta operação do RED. No caso do α_{Qm} , a potência máxima reativa indutiva ou capacitiva, depende da capacidade máxima do RED (S_{Gj}^{max}) e da potência ativa injetada no ciclo de controle atual, k .

A UI contribui para o balanço de potência, além de contribuir para a suavização dos impactos no PAC nas transições entre os modos de operação. Em modo ilhado, oferece referência de amplitude e frequência para a microrrede. Fazendo as referências de potência ativa e reativa na rede iguais a zero, os coeficientes escalares da UI, $\alpha_{Pm}UI$ e $\alpha_{Qm}UI$ podem ser determinados através das equações 4.17 e 4.18.

$$\alpha_{Pm}UI = \frac{P_{Lmt} - P_{Gmt}}{P_{UIm}^{max}} \quad (4.17)$$

$$\alpha_{Qm}UI = \frac{Q_{Lmt} - Q_{Gmt}}{Q_{UIm}^{max}} \quad (4.18)$$

Na próxima seção, será apresentado a operação da microrrede com controle do fluxo de potência no PAC e compartilhamento proporcional de potência entre os REDs.

4.3 Resultados de simulação

Este tópico apresenta os resultados de simulações da aplicação do algoritmo PBC em geradores distribuídos na arquitetura de microrrede proposta neste trabalho, utilizando o software PLECS versão 4.1.2. As simulações são realizadas com o modelo reduzido conforme a Figura 34. A Tabela 8 apresenta as características nominais dos cargas.

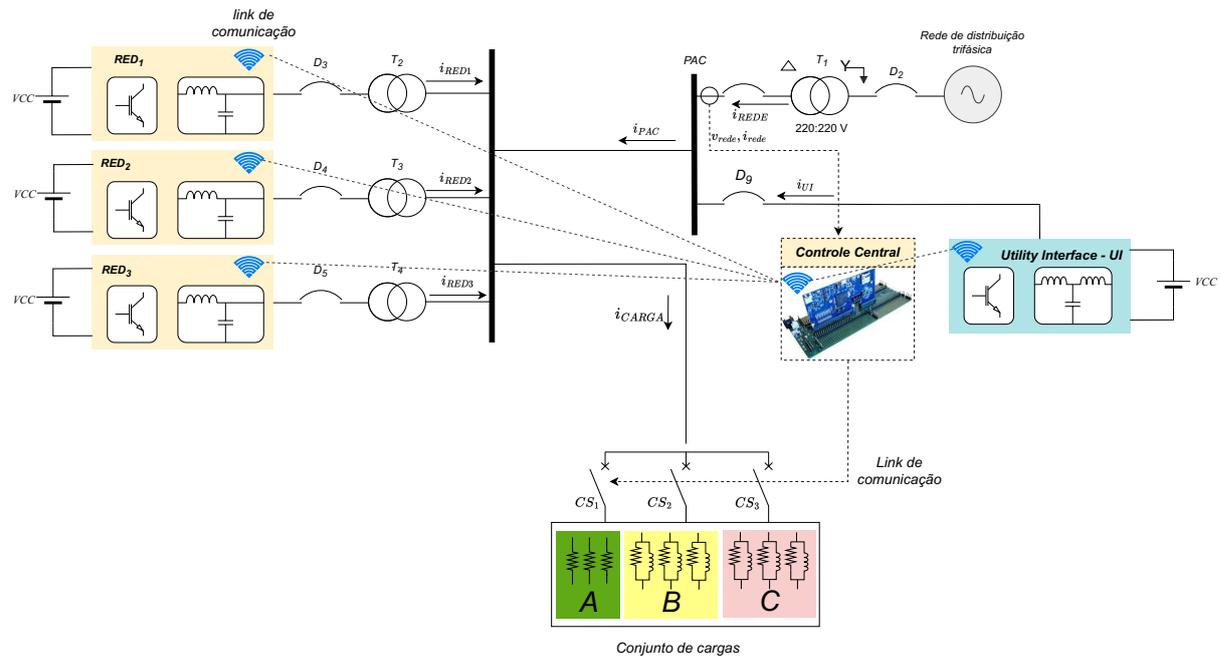


Figura 34 – Estrutura da microrrede utilizada na simulação do algoritmo PBC. (Fonte: Autoria própria.)

Tabela 8 – Dados nominais de operação da microrrede

Parâmetro	Símbolo	Valor
Capacidade máxima da UI	S_{UI}^{max}	3 kVA
Potência ativa total injetada pelos REDs	P_{Gt}^{max}	3 kW
Potência Ativa Carga A	P_{LAabc}	500, 500, 500 W
Potência Ativa Carga B	P_{LBabc}	700, 700, 700 W
Potência Ativa Carga C	P_{LCabc}	500, 500, 500 W
Potência Reativa Carga A	Q_{LAabc}	0, 0, 0 var
Potência Reativa Carga B	Q_{LBabc}	300, 300, 300 var
Potência Reativa Carga C	Q_{LCabc}	200, 200, 200 var
Demanda total de potência ativa	P_{Labct}	1700 W
Demanda total de potência reativa	Q_{Labct}	500 var

4.3.1 Controle do fluxo de potência

Nesta seção será verificada a capacidade da regulação do fluxo de potência ativa e reativa no PAC, conforme a estratégia de regulação empregada. Serão analisadas estratégias onde é possível verificar a versatilidade do controle da operação da microrrede frente à cenários mais vantajosos de acordo com a oferta e a demanda de energia. A Figura 35 exhibe os resultados obtidos para o fluxo de potência ativa na microrrede.

No instante de tempo $t = 0$ s à $t = 0,8$ s, o objetivo do controle é extrair até o limite máximo a potência da geração renovável fazendo [$P_{REDE}^* = 0$ W e $Q_{REDE}^* = 0$ var]. Ou seja, o complemento para o atendimento às cargas nos casos de geração inferior à demanda é realizado pela UI. Isto representa casos onde a o custo de produção é inferior aos custo da energia proveniente da rede elétrica. Nos casos de produção acima da demanda,

o excedente pode ser utilizado para recarregar os armazenadores de energia da UI, até a sua capacidade nominal. Quando a UI já está em sua capacidade nominal, através de contratos estabelecidos com a concessionária, este excedente pode ser despachado de forma controlada. Caso o consumo o consumo seja favorável, muda-se a estratégia de eficientização, de modo que em momentos de baixa produção, a rede elétrica fará o complemento para o cumprimento para o balanço de potência.

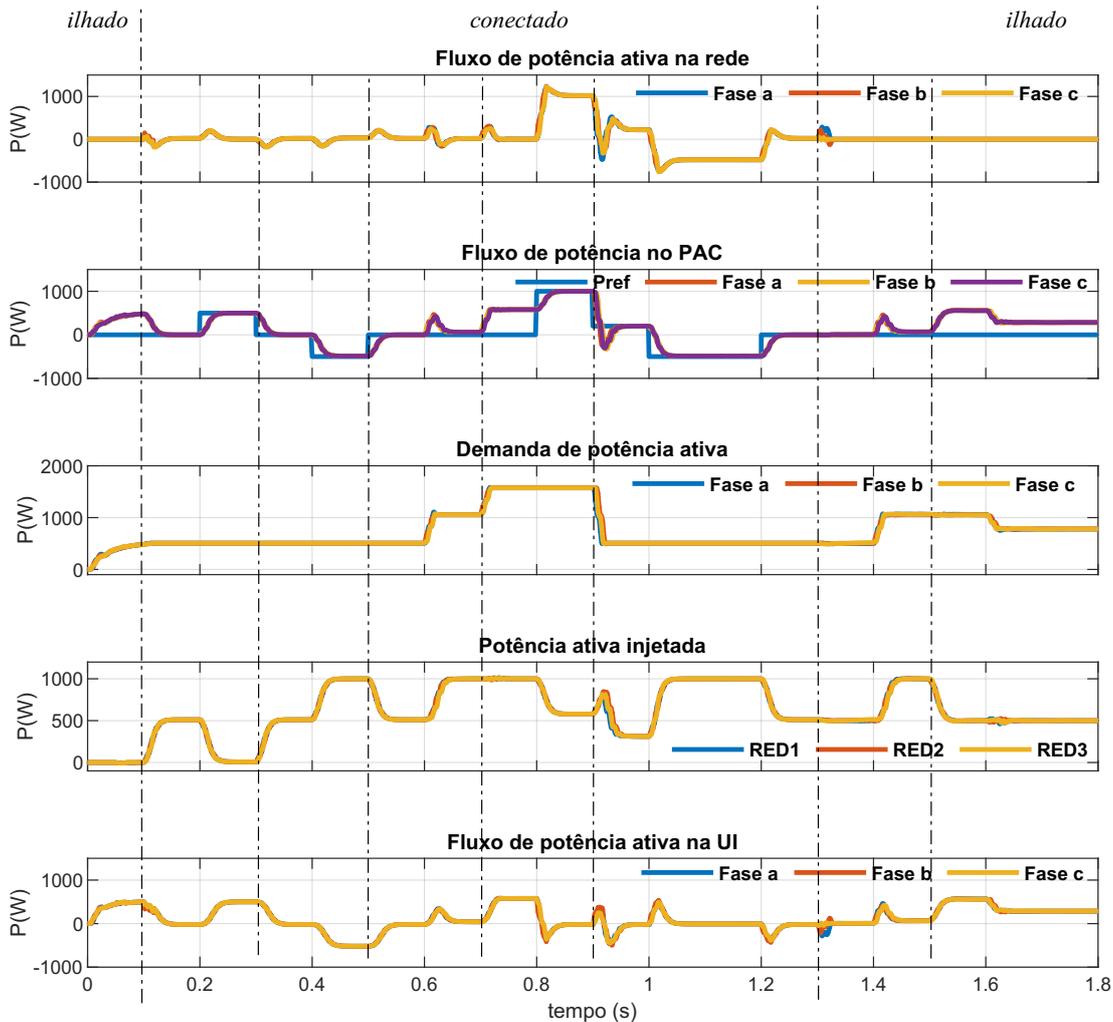
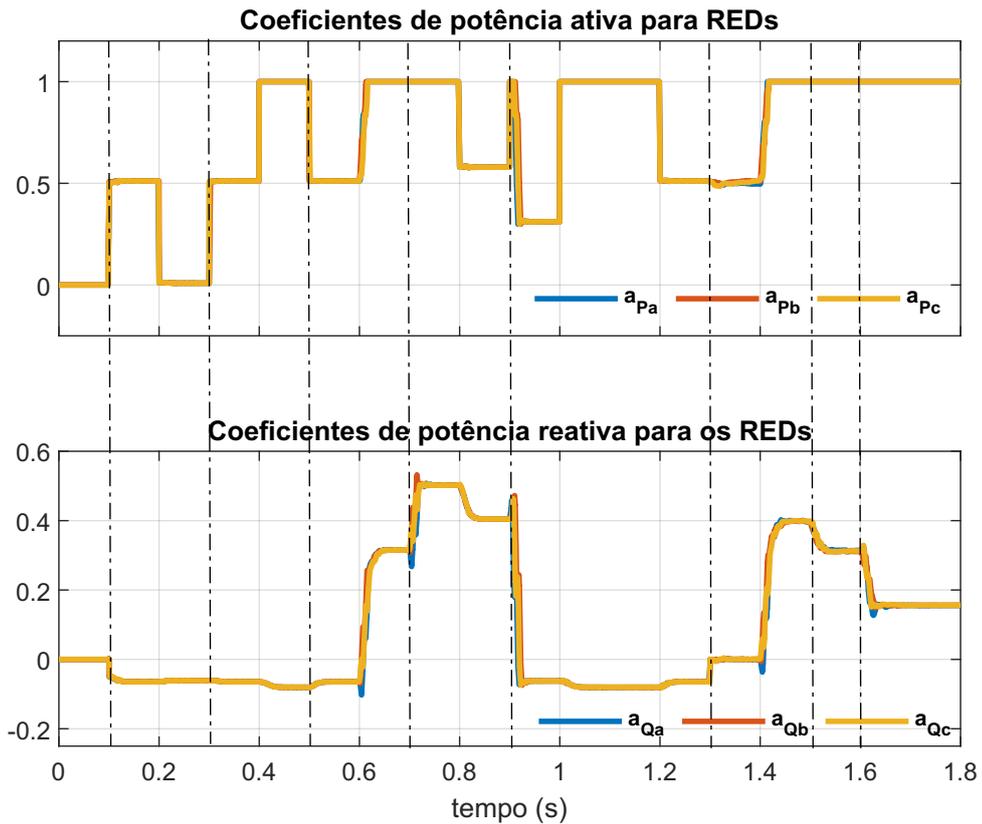
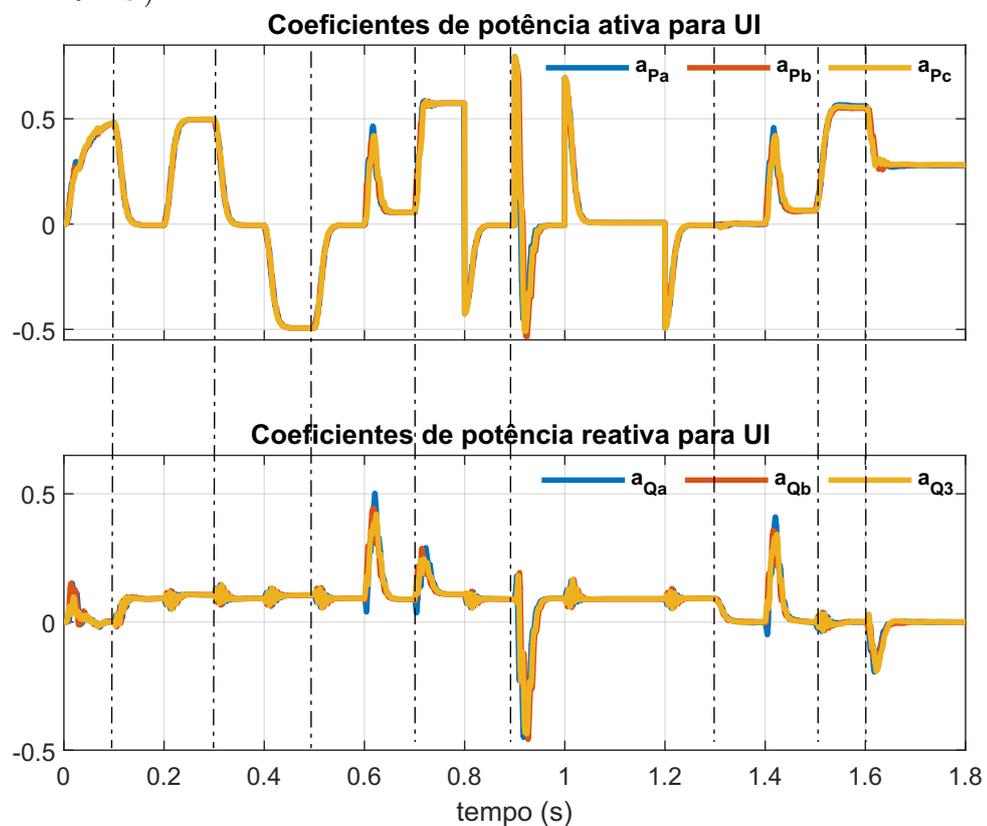


Figura 35 – Resultados do fluxo de potência ativa por fase com carga equilibrada. De cima para baixo: a) Fluxo de potência ativa na rede; b) Fluxo de potência no PAC; c) Fluxo de potência injetada pelos REDs; d) Demanda de potência ativa total da microrrede; e) Fluxo de potência ativa na UI. (Fonte: Autoria própria.)

No instante inicial, a microrrede está ilhada e os REDs estão desconectados. Em $t = 0,02$ s, a carga A é conectada e a UI fornece a demanda de potência da carga, $[P_{Labct} = 503,61]$ W. Em seguida, em $t = 0,05$ s, os REDs são conectados com referência de potência ativa e reativa iguais a zero. A Figura 36a exibe os coeficientes escalares de potência ativa e reativa para os REDs, enquanto a Figura 36b, mostra os coeficientes escalares de referência para a UI.



(a) Coeficientes escalares de referência de potência ativa e reativa para os REDs.)



(b) Coeficientes escalares de referência de potência ativa e reativa para a UI com carga equilibrada. (Fonte: Autoria própria.)

Figura 36 – Coeficientes de referência de potência ativa e reativa com carga equilibrada: a) para os REDs; b) para a UI. (Fonte: Autoria própria.)

A conexão com a rede acontece no instante $t = 0,1$ s e inicia o algoritmo PBC com referência de potência ativa no PAC igual a 0 W. Após o início do controle PBC, os REDs começam a injetar potência na microrrede. No instante $t = 0,1$ s a 0,2 s, os coeficientes escalares dos REDs são iguais à $[\alpha_{P_{abc}} = 0, 51]$ e a potência injetada igual à $[P_{G_{123}} = 514, 87]$ W.

Como os REDs possuem a mesma capacidade nominal e a carga é equilibrada, a demanda de potência ativa é distribuída igualmente entre eles e injetam a potência proporcional às suas capacidade máximas, realizando o compartilhamento proporcional de potência. Neste intervalo, a demanda solicitada pela carga é inferior à capacidade máxima de geração, e as referências de potência ativa para UI são iguais à $[\alpha_{P_{abc}UI} = 0]$, como pode ser visto na Figura 36b, fazendo a potência ativa de saída da UI igual à zero.

No instante $t = 0,2$ s a 0,3 s, a referência de potência no PAC recebe um comando em degrau de 0 W para 500 W, ou seja, solicita 500 W do PAC, que pode ser provido pela UI ou pela rede. Neste momento, objetivo do controle é a maximização da capacidade máxima da microrrede, solicitando da rede somente nos casos de insuficiência da microrrede. Então, os coeficientes escalares da UI são elevados para $[\alpha_{P_{abc}UI} = 0, 49]$, e a UI passa a injetar $[P_{UI_{abc}} = 497, 67]$ W. Neste instante, os REDs reduzem sua injeção de potência à $[P_{G_{1,2,3}} = 12, 56]$ W com seus coeficientes sendo iguais à $[\alpha_{P_{abc}} = 0, 0122]$, estabelecendo o equilíbrio de potência. A referência de potência ativa no PAC retorna para 0 W em $t = 0,3$ s e a demanda da carga passa a ser suprida pelos REDs novamente.

A demanda solicitada pela carga é inferior à capacidade máxima de injeção pelos REDs, desta forma, há potência disponível para ser injetada no PAC. Esta potência pode por exemplo ser utilizada para carregar os sistemas de armazenamento de energia existentes na UI, ou despachada para a rede elétrica. Em $t = 0,4$ s, a referência de potência no PAC recebe um comando em degrau de 0 W para -500 W, ou seja, deseja injetar os 500 W no PAC. Como pode ser visto na Figura 36a, os coeficientes escalares dos REDs são iguais a $[\alpha_{P_{abc}} = 1]$, ou seja, estão saturados no valor máximo positivo e injetam suas capacidades máximas para suprirem a carga e a solicitação de potência no PAC.

Na Figura 35, vê-se que os REDs passam a injetar $[P_{G_{1,2,3}} = 999, 94]$ W. Como a referência de potência injetada na rede é igual à zero $[P_{REDE}^* = 0]$ W, a UI absorve a potência ativa no PAC e são iguais à $[P_{UI_{abc}} = -512, 37]$ W, com seus respectivos coeficientes escalares iguais a $[\alpha_{P_{abc}UI} = -0, 49]$. No instante $t = 0,5$ s a 0,6 s a referência de potência ativa no PAC retorna para zero.

A carga B é conectada no instante $t = 0,6$ s, aumentando a demanda de potência para $[P_{L_{mt}} = 1054, 07]$ W. Os REDs reagem e elevam sua injeção de potência para suas capacidades máximas, $[P_{G_{123}} = 999, 10]$ W. Observa-se pela Figura 36b, que os coeficientes escalares dos REDs novamente são saturados. A UI supre com $[P_{UI_{abc}} = 43, 18]$ W e seus coeficientes escalares iguais à $[\alpha_{P_{abc}UI} = 0, 04]$, a rede está injetando neste momento 17,29

W.

A conexão da carga C ocorre em $t = 0,7$ s, e aumenta a demanda da microrrede para $[P_{Labct} = 1574, 08]$ W, que superior à capacidade de injeção total pelos REDs. A UI reage aumentando sua injeção de potência no PAC, $[P_{UIabc} = 577, 70]$ W, complementando a potência solicitada pela carga. Os coeficientes escalares da UI neste intervalo são iguais à $[\alpha_{PabcUI} = 0, 574]$. O fluxo de potência no PAC então passa a ser $[P_{PACabc} = 579, 42, 18]$.

Em $t = 0,8$ s, uma mudança no objetivo de controle, e determina uma maior participação da rede, de forma a contribuir com a microrrede para o atendimento à demanda. E nos casos em que há excesso de potência, essa potência poderá, mediante contratos estabelecidos com a concessionária, ser entregue para a rede. Desta forma, em $t = 0,8$ s, é solicitada uma potência no PAC igual à 1000 W, e então a rede injeta 1020,57 W, que corresponde à diferença entre a potência ativa demandada total pela fase m , $[P_{Lmt}]$ e a potência ativa total injetada pelo RED na fase m . Neste caso, a geração distribuída está operando fora do seu ponto de máxima potência, $[P_{G123} = 579, 48]$ W.

As cargas B e C são desconectadas no instante $t = 0,9$ s e a demanda da microrrede passa a ser $[P_{La,bt} = 506, 27]$ W. A referência de potência ativa no PAC é igual à 200 W, portanto, a potência ativa injetada pelos REDs, passa a ser 314,43 W.

O instante $t = 1$ s à 1,2 s, há uma solicitação para exportar 500 W para a rede. Então os REDs passam a injetar toda capacidade máxima, atendendo a demanda da carga de 506 W e exportando de forma controlada 488 W.

Em $t = 1,3$ s, ocorre um ilhamento. A injeção de potência pelos REDs é igual à demanda solicitada, 499 W. Em $t = 1,4$ s a demanda solicitada é de 1061,33 W, os REDs aumentam a injeção de potência para 1000 W e a UI age complementado 66,07 W de potência para atender a carga.

Em $t = 1,5$ s, os REDs tem sua capacidade de geração máxima reduzida para 500 W, então UI complementa com 557,84 W para o atendimento da carga. Em $t = 1,6$ s, a demanda da carga reduz à 781,67 W e UI reduz sua injeção de potência para 290,09 W.

A Tabela 9 apresenta os valores de potência ativa entregue pelos REDs e pela UI e seus respectivos coeficientes escalares para o intervalo de $t = 0$ s a 1,8 s. De acordo com o descrito anteriormente e dados contidos na Tabela 9, conclui-se que as potência ativas injetadas pelos REDs e pela UI são equivalentes aos coeficientes escalares determinados pelo controle central.

Tabela 9 – Potência ativa nos REDs e na UI

$\Delta t(s)$	P_{Lmt}	$P_{G1,2,3} (W)$	$\alpha_{Pa,b,c} (W)$	$P_{UIa,b,c}$	$\alpha_{Pa,b,c}UI$
0 - 0,1	495,05	0	0	495,05	0
0,1 - 0,2	506,27	514,87	0,51	0	0
0,2 - 0,3	506,27	12,56	0,012	497,675	0,49
0,3 - 0,4	506,27	514,87	0,51	0	0
0,4 - 0,5	506,27	999,94	1	-512,37	-0,49
0,5 - 0,6	506,27	514,87	0,51	0	0
0,6 - 0,7	1054,07	999,1	1	43,18	0,04
0,7 - 0,8	1574,08	999,68	1	587	0,57
0,8 - 0,9	1574,08	590,43	0,59	-19,5	0
0,9 - 1,0	506,27	318,27	0,31	-24,38	0
1,0 - 1,2	506,27	999,95	1	-2,92	0
1,2 - 1,4	506,27	516,51	0,51	-19,7	0
1,4 - 1,5	1061,33	1000	1	66,03	0,06
1,5 - 1,6	1061,33	499,99	1	557,84	0,55
1,6 - 1,8	781,67	499,99	1	286,55	0,28

A referência de potência reativa no PAC é mantida igual a zero durante todo intervalo de tempo no modo conectado, $t = 0$ s à 1,8 s. A Figura 37 exibe o fluxo de potência reativa na microrrede. A demanda de potência reativa é igual à zero no intervalo $t = 0,1$ s à 0,6, mas devido à presença dos capacitores de saída, os REDs absorvem esta parcela reativa capacitiva, $P_{G123} = -90,14$ var, de modo a manter o fluxo de potência reativa no PAC igual à zero e seu coeficiente escalar, $\alpha_{Qm} = -0,064$.

A potência reativa máxima disponível nos REDs, depende da potência aparente nominal e da injeção de potência ativa conforme discutido na seção 4.2.3. Desta forma, variando-se a potência ativa injetada, a potência reativa máxima se altera e assim, o coeficiente α_{Qm} também irá variar.

No instante $t = 0,6$ s, quando a carga B é conectada, a demanda de potência reativa é de $[Q_{Labct} = 441,6]$ var e os REDs injetam $[Q_{G1} = 352,71]$ var, enquanto a UI troca com a rede sua potência reativa capacitiva devido ao filtro de saída, $[Q_{UIa} = 314,86]$ var.

Em $t = 0,7$ s, a entrada da carga C, aumenta a demanda de potência reativa para 649,49 var. Os REDs elevam a injeção de potência reativa para 560,85 var e os coeficientes escalares são iguais à 0,50. O fluxo de potência reativa no PAC é mantido igual à zero, com a potência capacitiva da UI praticamente constante e sendo trocada com a rede. Esta potência, não altera o níveis de tensão na rede, portanto, são insignificantes em relação à capacidade da rede.

Em $t = 0,9$ s, as cargas B e C são desconectadas e a demanda de potência reativa é igual à zero.

Quando ocorre o ilhamento em $t = 1,3$ s, a potência reativa capacitiva de 90,14 var

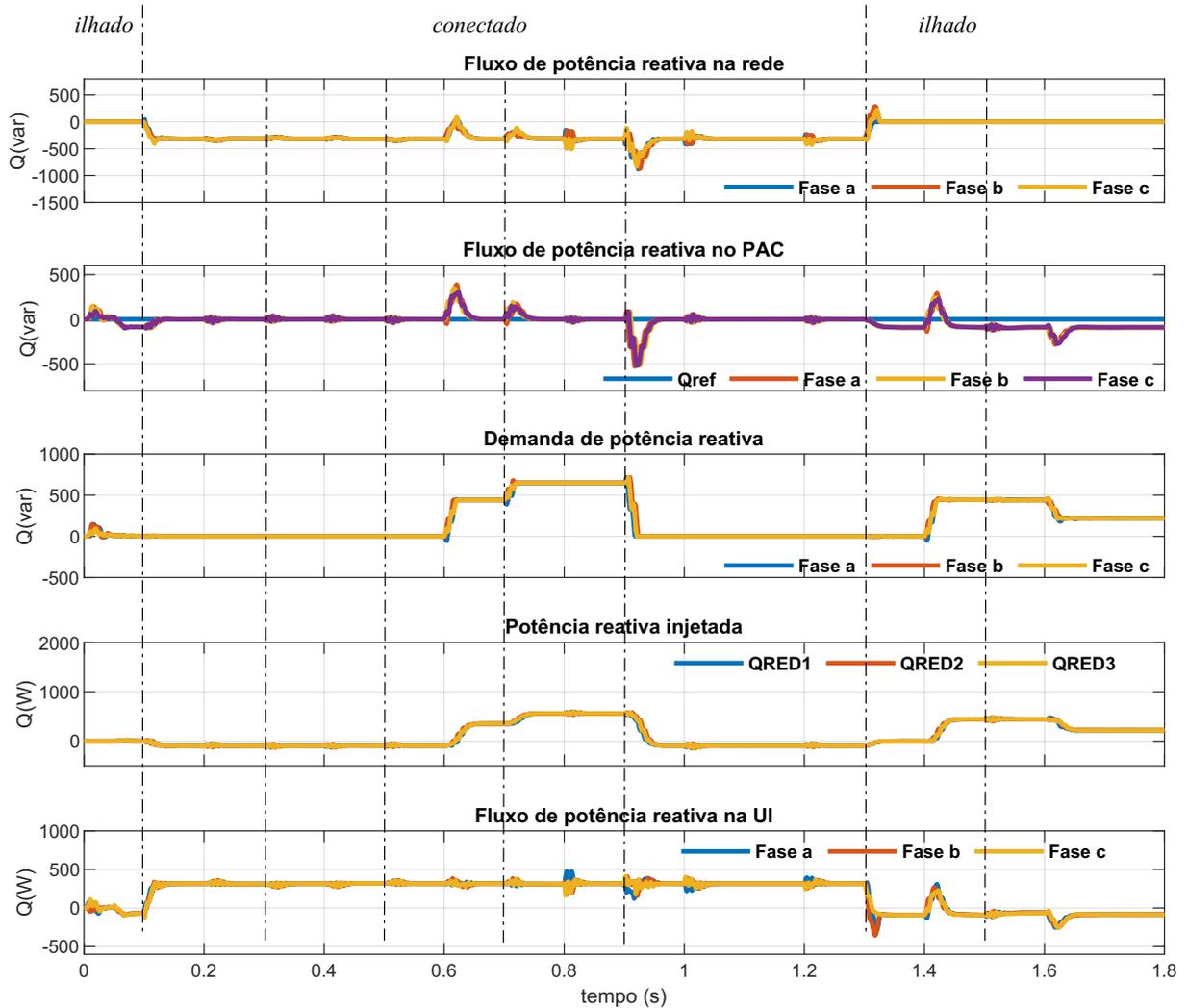


Figura 37 – Resultados do fluxo de potência reativa por fase com carga equilibrada. De cima para baixo: a) Fluxo de potência reativa na rede; b) Fluxo de potência reativa no PAC; c) Fluxo de potência reativa injetada pelos REDs; d) Demanda de potência reativa total da microrrede; e) Fluxo de potência reativa na UI. (Fonte: Autoria própria.)

é absorvida pela UI. Em $t = 1,4$ s, a conexão da carga B, eleva a demanda de potência reativa para 445,03 var e os REDs passam a injetar a demanda da carga, $Q_{G123} = 445,38$ var.

Em $t = 1,6$ s, a demanda reativa reduz à 220,47 var e os REDs passam a injetar 220,77 var.

A Tabela 10 apresenta os valores de potência reativa dos REDs e da UI com seus respectivos coeficientes escalares α_{Qm} . Observa-se que a potência reativa injetada pelos REDs são proporcionais às suas capacidades máximas, ou seja, algoritmo PBC realiza o compartilhamento proporcional de potência reativa entre os REDs regulando o fluxo de potência reativa no PAC.

Tabela 10 – Potência reativa nos REDs e na UI

$\Delta t(s)$	$Q_{Lmt}(var)$	$Q_{Gmt}^{max}(var)$	$Q_{G123}(var)$	α_{Qabc}	$Q_{UIabc}(var)$	α_{QabcUI}
0 - 0,1	2,88	1500	0	0	11,91	0
0,1 - 0,2	0	1408,86	-89,36	-0,064	314,8	0,089
0,2 - 0,3	0	1499,99	-92,84	-0,061	312,1	0,1
0,3 - 0,4	0	1408,86	-90,43	-0,064	314,95	0,09
0,4 - 0,5	0	1118,08	-89,69	-0,08	319,13	0,104
0,5 - 0,6	0	1408,86	-91,47	-0,064	314,50	0,09
0,6 - 0,7	441,66	1118,83	352,71	0,315	315,71	0,089
0,7 - 0,8	649,49	1118,32	561,04	0,501	310,99	0,108
0,8 - 0,9	649,49	1378,90	559,86	0,40	314,57	0,089
0,9 - 1,0	0	-91,46	1465,84	-0,062	314,9	0,09
1,0 - 1,2	0	1118,07	-89,81	-0,08	314,86	0,089
1,2 - 1,3	0	1408,26	-91,41	-0,064	315,15	0
1,3 - 1,4	0	1408,26	1,68	0	-91,93	0
1,4 - 1,5	443,04	1118,03	443,56	0,397	-88,98	0
1,5 - 1,6	439,85	1414,21	438,76	0,31	-63,85	0
1,6 - 1,8	219,94	1414,21	220,35	0,156	-83,07	0

A Figura 38 mostra as correntes envolvidas na operação da microrrede mediante as variações ocorridas no instante $t = 0$ s à 1,8 s.

No momento da conexão dos REDs, observa-se uma pequena oscilação na corrente com um pico de 11,31 A que decai rapidamente para o valor nominal de pico, 5,67 A em 0,5 ms. No instante da conexão com a rede, a corrente na rede atinge um pico de 13,65 A, que atinge seu valor nominal de 5,77 A em aproximadamente 10 ms. A conexão dos REDs, entrada e saída das cargas, não afetam a microrrede, como pode ser visto na Figura 38.

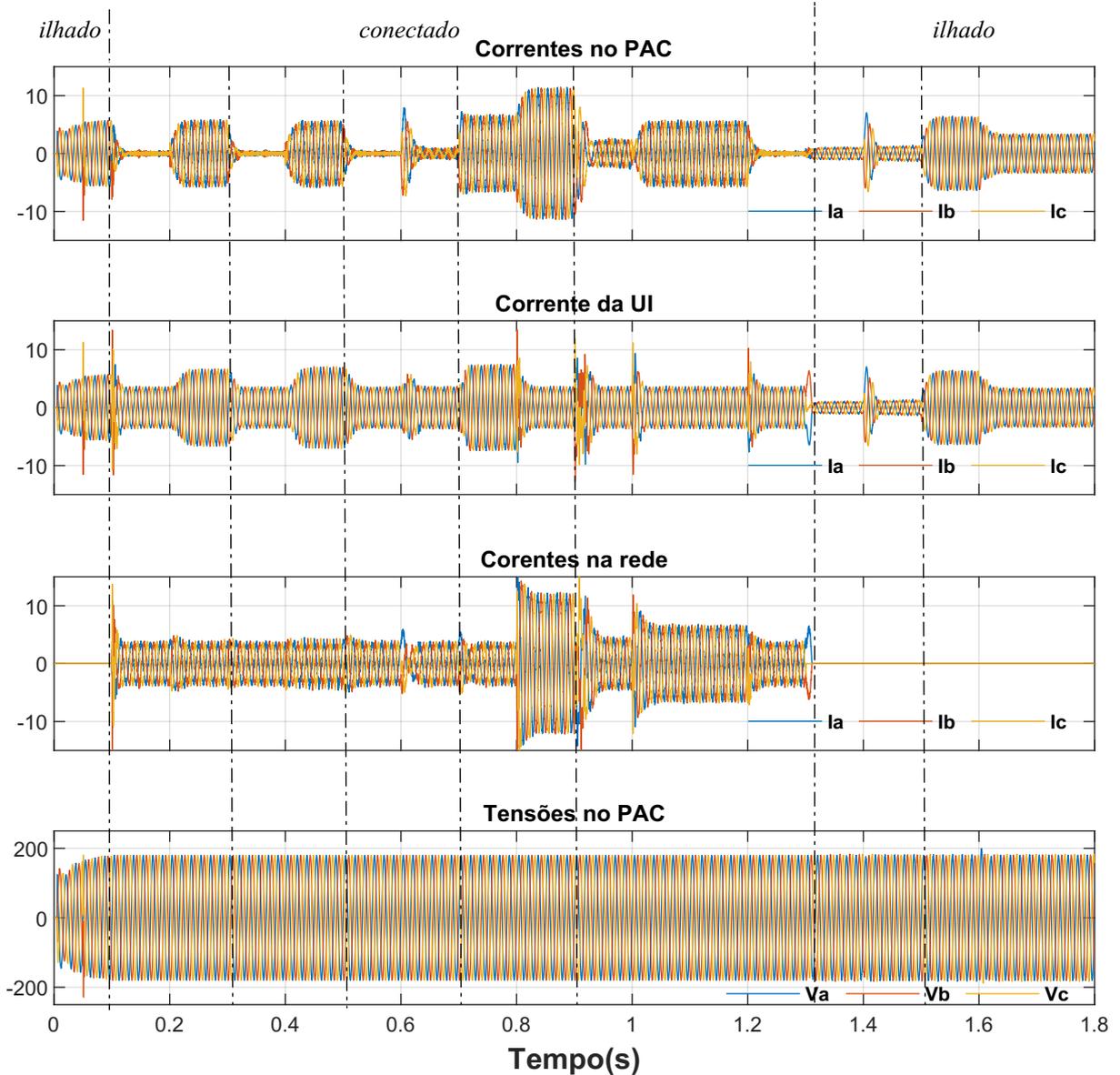
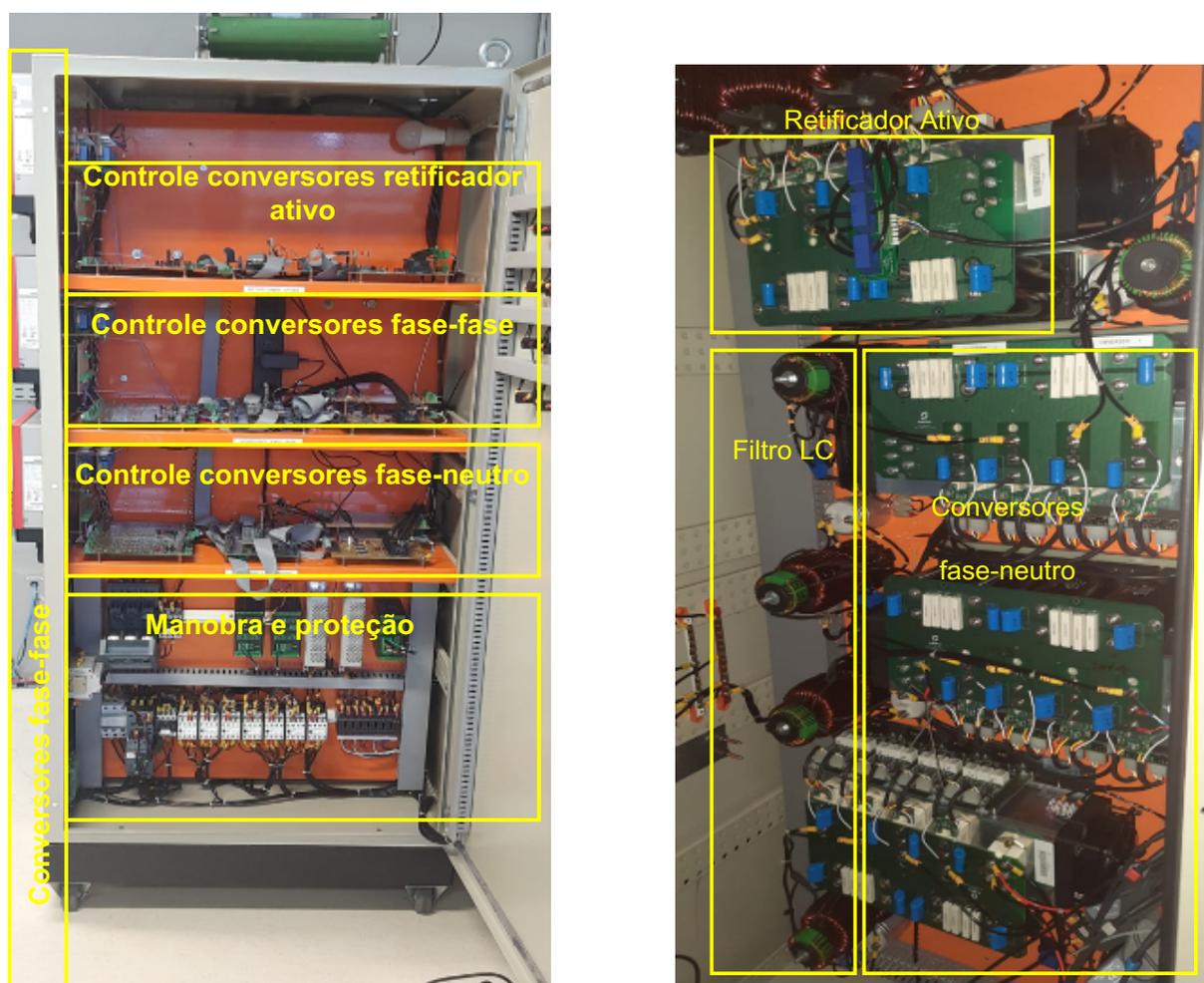


Figura 38 – Correntes envolvidas na operação da microrrede e tensão no PAC com carga equilibrada. De cima para baixo: a) Correntes no PAC; b) Correntes na UI; c) Correntes na rede; d) Tensões no PAC. (Fonte: Autoria própria.)

4.4 Conclusões do capítulo

Esse capítulo apresentou o algoritmo PBC utilizado em segundo nível de controle hierárquico empregado neste trabalho. Através de simulações, foi verificada a capacidade de coordenação dos REDs distribuindo a demanda da microrrede conforme suas capacidades máximas disponíveis. O algoritmo de controle permitiu o compartilhamento proporcional de potência entre os REDs no modo conectado e no modo ilhado e ainda estabeleceu os coeficientes de referência para a UI quando necessário, modo a garantir a distribuição da carga e atendimento da demanda proporcionando um controle sobre o fluxo de potência no PAC. No próximo capítulo será apresentado os resultados experimentais obtidos com o protótipo da microrrede.

A Figura 40 apresenta a vista interior do painel sendo que Figura 40a mostra a parte frontal do painel, onde está instalada toda a parte de manobra, proteção, condicionamento e controle dos conversores, enquanto na Figura 40b mostra a parte posterior do painel onde está instalado o estágio de potência.



(a) Estrutura de controle.

(b) Estágio de potência.

Figura 40 – Detalhes da parte interna do painel. (Fonte: autoria própria.)

5.1.1 Módulo de controle dos conversores

Até a data de defesa desta dissertação, o retificador ativo não foi integrado ao protótipo, desta forma, foi conectada uma fonte CC ajustável no barramento CC.

O módulo de controle dos conversores é apresentado na Figura 41.

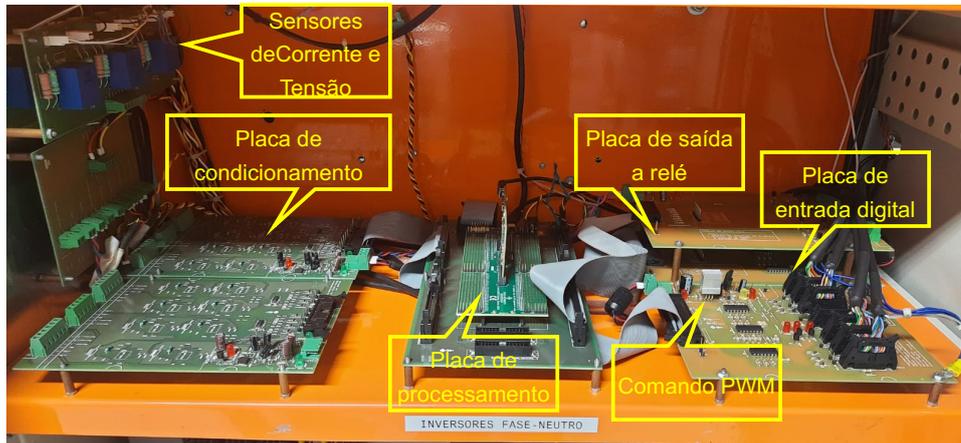


Figura 41 – Módulo de controle dos conversores. (Fonte: Autoria própria.)

O módulo de controle é composto pelas seguintes partes:

- Placa de condicionamento: é responsável pelo tratamento e adequação dos sinais analógicos provenientes dos sensores *hall* de tensão e corrente (LV-25P) e (LA-100P), respectivamente. O circuito de saída dos sensores foi dimensionado para obter uma tensão de saída entre $\pm 1,5$ V. Os sensores necessitam de um sinal de *offset* de 1,5 V para que sejam aplicados a entrada do DSP. Este *offset* se faz necessário devido à entrada analógica do DSP permitir sinais somente entre 0 e 3,3 V;
- A Placa de processamento: possui como elemento principal o kit TMDSDOCK28379D da Texas Instruments e é responsável por realizar a interface entre os pinos de entrada e saída do kit e as demais placas do sistema de controle. Além disso essa placa possui proteção nas entradas analógicas do DSP para que o sinal de entrada não exceda os limites de operação do mesmo;
- Placa de Comando PWM: é responsável por converter os sinais de 0 a 3,3 V das saídas de PWM do DSP, para sinais de 0 à 5 V que são enviados para o *gatedrive* DRM100D80A nos módulos de potência. É composta por 12 canais;
- A Placa entrada digital: responsável por converter sinais digitais de 0 à 5V ou 0 à 24 V em sinais de 0 a 3,3 V compatível com as entradas digitais do DSP. Esta placa é composta de 16 entradas;

- A placa saída a relé: utilizada para acionar os relés que irão fazer interface com o sistema de manobra e proteção do conjunto. Esta placa pode acionar até 8 relés auxiliares;

O kit TMDSDOCK28379D tem como principais características:

- Digital Signal Controller TMS320F28379D de ponto flutuante;
- Frequência de clock de 200MHz;
- Módulo A/D com 24 entradas de 12 bits;
- Memória RAM interna de 204k bytes e 1 MB de memória *Flash*;
- 24 canais PWM;
- Conector JTAG para emulação em tempo real.

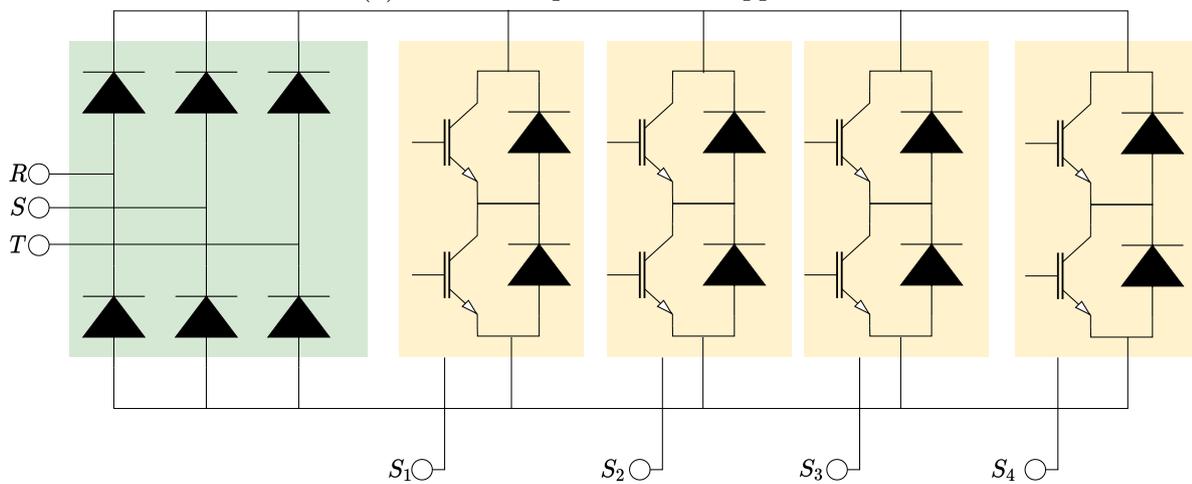
Os conversores fase-neutro são acionados pelo módulo de controle através da técnica PWM (*Pulse Width Modulation*) com frequência de chaveamento de 18 kHz para ambos. A taxa de amostragem para o sistema de controle é definida através da interrupção do A/D que foi definida em 36 kHz.

5.1.2 Módulos de Potência

Para a montagem dos conversores foi utilizado o módulo de potência padrão SPCIQ 1000-80-20 fabricado pela empresa Supplier. O módulo é composto por um retificador trifásico em ponte completa formado por três módulos de diodos modelo SKD 82/16 e quatro módulos de IGBTs SKM75GB12T4, ambos fabricados pela empresa Semikron. A Figura 42a apresenta o módulo de potência utilizado, enquanto Figura 42b mostra seu diagrama elétrico. A Tabela 11 apresenta as características dos componentes do módulo de potência da Semikron.



(a) Módulo de potência da Supplier.



(b) Diagrama elétrico

Figura 42 – Módulo de potência. (Fonte: Supplier.)

Tabela 11 – Características dos elementos do módulo de potência SPCIQ 1000-80-20

Conjunto Retificador trifásico + Inversor 4 braços	
Modelo	SPCIQ 1000-80-20
Tensão máxima de entrada	380 V_{CA}
Tensão máxima barramento	800 V_{CC}
Frequência de chaveamento	18 kHz
Potência nominal	10 kVA
Corrente máxima de saída	15,2 A

A Figura 43 apresenta o inversor solar do fabricante PHB e a Tabela 12 apresenta as principais características de seus componentes.



Figura 43 – Conversores fase-fase. (Fonte: Autoria própria.)

Tabela 12 – Características do conversor PHB

Inversor Solar Fotovoltaico monofásico PHB		
Modelo	PHB780-XS	PHB1500-XS
Tensão de saída	208 a 254 V_{CA}	
Tensão máxima de entrada	500 V_{CC}	
Frequência de chaveamento	15,36 kHz	
Potência nominal	780 W	1500 W
Corrente máxima de saída	3,5 A	7,2 A

5.1.3 Controle central e coordenação dos REDs

O controlador central é responsável pela coordenação e operação dos REDs para assegurar a estabilidade de operação da microrrede. Também tem a função de determinar o despacho de potência, de modo a proporcionar uma redução no custo operacional. Seu emprego permite operar de forma independente, gerenciando o armazenamento de energia para maximizar a geração renovável e reduzir cargas de pico e através da estratégia de controle, permite a operação eficiente dos REDs, realizando o partilhamento de carga entre eles.

Neste trabalho, suas funções são:

- Fornecer referência de potência para os REDs;
- Monitorar o fluxo de potência entre a microrrede e a rede de distribuição;
- Atender as solicitações no PAC conforme acordado com a concessionária local;
- Realizar o partilhamento de carga empregando o controle PBC;

A Figura 44 exhibe o controlador central do protótipo experimental

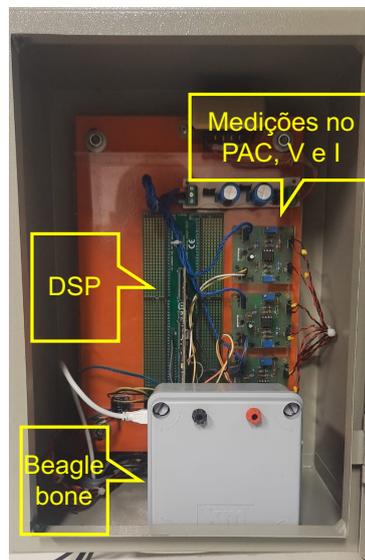


Figura 44 – Controlador central. (Fonte: Autoria própria.)

Conforme apresentado no capítulo 2, o controlador central encontra-se no segundo nível de controle hierárquico, realizando o controle da microrrede em uma taxa de processamento inferior ao primeiro nível. Isso permite que sistemas de comunicação de baixa velocidade possam ser empregados para estabelecer a comunicação com as unidades ativas participantes da microrrede e o controle central. Neste sentido, visando a implementação de um sistema de baixo custo, mas que ofereça alta confiabilidade e interface de comunicação com conversores de eletrônicos e sistemas de supervisão, os

mini-computadores se tornam uma alternativa viável para o controle e gerenciamento de energia. Nesta dissertação foi empregado o mini-computador *Beagle bone* como interface de comunicação entre a microrrede e o sistema supervisor, a fim de proporcionar a operação remota da microrrede. A estrutura de comunicação para o sistema de controle do protótipo da microrrede empregando o *Beagle bone* e rede CAN, é exibida na Figura 45.

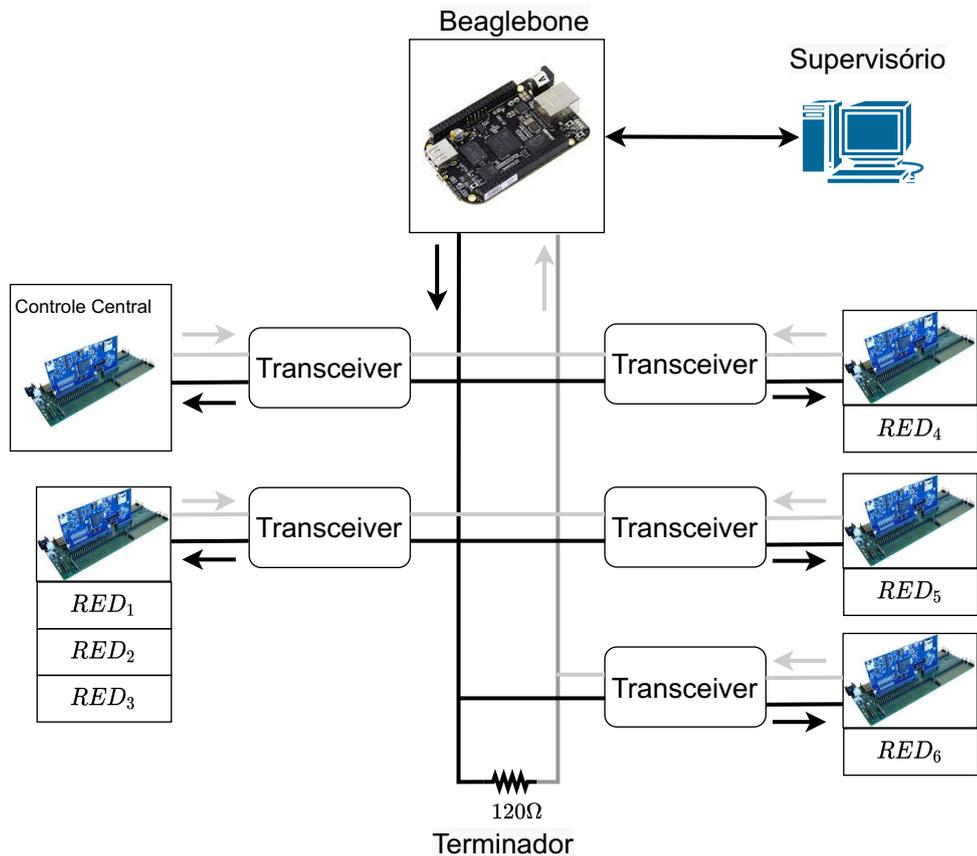


Figura 45 – Estrutura da rede de comunicação. (Fonte: Autoria própria.)

A placa Beaglebone é baseada no Sitara AM335x da Texas Instruments, composta por um ARM Cortex-A8 de 1 GHz, um acelerador gráfico 3D POWERVR SGX e uma unidade de processamento programável de tempo real (PRU-ICSS), possibilitando desenvolver separadamente do core principal, aplicações e protocolos de tempo real como EtherCAT, PROFINET, EtherNet/IP, PROFIBUS e Ethernet Powerlink. Além disso, esses dispositivos apresentam interfaces de comunicação embutida, como SPI, I2C, CAN, Ethernet e UART, permitindo uma integração direta com os dispositivos de controle existentes nos conversores eletrônicos de potência, sem a necessidade de módulos de aquisição de dados (Silva, 2013).

A rede CAN, muito conhecida por sua aplicação na indústria automobilística, é uma rede versátil, usada atualmente nos mais diversos projetos. Sua segurança e confiabilidade são definitivamente fatores que pesam na sua escolha pelos projetistas. Em Silva (2013) é apresentada a aplicação da rede CAN para gerenciamento e controle de energia em

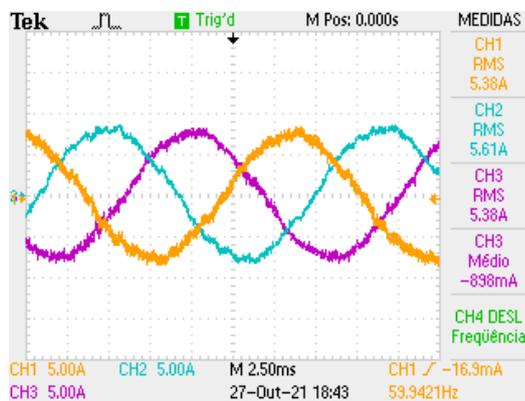
uma nanorrede híbrida, em segundo nível de controle hierárquico. Devido à robustez, confiabilidade e facilidade de integração com os conversores eletrônicos de potência, foi empregada o protocolo CAN na estrutura de controle hierárquico para estabelecer a comunicação entre os elementos participantes da microrrede e o sistema supervisor.

O barramento CAN é formado um par de fios trançados, contendo terminais resistivos nas duas extremidades de 120Ω resultando em uma impedância característica de 60Ω . Há uma comunicação bidirecional entre o supervisor e o Beaglebone através do protocolo SSH (Secure Shell). O Beaglebone possui um Webservice que recebe e envia mensagens para o barramento CAN, em que este se comunica também de forma bidirecional com os DSPs TMS32028379D embutidos no conversores eletrônicos. Os sinais enviados para os DSPs dos REDs são interpretados pelo código criado no Code Composer Studio versão 10.3, em que é possível os DERs receber e enviar comandos para o barramento, bem como ajustar a potência de saída conforme as referências recebidas pelo controle central.

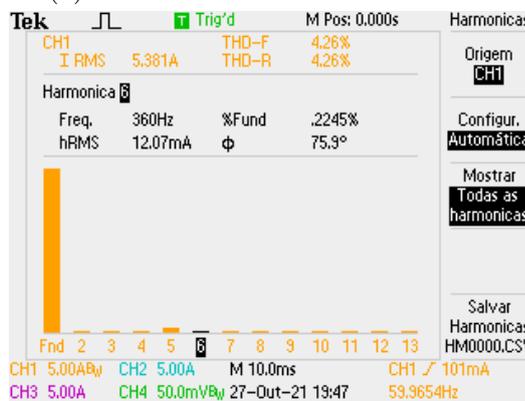
5.2 Controle do fluxo de potência

Nesta seção é apresentado os resultados experimentais do controle do fluxo de potência no PAC utilizando o algoritmo de controle PBC. Todos os experimentos foram realizados sem carga. O objetivo é avaliar a regulação do fluxo de potência no PAC e o compartilhamento proporcional de potência entre os REDs.

A Figura 46a exibe a corrente de saída do conversor RED_1 para uma referência de potência igual à 700 W. A Figura 46b exibe o espectro de frequência dos harmônicos presentes na corrente de saída.



(a) Corrente de saída do conversor.



(b) Espectro de frequências da corrente de saída.

Figura 46 – Corrente de saída do conversor. (Fonte: Autoria própria.)

Observa-se que a taxa de distorção harmônica total de corrente é de 4,26%, ou seja, dentro dos limites recomendados pelo padrão [IEEE Std 1547 \(2018\)](#). Destaca-se que a recomendação é que a THD deve ser no máximo 5% em condições nominais. Haja visto que para condições abaixo da nominal a THD está abaixo do limite recomendado, quando em operação nominal, espera-se que a THD permaneça dentro do limite recomendado.

Como discutido no capítulo 2 e na seção 5.1.3, o segundo nível de controle hierárquico opera em uma taxa inferior ao primeiro nível. Nos resultados a seguir, o período do ciclo de controle do controlador central é de 0,25 s (1 Hz).

A referência adotada nas medições realizadas durante os ensaios experimentais, segue que, para valores positivos de P ou Q , correspondem à injeção de potência ativa ou reativa pelos REDs, enquanto valores negativos, referem-se à absorção de potência. Do lado da rede, valores positivos de P ou Q , correspondem à absorção de potência por parte da rede, enquanto valores negativos referem-se ao caso em que a rede está fornecendo potência à microrrede. A Figura 47 apresenta o diagrama elétrico com as respectivas referências nos ensaios experimentais.

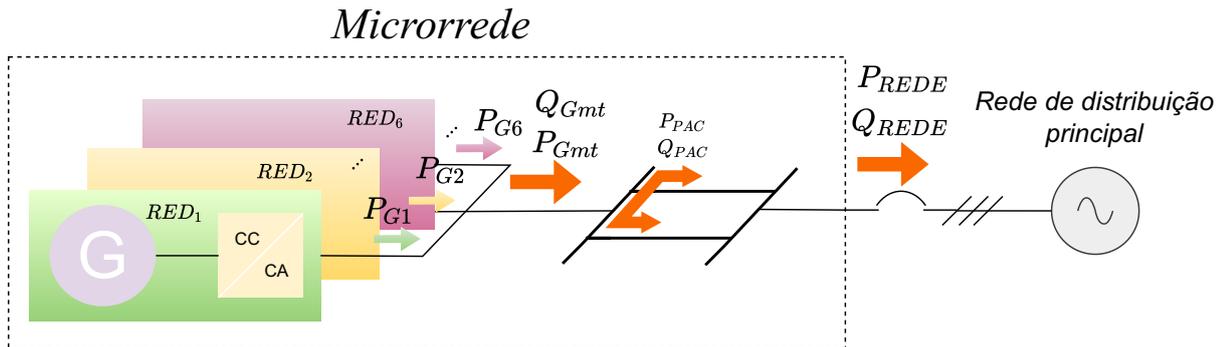


Figura 47 – Fluxo de potência no PAC para os resultados experimentais. (Fonte: Autoria própria.)

Como não há a presença da UI, [$P_{UI} = 0 \text{ W}$ e $Q_{UI} = 0 \text{ var}$], o fluxo de potência no PAC, é igual ao fluxo de potência na rede elétrica CA, ou seja, [$P_{PAC} = P_{REDE}$ e $Q_{PAC} = Q_{REDE}$].

A aplicação da lei de Kirchhoff nos terminais do PAC mostra que a potência gerada pelos REDs ($P_{Gmt} > 0$ e $Q_{Gmt} > 0$) é entregue para a rede elétrica CA ($P_{Gmt} = P_{REDE}$ e $Q_{Gmt} = Q_{REDE}$).

5.2.1 Controle de potência ativa

O primeiro experimento realizado é controle do fluxo de potência ativa no PAC, com a injeção apenas de potência ativa pelos REDs. A Figura 48 mostra os resultados obtidos para o fluxo de potência ativa no PAC, para o intervalo de tempo $t = 0$ s a 400 s.

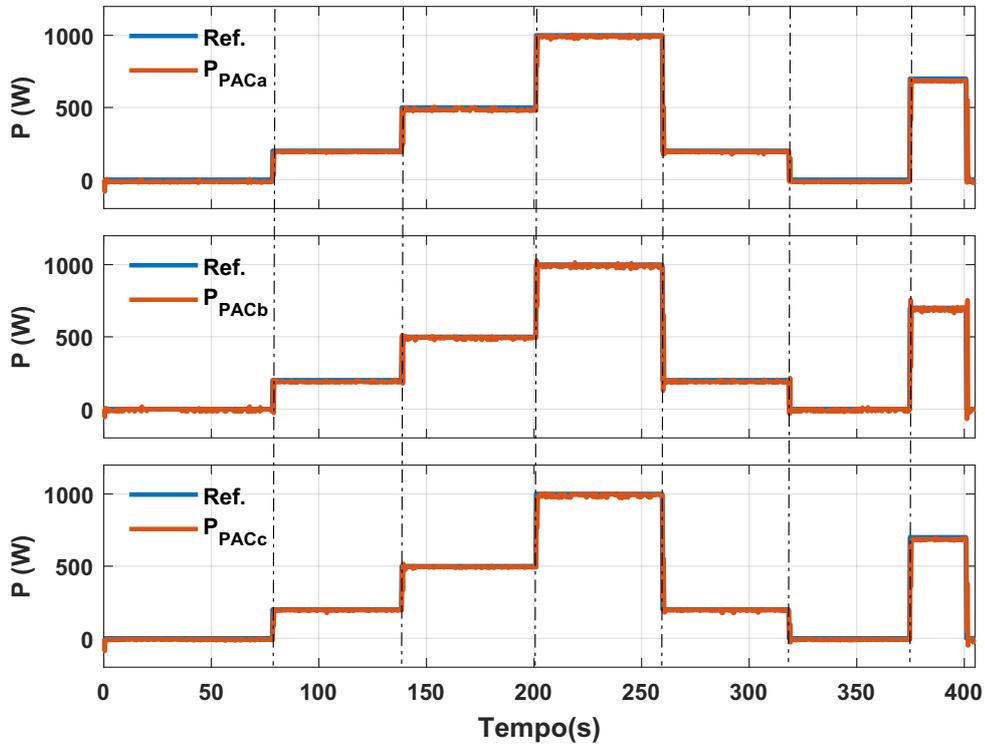


Figura 48 – Fluxo de potência ativa no PAC - primeiro experimento. (Fonte: Autoria própria.)

No instante inicial em $t = 0$ s à $t = 78$ s, a microrrede encontra-se conectada à rede a referência de potências ativa e reativa no PAC iguais à zero, [$P_{PAC}^* = 0$ W e $Q_{PAC}^* = 0$ var]. Verifica-se que os REDs, injetam uma pequena parcela de potência ao PAC igual à [$P_{RED1} = 40$, $P_{RED2} = 60$, $P_{RED3} = 61$, $P_{RED4} = 57$, $P_{RED5} = 35$, $P_{RED6} = 83$] W, conforme pode ser visto na Figura 49. Esta potência está relacionada às perdas à vazio nos transformadores isoladores na saída dos conversores e correspondem à, [$Perda_a = 110$, $Perda_b = 106$, $Perda_c = 120$] W.

Em $t = 78$ s a 138 s, a referência de potência no PAC recebe um comando em degrau de 0 W para 200 W. Neste instante, os REDs começam a injetar potência na microrrede. Os REDs com conexão fase-neutro recebem os coeficientes escalares de acordo com a fase em que estão conectados. Já os conversores fase-fase, recebem o coeficiente correspondente a fase de maior potencial de acordo com a nomenclatura de duplo índice da teoria de circuitos elétricos. Desta forma, a distribuição dos coeficientes escalares segue indicada na Tabela 13.

Tabela 13 – Distribuição dos coeficientes escalares.

Ativo	conexão	$\alpha_{P_m}, \alpha_{Q_m}$
RED_1	Van	α_{Pa}, α_{Qa}
RED_2	Vbn	α_{Pb}, α_{Qb}
RED_3	Vcn	α_{Pc}, α_{Qc}
RED_4	Vab	α_{Pa}, α_{Qa}
RED_5	Vbc	α_{Pb}, α_{Qb}
RED_6	Vcn	α_{Pc}, α_{Qc}

O controlador central determina e envia os seguintes coeficientes escalares de referência de potência ativa, $[\alpha_{Pa} = 0,12, \alpha_{Pb} = 0,16, \alpha_{Pc} = 0,16]$. A potência ativa entregue pelos REDs são exibidas na Figura 49 e para o instante de tempo $t = 78$ s a 138 s, são iguais à $[P_{RED1} = 116, P_{RED2} = 161, P_{RED3} = 161, P_{RED4} = 168, P_{RED5} = 113, P_{RED6} = 226]$ W.

Sendo a potência ativa máxima dos $RED_{s1,2,3}$ iguais à 1000 W, dos $RED_{s4,6}$ iguais à 1400 W e do RED_5 igual à 700 W, verifica-se que a potência injetada pelos REDs 1 a 6, representam respectivamente, $[11,6 - 16,1 - 16,1 - 12 - 16,1 - 16,1]\%$, o que correspondem aos coeficientes escalares determinados pelo algoritmo de controle. Isso representa que, a potência entregue ao PAC está sendo distribuída de forma proporcional à capacidade máxima de cada RED, permitindo o compartilhamento proporcional de potência.

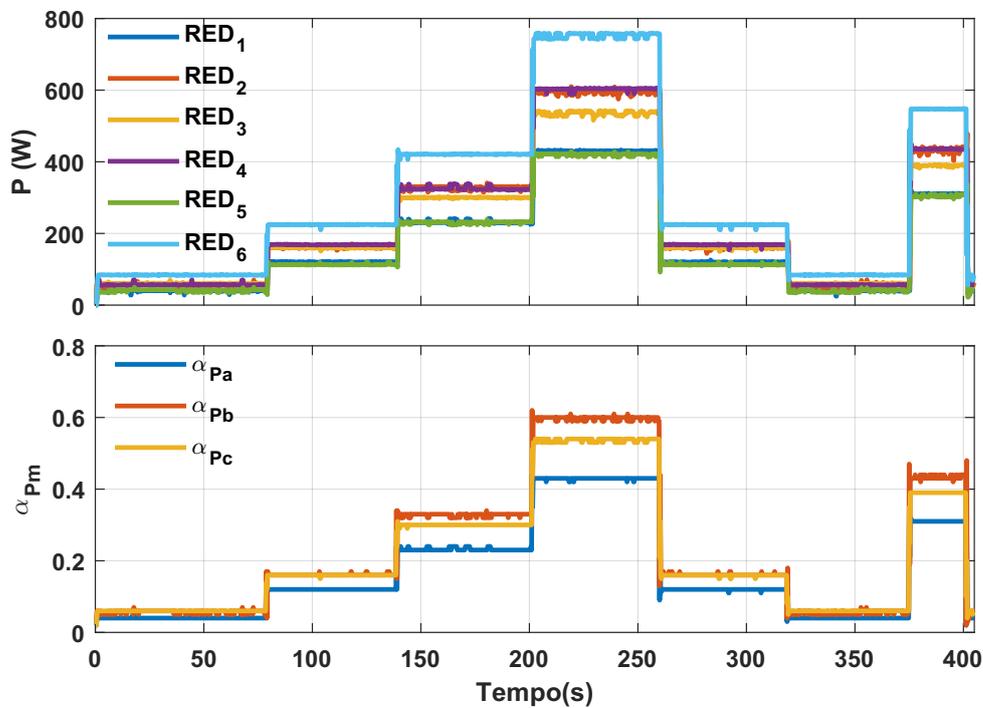


Figura 49 – Potência ativa injetada pelos REDs e seus respectivos coeficientes escalares - primeiro experimento. (Fonte: Autoria própria.)

No instante $t = 138$ s a 200 s a referência de potência ativa no PAC recebe um comando em degrau de 100 W para 500 W. Os novos coeficientes escalares são, $[\alpha_{Pa} = 0,23, \alpha_{Pb} = 0,33, \alpha_{Pc} = 0,30]$ e a potência injetada pelos REDs são iguais à, $[P_{RED1} = 231, P_{RED2} = 320, P_{RED3} = 301, P_{RED4} = 324, P_{RED5} = 232, P_{RED6} = 422]$ W.

A partir do instante $t = 200$ s, a sequência de comandos de referência de potência ativa, segue a seguinte ordem: no intervalo $t = 200$ s, a referência de potência é elevada à 1000 W, quando em $t = 260$ s, recebe um comando em degrau de 1000 W para 200 W e permanece até $t = 320$ s. Quando $t = 320$ s, a referência de potência ativa é igual à 0 W. Em $t = 375$ s, um comando em degrau muda a referência de 0 W para 700 W, quando em $t = 400$ s, recebe novamente um comando em degrau para 0 W. De acordo com a sequência descrita, a Tabela 14 apresenta os valores das potências ativas injetadas pelos REDs e seus respectivos coeficientes para o intervalo de $t = 0$ s à $t = 400$ s.

Tabela 14 – Potência ativa (W) nos REDs - primeiro experimento

$\Delta t(s)$	0-78	78-138	138-200	200-260	260-320	320-375	375-400
P_{REDE}^*	0	200	500	1000	200	0	700
P_{RED1}	40	116	231	430	118	40	311
P_{RED2}	60	161	320	590	160	60	420
P_{RED3}	61	161	301	527	159	60	390
P_{RED4}	57	168	324	604	169	57	435
P_{RED5}	35	113	232	414	113	37	309
P_{RED6}	83	226	422	742	225	84	548
α_{Pa}	0,04	0,12	0,23	0,43	0,12	0,04	0,31
α_{Pb}	0,05	0,16	0,33	0,59	0,16	0,05	0,44
α_{Pc}	0,06	0,16	0,30	0,54	0,16	0,06	0,39

Os REDs são parametrizados para não trocarem potência reativa com a microrrede durante todo intervalo de tempo $t = 0$ s à 400 s, (i.e., $\alpha_{Qm} = 0$). Devido a capacitância de saída do filtro LC dos conversores, uma potencia reativa é injetada no PAC. A Figura 50 exhibe o fluxo de potência reativa.

A Tabela 15 apresenta os valores da potência reativa no PAC para o instante $t = 0$ s a $t = 400$ s.

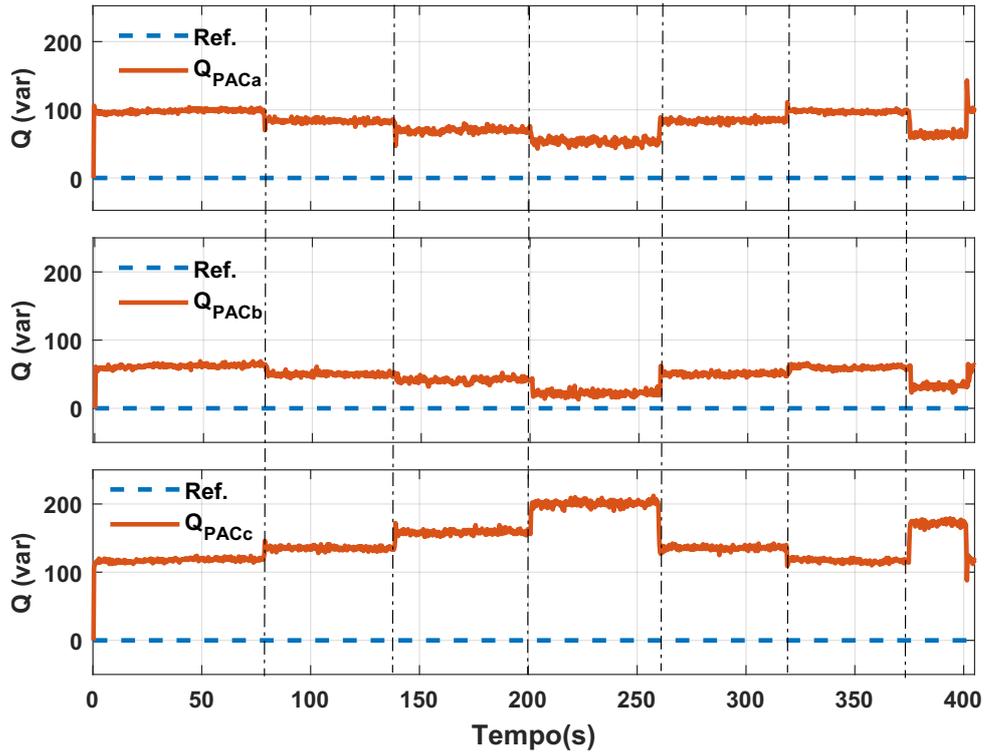


Figura 50 – Potência reativa no PAC - primeiro experimento. (Fonte: Autoria própria.)

Tabela 15 – Fluxo de potência reativa (var) no PAC - primeiro experimento

$\Delta t(s)$	Q_{PACa}	Q_{PACb}	Q_{PACc}
0 - 78	95	60	116
78 - 138	95	48	133
138 - 200	86	34	162
200 - 260	76	16	192
260 - 320	55	50	138
320 - 375	80	57	115
375 - 400	97	29	170

5.2.2 Controle de potência ativa e reativa

Nesta seção é apresentado os resultados experimentais do controle do fluxo de potências ativa e reativa no PAC.

No instante inicial, em $t = 0$ s à 100 s, a referência de potência ativa e reativa no PAC é igual à zero, [$P_{PAC}^* = 0$ W e $Q_{PAC}^* = 0$ var] e seus respectivos coeficientes escalares são iguais à, [$\alpha_{Pa} = 0,06$, $\alpha_{Pb} = 0,05$, $\alpha_{Pc} = 0,05$] e [$\alpha_{Qa} = -0,03$, $\alpha_{Qb} = -0,02$, $\alpha_{Qc} = -0,05$].

Os coeficientes $\alpha_{Pm} > 0$, é devido às perdas conforme citado na seção anterior é equivalente à, [$P_{RED1} = 61$, $P_{RED2} = 49$, $P_{RED3} = 51$, $P_{RED4} = 84$, $P_{RED5} = 84$, $P_{RED6} = 69$] W. Já os coeficientes $\alpha_{Qm} < 0$, representam a absorção da potência reativa capacitiva presente na saída do filtro LC dos conversores e correspondem à, [$Q_{RED1} = -54$, $Q_{RED2} = -38$, $Q_{RED3} = -82$, $Q_{RED4} = -44$, $Q_{RED5} = -16$, $Q_{RED6} = -75$] var.

A Figura 51 apresenta o fluxo de potência ativa no PAC para o instante $t = 0$ s à 450 s. No instante $t = 100$ s, a referência de potência ativa recebe um comando em degrau de 0 W para 500 W. O controlador central calcula e envia os coeficientes escalares [$\alpha_{Pa} = 0,26$, $\alpha_{Pb} = 0,32$, $\alpha_{Pc} = 0,29$], conforme pode ser visto na Figura 52. A potência ativa entregue pelos REDs são iguais à, [$P_{RED1} = 259$, $P_{RED2} = 321$, $P_{RED3} = 283$, $P_{RED4} = 351$, $P_{RED5} = 364$, $P_{RED6} = 407$] W.

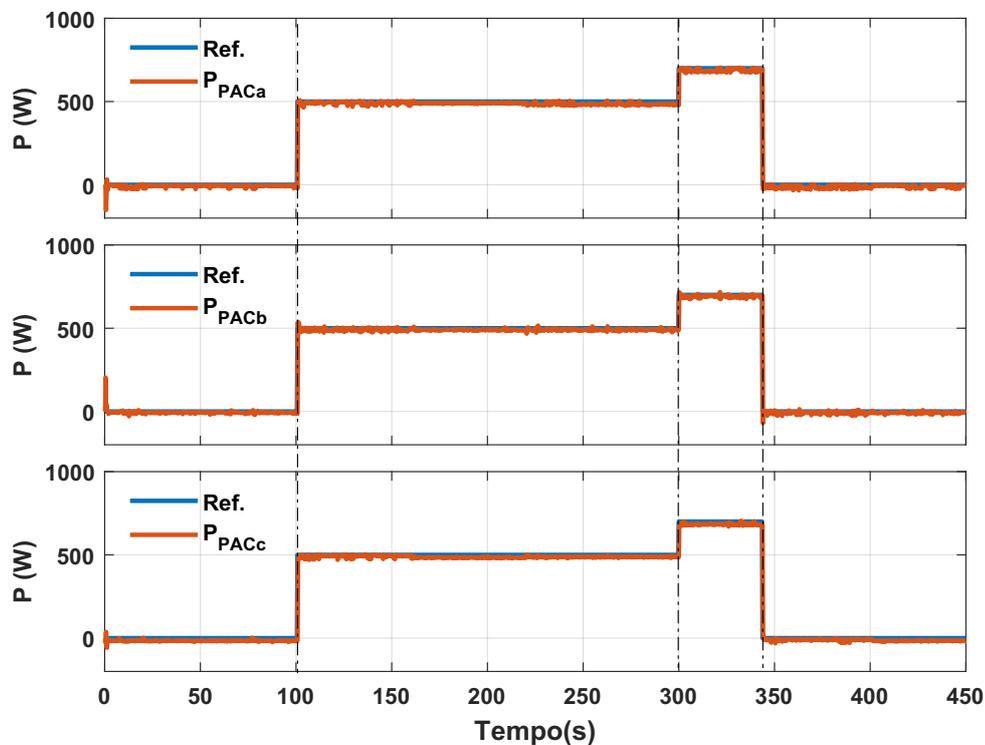


Figura 51 – Fluxo de potência ativa no PAC - segundo experimento. (Fonte: Autoria própria.)

Os respectivos coeficientes escalares de potência ativa representam a proporção de

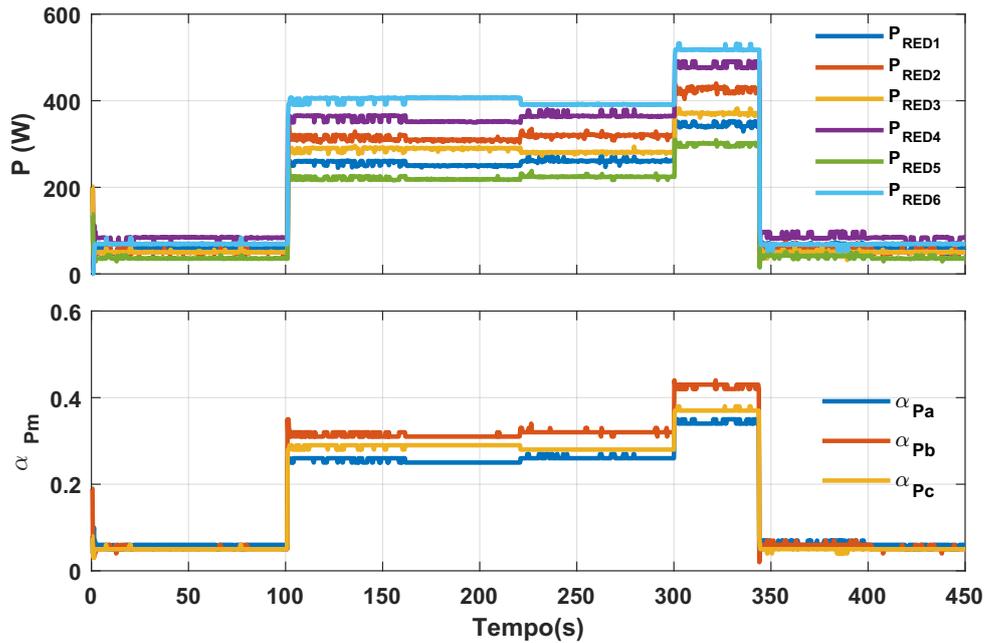


Figura 52 – Potência ativa entregue pelos REDs - segundo experimento. (Fonte: Autoria própria.)

potência ativa injetada por cada RED, em relação à sua potência ativa máxima disponível. No instante $t = 160$ s, ocorre uma variação no fluxo de potência reativa no PAC, como exibido na Figura 53, que faz com que ocorra variação na corrente e consequentemente nas perdas, que proporcionam variação do fluxo de potência ativa. Desta forma, os coeficientes escalares são iguais à, $[\alpha_{Pa} = 0,25, \alpha_{Pb} = 0,31, \alpha_{Pc} = 0,29]$ correspondendo às potências ativa injetadas, $[P_{RED1} = 249, P_{RED2} = 311, P_{RED3} = 290, P_{RED4} = 352, P_{RED5} = 218, P_{RED6} = 406]$. Da mesma forma, em $t = 220$ s, os valores dos coeficientes de potência ativa são alterados devido à variação do fluxo de potência reativa, sendo iguais à $[\alpha_{Pa} = 0,26, \alpha_{Pb} = 0,32, \alpha_{Pc} = 0,28]$ para injeção de potência ativa igual à $[P_{RED1} = 261, P_{RED2} = 319, P_{RED3} = 282, P_{RED4} = 364, P_{RED5} = 224, P_{RED6} = 391]$ W.

No instante $t = 300$ s, a referência de potência ativa é alterada de 500 W para 700 W e em $t = 375$ s, recebe um degrau de 700 W para 0 W. A Tabela 16 apresenta os valores das potências injetadas pelos REDs e seus respectivos coeficientes escalares para o intervalo de $t = 0$ s à 450 s.

Tabela 16 – Potência ativa (W) nos REDs - segundo experimento

$\Delta t(s)$	0-100	100-160	160-220	220-300	300-375	375-450
P_{REDE}^*	0	500	500	500	700	0
P_{RED1}	61	259	249	261	349	61
P_{RED2}	49	321	311	322	430	51
P_{RED3}	51	289	290	282	370	50
P_{RED4}	84	351	352	364	476	84
P_{RED5}	84	218	218	225	301	35
P_{RED6}	69	407	406	392	518	70
α_{Pa}	0,06	0,26	0,25	0,26	0,34	0,06
α_{Pb}	0,05	0,32	0,31	0,32	0,43	0,05
α_{Pc}	0,05	0,29	0,31	0,28	0,37	0,05

O fluxo de potência reativa no PAC é exibido na Figura 53 para o intervalo $t = 0$ s a 450 s. No instante $t = 0$ s à $t = 160$ s, a referência de potência no PAC é igual à zero. Nota-se que os conversores absorvem potência reativa para regular o fluxo de potência no PAC, [$Q_{RED1} = -54$, $Q_{RED2} = -38$, $Q_{RED3} = -82$, $Q_{RED4} = -44$, $Q_{RED5} = -16$, $Q_{RED6} = -75$] var, que correspondem aos seguintes coeficientes escalares, [$\alpha_{Qa} = -0,03$, $\alpha_{Qb} = -0,02$, $\alpha_{Qc} = -0,05$].

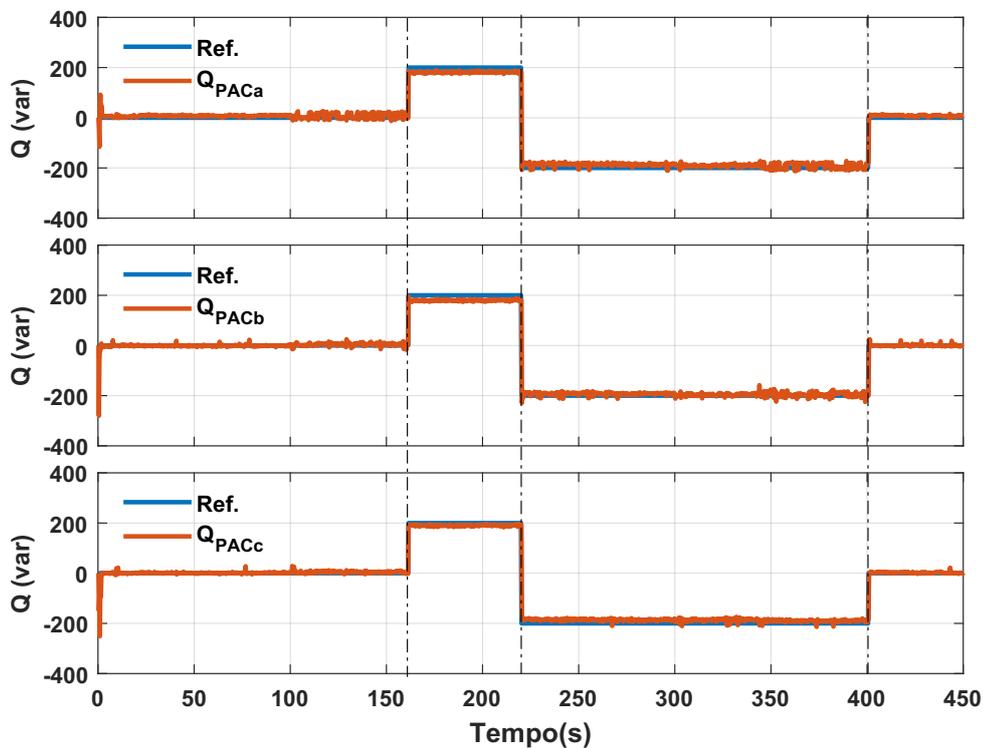


Figura 53 – Potência reativa no PAC - segundo experimento. (Fonte: Autoria própria.)

Devido à injeção de potência ativa em $t = 100$ s, a potência reativa máxima dos REDs diminui, resultando em novos coeficientes escalares. A Tabela 17 apresenta os dados do fluxo de potência para o instante $t = 0$ s à 450 s e a potência reativa máxima disponível em cada RED. Em $t = 160$ s, a referência de potência reativa no PAC é igual à 200 var.

Os REDs injetam [$Q_{RED1} = 51$, $Q_{RED2} = 80$, $Q_{RED3} = -8$, $Q_{RED4} = 57$, $Q_{RED5} = 46$, $Q_{RED6} = -1$] var. Os coeficientes de potência reativa são iguais à [$\alpha_{Qa} = 0,04$, $\alpha_{Qb} = 0,06$, $\alpha_{Qc} = 0$]. A potência reativa na saída dos conversores, é igual a proporção em relação à capacidade máxima de potência reativa disponível, ou seja, os REDs injetam potência reativa determinada pelo controle central, de forma proporcional à sua capacidade máxima disponível.

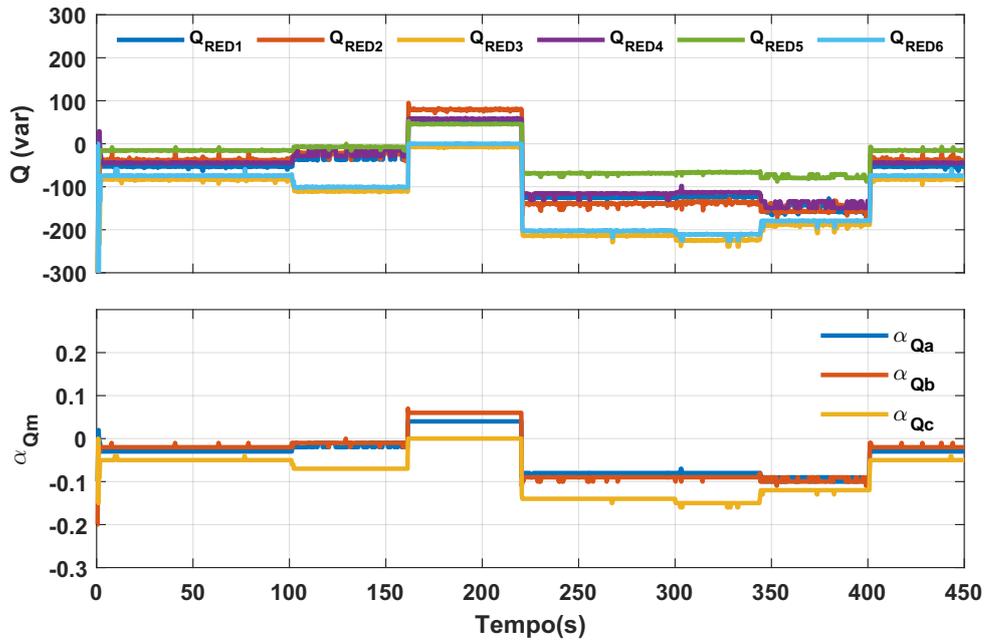


Figura 54 – Potência reativa nos REDs - segundo experimento. (Fonte: Autoria própria.)

Tabela 17 – Fluxo de potência reativa (var) nos REDs - segundo experimento

$\Delta t(s)$	0-100	100-160	160-220	220-300	300-345	345-400	400-450
Q_{REDE}^*	0	0	200	-200	-200	-200	0
Q_{RED1}	-53	-37	51	-126	-123	-156	-53
Q_{RED1}^{max}	1498,75	1477,47	1479,18	1477,11	1460,95	1498,31	1499,19
Q_{RED2}	-38	-22	80	-139	-141	-158	-38
Q_{RED2}^{max}	1499,19	1465,25	1467,4	1465,03	1436,44	1498,75	1499,19
Q_{RED3}	-82	-111	-8	-214	-224	-191	-83
Q_{RED3}^{max}	1499,13	1471,89	1471,69	1473,25	1453,39	1499,02	1499,11
Q_{RED4}	-45	-7	57	-116	-113	-148	-45
Q_{RED4}^{max}	1497,64	1458,35	1458,11	1455,16	1422,13	1497,75	1497,56
Q_{RED5}	-16	-7	46	-76	-67	-79	-15
Q_{RED5}^{max}	795,57	769,72	769,72	767,70	740,80	798,89	799,2
Q_{RED6}	-75	-101	-1	-202	-211	-179	-74
Q_{RED6}^{max}	1498,41	1443,72	1444,0	1447,87	1408,08	1498,45	1498,36
α_{Qa}	-0,03	-0,02	0,04	-0,08	-0,08	-0,09	-0,03
α_{Qb}	-0,02	-0,01	0,06	-0,09	-0,09	-0,09	-0,02
α_{Qc}	-0,05	-0,07	0	-0,14	-0,15	-0,12	-0,05

No instante $t = 220$ s à $t = 400$ s a referência de potência reativa no PAC recebe

um comando em degrau de 200 var para -200 var, ou seja, passa absorver potência reativa da rede. Quando em $t = 400$ s a referência de potência no PAC é igual à zero. Os valores de potência reativa e seus coeficientes estão exibidos na Tabela 17.

5.2.3 Conclusões do capítulo

Este capítulo apresentou os resultados experimentais obtidos através da operação da microrrede em modo conectado à vazio. Foi abordado detalhes construtivos do protótipo bem como os desafios encontrados para seu comissionamento e as soluções encontradas para a operação adequada da microrrede.

O controle PBC mostrou-se eficiente na regulação do controle do fluxo potência, permitindo o compartilhamento proporcional de potência entre os REDs. Também mostrou-se sua robustez quanto à variação da referência de potência em degrau, apresentando uma dinâmica rápida e o rastreamento da referência.

6 Conclusão

Neste trabalho foi realizado o projeto, a construção e o comissionamento de uma arquitetura de microrrede, para análise, investigação e desenvolvimento de pesquisas relacionadas ao controle e operação de microrredes com geração distribuída. Foram apresentados os detalhes construtivos do protótipo bem como a descrição das principais características dos elementos que o compõe, incluindo, sistemas de controle, módulos de potência e tecnologia de comunicação e informação utilizadas.

A configuração da estrutura da microrrede permite investigações acerca da inclusão de recursos energéticos distribuídos monofásicos de diferentes capacidades no sistema elétrico, e a elaboração de estudos que identificam os impactos quando da sua operação interligada à rede, obtendo como resultado, parâmetros de controle, coordenação e proteção de diversos recursos energéticos distribuídos, conectados em um único barramento comum, independente da forma e modo de conexão, assemelhando-se a um sistema de geração distribuída de grande porte.

O objetivo principal deste trabalho é regular o fluxo de potência no ponto de acoplamento comum entre a microrrede e a rede elétrica CA, realizando o compartilhamento de potência proporcional entre os elementos ativos participantes da microrrede, tratando o sistema inteiro como uma entidade única e controlável.

Para alcançar esse objetivo, propôs-se o emprego da técnica de controle baseado em potência, que é uma técnica de controle centralizado, já difundida e validada na literatura, que busca alcançar o controle proporcional de recursos energéticos distribuídos em microrredes.

A comunicação entre os controladores locais e controle central é realizada por meio de um canal de comunicação de baseado no protocolo CAN. Além disso, uma interface baseada em um mini-computador (*Beaglebone*) foi incluída no barramento de comunicação a para troca de dados com a estação de supervisão e controle, permitindo a microrrede ser assistida de forma remota.

Os resultados foram obtidos por meio de simulações utilizando o software PLECS versão 4.1.2. e através do protótipo experimental. Através das simulações, observou-se uma operação eficiente e robusta da técnica de controle PBC, alcançando uma operação estável nos modos conectado e ilhado e o regulação do fluxo de potência ativa e reativa no ponto de acoplamento comum. No modo ilhado, a UI atua de forma a fornecer o complemento de energia para manter o equilíbrio de potência na microrrede.

No modo conectado, as simulações abordaram dois cenários diferentes. O primeiro,

com a UI participante do algoritmo de controle PBC, contribuindo para o balanço de potência na microrrede para uma referência de potência na rede igual à zero. Isso representa, a maximização da geração renovável e da extração da capacidade máxima da UI, para atendimento à demanda da microrrede e uma menor participação da rede de distribuição. Outro cenário analisado é quando o preço da energia da rede é interessante para a microrrede, neste caso, a geração renovável pode ser utilizada para recarregar seus elementos armazenadores de energia e adquirir energia da rede. Em ambos os casos, o algoritmo de controle PBC permite controlar o quanto de potência deseja adquirir da rede.

A partir de contratos pré-estabelecidos com a concessionária, o excedente de energia produzida pelas fontes renováveis da microrrede podem ser enviadas para a rede de forma controlada conforme às necessidades da rede de distribuição.

Para validação experimental da técnica de controle empregada, o PBC foi aplicado ao nível de controle secundário na microrrede experimental construída no laboratório LGCE-UNIFEI campus Itabira. Os testes foram realizados com a microrrede operando no modo conectado à vazio, variando a referência do fluxo de potência ativa e reativa para a rede. Ressalta-se que, até a presente data de defesa desta dissertação, o retificador ativo trifásico e a UI não foram integrados ao protótipo.

Os resultados experimentais alcançados comprovaram a capacidade do controle de potência ativa e reativa da rede. Logo, através dos resultados de simulação e resultados experimentais, conclui-se que o sistema de controle PBC utilizado nesta dissertação cumpre os seguintes objetivos:

- Compartilhamento de potência proporcional entre as unidades de geração distribuída;
- Capacidade de operação *off-grid*;
- Controle do fluxo de potência ativa e reativa na rede

O protótipo desenvolvido será de grande utilidade em aulas no laboratório de geração e conversão de energia elétrica da UNIFEI *campus* Itabira para apresentação prática de conceitos sobre controle e operação de microrredes além de permitir pesquisas e trabalhos futuros.

6.1 Proposta de Continuidade

A utilização do protótipo da microrrede com o algoritmo de controle baseado em potência para regular o fluxo de potência no PAC permitiu a observação de novas oportunidades de abordagem do assunto e continuidade do trabalho. Como sugestão, destacam-se as seguintes propostas de continuidade:

- Integração de cargas na microrrede e avaliação do desempenho da estratégia de controle para o atendimento às variações de solicitação de demanda;
- Integrar o conversor formador de rede trifásico para operação em modo ilhado;
- Implementar a estrutura de controle para o modo de operação ilhado;
- Integração do sistema de armazenamento de energia e controladores de carga;
- Implementação do sistema supervisório;
- Investigação e implementação de outras estratégias de controle da microrrede.

6.2 Publicações relacionadas

Até o presente momento os seguintes trabalhos relacionados a essa dissertação foram aceitos:

- Agostinho, W. M. A.; Sousa, C. V.; Reis, G. L.; Silva, W. W. A.; Mendes, V. F. Controle baseado em potência aplicado em geradores distribuídos em uma microrrede de baixa tensão. SBSE, jul. 2022.

Referências

- Abu-Rub, H.; Malinowski, M.; Al-Haddad, K. *Power electronics for renewable energy systems, transportation and industrial applications*. : John Wiley & Sons, 2014. 38
- Barbi, I. *Projetos de fontes chaveadas*. 3. ed. 2014. 46
- Bellido, M. M. H. *Microrredes elétricas: uma proposta de implementação no Brasil*. Tese (Doutorado) — Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2018. 30
- Bidram, A.; Davoudi, A. Hierarchical structure of microgrids control system. *IEEE Transactions on Smart Grid*, Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), v. 3, n. 4, p. 1963–1976, dec 2012. 24
- Blaabjerg, F.; Teodorescu, R.; Liserre, M.; Timbus, A. V. Overview of control and grid synchronization for distributed power generation systems. *IEEE Transactions on industrial electronics*, IEEE, v. 53, n. 5, p. 1398–1409, 2006. 42
- Bowers, B. A history of electric light and power. *Peter Peregrinus Ltd*, 1982. 23
- Brandão, D. I.; Araújo, L. S.; Alonso, A. M. S.; Reis, G. L. dos; Liberado, E. V.; Marafão, F. P. Coordinated control of distributed three- and single-phase inverters connected to three-phase three-wire microgrids. *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), v. 8, n. 4, p. 3861–3877, dec 2020. 66
- Brandão, D. I.; Caldognetto, T.; Marafão, F. P.; Simões, M. G.; Pomilio, J. A.; Tenti, P. Centralized control of distributed single-phase inverters arbitrarily connected to three-phase four-wire microgrids. *IEEE Transactions on Smart Grid*, Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), v. 8, n. 1, p. 437–446, jan 2017. 66
- Brandão, D. I.; de Araújo, L. S.; Caldognetto, T.; Pomilio, J. A. Coordinated control of three- and single-phase inverters coexisting in low-voltage microgrids. *Applied Energy*, v. 228, p. 2050–2060, 2018. ISSN 0306-2619. Available on: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0306261918311140>>. 66
- Brandão, D. I.; Pomilio, J. A.; Marafão, F. P.; Alonso, A. M. Validação experimental de uma microrrede com controle centralizado e despachável. *Revista Eletrônica de Potência*, v. 23, n. 3, p. 281–291, 2018. 32
- Buso, S.; Mattavelli, P. Digital control in power electronics. *Synthesis Lectures on Power Electronics*, Morgan & Claypool Publishers, v. 5, n. 1, p. 1–229, 2015. 46
- Caldognetto, T.; Buso, S.; Tenti, P.; Brandão, D. I. Power-based control of low-voltage microgrids. *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), v. 3, n. 4, p. 1056–1066, dec 2015. 66
- Cha, H.; Vu, T.-K. Comparative analysis of low-pass output filter for single-phase grid-connected photovoltaic inverter. In: *2010 Twenty-Fifth Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC)*. 2010. p. 1659–1665. 39

- Ciobotaru, M.; Teodorescu, R.; Blaabjerg, F. A new single-phase pll structure based on second order generalized integrator. In: IEEE. *2006 37th IEEE Power Electronics Specialists Conference*. 2006. p. 1–6. 42
- Coelho, E.; Cortizo, P.; Garcia, P. Small-signal stability for parallel-connected inverters in stand-alone AC supply systems. *IEEE Transactions on Industry Applications*, Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), v. 38, n. 2, p. 533–542, 2002. 24, 31
- Coelho, E. A. A. *Técnicas de Controle Aplicadas Ao Paralelismo de Inversores*. Tese (Doutorado) — Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, dez. 2000. 23
- Corbelino, L. H. G. *Ferramenta para sincronismo de gerador síncrono com a rede elétrica empregando PLL monofásico embarcado em FPGA*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal do Mato Grosso do Sul, Campo Grande, 2012. 42
- Correa, E. P. *Estudo de um modelo de ordem reduzida para análise da estabilidade de microrredes CA*. Dissertação (Mestrado) — Universidade do Estado de Santa Catarina - UDESC, Joinville, fev. 2018. 55
- Costa, I. D.; Brandao, D. I.; Junior, L. M.; Simões, M. G.; Morais, L. M. Analysis of stationary-and synchronous-reference frames for three-phase three-wire grid-connected converter ac current regulators. *Energies*, Multidisciplinary Digital Publishing Institute, v. 14, n. 24, p. 8348, 2021. 44
- Dato, P.; Durmaz, T.; Pommeret, A. Smart grids and renewable electricity generation by households. *Energy Economics*, v. 86, p. 104511, 2020. ISSN 0140-9883. Available on: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0140988319303007>>. 23
- Dong, D. *Modeling and Control Design of a Bidirectional PWM Converter for Singlephase Energy Systems*. Dissertação (Mestrado) — Virginia Polytechnic Institute and State University, Blacksburg, 2009. 39
- Fathima, H.; N, P.; K, P.; Kalam, A.; Mekhilef, S.; Justo, J. *Hybrid-Renewable Energy Systems in Microgrids: Integration, Developments and Control*. Elsevier Science, 2018. (Woodhead Publishing Series in Energy). ISBN 9780081024935. Available on: <<https://books.google.com.br/books?id=nN-ztAEACAAJ>>. 23, 29
- Ferreira, W. M. *Abordagem multiobjetivo para o controle do fluxo de potência e melhorias na qualidade de energia de uma microrrede de baixa tensão*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2018. 29, 31, 32
- Ferreira, W. M. *Abordagem multiobjetivo para o controle do fluxo de potência e melhorias na qualidade de energia de uma microrrede de baixa tensão*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, dez. 2018. 29
- Ferreira, W. M.; Brandão, D. I.; Silva, S. M.; Alonso, A. M.; Marafão, F. P. Otimização multiobjetivo aplicada ao controle centralizado de uma microrrede de baixa tensão: controle do fluxo de potência e compensação de desbalanço. In: *Congresso Brasileiro de Automática-CBA*. 2019. v. 1, n. 1. 31
- Hamilton, J. *Historical Oil Shocks*. 2011. 23
- Hatziargyriou, N. *Microgrids: architectures and control*. 2014. 24

- Hatziargyriou, N.; Asano, H.; Iravani, R.; Marnay, C. Microgrids. *IEEE Power and Energy Magazine*, Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), v. 5, n. 4, p. 78–94, jul 2007. [23](#)
- IEEE. Standard for the specification of microgrid controllers. *Std 2030.7-2017*, p. 1–43, 2018. [24](#)
- IEEE Std 1547. Ieee standard for interconnection and interoperability of distributed energy resources with associated electric power systems interfaces. *IEEE Std 1547-2018 (Revision of IEEE Std 1547-2003)*, p. 1–138, 2018. [38](#), [57](#), [65](#), [91](#)
- Ipakchi, A.; Albuyeh, F. Grid of the future. *IEEE Power and Energy Magazine*, Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), v. 7, n. 2, p. 52–62, mar 2009. [29](#)
- ISO 11898-1. International organization for standardization. roadvehicles â controller area network (can)âpart 1: Data link layer and physical signaling. 2003. [66](#)
- ISO 11898-2. International organization for standartization. , roadvehicles â controller area network (can) â part 2: High-speed medium access unit. 2003. [66](#)
- Junior, M. E. T. S. *Estudo e Desenvolvimento de Métodos de Controle para Microrredes CA Ilhadas e Conectadas à Rede Elétrica*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Uberlândia, 2020. [31](#)
- Junior, M. E. T. S.; Freitas, L. C. G. de. Microrredes: Estado da arte, desafios e tendências para geração, distribuição e uso sustentável de energia elétrica / microgrids: State-of-the-art, challenges and trends for the sustainable generation, distribution and use of electricity. *Brazilian Applied Science Review*, Brazilian Applied Science Review, v. 4, n. 6, p. 3888–3906, 2020. [24](#)
- Júnior, F. M. P. *Análise da interoperabilidade de sistemas de comunicações móveis na operação e controle resiliente de microrredes*. Tese (Doutorado) — Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2018. [24](#)
- Kathushiko, O. Engenharia de controle moderno. 5^o edição. *Editora LTC*, 2011. [43](#)
- Katiraei, F.; Aguero, J. R. Solar pv integration challenges. *IEEE Power and Energy Magazine*, v. 9, n. 3, p. 62–71, 2011. [31](#)
- Katiraei, F.; Iravani, R.; Hatziargyriou, N.; Dimeas, A. Microgrids management. *IEEE Power and Energy Magazine*, v. 6, n. 3, p. 54–65, 2008. [35](#)
- Lasseter, R. MicroGrids. In: *2002 IEEE Power Engineering Society Winter Meeting. Conference Proceedings (Cat. No.02CH37309)*. : IEEE, 2002. [23](#)
- Lasseter, R.; Akhil, A.; Marnay, C.; Stephens, J.; Dagle, J.; Guttromsom, R.; Meliopoulos, A. S.; Yinger, R.; Eto, J. *Integration of distributed energy resources. The CERTS Microgrid Concept*. 2002. [23](#)
- Lasseter, R.; Paigi, P. Microgrid: a conceptual solution. In: *2004 IEEE 35th Annual Power Electronics Specialists Conference (IEEE Cat. No.04CH37551)*. 2004. v. 6, p. 4285–4290 Vol.6. [22](#)

- Li, X.; Zhang, H.; Shadmand, M. B.; Balog, R. S. Model predictive control of a voltage-source inverter with seamless transition between islanded and grid-connected operations. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, IEEE, v. 64, n. 10, p. 7906–7918, 2017. 28
- Matakas Junior, L. *Implementação de controladores para conversores trifásicos, sem transformação de coordenadas: análise geométrica através de vetores espaciais*. Tese (Livre Docência) — Universidade de São Paulo, São Paulo, 2012. 45
- Matos, J. G. de. *Controle de Potência em Microrredes cA Isoladas com Aerogeradores e Bancos de Baterias Distribuídos*. Tese (Doutorado) — Universidade Federal do Maranhão, São Luís do Maranhão, 2014. 32
- Meng, L.; Luna, A.; Diaz, E.; Sun, B.; Dragicevic, T.; Savaghebi, M.; Vasquez, J.; Guerrero, J.; Graells, M. Flexible system integration and advanced hierarchical control architectures in the microgrid research laboratory of aalborg university. *IEEE Transactions on Industry Applications*, Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), p. 1–1, 2015. 25
- Monshizadeh, P.; Persis, C.; Monshizadeh, N.; Schaft, A. A communication-free master-slave microgrid with power sharing. 09 2015. 30
- Morstyn, T.; Hredzak, B.; Agelidis, V. G. Distributed cooperative control of microgrid storage. *IEEE Transactions on Power Systems*, Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), v. 30, n. 5, p. 2780–2789, sep 2015. 25
- Mukherjee, S.; Shamsi, P.; Ferdowsi, M. Small signal modeling and control of a grid tied converter without a synchronization unit. In: *2016 IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC)*. : IEEE, 2016. 49
- Nise, N. S. *Engenharia de sistemas de controle*. 6. ed. Rio de Janeiro: , 2013. 46
- Nunes, E. A. de F. *Análise de Impactos na Rede de Distribuição de Energia Elétrica Decorrentes da Inserção de Sistemas de Geração Fotovoltaicos*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, RN, jun. 2017. 30, 31
- Olivares, D. E.; Mehrizi-Sani, A.; Etemadi, A. H.; Canizares, C. A.; Iravani, R.; Kazerani, M.; Hajimiragha, A. H.; Gomis-Bellmunt, O.; Saeedifard, M.; Palma-Behnke, R.; Jimenez-Estevez, G. A.; Hatziargyriou, N. D. Trends in microgrid control. *IEEE Transactions on Smart Grid*, Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), v. 5, n. 4, p. 1905–1919, jul 2014. 24, 31
- Oliveira, D. Q. *Sistema de Gerenciamento de Energia para Operação Resiliente de Microrredes em Modo Ilhado*. Tese (Doutorado) — Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2015. 61
- Oliveira, T. R. *Distribuição local de energia em corrente contínua: estudo, desenvolvimento e implementação de um protótipo de nanorrede C.C. dedicado aos setores residencial e comercial*. Tese (Doutorado) — Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2016. 22
- Planas, E.; Muro, A. G. de; Andreu, J.; Kortabarria, I.; Martínez de Alegría, I. General aspects, hierarchical controls and droop methods in microgrids: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 17, p. 147–159, 2013. ISSN 1364-0321. Available on: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032112005333>>. 35

- PRODIST, A. *Procedimentos de distribuição de energia elétrica no sistema elétrico nacional*. : Módulo, 2012. 29, 57
- Rashid, M. H. *Power Electronics: Devices, Circuits and Applications*. Fourth. 2014. ISBN 978-85-430-1452-4. 37
- Rocabert, J.; Luna, A.; Blaabjerg, F.; Rodríguez, P. Control of power converters in ac microgrids. *IEEE Transactions on Power Electronics*, v. 27, n. 11, p. 4734–4749, 2012. 25, 30
- Samad, T.; Annaswamy, A. M. Controls for smart grids: Architectures and applications. *Proceedings of the IEEE*, Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), v. 105, n. 11, p. 2244–2261, nov 2017. 28
- Seo, S.; Cho, Y.; Lee, K.-B. Lcl-filter design for grid-connected three-phase inverter using space vector pwm. In: IEEE. *2016 IEEE 8th International Power Electronics and Motion Control Conference (IPEMC-ECCE Asia)*. 2016. p. 389–394. 39
- Setiawan, M. A.; Shahnia, F.; Rajakaruna, S.; Ghosh, A. ZigBee-based communication system for data transfer within future microgrids. *IEEE Transactions on Smart Grid*, Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), v. 6, n. 5, p. 2343–2355, sep 2015. 25
- Shah, S.; Pels, I. Step-by-step design of an lcl filter for three-phase grid interactive converter. *IEEE PELS*, 2015. 39
- Silva, R. C. da. *Estudo e Desenvolvimento de um Conversor Formador de Rede Multiterminal*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, jul. 2020. 34
- Silva, W. W. A. G. *Estudo e implementação de um conversor bidirecional como interface na regulação de tensão em barramento c.c. e carregamento de baterias em um sistema nanorrede*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, set. 2013. 89
- Souza, G. G. d. *Sistema de Gerenciamento para Microrredes: Controle e Otimização do Fluxo de Potência*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Pato Branco, 2019. 31
- Tang, Y.; Loh, P. C.; Wang, P.; Choo, F. H.; Gao, F.; Blaabjerg, F. Generalized design of high performance shunt active power filter with output lcl filter. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, IEEE, v. 59, n. 3, p. 1443–1452, 2011. 40
- Tenti, P.; Paredes, H. K. M.; Mattavelli, P. Conservative power theory, a framework to approach control and accountability issues in smart microgrids. *IEEE Transactions on Power Electronics*, IEEE, v. 26, n. 3, p. 664–673, 2010. 44
- Teodorescu, R.; Liserre, M.; Rodriguez, P. *Grid converters for photovoltaic and wind power systems*. : John Wiley & Sons, 2011. 8, 42, 43
- Ton, D. T.; Smith, M. A. The u.s. department of energy's microgrid initiative. *The Electricity Journal*, Elsevier BV, v. 25, n. 8, p. 84–94, oct 2012. 22

Vandoorn, T. L.; Vasquez, J. C.; Kooning, J. D.; Guerrero, J. M.; Vandevelde, L. Microgrids: Hierarchical control and an overview of the control and reserve management strategies. *IEEE Industrial Electronics Magazine*, Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), v. 7, n. 4, p. 42–55, dec 2013. [29](#)

Vitorino, M. A. *Eletrônica de potência: conceitos e aplicações*. 1. ed. Curitiba: , 2019. [38](#)

Xiao, Z.; Li, T.; Huang, M.; Shi, J.; Yang, J.; Yu, J.; Wu, W. Hierarchical MAS based control strategy for microgrid. *Energies*, MDPI AG, v. 3, n. 9, p. 1622–1638, sep 2010. [32](#)