

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

CHARLES WILLIAM POLIZELLI PEREIRA

**ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE OS SISTEMAS DELTA-UPQC E BACK-TO-
BACK OPERANDO COMO CONVERSOR BIDIRECIONAL DE INTERLIGAÇÃO
ENTRE A REDE ELÉTRICA E MICRORREDES CA MONOFÁSICAS**

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

CORNÉLIO PROCÓPIO
2022

CHARLES WILLIAM POLIZELLI PEREIRA

ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE OS SISTEMAS DELTA-UPQC E BACK-TO-BACK OPERANDO COMO CONVERSOR BIDIRECIONAL DE INTERLIGAÇÃO ENTRE A REDE ELÉTRICA E MICRORREDES CA MONOFÁSICAS

Comparative analysis between Delta-UPQC and Back-to-Back systems operating as a bidirectional interconnection converter between the electrical grid and single-phase AC microgrids.

Dissertação apresentada como requisito para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

Orientador: Prof. Dr. Sérgio Augusto Oliveira da Silva

Co-orientador: Prof. Dr. Leonardo Bruno Garcia Campanhol

CORNÉLIO PROCÓPIO
2022



[4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/)

Esta licença permite o download e o compartilhamento da obra desde que sejam atribuídos créditos ao(s) autor(es), sem a possibilidade de alterá-la ou utilizá-la para fins comerciais.



**Ministério da Educação
Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Campus Cornélio Procópio**



CHARLES WILLIAM POLIZELLI PEREIRA

**ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE OS SISTEMAS DELTA-UPQC E BACK-TO-BACK OPERANDO COMO
CONVERSOR BIDIRECIONAL DE INTERLIGAÇÃO ENTRE A REDE ELÉTRICA E MICRORREDES CA
MONOFÁSICAS**

Trabalho de pesquisa de mestrado apresentado como requisito para obtenção do título de Mestre Em Engenharia Elétrica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR). Área de concentração: Sistemas Eletrônicos Industriais.

Data de aprovação: 22 de Novembro de 2022

Dr. Sergio Augusto Oliveira Da Silva, Doutorado - Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Leonardo Bruno Garcia Campanhol, - Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Dr. Lucio Dos Reis Barbosa, Doutorado - Universidade Estadual de Londrina (Uel)

Dr. Rodrigo Augusto Modesto, Doutorado - Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Documento gerado pelo Sistema Acadêmico da UTFPR a partir dos dados da Ata de Defesa em 13/12/2022.

Dedico este trabalho à minha mãe,
pelo seu apoio incondicional.

AGRADECIMENTOS

É tão difícil nomear as pessoas à quem devo agradecer, pois todas as pessoas que passaram por mim me ajudaram a construir esse trabalho de alguma forma. Primeiramente, toda honra e toda glória à Jesus Cristo, que manteve a minha fé nos momentos fáceis e difíceis.

Agradeço aos meus pais, que me deram suporte financeiro e emocional para enfrentar e conquistar esse meu sonho. Não há nada que eu possa fazer para recompensá-los.

Agradeço aos meus orientadores, Prof. Sérgio e Prof. Leonardo Campanhol, pela paciência, disponibilidade e discussões que ajudaram a construir esse trabalho. Aos meus professores de graduação e de pós graduação, em especial aos professores Newton da Silva, Lúcio Barbosa e Leonardo Sampaio, que sempre estavam disponíveis para me atender, e à secretária Jessica que sempre me ajudou.

Agradeço aos grandes amigos que fiz nessa longa caminhada, o Sebastián, o Bruninho e o Roberval, que me incentivaram nos momentos de desânimo, ao Osvaldo e ao Aleksander pelos momentos dentro e fora do laboratório, e à todos os professores que fiz amizade no tempo que estive no campus da UTFPR Apucarana.

E aos diversos amigos que participaram, de alguma forma, desse momento, ao meu amigo Giancarlo, à Dayse, ao Márcio Milhorança, ao Aroldo, à Cintia Elena, à Melina, ao Daniel Strufaldi, ao Leonardo, ao Diego Martin e à Lucilene, dentre tantos outros que estiveram comigo nesses últimos meses.

Em especial, quero agradecer à minha avó Ilda, que em nenhum momento deixou de acreditar na minha capacidade e me incentivar para terminar esse mestrado.

A minha eterna gratidão à todos que torceram por mim e me ajudaram a vencer esse desafio.

Não importa o que a vida fez de você, mas o que
você faz com o que a vida fez de você.
(JEAN-PAUL SARTRE).

RESUMO

PEREIRA, Charles William Polizelli. **Análise comparativa entre os sistemas Delta-UPQC e Back-to-Back operando como conversor bidirecional de interligação entre a rede elétrica e microrredes CA monofásicas.** 2022. 182 p. Dissertação – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Cornélio Procópio, 2022.

Este trabalho apresenta o estudo e análise comparativa entre duas topologias de conversores de potência, o conversor Delta UPQC (*Unified Power Quality Conditioner*) e o conversor Back-to-Back, atuando como conversor eletrônico bidirecional de interligação (CEBI) para conectar a rede elétrica convencional à uma microrrede CA monofásica. Nesse trabalho será avaliado o fluxo de potência nas duas topologias de CEBI, verificando a potência processada por cada um dos conversores que compõem o CEBI, além de verificar a bidirecionalidade do fluxo de potência, drenando e injetando potência na rede elétrica convencional. No PAC (ponto de acoplamento comum) da microrrede será conectado cargas lineares e não lineares, de forma a avaliar os índices de qualidade de energia que o CEBI consegue atender. Ambas as topologias de CEBI são formadas por dois inversores de frequência monofásico *full-bridge*, conectados entre si pelo barramento CC, em que na topologia Delta UPQC ela irá operar na estratégia dual de compensação, com o conversor série operando como fonte de corrente e o conversor paralelo operando como fonte de tensão. Da mesma forma, na topologia back-to-back o conversor conectado na rede elétrica opera como fonte de corrente e o conversor conectado no ponto de acoplamento da microrrede opera como fonte de tensão senoidal. Os resultados de simulação e experimentais serão apresentados para avaliar e validar o funcionamento de ambas as topologias para atender os índices de qualidade de energia e o fluxo de potência entre a rede elétrica convencional e a microrrede CA, dando embasamento para dimensionar os conversores fonte de corrente e fonte de tensão.

Palavras-chave: Microrredes CA, Conversor Eletrônico Bidirecional de Interligação, Back-to-Back, Delta UPQC.

ABSTRACT

PEREIRA, Charles William Polizelli. **Comparative analysis between Delta-UPQC and Back-to-Back systems operating as a bidirectional interconnection converter between the electrical grid and single-phase AC microgrids.** 2022. 182 p. Master Thesis – Electrical Engineering Graduate Program, Federal University of Technology of Parana. Cornélio Procópio, 2022.

This work presents the study and comparative analysis between two topologies of power converters, the Delta UPQC converter (Unified Power Quality Conditioner) and the Back-to-Back converter, acting as a bidirectional electronic interconnection converter (BIEC) to connect the electrical grid conventional to a single-phase AC microgrid. In this work, the power flow in the two topologies of BIEC will be evaluated, verifying the power processed by each of the converters that make up the BIEC, in addition to verifying the bidirectionality of the power flow, draining and injecting power in the conventional electrical grid. In the CCP (common coupling point) of the microgrid, linear and non-linear loads will be connected, in order to evaluate the energy quality indexes that BIEC can meet. Both BIEC topologies are formed by two single-phase full-bridge frequency inverters, connected to each other by the DC link, in which in the Delta UPQC topology it will operate in the dual compensation strategy, with the series converter operating as a current source and the parallel converter operating as a voltage source. Likewise, in the Back-to-Back topology, the converter connected to the power grid operates as a current source and the converter connected to the microgrid coupling point operates as a sinusoidal voltage source. The simulation and experimental results will be presented to evaluate and validate the operation of both topologies to meet the energy quality indices and the power flow between the conventional electrical grid and the AC microgrids, providing a basis for sizing the current source converters and voltage source.

Keywords: AC Microgrids, Bidirectional Grid Interface Converter, Back-to-Back, Delta UPQC.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1-1 – Esquema de uma Microrrede CA.....	22
Figura 1-2 – Esquema da conexão de um conversor eletrônico bidirecional de interligação entre uma rede elétrica e fontes renováveis e cargas.....	24
Figura 1-3 – Topologia Back-to-Back atuando como CEBI.....	25
Figura 1-4 – Topologia UPQC modo dual atuando como CEBI.....	28
Figura 3-1 – Diagrama de blocos do algoritmo p-PLL.....	47
Figura 3-2 – Diagrama de blocos do algoritmo SRF.....	49
Figura 3-3 – Circuito do Conversor Eletrônico Bidirecional de Interligação utilizado no trabalho: (a) Topologia Back-to-Back. (b) Topologia Delta UPQC.....	50
Figura 3-4 – Diagrama de blocos do controlador de corrente do conversor fonte de corrente.....	51
Figura 3-5 – Diagrama de blocos da transformada da corrente medida do conversor fonte de corrente em dois sinais contínuos.....	52
Figura 3-6 – Diagrama de blocos do controle do barramento CC.....	53
Figura 3-7 – Diagrama de blocos do controlador fonte de tensão.....	54
Figura 3-8 – Diagrama de blocos da transformação da tensão do conversor fonte de tensão para o eixo dq.....	55
Figura 3-9 – Diagrama de blocos da estimativa de corrente do capacitor do filtro do conversor fonte de tensão.....	56
Figura 3-10 – Diagrama de blocos da transformação das correntes para o eixo dq: (a) corrente da microrrede. (b) corrente do conversor fonte de tensão.....	57
Figura 3-11 – Circuito do emulador da fonte de geração distribuída controlado em corrente.....	57
Figura 3-12 – Diagrama de blocos da malha de controle do emulador de fonte de geração distribuída.....	58
Figura 4-1 – Curvas das potências aparentes normalizadas sem perdas do Back-to-Back: (a) conversor fonte de corrente. (b) conversor fonte de tensão.....	74
Figura 4-2 – Curvas das potências aparentes normalizadas sem perdas do conversor fonte de corrente do Back-to-Back: sem distorção na rede elétrica e fator de potência na microrrede unitário.....	75
Figura 4-3 – Curvas das potências aparentes normalizadas com perdas de 15% do Back-to-Back: (a) conversor fonte de corrente. (b) conversor fonte de tensão.....	76
Figura 4-4 – Curvas das potências aparentes normalizadas com perdas de 15% do conversor fonte de corrente do Back-to-Back: sem distorção na rede elétrica e fator de potência na microrrede unitário.....	77
Figura 4-5 – Curvas das potências aparentes normalizadas sem perdas do Delta UPQC: (a) conversor fonte de corrente. (b) conversor fonte de tensão.....	77
Figura 4-6 – Curvas das potências aparentes normalizadas com perdas de 15% do Delta UPQC: (a) conversor fonte de corrente. (b) conversor fonte de tensão.....	78
Figura 5-1 – Circuito utilizado em simulação da topologia B2B.....	81
Figura 5-2 – Circuito utilizado em simulação do emulador de GD.....	82
Figura 5-3 – Curvas de tensão e corrente da simulação do B2B: (a) tensão V_{REDE} (em vermelho) e da corrente i_{FC} (em azul). (b) tensão V_{MR} (em vermelho) e corrente i_{MR} (em azul). (c) tensão V_{REDE} (em vermelho) e tensão V_{MR} (em azul).....	82
Figura 5-4 – Curvas de tensão e corrente da topologia B2B no momento de conexão do emulador: (a) tensão V_{REDE} (em vermelho) e corrente i_{FC} (em azul). (b) tensão V_{MR} (em vermelho) e corrente i_{MR} (em azul). (c) tensão V_{MR} (em vermelho) e corrente i_{GD} (em azul). (d) corrente i_{FC} (em vermelho) e corrente i_{GD} (em azul).....	84

Figura 5-5 – Circuito utilizado em simulação da topologia Delta UPQC.	86
Figura 5-6 – Curvas de tensão e corrente da simulação do Delta UPQC: (a) tensão V_{REDE} (em vermelho) e da corrente i_{REDE} (em azul). (b) tensão V_{MR} (em vermelho) e corrente i_{MR} (em azul). (c) tensão V_{REDE} (em vermelho) e tensão V_{MR} (em azul). (d) tensão V_{1TRAFO} (em vermelho) e corrente i_{REDE} (em azul). (e) tensão V_{2TRAFO} (em vermelho) e corrente i_{FC} (em azul). (f) tensão V_{FT} (em vermelho) e corrente i_{FT} (em azul).	86
Figura 5-7 – Curvas de tensão e corrente da topologia Delta UPQC no momento de conexão do emulador: (a) tensão V_{REDE} (em vermelho) e corrente i_{FC} (em azul). (b) tensão V_{MR} (em vermelho) e corrente i_{MR} (em azul). (c) tensão V_{MR} (em vermelho) e corrente i_{GD} (em azul). (d) corrente i_{FC} (em vermelho) e corrente i_{GD} (em azul).	89
Figura 6-1 – Circuito implementado em protótipo da topologia B2B.	92
Figura 6-2 – Circuito implementado em protótipo da topologia Delta UPQC.	93
Figura 6-3 – Curvas de tensão (em amarelo com 50V/div) e corrente (em azul com 10A/div) em 5ms/div da topologia B2B: (a) Tensão V_{REDE} e corrente i_{FC} . (b) Tensão V_{REDE} e corrente i_{MR} . (c) Tensão V_{MR} e corrente i_{FC} . (d) Tensão e corrente i_{MR}	96
Figura 6-4 – Curvas de tensão (em amarelo com 50V/div) e corrente (em azul com 10A/div) em 5ms/div da topologia UPQC: (a) Tensão V_{REDE} e corrente i_{FC} . (b) Tensão V_{REDE} e corrente i_{MR} . (c) Tensão V_{MR} e corrente i_{FC} . (d) Tensão e corrente i_{MR}	97
Figura 6-5 – Circuito da carga não linear RC.	99
Figura 6-6 – Curvas de tensão (em amarelo com 50V/div) e corrente (em azul com 10A/div) em 5ms/div das duas topologias para carga não linear RC: (a) Tensão V_{REDE} e corrente i_{FC} do B2B. (b) Tensão V_{REDE} e corrente i_{REDE} do UPQC. (c) Tensão V_{MR} e corrente i_{MR} do B2B. (d) Tensão V_{MR} e corrente i_{MR} do UPQC.	99
Figura 6-7 – Circuito da carga não linear RL.	101
Figura 6-8 – Curvas de tensão (em amarelo com 50V/div) e corrente (em azul com 10A/div) em 5ms/div das duas topologias para carga não linear RL: (a) Tensão V_{REDE} e corrente i_{FC} do B2B. (b) Tensão V_{REDE} e corrente i_{REDE} do UPQC. (c) Tensão V_{MR} e corrente i_{MR} do B2B. (d) Tensão V_{MR} e corrente i_{MR} do UPQC.	101
Figura 6-9 – Curvas da tensão do barramento CC V_{bcc} (em amarelo com 50V/div) e corrente da rede i_{REDE} (em azul com 10A/div) em 100ms/div das duas topologias para carga linear: (a) na diminuição de carga (de 100% para 33%) para o B2B. (b) na diminuição de carga (de 100% para 33%) para o UPQC. (c) no aumento de carga (de 33% para 100%) para o B2B. (d) no aumento de carga (de 33% para 100%) para o UPQC.	103
Figura 6-10 – Curvas da tensão do barramento CC V_{bcc} (em amarelo com 50V/div) e corrente da carga i_{MR} (em azul com 10A/div) em 100ms/div das duas topologias para carga linear: (a) na diminuição de carga (de 100% para 33%) para o B2B. (b) na diminuição de carga (de 100% para 33%) para o UPQC. (c) no aumento de carga (de 33% para 100%) para o B2B. (d) no aumento de carga (de 33% para 100%) para o UPQC.	104
Figura 6-11 – Curvas da tensão do barramento CC V_{bcc} (em amarelo com 50V/div) e corrente da rede i_{REDE} (em azul com 10A/div) em 100ms/div das duas topologias para carga não linear RL: (a) na diminuição da carga resistiva (de 100% para 50%) para o B2B. (b) na diminuição da carga resistiva (de 100% para 50%) para o UPQC. (c) no aumento da carga resistiva (de 100% para 50%) para o B2B. (d) no aumento da carga resistiva (de 100% para 50%) para o UPQC.	105
Figura 6-12 – Curvas da tensão do barramento CC V_{bcc} (em amarelo com 50V/div) e corrente da carga i_{MR} (em azul com 10A/div) em 100ms/div das duas topologias para carga não linear RL: (a) na diminuição da carga resistiva (de 100% para 50%) para o B2B. (b) na diminuição da carga resistiva (de 100% para 50%) para o UPQC. (c) no aumento da carga resistiva (de 100% para 50%) para o B2B. (d) no aumento da carga resistiva (de 100% para 50%) para o UPQC.	106

Figura 6-13 – Curvas de tensão (em amarelo com 50V/div) e corrente (em azul com 5A/div) em 5ms/div do B2B para $V_{REDE}=101,8$ V: (a) Tensão V_{REDE} e corrente i_{FC} . (b) Tensão v_{MR} e corrente i_{MR} .	109
Figura 6-14 – Curvas das potências normalizadas do B2B para $V_{REDE} = 101,8$ V e carga linear: (a) Conversor fonte de corrente. (b) Conversor fonte de tensão.	109
Figura 6-15 – Curvas de tensão (em amarelo com 50V/div) e corrente (em azul com 5A/div) em 5ms/div do B2B para $V_{REDE}=108,2$ V: (a) Tensão V_{REDE} e corrente i_{FC} . (b) Tensão v_{MR} e corrente i_{MR} .	110
Figura 6-16 – Curvas das potências normalizadas do B2B para $V_{REDE} = 108,2$ V e carga linear: (a) Conversor fonte de corrente. (b) Conversor fonte de tensão.	110
Figura 6-17 – Curvas de tensão (em amarelo com 50V/div) e corrente (em azul com 5A/div) em 5ms/div do B2B para $V_{REDE}=146,4$ V: (a) Tensão V_{REDE} e corrente i_{FC} . (b) Tensão v_{MR} e corrente i_{MR} .	111
Figura 6-18 – Curvas das potências normalizadas do B2B para $V_{REDE} = 146,4$ V e carga linear: (a) Conversor fonte de corrente. (b) Conversor fonte de tensão.	111
Figura 6-19 – Curvas de tensão (em amarelo com 50V/div) e corrente (em azul com 5A/div) em 5ms/div do B2B para $V_{REDE}=152,7$ V: (a) Tensão V_{REDE} e corrente i_{FC} . (b) Tensão v_{MR} e corrente i_{MR} .	112
Figura 6-20 – Curvas das potências normalizadas do B2B para $V_{REDE} = 152,7$ V e carga linear: (a) Conversor fonte de corrente. (b) Conversor fonte de tensão.	112
Figura 6-21 – Curvas de tensão (em amarelo com 50V/div) e corrente (em azul com 10A/div) em 5ms/div do B2B para $V_{REDE}=101,8$ V: (a) Tensão V_{REDE} e corrente i_{FC} . (b) Tensão v_{MR} e corrente i_{MR} .	114
Figura 6-22 – Curvas das potências normalizadas do B2B para $V_{REDE} = 101,8$ V e carga não linear RL: (a) Conversor fonte de corrente. (b) Conversor fonte de tensão.	114
Figura 6-23 – Curvas de tensão (em amarelo com 50V/div) e corrente (em azul com 10A/div) em 5ms/div do B2B para $V_{REDE}=108,6$ V: (a) Tensão V_{REDE} e corrente i_{FC} . (b) Tensão v_{MR} e corrente i_{MR} .	115
Figura 6-24 – Curvas das potências normalizadas do B2B para $V_{REDE} = 108,6$ V e carga não linear RL: (a) Conversor fonte de corrente. (b) Conversor fonte de tensão.	115
Figura 6-25 – Curvas de tensão (em amarelo com 50V/div) e corrente (em azul com 10A/div) em 5ms/div do B2B para $V_{REDE}=146,3$ V: (a) Tensão V_{REDE} e corrente i_{FC} . (b) Tensão v_{MR} e corrente i_{MR} .	116
Figura 6-26 – Curvas das potências normalizadas do B2B para $V_{REDE} = 146,3$ V e carga não linear RL: (a) Conversor fonte de corrente. (b) Conversor fonte de tensão.	116
Figura 6-27 – Curvas de tensão (em amarelo com 50V/div) e corrente (em azul com 10A/div) em 5ms/div do B2B para $V_{REDE}=152,6$ V: (a) Tensão V_{REDE} e corrente i_{FC} . (b) Tensão v_{MR} e corrente i_{MR} .	117
Figura 6-28 – Curvas das potências normalizadas do B2B para $V_{REDE} = 152,6$ V e carga não linear RL: (a) Conversor fonte de corrente. (b) Conversor fonte de tensão.	117
Figura 6-29 – Curvas de tensão (em amarelo com 50V/div) e corrente (em azul com 5A/div) em 5ms/div do UPQC para $V_{REDE} = 101,8$ V: (a) Tensão V_{REDE} e corrente i_{REDE} . (b) Tensão v_{MR} e corrente i_{MR} . (c) Tensão V_{1TRAFO} e corrente i_{REDE} . (d) Tensão V_{2TRAFO} e corrente i_{FC} . (e) Tensão v_{FT} e corrente i_{FT} .	119
Figura 6-30 – Curvas das potências normalizadas do UPQC para $V_{REDE} = 101,8$ V e carga linear: (a) Conversor fonte de corrente. (b) Conversor fonte de tensão.	120
Figura 6-31 – Curvas de tensão (em amarelo com 50V/div) e corrente (em azul com 5A/div) em 5ms/div do UPQC para $V_{REDE} = 108,1$ V: (a) Tensão V_{REDE} e corrente i_{REDE} . (b) Tensão v_{MR} e corrente i_{MR} . (c) Tensão V_{1TRAFO} e corrente i_{REDE} . (d) Tensão V_{2TRAFO} e corrente i_{FC} . (e) Tensão v_{FT} e corrente i_{FT} .	120

Figura 6-32 – Curvas das potências normalizadas do UPQC para $v_{REDE} = 108,1$ V e carga linear: (a) Conversor fonte de corrente. (b) Conversor fonte de tensão.....	121
Figura 6-33 – Curvas de tensão (em amarelo com 50V/div) e corrente (em azul com 5A/div) em 5ms/div do UPQC para $v_{REDE} = 146,3$ V: (a) Tensão v_{REDE} e corrente i_{REDE} . (b) Tensão v_{MR} e corrente i_{MR} . (c) Tensão v_{1TRAFO} e corrente i_{REDE} . (d) Tensão v_{2TRAFO} e corrente i_{FC} . (e) Tensão v_{FT} e corrente i_{FT}	122
Figura 6-34 – Curvas das potências normalizadas do UPQC para $v_{REDE} = 146,3$ V e carga linear: (a) Conversor fonte de corrente. (b) Conversor fonte de tensão.....	123
Figura 6-35 – Curvas de tensão (em amarelo com 50V/div) e corrente (em azul com 5A/div) em 5ms/div do UPQC para $v_{REDE} = 152,8$ V: (a) Tensão v_{REDE} e corrente i_{REDE} . (b) Tensão v_{MR} e corrente i_{MR} . (c) Tensão v_{1TRAFO} e corrente i_{REDE} . (d) Tensão v_{2TRAFO} e corrente i_{FC} . (e) Tensão v_{FT} e corrente i_{FT}	123
Figura 6-36 – Curvas das potências normalizadas do UPQC para $v_{REDE} = 152,8$ V e carga linear: (a) Conversor fonte de corrente. (b) Conversor fonte de tensão.....	124
Figura 6-37 – Curvas de tensão (em amarelo com 50V/div) e corrente (em azul com 5A/div) em 5ms/div do UPQC para $v_{REDE} = 101,8$ V: (a) Tensão v_{REDE} e corrente i_{REDE} . (b) Tensão v_{MR} e corrente i_{MR} . (c) Tensão v_{1TRAFO} e corrente i_{REDE} . (d) Tensão v_{2TRAFO} e corrente i_{FC} . (e) Tensão v_{FT} e corrente i_{FT}	125
Figura 6-38 – Curvas das potências normalizadas do UPQC para $v_{REDE} = 101,8$ V e carga não linear RL: (a) Conversor fonte de corrente. (b) Conversor fonte de tensão.....	126
Figura 6-39 – Curvas de tensão (em amarelo com 50V/div) e corrente (em azul com 5A/div) em 5ms/div do UPQC para $v_{REDE} = 108,2$ V: (a) Tensão v_{REDE} e corrente i_{REDE} . (b) Tensão v_{MR} e corrente i_{MR} . (c) Tensão v_{1TRAFO} e corrente i_{REDE} . (d) Tensão v_{2TRAFO} e corrente i_{FC} . (e) Tensão v_{FT} e corrente i_{FT}	126
Figura 6-40 – Curvas das potências normalizadas do UPQC para $v_{REDE} = 108,2$ V e carga não linear RL: (a) Conversor fonte de corrente. (b) Conversor fonte de tensão.....	127
Figura 6-41 – Curvas de tensão (em amarelo com 50V/div) e corrente (em azul com 5A/div) em 5ms/div do UPQC para $v_{REDE} = 146,4$ V: (a) Tensão v_{REDE} e corrente i_{REDE} . (b) Tensão v_{MR} e corrente i_{MR} . (c) Tensão v_{1TRAFO} e corrente i_{REDE} . (d) Tensão v_{2TRAFO} e corrente i_{FC} . (e) Tensão v_{FT} e corrente i_{FT}	128
Figura 6-42 – Curvas das potências normalizadas do UPQC para $v_{REDE} = 146,4$ V e carga não linear RL: (a) Conversor fonte de corrente. (b) Conversor fonte de tensão.....	129
Figura 6-43 – Curvas de tensão (em amarelo com 50V/div) e corrente (em azul com 5A/div) em 5ms/div do UPQC para $v_{REDE} = 152,8$ V: (a) Tensão v_{REDE} e corrente i_{REDE} . (b) Tensão v_{MR} e corrente i_{MR} . (c) Tensão v_{1TRAFO} e corrente i_{REDE} . (d) Tensão v_{2TRAFO} e corrente i_{FC} . (e) Tensão v_{FT} e corrente i_{FT}	129
Figura 6-44 – Curvas das potências normalizadas do UPQC para $v_{REDE} = 152,8$ V e carga não linear RL: (a) Conversor fonte de corrente. (b) Conversor fonte de tensão.....	130
Figura 6-45 – Fluxo de potência na topologia Back-to-Back.....	133
Figura 6-46 – Fluxo de potência na topologia Delta UPQC para $v_{REDE} = 101,8$ V.....	135
Figura 6-47 – Fluxo de potência na topologia Delta UPQC para $v_{REDE} = 146,3$ V.....	136
Figura 6-48 – Fluxo de potência na topologia Delta UPQC para $v_{REDE} = 152,8$ V.....	137
Figura 6-49 – Curvas dos ábacos de corrente do Back-to-Back: (a) do conversor fonte de corrente. (b) do conversor fonte de tensão.	139
Figura 6-50 – Curvas dos ábacos de corrente do Delta UPQC: (a) do conversor fonte de corrente. (b) do conversor fonte de tensão.	140

LISTA DE QUADROS

Quadro 2.1 – Limites de distorções harmônicas totais (em % da tensão fundamental).....	39
Quadro 2.2 – Limite de distorção da tensão.	40
Quadro 2.3 – Limite de distorção de corrente para sistemas com tensão entre 120 V e 69 kV.	41
Quadro 3.1 – Especificações técnicas dos elementos utilizados no sistema em estudo.	59
Quadro 3.2 – Valores dos ganhos dos controladores utilizados nas malhas de controle.	60
Quadro 4.1 – Casos analisados de fluxo de potência para comparação do comportamento das topologias estudadas.	79
Quadro 5.1 – Valores medidos na simulação do B2B drenando corrente da rede elétrica....	83
Quadro 5.2 – Valores medidos na simulação do B2B injetando corrente da rede elétrica. ...	85
Quadro 5.3 – Valores medidos na simulação do UPQC drenando corrente da rede elétrica.87	
Quadro 5.4 – Valores medidos para os conversores Fonte de Corrente e Fonte de Tensão na simulação do UPQC drenando corrente da rede elétrica.	88
Quadro 5.5 – Valores medidos na simulação do UPQC injetando corrente na rede elétrica.90	
Quadro 6.1 – Ensaio experimental realizado no protótipo.....	94
Quadro 6.2 – Valores medidos na operação das topologias em protótipo para carga linear.98	
Quadro 6.3 – Valores medidos na operação das topologias em protótipo para carga não linear RC.....	100
Quadro 6.4 – Valores medidos na operação das topologias em protótipo para carga não linear RL.	102
Quadro 6.5 – Valores medidos do B2B para carga linear e $V_{REDE}=101,8$ V.....	109
Quadro 6.6 – Valores medidos do B2B para carga linear e $V_{REDE}=108,2$ V.....	110
Quadro 6.7 – Valores medidos do B2B para carga linear e $V_{REDE}=146,4$ V.....	111
Quadro 6.8 – Valores medidos do B2B para carga linear e $V_{REDE}=152,7$ V.....	112
Quadro 6.9 – Valores medidos do B2B para carga não linear RL e $V_{REDE}=101,8$ V.....	114
Quadro 6.10 – Valores medidos do B2B para carga não linear RL e $V_{REDE}=108,6$ V.....	115
Quadro 6.11 – Valores medidos do B2B para carga não linear RL e $V_{REDE}=146,3$ V.....	116
Quadro 6.12 – Valores medidos do B2B para carga não linear RL e $V_{REDE}=152,6$ V.....	117
Quadro 6.13 – Valores medidos do UPQC para carga linear e $V_{REDE}=101,8$ V.....	119
Quadro 6.14 – Valores medidos do UPQC para carga linear e $V_{REDE}=108,1$ V.....	121
Quadro 6.15 – Valores medidos do UPQC para carga linear e $V_{REDE}=146,3$ V.....	122
Quadro 6.16 – Valores medidos do UPQC para carga linear e $V_{REDE}=152,8$ V.....	124
Quadro 6.17 – Valores medidos do UPQC para carga não linear RL e $V_{REDE}=101,8$ V.....	125
Quadro 6.18 – Valores medidos do UPQC para carga não linear RL e $V_{REDE}=108,2$ V.....	127
Quadro 6.19 – Valores medidos do UPQC para carga não linear RL e $V_{REDE}=146,4$ V.....	128
Quadro 6.20 – Valores medidos do UPQC para carga não linear RL e $V_{REDE}=152,8$ V.....	130
Quadro 6.21 – Valores medidos da rede elétrica para o B2B sem carga.....	132
Quadro 6.22 – Valores medidos da rede elétrica para o UPQC sem carga.....	132
Quadro 6.23 – Variáveis medidas dos conversores fonte de corrente e fonte de tensão das duas topologias para carga linear, conectados na rede elétrica.	138
Quadro 6.24 – Relação entre as correntes dos conversores com a corrente da microrrede.	141
Quadro 6.25 – Preço das chaves utilizadas no Back-to-Back em função da potência da carga.	142
Quadro 6.26 – Preço das chaves utilizadas no Delta UPQC em função da potência da carga.	142

Quadro 6.27 – Diferenças gerais entre as topologias Back-to-Back e Delta UPQC. 144

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

A	Ampère
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
BGIC	<i>Bidirectional Grid Interface Converter</i>
B2B	<i>Back-to-Back</i>
C	Capacitor
CA	Corrente alternada
CC	Corrente contínua
CEBI	Conversor Eletrônico Bidirecional de Interligação
cos	Cosseno
d	Razão cíclica
DSP	<i>Digital Signal Processor</i> (Processador Digital de Sinais)
EMI	Interferência eletromagnética
FC	Fonte de Corrente
FP	Fator de Potência
FPB	filtro passa-baixa
FT	Fonte de Tensão
GD	Geração Distribuída
Hz	Hertz
I	Corrente
IEC	International Electrotechnical Commission
IEEE	<i>Institute of Electrical and Electronics Engineers</i>
IHD	<i>Individual Harmonic Distortion</i> (DIT – Distorção harmônica individual)
K_{PWM}	Ganho do PWM
L	Indutor
MR	Microrrede
P	Proporcional
PAC	Ponto de Acoplamento Comum, ou PCC – Point of Common Coupling
PI	Proporcional Integrativo
PLL	<i>Phase Locked Loop</i>
PWM	<i>Pulse Width Modulation</i> (Modulação por Largura de Pulso)
R	Resistor
RMS	<i>Root Mean Square</i>
S	Potência Aparente

SCR	<i>Silicon Controlled Rectifier</i> (retificadores controlados de silício)
sen	Seno
SRF	<i>Synchronous Reference Frame</i>
SST	<i>Solid State Transformer</i> (Transformador de Estado Sólido)
THD	<i>Total Harmonic Distortion</i> (DTT – Distorção harmônica total)
Trafo	Transformador
UPQC	<i>Unified Power Quality Conditioner</i>
UPS	<i>Uninterruptible power supply</i>
V	Volts (ou tensão)
VA	Volt-Ampère
VSC	<i>Voltage Source Converter</i>
VTCD	Variação de tensão de curta duração
W	Watts
μR	Microrrede

Sumário

1. INTRODUÇÃO	19
1.1 Microrredes Elétricas	20
1.2 Conversores Bidirecionais de Interligação	23
1.2.1 Back-to-Back no contexto de microrredes	25
1.2.2 UPQC no contexto de microrredes	27
1.3 Objetivos	29
1.4 Contribuição e relevância do trabalho	30
1.5 Organização do trabalho	32
2. PROBLEMAS DE QUALIDADE DE ENERGIA NO AMBIENTE DE MICRORREDES	34
2.1 Considerações finais do capítulo	43
3. SISTEMAS DE INTERLIGAÇÃO ENTRE MICRORREDES E REDE DA CONCESSIONÁRIA	45
3.1 Transformada de Clarke e Park	45
3.2 PLL (<i>Phase Locked Loop</i>)	46
3.3 SRF (<i>Synchronous Reference Frame</i>)	48
3.4 Conversores Fonte de Corrente e Fonte de Tensão	49
3.5 Fonte de geração distribuída emulada	57
3.6 Parâmetros das malhas de controle	58
3.7 Considerações finais do capítulo	60
4. FLUXO DE POTÊNCIA	62
4.1 Fluxo de Potência do Back-to-Back	65
4.2 Fluxo de Potência do Delta UPQC	67
4.3 Curvas do fluxo de potência das topologias	74
4.4 Considerações finais do capítulo	80
5. RESULTADOS DE SIMULAÇÃO	81
5.1 Simulação com o Back-to-Back	81
5.2 Simulação com o Delta UPQC	85
5.3 Considerações finais do capítulo	90
6. RESULTADOS EXPERIMENTAIS	92
6.1 Carga linear resistiva	95
6.2 Carga não linear RC	98
6.3 Carga não linear RL	100
6.4 Resultados dinâmicos	102
6.5 Variação da tensão de entrada	106

6.6	Operação sem carga	131
6.7	Fluxo de potência do Back-to-Back e da UPQC	133
6.8	Dimensionamento dos conversores	138
6.9	Comparativo entre Back-to-Back e Delta UPQC	143
6.10	Considerações finais do capítulo	145
7.	CONCLUSÃO E DISCUSSÃO	146
7.1	Proposta de continuidade	148
	APÊNDICE A – Modelagem dos conversores	149
9.1	Modelagem do conversor fonte de corrente	149
9.2	Modelagem do barramento CC	153
9.3	Modelagem do conversor fonte de tensão	155
9.4	Modelagem do emulador fonte de corrente	160
	APÊNDICE B – Projeto dos Controladores	162
10.1	Projeto do controlador PI de corrente do conversor fonte de corrente	164
10.2	Projeto do controlador PI de tensão do barramento CC	166
10.3	Projeto do controlador P de corrente do conversor fonte de tensão	169
10.4	Projeto do controlador PI de tensão do conversor fonte de tensão	170
10.5	Projeto do controlador PI de corrente do emulador de geração distribuída	173
	APÊNDICE C – FOTO DO PROTÓTIPO	176
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	177

1. INTRODUÇÃO

A energia elétrica é o combustível de desenvolvimento de um país e de uma sociedade, e juntamente com o desenvolvimento de tecnologias, de produtos e de máquinas, essa demanda por energia elétrica por consumidores residenciais, comerciais e industriais vem exigindo que seja disponibilizado uma quantidade maior de energia elétrica, ao mesmo tempo que essa energia seja de qualidade.

Além desse aumento pela demanda de energia elétrica, há uma constante preocupação com o meio ambiente, em que os países estão investindo cada vez mais em soluções e tecnologias com energia renováveis e limpa. Com isso, os países tem trabalhado para suprir essa demanda de energia sem provocar altos impactos sociais e ambientais, evitando a construção de usinas hidrelétrica ou a operação de usinas de carvão (CARVALHO, 2010).

A disponibilidade energética de uma localidade depende de diversos fatores, como a matriz energética e da capacidade de distribuição dessa energia. Conseqüentemente, a matriz energética dos países dependem da disponibilidade de recursos naturais, da sua geografia e da tecnologia à sua disposição para converter as fontes de energias disponíveis em energia elétrica.

A matriz energética do Brasil é predominantemente hidrelétrica, em que no final de 2021, a energia hidrelétrica correspondeu à 53,4% da geração total da matriz energética brasileira, seguida do gás natural (12,8%), logo após a geração eólica com 10,6% e o restante distribuído em, biomassa (8,2%), derivados de petróleo (3,5%), carvão (3,4%), solar (2,5%) e outros (5,6%), de um total de 679,2 TWh (EPE, 2022).

O sistema de geração e transmissão de energia elétrica envolve grandes usinas geradoras implantadas em locais distantes do ponto de consumo final, trazendo um alto custo na transmissão e perdas dessa energia, além da dificuldade de implementação de outras grandes usinas por questões econômicas e ecológicas.

Ainda, de acordo com RIBEIRO (2015), com o aprimoramento e avanço da tecnologia, há um aumento de cargas não lineares ligadas à rede elétrica, demandando uma preocupação relacionada à qualidade de energia no sistema elétrico de potência.

Diante da problemática da necessidade de aumento da disponibilidade de energia elétrica e do fornecimento de uma energia elétrica de qualidade e confiável, tem surgido a possibilidade de integrar o uso das fontes renováveis de energia, como

sistemas eólicos, fotovoltaicos, células combustíveis, biomassa e microturbinas, ao sistema elétrico já existente, por pequenas usinas mais eficientes, instaladas próximas aos centros de carga, evitando a sobrecarga e as perdas no sistema de transmissão e garantindo a qualidade e confiabilidade da energia nos pontos de consumo (MOHAN, 2014).

Diante disso, LASSETER (2002) mostra que uma microrrede elétrica vem auxiliar na resolução dessa problemática, fornecendo uma forma de operar essas fontes de energia renovável, conhecida como fontes de geração distribuída, de maneira integrada, se comportando como uma célula de geração de energia para a concessionária, e ao mesmo tempo atendendo as necessidades do consumidor local de energia, como confiabilidade local, reduzindo perdas, fornecendo uma tensão senoidal e sem afundamentos e elevações.

1.1 Microrredes Elétricas

A proposta da microrrede surgiu nos Estados Unidos com a finalidade de se obter um melhor aproveitamento das fontes de energias renováveis, de fornecer para as cargas uma energia elétrica de qualidade e evitar que distúrbios sejam transmitidos para a rede de distribuição (ZOA. et al, 2004).

O conceito de microrrede foi apresentada por LASSETER (2001) como uma proposta para aproveitar a estrutura de residências, plantas industriais e de prédios comerciais para aumentar a eficiência da geração de energia. A microrrede consiste em um conjunto de pequenas fontes de geração de energia, sistemas de armazenamento de energia e cargas.

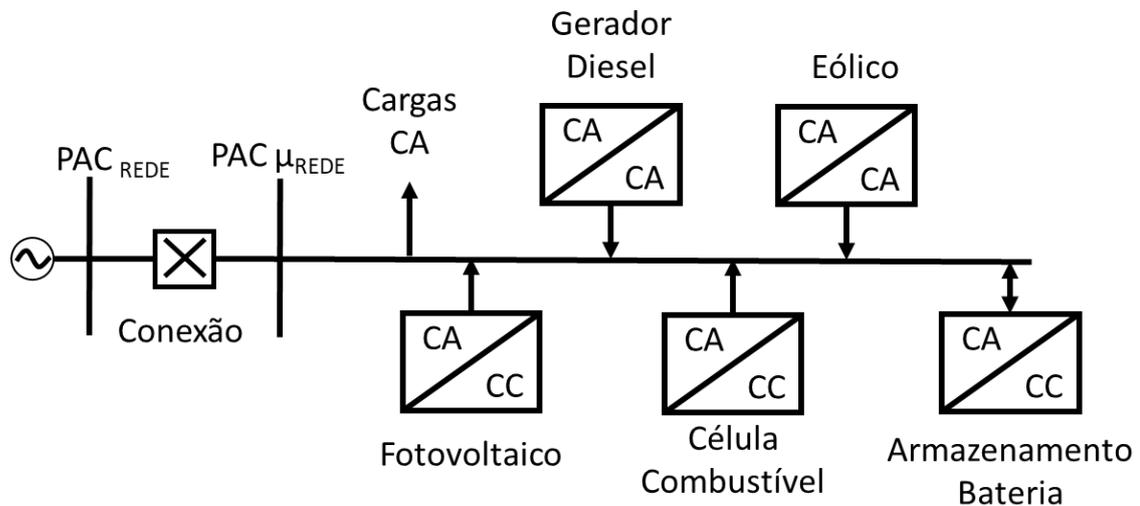
Uma microrrede é um subsistema formado por pequenas fontes de gerações de energia (denominadas fontes de geração distribuída) que, na sua maioria, são painéis fotovoltaicos e pequenos geradores eólicos, além de conter cargas conectadas em um ponto de acoplamento comum (PAC) com as fonte de geração de energia. O PAC da microrrede é responsável por mantê-la conectada à rede da concessionária em condições normais, ou garantir a desconexão da microrrede diante de distúrbios, ou situações adversas, ou de eventos programados na rede da concessionária, formando um subsistema em operação isolada (CHOWDHURY. et al, 2009).

Além da funcionalidade de uma microrrede, ela auxilia a resolver um problema da geração distribuída (GD), ocasionada pela operação das fontes de geração distribuída (VASCONCELOS. et al, 2015). A conexão de uma GD na rede elétrica existente pode ocasionar a perda da coordenação entre religadores automáticos e a perda da sua sensibilidade, causando gradientes de tensão e deslocamento de fase, podendo ocasionar alteração no funcionamento de dispositivos de proteção contra curto-circuito e prejudicar o funcionamento de equipamentos unidirecionais inseridos na rede, entre outros (NAIEM, et al, 2012; COSTA, 2019).

As microrredes podem ser classificadas de acordo com a técnica para distribuição da energia, podendo ser transmitida em corrente alternada (CA), corrente contínua (CC) ou de forma híbrida, em que é utilizado as duas tecnologias simultaneamente (PLANAS. et al, 2015). As microrredes CC estão ganhando espaço por terem o seu controle facilitado pela não existência de potência reativa e da não necessidade de controle de frequência (UNAMUNO; BARRENA, 2015). As microrredes híbridas combinam características das arquiteturas CA e CC, no entanto, a microrrede CC e híbrida apresentam algumas desvantagens, como os dispositivos de proteção que não estão totalmente desenvolvidos, uma menor confiabilidade do sistema e a complexidade no gerenciamento e controle da microrrede (UNAMUNO; BARRENA, 2015).

Já a maioria das aplicações de microrrede são do tipo CA, devido as suas características de funcionamento e sua facilidade na utilização da infraestrutura atual do sistema elétrico de potência, da utilização dos dispositivos de manobra, de medição e de proteção que possuem seu desenvolvimento conceituado e por terem um baixo custo, quando comparados aos dispositivos CC (PATRAO. et al, 2015). Na Figura 1.1 é possível observar um exemplo de uma estrutura de uma microrrede CA.

Figura 1-1 – Esquema de uma Microrrede CA.



Fonte: Autor.

Na Figura 1.1 pode ser visto que uma microrrede possui geradores de energia e pode possuir elementos armazenadores de energia, podendo operar no modo conectado à rede elétrica, ou no modo desconectado, conhecido também como forma ilhada, em que a energia necessária para as cargas dependem da disponibilidade de energia. A conexão entre a rede elétrica e a microrrede é realizada por um elemento de conexão, que é apresentado na literatura algumas alternativas.

De acordo com NIKKHAJOEI (2007), a mudança no modo de operação pode ser feita por um semicondutor, conhecido como chave estática. Quando a microrrede está conectada na rede elétrica, pode haver a bidirecionalidade do fluxo de potência, em que uma carga no PAC da microrrede pode ser alimentada pela rede elétrica, ou a energia produzida pela microrrede pode ser injetada na rede elétrica. Caso haja algum distúrbio na rede elétrica principal, a chave estática é desconectada e a microrrede passa a ser alimentada pelas fontes de geração distribuída (GD) e armazenadores de energia.

Como desvantagem, a chave estática não permite oscilações de frequência, não permitindo uma conexão assíncrona entre a rede principal e a microrrede, nem permitindo o afundamento de tensão, fazendo a desconexão da microrrede com a rede elétrica principal na presença desses eventos e diminuindo a confiabilidade (BORGES, 2010).

A chave estática é projetada como alternativa para proteger a microrrede e para abrir em todas as falhas. Como ela faz a desconexão da rede elétrica com a

microrrede, as falhas causadas internamente da microrrede precisam ser corrigidas por outras técnicas, em que o autor NIKKHAJOEI (2007) conclui que é necessário avançar em busca de tecnologias mais robustas e flexíveis na conexão das duas redes.

Ainda em DONG, et al (2013), é citado que pelo fato das fontes de geração distribuída possuírem uma dinâmica variável, exigindo mudanças bruscas de cargas e ocasionando um desgaste maior dos equipamentos mecânicos do sistema, os conversores eletrônicos vem solucionando esses e outros problemas, que são utilizados para desacoplar as redes e evitar problemas transitórios da rede elétrica e da microrrede.

Os conversores eletrônicos utilizados entre a rede elétrica e a microrrede possuem as funções de realizar a operação de fluxo de potência bidirecional, realizar o desacoplamento dinâmico dos sistemas, possuindo a capacidade de interrupção de correntes em falha e, podem possuir, funções inteligentes de medição e comunicação (BOROYEVICH. et al, 2010).

1.2 Conversores Bidirecionais de Interligação

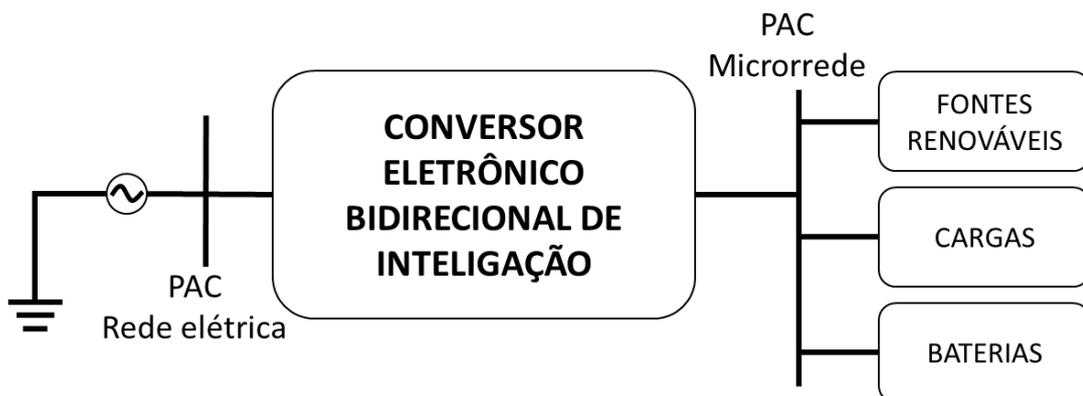
Devido as características das microrredes elétricas CA, elas podem ser conectadas na rede elétrica (GUPTA, et al. 2018) de forma direta por uma chave estática, como é apresentado em diversos trabalhos (RAJESH, et al, 2017; XU, et al, 2013; JIN, et al, 2012; LASSETER, 2002), ou por um rele de admitância (DEWADASA, et al, 2009), ou ainda por um conversor eletrônico com transformador de alta frequência, conhecido como SST (Solid State Transformer - Transformador de Estado Sólido), como abordado em alguns trabalhos (ZHAO, et al. 2012; MERWE, MOUTON, 2009; RODRIGUES, et al. 2016). No entanto, como discutido, as chaves estáticas apresentam algumas limitações, as quais são solucionadas na conexão da rede elétrica principal com a microrrede por um conversor eletrônico bidirecional.

O conversor eletrônico bidirecional de interface (conhecido também como BGIC – *Bidirectional Grid Interface Converter*) serve para solucionar problemas de qualidade de energia, realizando a troca de energia entre a rede elétrica e a microrrede, além de manter estável o fornecimento de energia para as cargas durante intermitências ocasionadas na rede elétrica convencional ou na microrrede.

De acordo com os trabalhos publicados na área (BACON, 2020; SUN. et al, 2017; DONG. et al, 2013; MICALLEF. et al, 2015), os conversores eletrônicos bidirecionais tem apresentado as seguintes funções: i) controle do fluxo bidirecional de energia; ii) suavização das intermitências dinâmicas causadas pelas fontes renováveis da microrrede; iii) medição e comunicação; iv) melhora da qualidade de energia; v) de comutação entre o modo conectado e o modo ilhado sem interrupção no fornecimento de energia.

A Figura 1.2 apresenta o esquema de ligação de uma microrrede, com suas cargas, conectadas à rede elétrica principal por meio de um conversor bidirecional eletrônico.

Figura 1-2 – Esquema da conexão de um conversor eletrônico bidirecional de interligação entre uma rede elétrica e fontes renováveis e cargas.



Fonte: o autor.

Na Figura 1.2 é mostrado um esquema em diagrama de blocos, sendo que o PAC da Microrrede, para o caso em estudo, é em CA e as fontes renováveis e baterias devem possuir um conversor para adequar o tipo de corrente e os níveis de tensão no PAC da microrrede.

Esses conversores bidirecionais podem ter uma isolação galvânica entre a rede elétrica principal (EVERTS. et al, 2014), ou serem não isolados (MAJUMDER, 2014). Os conversores com isolação galvânica operam em alta frequência, como é o caso dos SSTs, e a isolação em altas frequências requerem mais estágios de conversão de energia, maior quantidade de componentes, ocasionando no aumento dos custos e redução da eficiência devido as perdas nos diversos estágios de conversão (DONG. et al, 2013).

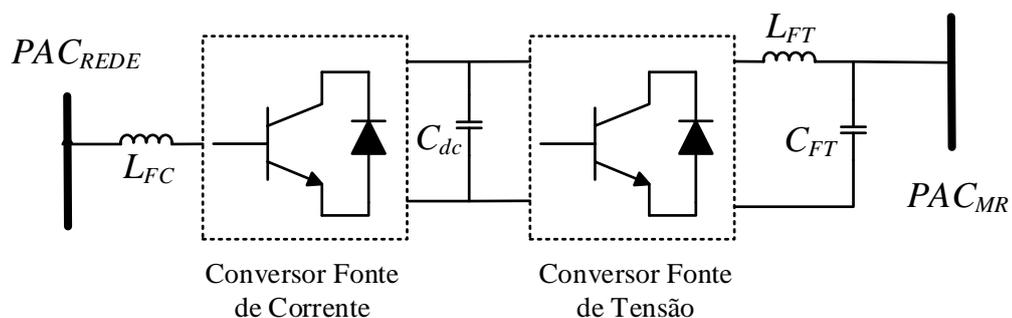
Os conversores eletrônicos bidirecionais de interligação não isolados galvanicamente é uma opção mais econômica, mais eficiente e que apresentam uma maior confiabilidade, comparados com os conversores com isolação galvânica (DONG. et al, 2013). Podemos citar duas topologias não isoladas que são utilizadas na interligação da microrrede com a rede elétrica principal. Temos a topologia na configuração Back-to-Back (B2B), que é composto por dois conversores que compartilham o mesmo barramento CC, utilizado em alguns trabalhos (SEKHAVATMANESH; et al, 2015. NUTKANI; et al, 2013. HUANG; et al, 2021; ORDONO, et al, 2019). A outra topologia utilizada como conversor bidirecional de interligação é a topologia UPQC dual, que nesse trabalho será denominado como Delta UPQC. Essa topologia também vem sendo aplicado em diversos trabalhos com microrrede (BACON; et al, 2022. SREENIVASULU; et al, 2020. SILVA, 2001. CAMPANHOL, 2017).

Ambas as topologias podem ser utilizadas para realizar a interligação da rede elétrica com a microrrede, promovendo o condicionamento ativo de energia, mantendo uma corrente senoidal drenada da rede elétrica e fornecendo uma tensão senoidal para as cargas no barramento da microrrede.

1.2.1 Back-to-Back no contexto de microrredes

A topologia do conversor bidirecional B2B é composto por dois conversores de tensão VSC (*Voltage Source Converter – Conversor Fonte de Tensão*), conectados pelo barramento CC, de forma que um fique de costas para o outro. A Figura 1.3 mostra o esquema de ligação do B2B como conversor bidirecional de interligação.

Figura 1-3 – Topologia Back-to-Back atuando como CEBI.



Fonte: o autor.

Como o conversor B2B consiste de dois conversores de tensão PWM (*Pulse Width Modulation* – Modulação por Largura de Pulso) interconectados por um acoplamento capacitivo C_{dc} . O primeiro conversor, que se encontra conectado no PAC da rede elétrica, atua como uma fonte de corrente, de forma a drenar ou injetar uma corrente senoidal na rede elétrica. O segundo conversor, que está ligado no PAC da microrrede, atua como uma fonte de tensão, mantendo uma fonte de tensão puramente senoidal em seu terminais.

No primeiro conversor, conectado na rede elétrica, há um filtro indutivo L_{FC} de acoplamento, que faz a filtragem e o acoplamento da corrente da rede elétrica. O segundo conversor, conectado no barramento da microrrede possui um filtro indutivo-capacitivo $L_{FT}C_{FT}$ de forma a realizar a filtragem de uma tensão senoidal no ponto de acoplamento da microrrede.

A bidirecionalidade do conversor Back-to-Back depende da quantidade de energia produzida pela microrrede e consumida pelas cargas. Quando a energia elétrica produzida pela microrrede for maior que a energia consumida nas cargas, o excesso é injetado na rede elétrica principal pelo conversor conectado na rede elétrica. No entanto, quando a energia exigida pelas cargas é maior que a geração da microrrede, o conversor conectado à rede drena uma corrente da rede elétrica para suprir a energia exigida pela carga. Em ambos os casos de operação, a energia passa integralmente pelos dois inversores que compõem o B2B.

O conversor Back-to-Back tem sido utilizado no gerenciamento de energia gerado por microrredes, como em MALEKI; et al (2014) em que é realizado simulações onde ele é utilizado para controlar o fluxo de potência entre a geração da microrrede e a rede elétrica principal quando há distúrbios na frequência da microrrede na variação das fontes de energia da microrrede.

Em CHOUDHARY; POTE (2013) é mostrado uma aplicação do conversor Back-to-Back, em que o conversor isola a frequência entre a rede elétrica e a microrrede, além de compensar a potência reativa das cargas. No trabalho de SUSANTO; et al (2014) o conversor B2B é utilizado para gerenciar o fluxo de energia entre duas microrredes, controlando a frequência em casos de sobrecargas ou falhas na geração de energia em qualquer uma das microrredes.

Em MAJUMDER; et al (2010) é mostrado a aplicação de uma microrrede em conjunto com a rede elétrica, em que a microrrede fornece energia para as cargas, e quando a corrente exigida pelas cargas é maior que a quantidade que a microrrede

pode fornecer, a rede elétrica fornece o restante, da mesma forma, quando a microrrede gera mais energia que a consumida pelas cargas, o excesso é injetado na rede elétrica, através do conversor Back-to-Back. Em ZHOU, et al (2012) é mostrado a utilização do B2B em uma microrrede com cargas não lineares para eliminar problemas de qualidade de energia pelo método de compensação do eixo de referência d-q.

No trabalho de GRZESIAK; TOMASIK (2006) é apresentado um conversor B2B com um banco de baterias no seu barramento CC, apenas na intenção de corrigir problemas de desequilíbrio da tensão do capacitor, drenar uma corrente da rede elétrica, sem harmônicos e com fator de potência unitário, independente da carga, concluindo que o sistema UPS (*Uninterruptible power supply*) pode ser utilizado com a topologia B2B.

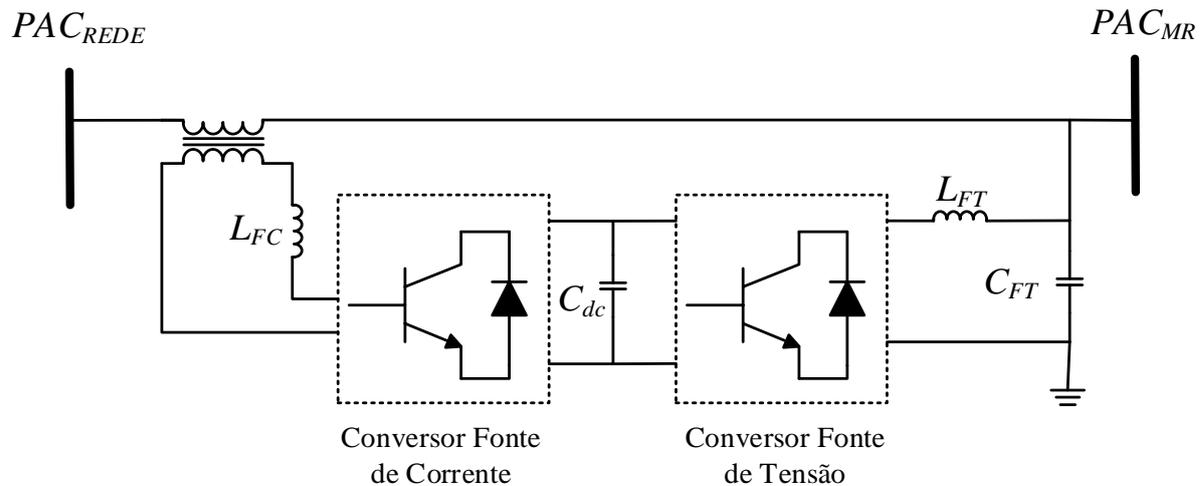
Como visto, os conversores Back-to-Back vem sendo utilizados e estudados em aplicações diversas de microrredes para eliminar problemas de qualidade de energia, fazer a conexão entre a rede elétrica e microrredes, atuando como conversor bidirecional, drenando e injetando corrente ativa da rede elétrica, realizar controle de variação de tensão e frequência, realizando o isolamento e a segurança da microrrede em relação aos distúrbios da rede elétrica, além de ser utilizado como formador de rede na ausência da rede elétrica em um sistema UPS.

1.2.2 UPQC no contexto de microrredes

A topologia UPQC (*Unified Power Quality Conditioner*, ou condicionador de qualidade de energia unificado) foi proposto a princípio em aplicações para solução de problemas de qualidade de energia, em que a sua operação pode garantir um elevado fator de potência na rede elétrica e garantir tensões equilibradas e senoidais para as cargas (FUJITA; AKAGI, 1998).

O UPQC é composto por dois filtros ativos de potência, sendo um filtro ativo em série e outro filtro ativo em paralelo com rede elétrica convencional. O inversor série possui um acoplamento indutivo L_{FC} , conectado em um transformador, já o inversor paralelo possui um acoplamento indutivo-capacitivo $L_{FC}C_{FC}$ em seu terminal de saída, como pode ser visto na Figura 1.4.

Figura 1-4 – Topologia UPQC modo dual atuando como CEBl.



Fonte: o autor.

Se observamos, a topologia UPQC mostrada na Figura 1.4 possui uma estrutura idêntica com a topologia Back-to-Back, diferenciando apenas a forma de conexão à rede elétrica, que é utilizado um transformador que atua como uma impedância para o inversor ligado na rede elétrica. A topologia UPQC possui dois conversores, em que o conversor conectado na rede elétrica convencional atua como fonte de corrente e o conversor conectado no PAC da microrrede atua como fonte de tensão, ambos controlados por PWM, operando na topologia de UPQC dual (CAMPANHOL, 2017; SILVA, 2001; SILVA, 2002).

Além das aplicações com qualidade de energia, a topologia UPQC vem sendo utilizada em aplicações com microrredes, de forma a garantir a qualidade de energia em um ponto específico do sistema (CHAKRABORTY; SIMOES, 2009; SILVA, 2002).

Em aplicações com geração distribuída, trabalhos utilizaram o barramento CC do conversor bidirecional para conectar geradores de energia, nomeando esse sistema como UPQC-DG (KHADKIKAR, 2012. CAMPANHOL, 2017). Essa aplicação de UPQC-DG pode ser utilizada quando ocorre falhas na rede elétrica, mantendo o fornecimento de energia para as cargas, mantendo uma tensão senoidal regulada, pois o conversor fonte de tensão tem a função de gerar uma tensão senoidal para o barramento de cargas.

Uma outra aplicação foi abordada por KHORASANI; et al (2017), em que é utilizado um UPQC em uma microrrede híbrida, denominando UPQC-DC, analisando

o desempenho da topologia UPQC na melhoria de qualidade de energia, controle do fluxo de potência, compensação de potência reativa e na eliminação de oscilações de potência, no modo de operação conectado à rede elétrica e desconectado da rede elétrica.

Em HAN; et al (2006) é utilizado um UPQC com um sistema de geração distribuída conectado em seu barramento CC, e através de resultados de simulação e de resultados em um protótipo de 20 kVA foi demonstrado que o conversor UPQC é capaz de corrigir problemas de qualidade de energia, como abaixamento e elevação de tensão, interrupção da tensão da rede elétrica, correção do fator de potência e harmônicos, tanto na operação conectado à rede elétrica, quanto na operação em modo ilhado, em que o objetivo é aplicar o UPQC para melhorar a qualidade de energia em um sistema de distribuição de energia.

Já no trabalho de BACON (2022), é mostrado a utilização do conversor UPQC atuando de diversas formas, em situações em que a rede elétrica está conectada e com a rede elétrica está desconectada do sistema, mantendo um banco de baterias no barramento CC. No trabalho foi verificado que não é necessário mudar a estratégia de controle para as diversas formas de operacionalização e que as transições entre o modo conectado e ilhado ocorrem de maneira satisfatória, além de suavizar os problemas de intermitências das fontes renováveis de energia da microrrede.

Como visto, há diversas aplicações utilizando a topologia UPQC conectada à rede elétrica, e quando desconectada da rede elétrica a operação pode continuar de maneira satisfatória. Essa topologia é capaz de fornecer energia para as cargas, drenando ou injetando corrente na rede elétrica, atendendo os índices de qualidade de energia, tornando o sistema operacional na ausência da rede elétrica através do banco de baterias e atuando como proteção para a rede elétrica e para a microrrede.

1.3 Objetivos

Esse trabalho tem como objetivo geral realizar uma análise comparativa entre os conversores Back-to-Back e Delta UPQC atuando como conversor eletrônico bidirecional de interligação entre a rede elétrica e uma microrrede CA, alimentando cargas lineares e não lineares com a finalidade de se avaliar os índices de qualidade

de energia, capacidade de rejeição à distúrbios na carga e o fluxo de potência processada pelos conversores.

Para atingir esse objetivo geral, o desenvolvimento desse trabalho tem os seguintes objetivos específicos:

- Modelar matematicamente os conversores bidirecionais de interligação, na topologia Back-to-Back e na topologia Delta UPQC;
- Projetar e implementar controladores P e PI nos controles de tensão e corrente dos inversores dos conversores bidirecionais de interligação no eixo síncrono dq;
- Realizar o controle dos conversores bidirecionais de interligação para atender especificidades dos índices de qualidade de energia na presença de cargas lineares e não lineares;
- Desenvolver o estudo teórico do fluxo de potência dos conversores Back-to-Back e Delta UPQC;
- Implementar e testar o protótipo das duas topologias, comparando o funcionamento como conversor bidirecional de interligação, validando os resultados de acordo com o modelo matemático do fluxo de potência;
- Analisar experimentalmente o desempenho dos conversores bidirecionais de interligação, comparando a atuação da topologia Back-to-Back e Delta UPQC;
- Analisar as diferenças entre as topologias no dimensionamento dos elementos que compõem cada um.

1.4 Contribuição e relevância do trabalho

Em decorrência da utilização dos conversores bidirecionais de interligação, que conectam a rede elétrica em uma microrrede e cargas, as vantagens do uso desses conversores consistem em regular níveis de tensão e corrente, realizar correção do fator de potência nas cargas, correção de harmônicos na corrente drenada da rede elétrica e da tensão nas cargas, da correção de intermitências, de injetar na rede elétrica a corrente gerada em excesso pela microrrede, entre outras vantagens.

Pelo fato de alguns trabalhos apresentarem a topologia Back-to-Back como conversor bidirecional, e em outros apresentarem a topologia UPQC, ambas

topologias executando as mesmas funções, então esse trabalho tem o intuito de analisar de modo comparativo as duas topologias no modo conectado à rede elétrica, atuando como conversor bidirecional entre a rede elétrica convencional e a microrrede.

A análise comparativa desse trabalho consiste em se utilizar as duas topologias, atuando como conversor bidirecional de interligação entre uma rede elétrica convencional e uma microrrede com cargas conectadas no ponto de acoplamento da microrrede. Em simulação será implementado uma fonte de corrente senoidal no ponto de acoplamento da microrrede, em que o conversor bidirecional quando conectado à rede elétrica se encarregará de administrar o fluxo de potência da microrrede para a carga e seu excesso para a rede elétrica. Em protótipo será implementado o conversor bidirecional alimentando cargas lineares e não lineares, com o intuito de se avaliar a sua capacidade de correção de harmônicos, da rejeição à distúrbios e a avaliação do fluxo de potência entre os conversores.

A realização desse estudo traz as seguintes contribuições:

- Desenvolver o estudo do fluxo de potência das topologias avaliadas;
- Aplicar a metodologia de controladores no eixo síncrono dq, implementando as malhas de controle em um DSP, o TMS320F28335 da Texas Instruments;
- Validação dos resultados teóricos e de simulação por uma implementação prática de um conversor bidirecional na topologia Back-to-Back e outro na topologia Delta UPQC, alimentando cargas lineares e não lineares de até 1 kVA, com a finalidade de: i. drenar corrente puramente senoidal e regulada para alimentar as cargas lineares e não lineares; ii. fornecer uma tensão senoidal e regulada às cargas; iii. ser o formador de rede elétrica para a microrrede; iv. rejeitar distúrbios causados na carga; v. fazer a bidirecionalidade de energia entre a microrrede e a rede elétrica, por meio de simulação; vi. realizar o estudo do fluxo de potência pelos conversores, embasando o dimensionamento dos elementos dos conversores.

Para atingir os resultados para comparação será modelado o sistema em software de simulação MatLab/Simulink, buscando obter o modelo mais próximo possível do protótipo. Será obtido os resultados de simulação e após será realizado os experimentos em protótipo, validando os resultados de simulação e buscando fazer os ajustes no protótipo para a operação do sistema.

1.5 Organização do trabalho

Esse trabalho está dividido em sete capítulos. No primeiro capítulo é apresentado a motivação e a contextualização das microrredes e do conversor bidirecional, apresentando os objetivos desse trabalho e o que se espera no desenvolvimento do mesmo, contextualizando com o que vem sendo desenvolvido e o que esse trabalho busca como resultado final.

No segundo capítulo é apresentado os problemas de qualidade de energia que aparecem nas microrredes, apresentando a definição de índices de qualidade.

No terceiro capítulo é apresentado as topologias Back-to-Back e Delta UPQC, as suas malhas de controle e como é realizado a operacionalização do conversor bidirecional, apresentando os parâmetros utilizados no protótipo implementado.

No quarto capítulo é apresentado a modelagem do fluxo de potência, mostrando a potência processada por cada etapa de ambas as topologias, dando subsídios para justificar o dimensionamento de cada elemento dos inversores utilizados no Back-to-Back e no Delta UPQC.

No quinto capítulo é apresentado os resultados de simulação dos modos de operação das duas topologias, de maneira a mostrar a semelhança da simulação com o protótipo implementado fisicamente. Além disso, nos resultados de simulação são apresentados os resultados da bidirecionalidade de ambas as topologias.

Logo em seguida, no sexto capítulo é apresentado os resultados experimentais obtidos no protótipo implementado, mostrando o funcionamento das duas topologias para cargas lineares, cargas não lineares e sem carga, além da capacidade de rejeição de distúrbios na carga, validação do estudo do fluxo de potência e a diferença no dimensionamento dos elementos das topologias, e por fim, apresentando uma tabela com as principais diferenças entre as topologias.

No sétimo capítulo é apresentado a conclusão desse trabalho, a discussão sobre as diferenças entre as topologias e as propostas de continuidade.

No Apêndice A é apresentado a modelagem dos conversores, com a apresentação da metodologia utilizada nas malhas de controle do capítulo 3. No Apêndice B é apresentado o projeto dos controladores P e PI utilizados nas malhas de controle do capítulo 3 e pela modelagem apresentada no Apêndice A.

No Apêndice C é mostrado foto do protótipo implementado para as duas topologias.

2. PROBLEMAS DE QUALIDADE DE ENERGIA NO AMBIENTE DE MICRORREDES

Com o avanço e desenvolvimento de novas tecnologias, na busca do aumento de eficiência da utilização da energia elétrica, surgiram componentes da eletrônica de potência, em que surgiram alguns problemas de qualidade de energia nos pontos de fornecimento de energia para os consumidores (ZAHIRA, 2021).

A qualidade de energia está ligada às interrupções ou situações anormais de tensão e de frequência de uma instalação elétrica, enquanto a confiabilidade de um sistema depende das interrupções no fornecimento dessa energia, em que afeta os consumidores conectados na mesma rede elétrica (CHOWDHURY, et al., 2009).

A utilização de cargas não lineares pelos consumidores contribuem para a alteração dos índices de qualidade de energia, drenando correntes com elevado conteúdo harmônico, contribuindo no aparecimento de distorções nas tensões da rede elétrica (CAMPANHOL, 2017).

Diversas normas vem sendo publicadas, impondo aos fabricantes de equipamentos elétricos e eletrônicos desenvolverem produtos que sejam robustos suficientes para não introduzirem problemas de qualidade de energia na rede elétrica convencional. No Brasil é a ANEEL (Agência Nacional de Energia Elétrica) que trata dos assuntos sobre o fornecimento da energia elétrica no país. No módulo 8 – Qualidade do Fornecimento de Energia Elétrica da Resolução Normativa nº 956 (ANEEL, 2021) é apresentado os requisitos aceitáveis para o fornecimento de energia elétrica aos consumidores. Como a ANEEL não apresenta restrições relacionadas aos harmônicos de corrente, na literatura são utilizados como referência duas normas internacionais, uma do IEC (*International Electrotechnical Commission*) que possui a norma IEC 61000-3-2 de 2014 que trata dos limites de emissão de corrente harmônica em equipamentos com corrente de entrada menores que 16 Amperes por fase (IEC 61000-3-2, 2019), e a outra norma do IEEE (*Institute of Electrical and Electronics Engineers*) que apresenta a IEEE 519 que trata dos requisitos para controle harmônico em sistemas elétricos de potência (IEEE 519, 2014).

Os problemas de qualidade de energia são considerados como distúrbios, que surgem devido à variação da frequência da forma de onda de tensão e da magnitude de tensão de alimentação, podendo trazer prejuízos aos consumidores e às concessionárias de energia (CHOWDHURY, et al., 2009). Esses distúrbios podem

ser causados devido às características intrínsecas da carga, ou devido à situações na rede elétrica convencional, afetando o funcionamento do barramento onde as cargas estão localizadas. Os distúrbios básicos de qualidade de energia são:

- **Transientes**

Os transientes são distúrbios que ocorrem na tensão de maneira brusca por um curto período de tempo, podendo ocasionar uma oscilação na tensão em uma alta frequência e/ou uma variação de tensão que pode chegar à milhares de volts e, conseqüentemente, trazendo uma variação de corrente que percorre o sistema. Esses transientes podem acontecer devido à descargas atmosféricas, descargas eletrostáticas, comutações nas cargas e nas linhas de alimentação, energização de banco de capacitores ou interrupções de cargas indutivas. A variação de cargas capacitivas e indutivas podem criar circuitos ressonantes, ampliando a tensão devido à fontes harmônicas.

Os transientes devido à descargas atmosféricas e eletrostáticas podem ser eliminadas com a instalação de um sistema de para-raios e aterramento adequado, já os transientes de variação de carga pode ser minimizado com condicionadores de energia e de linha ferro-ressonante (CHOWDHURY, et al., 2009), em que um condicionador de energia pode minimizar as intermitências causadas pela conexão/desconexão de cargas.

- **Variação de frequência**

O sistema de distribuição e as instalações de geração elétrica no Brasil operam na frequência de 60 Hz em regime permanente. Em condições normais de operação, o sistema pode operar dentro da faixa de frequência entre 59,9 Hz e 60,1 Hz (ANEEL, 2021).

Na ocorrência de distúrbios no sistema elétrico de distribuição, a frequência não pode, em hipótese alguma, passar de 66 Hz e nem ser inferior à 56,5 Hz. Ainda, pode permanecer acima de 62 Hz por no máximo 30 segundos e acima de 63,5 Hz por no máximo 10 segundos, da mesma forma pode permanecer abaixo de 58,5 Hz por no máximo 10 segundos e abaixo de 57,5 Hz por no máximo 5 segundos. Quando não forem atendidas essas condições, o elemento gerador da variação de frequência deve ser desconectado da rede elétrica principal.

Caso a microrrede seja conectada diretamente à rede elétrica, ela pode sofrer com essa variação de frequência, ou pode causar variação de frequência na rede elétrica, e essa variação pode ser solucionada com um conversor de energia.

- **Afundamentos e elevações de tensão**

Os afundamentos, conhecidos também como *sags*, e as elevações de tensão, conhecido também como *swell*, são as variações na magnitude da tensão, que podem ocorrer em meio ciclo ou até em vários segundos da tensão.

Os afundamentos de tensão podem ocorrer devido à ligação repentina de cargas de elevada potência, que consomem grande quantidade de corrente, como motores elétricos e fornos à arco elétrico (SANKARAN, 2019).

Uma elevação de tensão pode ser causada por uma falha na ligação da linha de alimentação com o neutro ou terra, que acontece quando o condutor de uma das fases tem contato com o solo ou o condutor de alimentação entra em contato com o condutor neutro, resultando em um aumento de tensão temporário nas outras fases. A elevação ocorre também quando há a retirada de grandes cargas ou conexão de um banco de capacitores. A ANEEL (ANEEL, 2021) denomina esses afundamentos e elevações de tensão de “Variação de tensão de curta duração – VTCD”, que pode durar um ciclo da tensão ou até três minutos. Essa variação pode ser classificado como Variação Momentânea de Tensão quando dura até três segundos, ou como Variação Temporária de Tensão quando dura de três segundos à três minutos.

Em uma microrrede esse fenômeno pode aparecer na conexão ou desconexão de fontes de geração distribuída, ou por alteração do nível de potência gerada.

- **Subtensões e Sobretensões**

Quando o afundamento ou elevação de tensão possuem a duração maior que dois minutos, eles são classificados como subtensão ou sobretensão, respectivamente. A condição de subtensão pode ser ocasionada por perda de alguma fase, ou pela perda da geração de energia, ou carregamento de alguma fase acima da sua capacidade, abaixando a tensão entregue aos consumidores. As subtensões podem ser corrigidas alterando as derivações dos transformadores de distribuição de energia.

A condição de sobretensão pode ocorrer devido à problemas em capacitores de regulação de tensão, ou nos transformadores de transmissão e distribuição de energia. Esses problemas de sobretensões podem ser eliminados com a instalação de dispositivos reguladores de tensão próximos aos locais de utilização da energia, como sistemas UPS utilizados para regular a tensão de cargas sensíveis, mesmo quando a rede da concessionária está presente, ou nos casos da falta da alimentação da rede da concessionária (SHALUKHO, et al., 2019).

No sistema de energia elétrica brasileiro, a tensão nos pontos de conexão deve situar-se entre 95% e 105% da tensão nominal de operação (ANEEL, 2021).

- **Falta de energia**

A interrupção de tensão, ou falta de energia, acontece quando há a perda de tensão de alimentação por um determinado período de tempo. Elas podem ser por um curto espaço de tempo (menos que dois minutos), ou por um longo período de tempo. A interrupção de tensão é causada pela abertura da linha de alimentação, por um disjuntor, ou um religador de linha, ou até por um rompimento físico da linha.

Quando isso acontece, os consumidores sofrerão pelo afundamento de tensão nas outras fases, pela falta de uma das fases de alimentação. Essas interrupções podem ser minimizadas com a instalação de um sistema UPS com armazenamento de energia, podendo ser baterias, geradores a diesel ou geradores distribuídos. A proteção contra interrupções de tensão requer uma chave de transferência estática, para fazer a conexão e desconexão do sistema UPS na carga (SHALUKHO, et al., 2019).

- **Distorção Harmônica**

A distorção harmônica é o problema de qualidade de energia que tem surgido devido à operação de cargas não lineares no sistema elétrico. Ela acontece quando a forma de onda da tensão ou corrente possui componentes de frequências mais altas e múltiplas da frequência de energia padrão, que no caso do Brasil é de 60 Hz, se desviando da forma de onda senoidal padrão.

A harmônica é definida como uma componente, da tensão ou da corrente, que apresenta uma frequência múltipla inteira da componente fundamental. As formas de onda de tensão e corrente são formadas pelas somas da componente fundamental com as componentes harmônicas, como mostrado na equação (2.1).

$$V_{RMS} = \sqrt{V_1^2 + V_2^2 + V_3^2 + \dots + V_n^2} \quad (2.1)$$

Lembrando que na equação (2.1) pode ser a tensão ou a corrente. Os índices que vão de 1 até n, corresponde ao valor RMS da tensão fundamental até a n harmônica.

A presença dessas harmônicas causam distorção no formato de onda da tensão ou da corrente, e pode ser avaliada em forma de percentual como THD (*Total Harmonic Distortion*) ou na tradução como DTT (Distorção harmônica total), que é a taxa de distorção harmônica total no ponto avaliado, podendo ser avaliado a tensão ou a corrente, como pode ser visto na equação (2.2), ou como IHD (*Individual Harmonic Distortion*), na tradução DIT (Distorção harmônica individual), que representa o valor RMS da componente harmônica em questão em relação ao valor RMS da fundamental, que pode ser visto na equação (2.3):

$$THD_v = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} V_h^2}}{V_1} \cdot 100\% \quad (2.2)$$

$$IHD_h = \frac{V_h}{V_1} \cdot 100\% \quad (2.3)$$

em que V_1 representa o valor eficaz da componente fundamental e V_h representa o valor eficaz de cada componente harmônica no sistema e h representa a ordem da componente harmônica a ser avaliada.

Essas componentes de frequência mais altas prejudicam o funcionamento e desempenho dos equipamentos, causando aquecimento nos transformadores de distribuição, interrupção do funcionamento normal dos equipamentos eletrônicos e ressonância de algumas cargas.

A distorção harmônica é produzida pelos equipamentos com chaveamento, como computadores, reatores de iluminação, inversores de frequência e qualquer equipamento que utiliza fontes chaveadas. Ela pode ser reduzida com reatores de impedância ou filtros passivos e ativos.

O Módulo 8 do Prodíst apresenta apenas os limites de distorção harmônica permitida na tensão. No Quadro 2.1 é apresentado os limites permitidos para a tensão da rede da concessionária.

Quadro 2.1 – Limites de distorções harmônicas totais (em % da tensão fundamental).

Indicador	Tensão nominal até 2,3 kV
Distorção harmônica total de tensão (DTT%).	10,0 %
Distorção harmônica total de tensão para as componentes pares não múltiplas de 3 (DTT _p %).	2,5 %
Distorção harmônica total de tensão para as componentes ímpares não múltiplas de 3 (DTT _i %).	7,5 %
Distorção harmônica total de tensão para as componentes múltiplas de 3.	6,5 %

Fonte: ANEEL, 2021, p. 10.

Como mostrado no Quadro 2.1, o Módulo 8 do Prodíst não trata dos harmônicos de corrente, no entanto, as cargas não-lineares injetam conteúdo harmônico na rede da concessionária em forma de corrente, distorcendo a forma de onda da tensão. Ou seja, se houver a redução dos harmônicos de corrente haverá também a redução dos harmônicos da tensão da rede, atendendo os limites estabelecidos pela ANEEL.

A norma IEC 61000-3-2 (2014) trata da corrente harmônica que os equipamentos produzem e podem injetar no sistema elétrico de potência, sendo considerado os equipamentos com corrente de entrada de até 16 A por fase. Esses equipamentos são divididos em quatro classes:

1. Classe A: equipamentos com alimentação trifásica equilibrada, aparelhos de uso doméstico, exceto os da classe D, ferramentas, exceto as portáteis, *dimmers* para lâmpadas incandescentes, equipamentos de áudio e os demais equipamentos não inclusos nas classes B, C e D;
2. Classe B: Ferramentas portáteis e equipamentos de solda não profissional;
3. Classe C: Dispositivos de iluminação;
4. Classe D: Computadores pessoais, monitores de vídeo e aparelhos de televisão, de potência entre 75 W e 600 W.

Os fabricantes devem se atentar aos harmônicos que o equipamento produzido vai injetar na rede elétrica, visando garantir que a ligação do seu equipamento cause a menor interferência possível no sistema elétrico de potência.

Já a norma IEEE 519 (2014) tem como objetivo trazer informações sobre os procedimentos que devem ser adotados para o controle de harmônicos no sistema elétrico e os limites de harmônicos das correntes injetadas pelos consumidores conectados na rede elétrica, visando a qualidade de energia na rede elétrica para os consumidores conectados no mesmo ponto de alimentação, e não em cada equipamento, como é tratado na norma IEC 61000-3-2 (2014).

De acordo com essa norma, os usuários e operadores do sistema de energia devem limitar os harmônicos de tensão de acordo com o Quadro 2.2, em que os valores diários do 99° percentil do tempo mais curto (3 segundos) devem ser inferiores a 1,5 vezes os valores do Quadro 2.2 e os valores semanais do 95° percentil de tempo curto (10 minutos) devem ser menores que os valores apresentados no Quadro 2.2.

Quadro 2.2 – Limite de distorção da tensão.

Tensão do Barramento da rede elétrica	Harmônico individual (%)	Distorção Harmônica Total (THD %)
$V \leq 1,0 \text{ kV}$	5,0 %	8,0 %
$1,0 \text{ kV} < V \leq 69 \text{ kV}$	3,0 %	5,0 %
$69 \text{ kV} < V \leq 161 \text{ kV}$	1,5 %	2,5 %
$161 \text{ kV} < V$	1,0 %	1,5 %

Fonte: IEEE 519, 2014, p. 6.

A mesma norma avalia a distorção harmônica da corrente, mas em relação à corrente máxima de demanda, dado como TDD (*Total Demand Distortion*) e apresentado na equação (2.4).

$$TDD = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} I_h^2}}{I_L} \cdot 100\% \quad (2.4)$$

Em que I_h corresponde à corrente harmônica de ordem h e I_L é a corrente de demanda máxima de carga (componente da frequência fundamental) no ponto de acoplamento da rede elétrica operando em condições normais de carga.

Os limites da distorção de corrente no ponto de acoplamento comum da rede da concessionária depende dos níveis de tensão desse ponto de alimentação. Para os sistemas com tensão nominal de 120 V até 69 kV, a taxa de distorção harmônica de corrente na rede deve seguir os valores referenciados no Quadro 2.3.

Quadro 2.3 – Limite de distorção de corrente para sistemas com tensão entre 120 V e 69 kV.

Distorção máxima de corrente harmônica em porcentagem de I_L						
Ordem harmônica individual (harmônicos ímpares)						
I_{SC}/I_L	$3 \leq h < 11$	$11 \leq h < 17$	$17 \leq h < 23$	$23 \leq h < 35$	$35 \leq h \leq 50$	TDD
< 20	4,0 %	2,0 %	1,5 %	0,6 %	0,3 %	5,0%
20 < 50	7,0 %	3,5 %	2,5 %	1,0 %	0,5 %	8,0%
50 < 100	10,0 %	4,5 %	4,0 %	1,5 %	0,7 %	12,0%
100 < 1000	12,0 %	5,5 %	5,0 %	2,0 %	1,0 %	15,0%
> 1000	15,0 %	7,0 %	6,0 %	2,5 %	1,4 %	20,0%

Fonte IEEE 519, 2014, p. 7.

Em que I_{SC} é a corrente máxima de curto-circuito no ponto de acoplamento da rede. Todos os valores da distorção harmônica de corrente devem estar em porcentagem da corrente de demanda máxima, I_L .

Os conteúdos harmônicos devem ser limitados às correntes harmônicas diárias do 99° percentil de tempo muito curto (até 3 segundos) que devem ser inferiores a duas vezes os valores fornecidos no Quadro 2.3, ou as correntes harmônicas semanais do 99° percentil de curta duração (até 10 minutos) que devem ser inferiores a 1,5 vezes os valores do Quadro 2.3, ou as correntes harmônicas semanais do 95° percentil de curta duração (até 10 minutos) que devem ser menores do que os valores do Quadro 2.3.

- **Fator de Potência**

O fator de potência é a porcentagem da potência aparente total que é convertida em potência útil (SANKARAN, 2019). O baixo fator de potência pode ocasionar falhas no funcionamento de equipamentos e sobrecarregar as linhas de

transmissão e distribuição das concessionárias. Quando há harmônicas surge uma outra componente no fator de potência, dando origem ao tetraedro de potência e o fator de potência total é obtido pela relação da potência ativa pela potência aparente não fundamental, dada pela soma das tensões e correntes das n harmônicas presentes na carga. Para o caso da tensão e corrente fundamentais, sem as harmônicas, o fator de potência é definido como o cosseno do deslocamento angular entre a tensão e a corrente, chamado como fator de deslocamento

O problema é o baixo fator de potência, que pode ser originado por cargas capacitivas e indutivas, sendo mais comuns as cargas indutivas como máquinas elétricas. Em casos que a distorção da forma de onda que é devido aos harmônicos, pode haver uma mudança de fase entre a tensão e a corrente, ocasionando alteração do fator de potência (SANKARAN, 2019)

Em unidades consumidoras, a ANEEL estabelece para as ligações com tensão inferior a 230 kV, o fator de potência deve estar situado entre 0,92 e 1,00 indutivo, ou entre 1,00 e 0,92 capacitivo (ANEEL, 2021).

- **Cortes de tensão (*Voltage Notching*)**

Os cortes de tensão são distorções no formato da onda de tensão, que ocorre durante a comutação de um SCR (retificadores controlados de silício). Na comutação de um SCR ocorre um curto-circuito momentâneo, resultando no aumento da corrente e na queda da tensão, aparecendo como um afundamento na tensão. O mais prejudicial é quando esse corte toca o eixo zero da tensão, pois alguns equipamentos tem seu funcionamento dependente desse cruzamento de zero da tensão, provocando o seu mal funcionamento.

Os circuitos que ocasionam os cortes de tensão são os controladores de velocidade de motor CC e de aquecimento por indução, em que ambos utilizam SCR na sua operação. Aqueles equipamentos sensíveis aos cortes de tensão podem ser protegidos por um reator de impedância que elimina o cruzamento de zero e elimina a interferência nos equipamentos conectados na mesma tensão e que estão próximos (SHALUKHO, et al., 2019).

- **Flutuação de tensão**

Flutuação ou variação da tensão é um efeito de oscilação da tensão detectada pelo olho humano, que pode ser observada na variação da intensidade da luz elétrica de uma lâmpada incandescente.

Essa oscilação de tensão é causada por arcos no sistema de energia, ocasionado por máquinas de solda ou fornos elétricos, e que esses problemas podem ser eliminado com a instalação de filtros ou compensadores estáticos.

- **Ruído Elétrico**

O ruído elétrico aparece como uma interferência eletromagnética (EMI) ocasionada por sinais de alta frequência e baixa tensão sobrepostas ao sinal senoidal de tensão. A frequência desses sinais são da ordem de kHz ou MHz e com a magnitude que pode chegar até 20 V. Esse ruído pode surgir de raios, eletricidade estática, radiação solar, proximidade de linhas de transmissão de energia elétrica, comutação de alta frequência em dispositivos eletrônicos e lâmpadas fluorescentes.

Os equipamentos de telecomunicações, computadores, controles de processos industriais, instrumentos biomédicos e sistemas de controle climático são os equipamentos mais afetados por ruídos. Os efeitos desses ruídos podem ser reduzidos com a instalação de filtros de linha de radiofrequência, capacitores ou indutores nos circuitos dos equipamentos (SHALUKHO, et al., 2019).

2.1 Considerações finais do capítulo

Nesse capítulo foi apresentado e discutido sobre os problemas de qualidade de energia que podem estar presentes em uma microrrede quando conectada na rede elétrica convencional. Esses problemas podem acontecer devido às características das cargas e na operação da microrrede, sendo que esses problemas não devem ser propagados para as cargas e nem para a rede elétrica convencional.

De acordo com SHALUKHO, et al. (2019), devido às características da geração distribuída, o uso de equipamentos semicondutores na microrrede, como inversores, controladores de carga, e devido ao fluxo bidirecional de energia, esses afetam a qualidade de energia de forma negativa para os consumidores.

Devido ao fato da microrrede surgir como uma alternativa para a produção de energia sustentável e auxiliar a rede elétrica, ela aparece no sistema elétrico como uma fonte de energia não convencional, auxiliando na mitigação de problemas de qualidade de energia. Além disso, na passagem do modo conectado na rede para o modo ilhado, e vice-versa, surgem alguns distúrbios de qualidade de energia que devem ser considerados e tratados (ZAHIRA, et al., 2021).

Como a proposta é fazer o isolamento dos problemas entre a rede elétrica e a microrrede pelo conversor eletrônico a ser estudado, os problemas de qualidade de energia que ocorrem na rede elétrica não deverá ser propagado para as cargas, e os problemas ocasionados na microrrede e nas cargas não devem ser propagados para a rede elétrica, tornando a operação de ambos os sistemas independente.

Nos distúrbios que apresentam valores limites determinados por normas, como apresentado nesse capítulo, os valores serão utilizados para avaliação da operação do conversor bidirecional e da microrrede, mantendo os índices de qualidade dentro dos valores estabelecidos nas referidas normas.

3. SISTEMAS DE INTERLIGAÇÃO ENTRE MICRORREDES E REDE DA CONCESSIONÁRIA

As topologias B2B e Delta UPQC são semelhantes, em que um inversor está conectado à rede elétrica convencional e um outro inversor está conectado ao barramento da microrrede. A diferença consiste na existência de um transformador na topologia Delta UPQC.

Em ambos os casos, o inversor conectado à rede elétrica atua como um conversor fonte de corrente senoidal, enquanto o inversor conectado no barramento da microrrede atua como uma fonte de tensão senoidal, sendo o formador de rede.

O controle utilizado é baseado no eixo síncrono dq, apresentado na teoria das Transformadas de Clarke e Park. Com a mudança de eixo é possível projetar controladores PI que irão atuar com uma referência contínua, ao invés da referência alternada senoidal, já que o desempenho dos controladores PI são melhorados quando atuam em um referência de controle contínua.

3.1 Transformada de Clarke e Park

O conceito de componentes alfa, beta e zero surgiu em 1917 no artigo “Short Circuito n Grounded Neutral Systems”, mas apenas em 1938 que foi apresentado uma aplicação para as componentes modais, com o artigo “Problems Solved by Modified Symmetrical Components” de Edith Clarke, passando a ser conhecida como Componentes de Clarke (ROBBA, 2000).

A teoria das componentes de Clarke diz que uma sequência de tensão trifásica no eixo abc pode ser decomposta por três componentes, alfa, beta e zero, através de uma matriz de transformação, como mostra a equação (3.1).

$$\begin{bmatrix} V_\alpha \\ V_\beta \\ V_0 \end{bmatrix} = \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} V_A \\ V_B \\ V_C \end{bmatrix} \quad (3.1)$$

em que, V_A , V_B e V_C são as tensões trifásicas em sequência no eixo abc, e V_α , V_β e V_0 são as tensões no eixo estacionário alfa, beta e zero.

Quando um sistema trifásico é simétrico, a decomposição do sistema trifásico pode ser feito para um par de eixos ortogonais, alfa e beta, em que o eixo alfa coincide com o primeiro fasor da sequência e o eixo beta está deslocado $-\pi/2$ do eixo alfa, como pode ser visto na equação (3.2).

$$\begin{bmatrix} V_\alpha \\ V_\beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_A(\omega \cdot t) \\ V_A(\omega \cdot t - \pi/2) \end{bmatrix} \quad (3.2)$$

em que ω é a frequência angular da rede elétrica.

Essa decomposição em um par de eixos ortogonais da equação (3.2) pode ser realizada para um sistema monofásico, em que é utilizado a tensão ou corrente em questão no eixo alfa, e a partir dessa é deslocado $-\pi/2$ para gerar o eixo beta. Para o sistema monofásico, a tensão V_A coincide com a tensão de fase da rede elétrica V_{REDE} .

Através da componente de Clarke pode ser utilizada a Transformada de Park, que tem o intuito de transformar o eixo bifásico ortogonal em um sistema de vetores girantes à uma velocidade angular ω , onde $\omega = 2 \cdot \pi \cdot f$, e que f é a frequência das componentes $\alpha\beta$. Esses vetores girantes são conhecidos como eixo dq e a Transformada de Park é mostrada na equação (3.3).

$$\begin{bmatrix} V_d \\ V_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \text{sen}(\theta) \\ -\text{sen}(\theta) & \cos(\theta) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} V_\alpha \\ V_\beta \end{bmatrix} \quad (3.3)$$

O ângulo θ da Transformação de Park da equação (3.3) está sincronizado com a posição angular do eixo alfa, que no caso de um sistema monofásico, ele está sincronizado com o ângulo de fase da tensão ou corrente medida.

A medida desse ângulo é obtido do sistema ou da rede elétrica por um circuito PLL (*Phase Locked Loop*) implementado no microprocessador.

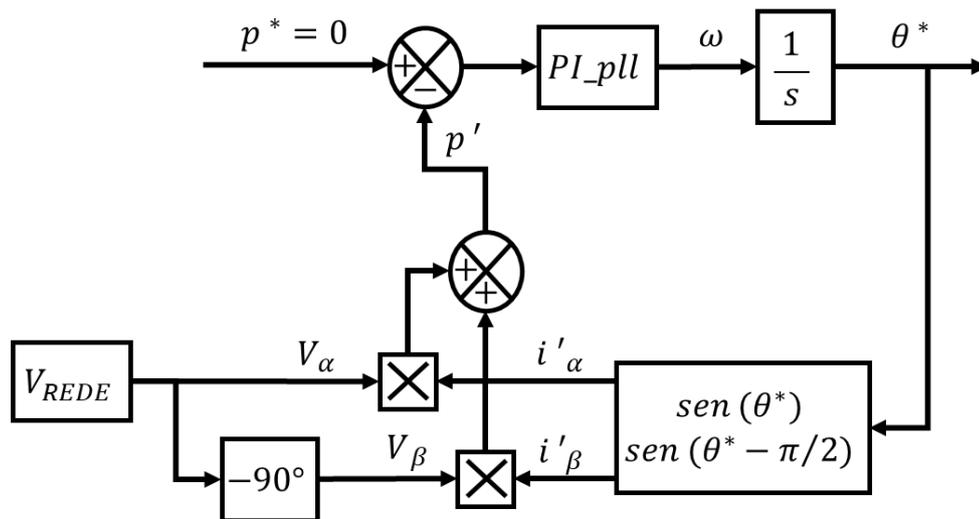
3.2 PLL (*Phase Locked Loop*)

A frequência e o ângulo de fase da rede elétrica, necessários para a geração das coordenadas do vetor unitário síncrono $\text{sen}(\theta)$ e $\cos(\theta)$, utilizado para

gerar as referências de controle no eixo dq e utilizado no algoritmo SRF, são obtidas por um sistema PLL. Há diversas topologias de PLL propostas para sistemas monofásicas.

Nesse trabalho se optou pela utilização do p-PLL monofásico, como mostrado no diagrama de blocos da Figura 3.1 e descrito em SILVA, et al (2008).

Figura 3-1 – Diagrama de blocos do algoritmo p-PLL.



Fonte: baseado em SILVA (2008).

O objetivo do p-PLL é cancelar a componente CC (p') da potência fictícia, em que, quando a p' for nula, o sinal do PLL está atracado com a componente de frequência fundamental do sinal de entrada.

O algoritmo p-PLL apresentado na Figura 3.1 é baseado na teoria da potência instantânea trifásica. Para ser utilizado em sistemas monofásicos deve ser utilizado a Transformada de Clarke, em que a tensão V_α é a tensão medida da rede elétrica e a tensão V_β é deslocada $-\pi/2$ de V_α , como pode ser visto na equação (3.4).

$$\begin{bmatrix} V_\alpha \\ V_\beta \end{bmatrix} = \frac{1}{V_{p_REDE}} \cdot \begin{bmatrix} V_{REDE} \cdot \text{sen}(\omega \cdot t) \\ V_{REDE} \cdot \text{sen}(\omega \cdot t - \pi/2) \end{bmatrix} \quad (3.4)$$

Da mesma forma, com o ângulo θ é gerado a corrente i'_α e i'_β com valor de pico unitário, como pode ser visto na equação (3.5).

$$\begin{bmatrix} i'_\alpha \\ i'_\beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \text{sen}(\theta^*) \\ \text{sen}(\theta^* - \pi/2) \end{bmatrix} \quad (3.5)$$

No momento em que o θ^* da equação (3.5) for idêntico o $\omega \cdot t$ da equação (3.4), o erro da comparação da potência será nulo e o PLL estará atracado à rede elétrica. A potência ativa instantânea fictícia p' é calculada pela equação (3.6).

$$p' = \frac{V_{REDE}}{V_{p_REDE}} \cdot \text{sen}(\omega t) \cdot \text{sen}(\theta^*) + \frac{V_{REDE}}{V_{p_REDE}} \cdot \text{sen}(\omega t - \pi/2) \cdot \text{sen}(\theta^* - \pi/2) \quad (3.6)$$

A comparação da potência CC com a potência fictícia gera um erro que é compensado por um PI e dá origem à frequência angular ω . Ao integrar a frequência angular se obtêm o ângulo θ , que é utilizado no algoritmo para gerar a corrente i'_α e i'_β , em fase com as tensões bifásicas, além de fornecer a informação da posição angular da rede elétrica, como foi visto no diagrama de blocos da Figura 3.1.

Com a informação do ângulo θ é possível obter a referência para o algoritmo SRF e para as referências de controle no eixo dq.

3.3 SRF (*Synchronous Reference Frame*)

Nesse trabalho, utilizou-se um algoritmo de geração das referências de corrente de compensação baseado no sistema de eixo de referência síncrona (SRF – *Synchronous Reference Frame*) com o intuito de gerar a referência para impor à rede elétrica a parcela ativa da corrente fundamental da carga, realizando a medição da corrente de carga e separando a parcela ativa das parcelas harmônicas e reativas.

O algoritmo SRF foi proposto inicialmente por BHATTACHARYA, et al (1991), sendo utilizado na compensação ativa de potência de um filtro série híbrido, isolando parcelas harmônicas entre a fonte de alimentação e a carga. Outros trabalhos foram desenvolvidos utilizando o algoritmo SRF em aplicações como filtros ativos de potência (GARCIA CAMPANHOL, et al, 2014) e em sistemas UPS (SILVA, et al, 2002).

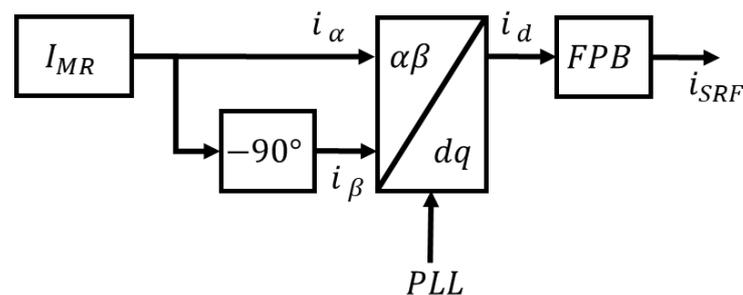
O algoritmo SRF utilizado nesse trabalho atua como uma malha de *feed forward* para o controle da corrente que é drenada ou injetada na rede elétrica.

A corrente no PAC da microrrede é medida e informada ao controle de corrente do conversor fonte de corrente. Com a alteração de corrente no PAC da microrrede, o barramento CC sofre variação, variando a sua tensão para manter fixada a tensão do conversor fonte de tensão e a potência dissipada ou injetada no PAC da microrrede. Como a malha de tensão do barramento CC é lenta, a variação de

corrente no PAC da microrrede é informada pelo algoritmo do SRF mais rapidamente à malha de controle de corrente do conversor fonte de corrente, que consegue processar a corrente necessária para o PAC da microrrede, minimizando as variações na tensão do barramento CC.

O diagrama de blocos do algoritmo SRF utilizado é mostrado na Figura 3.2.

Figura 3-2 – Diagrama de blocos do algoritmo SRF.



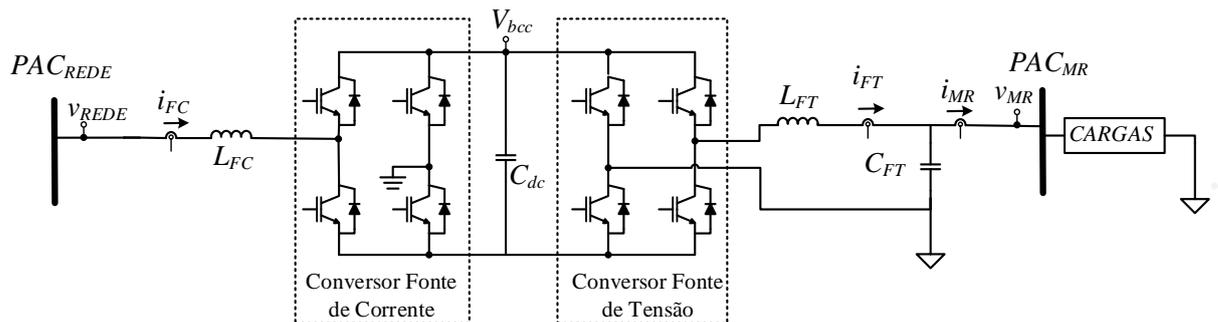
Fonte: baseado em SILVA (2002).

A corrente no PAC da microrrede é transformada para a parcela “d” da transformada de Park. A corrente i_d corresponde à componente fundamental e harmônica da parcela ativa da corrente da carga, que ao passar por um filtro passa-baixa (FPB), deixa em sua saída apenas um sinal contínuo, que corresponde apenas à componente fundamental da parcela ativa da corrente necessária para a carga. Essa corrente i_{SRF} será somada com a referência de corrente vinda do controlador do barramento CC, atuando como referência para o controlador de corrente do conversor fonte de corrente, como será visto adiante.

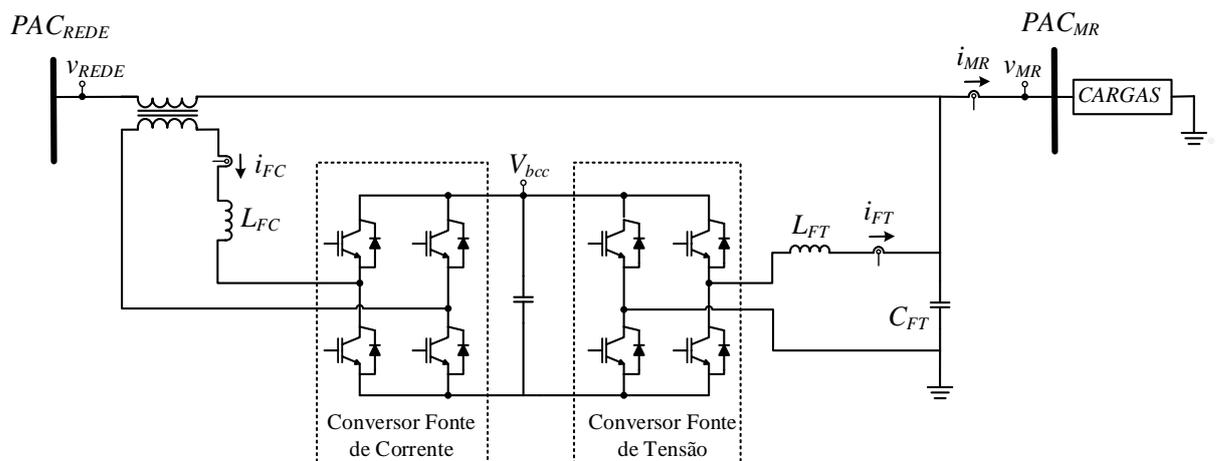
3.4 Conversores Fonte de Corrente e Fonte de Tensão

Na Figura 3.3 é mostrado a estrutura de potência do sistema do conversor eletrônico bidirecional de interligação, nas duas topologias. Em ambos os sistemas, eles podem operar fornecendo energia para as cargas ou injetando energia de uma microrrede para a rede elétrica.

Figura 3-3 – Circuito do Conversor Eletrônico Bidirecional de Interligação utilizado no trabalho:
 (a) Topologia Back-to-Back. (b) Topologia Delta UPQC.



(a)



(b)

Fonte: o autor.

Como visto na Figura 3.3, tanto uma topologia quanto a outra, possuem dois inversores em ponte completa, com o barramento CC em comum aos dois inversores. O inversor de entrada está conectado na rede elétrica convencional (denominado PAC da rede elétrica) por um filtro L e o outro inversor de saída conectado em um ponto de acoplamento comum (PAC) da microrrede por um filtro LC.

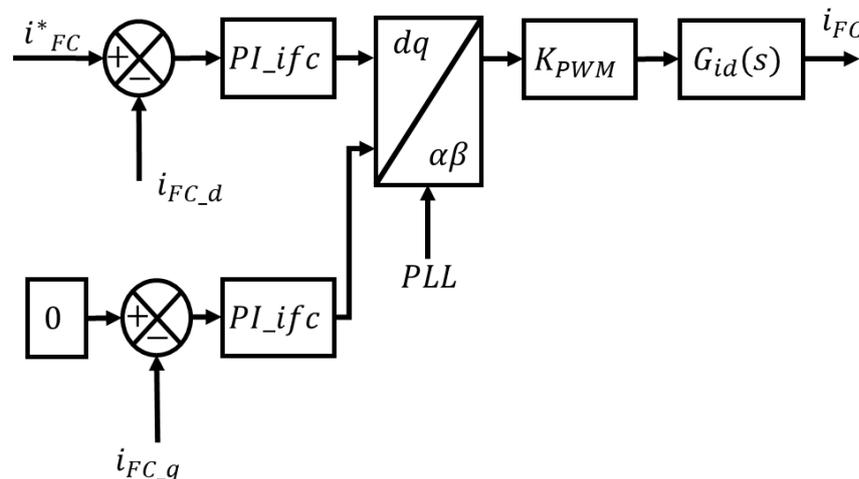
Na topologia Delta UPQC dual (Figura 3.3.b), o inversor de entrada está conectado à rede elétrica por um transformador elétrico de relação unitária de transformação ($N1:N2 = 1$) e o ponto de neutro da carga e do conversor fonte de tensão é o mesmo ponto de neutro da tensão da rede elétrica monofásica. Já para o conversor B2B, o ponto de neutro da rede elétrica se difere do ponto de neutro da carga e do conversor fonte de tensão.

O modelo e equacionamento matemático do conversor fonte de corrente utilizado nas duas topologias de CEBI é descrito no Apêndice A e a sua função de transferência do circuito equivalente é dado pela equação (3.7).

$$G_{id_{FC}}(s) = \frac{i_{FC}(s)}{d_{FC}(s)} = \frac{V_{CC}}{L_{FC} \cdot s + R_{FC}} \quad (3.7)$$

Para o controle do conversor fonte de corrente foi utilizado a técnica de controle no eixo síncrono dq. O diagrama de blocos do controle da malha de corrente do conversor fonte de corrente é dado pela Figura 3.4.

Figura 3-4 – Diagrama de blocos do controlador de corrente do conversor fonte de corrente.



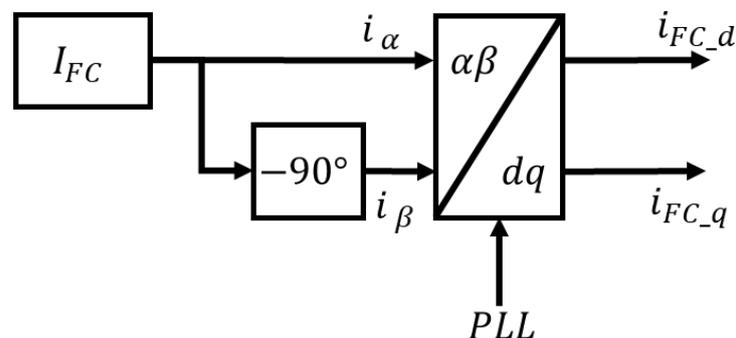
Fonte: o autor.

O conversor fonte de corrente controla uma corrente no sistema, denominada i_{FC} . Essa corrente controlada é senoidal em 60 Hz, estando em fase com a tensão da rede elétrica. Essa corrente é medida, e utilizando a transformada de Clarke e Park, ela é transformada nas variáveis contínuas do eixo dq. A parcela da

corrente i_{FC_q} precisa ser zero, em que ela é comparada com a constante zero e o seu erro passa por um PI de corrente, denominado PI_{ifc} . Já a parcela da corrente i_{FC_d} é comparada com a corrente de referência i^*_{FC} , que se trata da corrente necessária para alimentar as chaves de potência e as perdas nos elementos passivos do sistema somada à corrente que circula no PAC da microrrede. Após essa comparação, o erro passa por um controlador PI_{ifc} , sendo que os ganhos são os mesmos, tanto para o controlador no eixo d quanto para controlador no eixo q.

Esses sinais são passados pela Transformada inversa de Park, obtendo o sinal no eixo alfa, que está em fase com a tensão da rede elétrica devido ao PLL, servindo para gerar os pulsos PWM no microcontrolador para o acionamento das chaves do conversor fonte de corrente. Na Figura 3.5 é mostrado como é obtido a corrente medida do conversor de corrente nos eixos dq, utilizadas no diagrama de controle da Figura 3.4.

Figura 3-5 – Diagrama de blocos da transformada da corrente medida do conversor fonte de corrente em dois sinais contínuos.



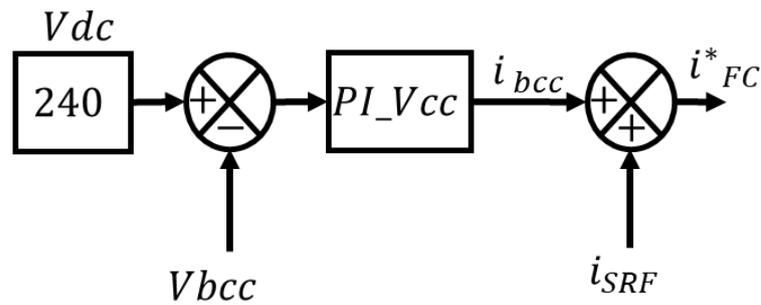
Fonte: o autor.

Na Figura 3.5, a corrente do conversor fonte de corrente é medida, sendo essa corrente considerada no eixo alfa e o defasamento de 90° surge a corrente beta. Usando a transformada de Park com o PLL obtido da rede elétrica, essas correntes alfa e beta são convertidas para o eixo dq.

Já a referência de corrente drenada ou injetada na rede elétrica (i^*_{FC}) precisa ser suficiente para compensar as perdas nos elementos passivos do sistemas e das chaves de potência, ao mesmo tempo que monitora a corrente que circula no PAC da microrrede. Um controlador PI mantém a tensão do barramento CC do banco de capacitores entre os inversores, informando a referência de corrente necessária

para manter sua tensão regulada, que ao ser somada com a informação da corrente necessária no PAC da microrrede, fornece a referência de corrente para o controle da malha de corrente do conversor fonte de corrente. O diagrama de blocos do controle do barramento CC pode ser visto na Figura 3.6.

Figura 3-6 – Diagrama de blocos do controle do barramento CC.



Fonte: o autor.

Na malha de controle do barramento CC é informado a referência de tensão de 240 V, que ao comparar com o valor medido da tensão no barramento CC, o erro passa por um controlador PI_V_{cc} produzindo a corrente de referência i_{bcc} para manter essa tensão regulada no barramento CC. Como foi obtido a corrente das perdas das chaves e a corrente que circula no PAC da microrrede pela corrente i_{SRF} , em que essa corrente atua como uma malha de controle *feed-forward*, ela é somada com a corrente de referência do barramento CC, sendo a referência de corrente que o conversor fonte de corrente deve drenar ou injetar na rede elétrica. O modelo matemático do barramento CC é mostrado no Apêndice A e a sua função de transferência é mostrada na equação (3.8).

$$G_{vi_{FC}}(s) = \frac{\hat{v}_{bcc}(s)}{\hat{i}_{FC_{pico}}(s)} = \frac{V_{pico_REDE}}{2 \cdot C_{bcc} \cdot V_{dc} \cdot s} \quad (3.8)$$

A tensão do barramento CC é controlada pelo conversor fonte de corrente, e essa tensão é de 240Vcc, sendo suficiente para controlar uma tensão senoidal de valor de pico de 180 V no conversor fonte de tensão.

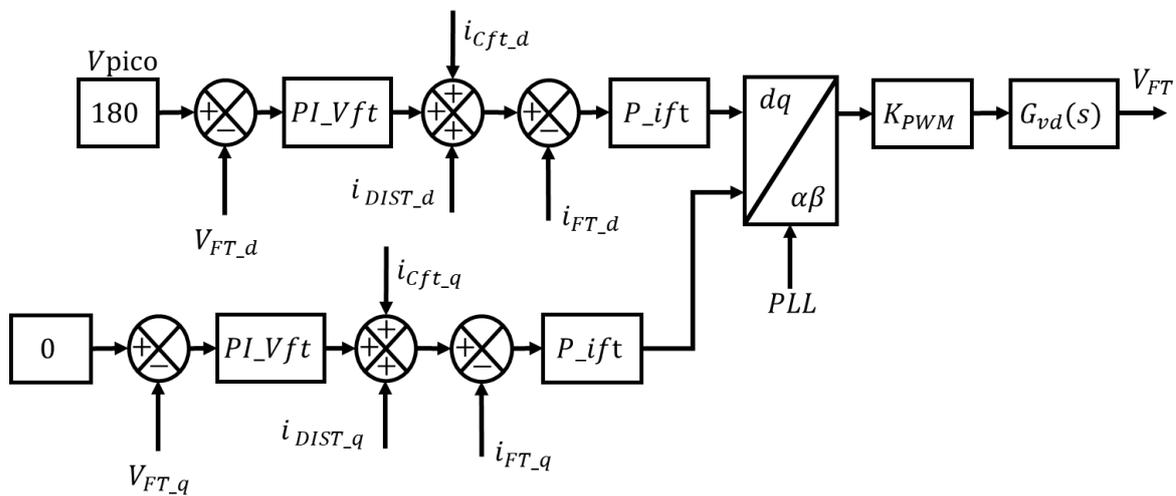
O conversor bidirecional (CEBI) utiliza um conversor fonte de tensão na sua saída. A função desse conversor é controlar uma tensão senoidal para as cargas e ser o formador de rede elétrica no PAC da microrrede, estando em fase com a tensão

da rede elétrica convencional. O modelo e equacionamento matemático do conversor fonte de tensão de ambas as topologias é descrito no Apêndice A e sua função de transferência é mostrada na equação (3.9).

$$G_{vd_{FT}} = \frac{V_{MR}(s)}{\hat{d}_{FT}(s)} = \frac{V_{bcc}}{C_{FT} \cdot L_{FT} \cdot s^2 + C_{FT} \cdot R_{LFT} + 1} \quad (3.9)$$

O controle do conversor fonte de tensão é realizado no eixo síncrono dq e o seu diagrama de blocos do controle completa do conversor fonte de tensão é mostrado na Figura 3.7.

Figura 3-7 – Diagrama de blocos do controlador fonte de tensão.



Fonte: o autor.

No controle do conversor fonte de tensão, todas as variáveis senoidais são transformadas para variáveis contínuas no eixo dq, utilizando as Transformadas de Clarke e Park. O diagrama de blocos da Figura 3.7 apresenta duas malhas de controle, uma malha interna de controle de corrente e outra malha externa de controle de tensão.

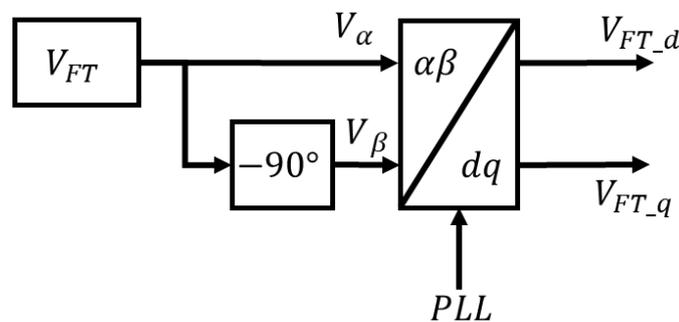
A malha interna de corrente tem a função de controlar a corrente no indutor do conversor fonte de tensão através de um controlador proporcional. A malha externa de tensão é responsável por regular uma tensão senoidal na saída do conversor fonte de tensão, através de um controlador proporcional-integral.

Por se tratar de um controlador multi-malhas, a malha interna de corrente é mais rápida do que a malha externa de tensão, com o intuito de responder mais

rapidamente às variações na corrente drenada ou injetada do barramento da microrrede. De acordo com SILVA (2001) a malha externa de tensão não pode ter uma velocidade de resposta maior que a malha interna de corrente sob o risco de haver instabilidade no controle.

Como pode ser visto no diagrama de blocos do conversor fonte de tensão da Figura 3.7, o conversor controla uma tensão V_{FT} . Essa tensão V_{FT} é medida e é transformada em variáveis do eixo dq pela transformada de Clarke e Park, como pode ser visto no diagrama de blocos da Figura 3.8.

Figura 3-8 – Diagrama de blocos da transformação da tensão do conversor fonte de tensão para o eixo dq.

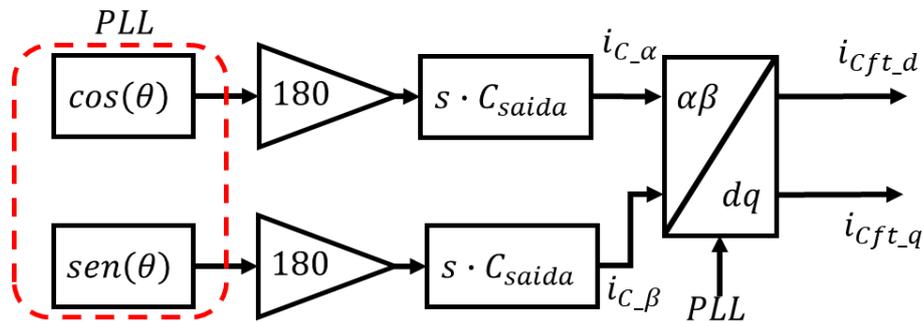


Fonte: o autor.

Com os valores da tensão V_{FT} nos eixos d e q, eles são comparados com os valores de referência, em que V_{FT_d} deve ter o mesmo valor da tensão de pico da rede elétrica e V_{FT_q} deve ter valor nulo, para estar em fase com a tensão da rede elétrica. O erro de cada um das comparações são ajustadas por um controlador PI de tensão denominado PI_Vft , em que ambos possuem o mesmo ganho.

Na saída do controlador, a referência de corrente do conversor fonte de tensão é somada com a corrente de distúrbio i_{DIST} , que para a topologia Delta UPQC, a corrente de distúrbio é a diferença entre a corrente da microrrede pela corrente do conversor fonte de corrente, ou seja, $i_{DIST} = i_{MR} - i_{FC}$, e no caso do B2B, a corrente de distúrbio é apenas a corrente na microrrede, ou, $i_{DIST} = i_{MR}$, além da soma da estimativa de corrente do capacitor i_{cft} do filtro do conversor fonte de tensão. O diagrama de blocos que representa a estimativa de corrente do capacitor do filtro é mostrado na Figura 3.9.

Figura 3-9 – Diagrama de blocos da estimativa de corrente do capacitor do filtro do conversor fonte de tensão.



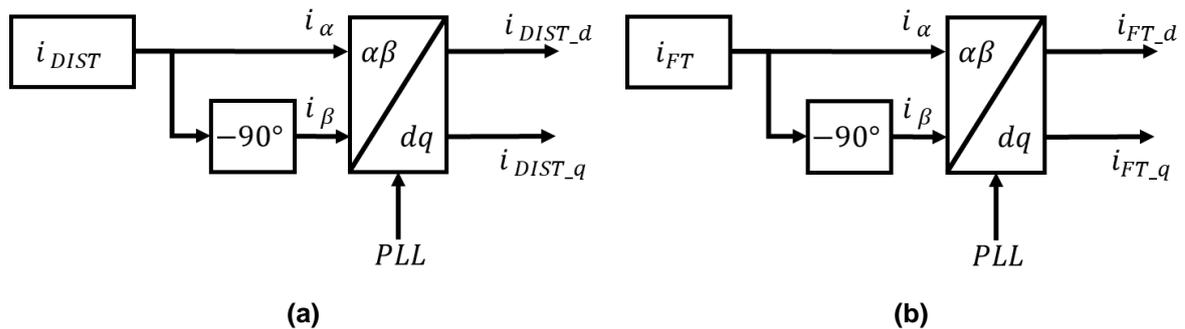
Fonte: o autor.

Uma forma de manter a estimativa de corrente no capacitor sem interferências da tensão do conversor fonte de tensão, ou até mesmo da rede elétrica, se utilizou as medidas diretas do PLL, em que o seno do PLL é atrasado 90° em relação ao cosseno. Como ambos tem um valor de pico unitário é dado um ganho da tensão de pico da rede elétrica, obtendo a estimativa de corrente pela função de transferência do capacitor, dada pela equação (3.10).

$$\begin{aligned} i_{cap_alpha} &= V_{FT}(\theta) \cdot C_{FT} \cdot s = 180 \cdot \cos(\theta)_{PLL} \cdot C_{FT} \cdot s \\ i_{cap_beta} &= V_{FT}(\theta - 90^\circ) \cdot C_{FT} \cdot s = 180 \cdot \sin(\theta)_{PLL} \cdot C_{FT} \cdot s \end{aligned} \quad (3.10)$$

O resultado da soma dessas três correntes, ou seja, a corrente de referência obtida pelo controlador PI de tensão, a corrente estimada do capacitor do filtro e a corrente de distúrbio, que no UPQC é $i_{DIST_UPQC} = i_{MR} - i_{FC}$ e no caso do B2B é dada por $i_{DIST_B2B} = i_{MR}$, são comparadas com a corrente medida no indutor do filtro do conversor fonte de tensão, sendo todas as correntes no eixo dq. Os diagramas de blocos da transformada para o eixo dq da corrente da microrrede e da corrente medida no indutor pode ser visto na Figura 3.10.

Figura 3-10 – Diagrama de blocos da transformação das correntes para o eixo dq: (a) corrente da microrrede. (b) corrente do conversor fonte de tensão.



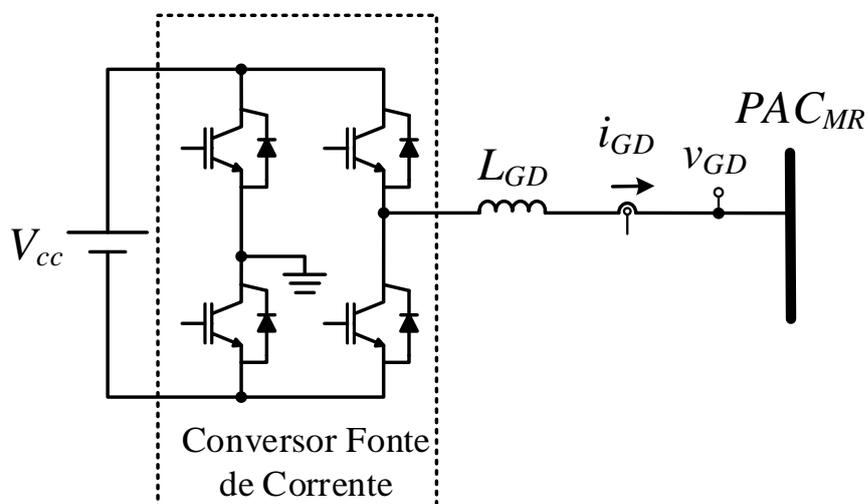
Fonte: o autor.

Após a comparação com a corrente medida, surge um erro que passa por um controlador de ganho proporcional P_{ift} , e esse sinal de controle é transformado para o eixo alfa pela Transformada Inversa de Park, passando pelo ganho K_{PWM} para atuar nas chaves de potência do conversor fonte de tensão.

3.5 Fonte de geração distribuída emulada

Na intenção de avaliar a bidirecionalidade do conversor de interligação, no PAC da microrrede é conectado um inversor em ponte completa controlado em corrente com filtro indutivo L_{GD} na saída, emulando uma fonte de geração distribuída, como pode ser visto a sua estrutura na Figura 3.11.

Figura 3-11 – Circuito do emulador da fonte de geração distribuída controlado em corrente.



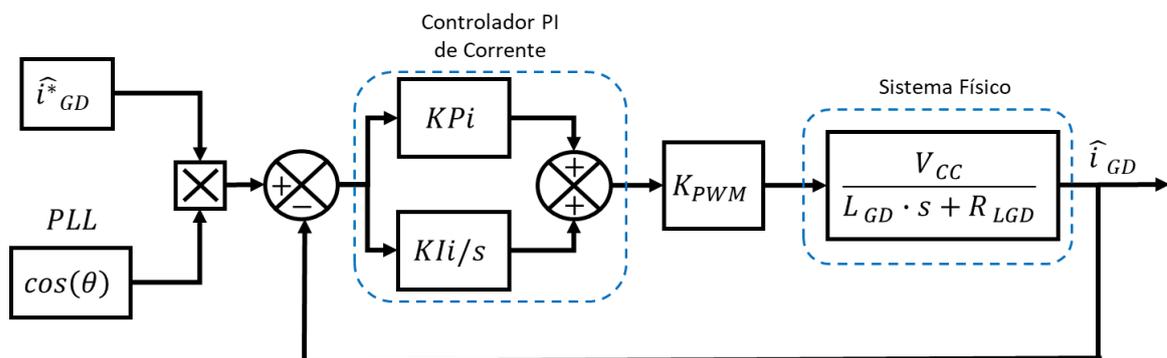
Fonte: o autor.

A tensão V_{CC} pode ser obtida de um sistema fotovoltaico ou de um banco de baterias, ou de um sistema de corrente alternada que passa por um retificador e um banco de capacitores. Esse sistema que emula uma fonte de GD é controlado em corrente, atuando como um conversor fonte de corrente. O modelo matemático é o mesmo utilizado para o conversor fonte de corrente e a sua função de transferência é mostrado na equação (3.11).

$$G_{id_GD}(s) = \frac{i_{GD}(s)}{d_{GD}(s)} = \frac{V_{CC}}{L_{GD} \cdot s + R_{GD}} \quad (3.11)$$

A malha de controle em malha fechada da corrente injetada no PAC da microrrede pode ser mostrado no diagrama de blocos da Figura 3.12.

Figura 3-12 – Diagrama de blocos da malha de controle do emulador de fonte de geração distribuída.



Fonte: o autor.

A malha de controle do emulador recebe a informação de corrente que será processada pelo inversor através da variável \hat{i}_{GD}^* , que é multiplicada pelo cosseno vindo do PLL. Com essa referência de corrente, o emulador drena a corrente informada do seu barramento CC para injetar no PAC da microrrede.

3.6 Parâmetros das malhas de controle

Os valores dos elementos utilizados CEBI e no emulador de geração distribuída são apresentados na Quadro 3.1.

Quadro 3.1 – Especificações técnicas dos elementos utilizados no sistema em estudo.

Definição	Variável	Valor
Tensão do barramento CC	V_{dc}	240 V
Ganho do PWM	K_{PWM}	2 / 3750
Indutor do conversor fonte de corrente	L_{FC}	3,14 mH
Resistência série do conversor fonte de corrente	R_{LFC}	0,38 Ω
Capacitância do barramento CC	C_{DC}	1410 μ F
Tensão de pico da Rede elétrica	V_{PICO}	180 V
Indutor do conversor fonte de tensão	L_{FT}	354 μ H
Resistência série do conversor fonte de tensão	R_{LFT}	0,12 Ω
Capacitância do conversor fonte de tensão	C_{FT}	40 μ F
Indutor do emulador de fonte de geração distribuída	L_{GD}	3,14 mH
Resistência série do emulador de fonte de geração distribuída	R_{GD}	0,38 Ω

Fonte: Autor.

O ganho do PWM está relacionado com o valor de pico da onda triangular, usada como portadora para gerar os pulsos das chaves dos conversores CC/CA e pode ser calculado pela equação (3.12).

$$K_{PWM} = \frac{2}{P_{PWM}} \quad (3.12)$$

No caso desse trabalho, o pico do PWM é igual à $P_{PWM} = 3750$. O projeto dos controladores e a metodologia para se obter os ganhos dos controladores é mostrado no Apêndice B, e os valores dos controladores utilizados para a operacionalização dos conversores fonte de corrente e fonte de tensão são apresentados no Quadro 3.2.

Quadro 3.2 – Valores dos ganhos dos controladores utilizados nas malhas de controle.

Definição	Variável	Valor
Ganho proporcional da malha de corrente do conversor fonte de corrente	Kp_{id_FC}	440,3781
Ganho integral da malha de corrente do conversor fonte de corrente	Ki_{id_FC}	67093
Ganho proporcional da malha de tensão do barramento CC	Kp_{vi_bcc}	2,3854
Ganho integral da malha de tensão do barramento CC	Ki_{vi_bcc}	0,09049
Ganho proporcional da malha de corrente do conversor fonte de corrente	Kp_{id_FT}	43,4525
Ganho proporcional da malha de corrente do conversor fonte de tensão	Kp_{vd_FT}	0,1857
Ganho integral da malha de corrente do conversor fonte de tensão	Ki_{vd_FT}	66,8130
Ganho proporcional da malha de corrente do emulador	Kp_{id_GD}	268,1787
Ganho integral da malha de corrente do emulador	Ki_{id_GD}	$1,9107 \times 10^6$
Ganho proporcional do PLL	Kp_{PLL}	180
Ganho integral do PLL	Ki_{PLL}	1300

Fonte: O autor.

Os controladores foram implementados por equações de diferenças em um sistema embarcado, o microcontrolador TMS320F28335 da Texas Instruments após a discretização dos ganhos pela regra de Tustin. A frequência de amostragem utilizada foi de 60 kHz.

3.7 Considerações finais do capítulo

Nesse capítulo foi apresentado a metodologia utilizada para implementar esse sistema de conversor bidirecional, assim como os valores dos componentes utilizados.

No CEBI, as malhas de controle atuam em referências contínuas, obtidas das Transformadas de Clarke e de Park. Nesse capítulo foi apresentado essas transformadas e a explicação da utilização delas para o sistema monofásico.

Com as Transformadas de Clarke e de Park foi possível implementar o algoritmo para identificar a fase da tensão de rede elétrica, o algoritmo PLL. No trabalho foi utilizado o p-PLL e nesse capítulo foi apresentado a teoria do p-PLL e o diagrama de blocos do algoritmo implementado.

Com o intuito de monitorar a corrente no PAC da microrrede foi utilizado o algoritmo SRF, e foi apresentado a forma que ele foi implementado na malha de controle da referência de corrente do conversor fonte de corrente.

Além disso, nesse capítulo foi detalhado os circuitos das duas topologias de CEBI utilizadas, o Back-to-Back e a Delta UPQC e as considerações para a utilização da mesma estratégia de controle para as duas topologias. Foi apresentado e discutido as malhas de controle dos conversores fonte de corrente e fonte de tensão, com a sua modelagem sendo apresentada no Apêndice A e o projeto dos controladores sendo apresentado no Apêndice B.

Finalmente, nesse capítulo foi apresentado os valores dos elementos utilizados no sistema CEBI e no emulador de fonte de geração distribuída, com os respectivos ganhos dos controladores utilizados e implementados na prática por um sistema embarcado.

4. FLUXO DE POTÊNCIA

Para um melhor entendimento no funcionamento das topologias B2B e Delta UPQC, e o seu comportamento como conversor bidirecional de interligação, a proposta desse trabalho é realizar um estudo para dar subsídios na demonstração das diferenças entre as duas topologias e o dimensionamento adequado dos inversores de ambas as topologias.

Esse estudo apresentará curvas da potência processada por cada inversor em relação à variação da tensão de entrada e de saída das topologias avaliadas.

A norma IEEE 1459 (2010) traz as expressões matemáticas utilizadas no desenvolvimento de medição de grandezas de energia elétrica, para condições senoidais, não senoidais, carga balanceada e cargas desequilibradas, fornecendo definições de energia elétrica para quantificar o fluxo de energia elétrica em circuitos monofásicos e trifásicos.

Das definições apresentadas na norma se faz necessário apresentar alguns conceitos antes de apresentar o equacionamento do fluxo de potência das duas topologias utilizadas.

A potência aparente pode ser apresentada em termos de corrente e tensão RMS ou em termos de fundamentais e harmônicos, como pode ser visto na equação (4.1), em que o índice 1 representa a variável fundamental, o índice H representa a variável harmônica e o índice N representa a variável não fundamental.

$$S^2 = (VI)^2 = (V_1^2 + V_H^2) \cdot (I_1^2 + I_H^2) \quad (4.1)$$

$$S^2 = (V_1 I_1)^2 + (V_1 I_H)^2 + (V_H I_1)^2 + (V_H I_H)^2 = S_1^2 + S_N^2$$

A potência aparente não-fundamental pode ser representada conforme a equação (4.2), sendo D_I é a potência de distorção de corrente e D_V é a potência de distorção de tensão.

$$S_N^2 = D_I^2 + D_V^2 + S_H^2 \quad (4.2)$$

As potências de distorção podem ser representadas na forma de taxa de distorção harmônica, como mostra a equação (4.3).

$$D_I = V_1 \cdot I_H = S_1 \cdot THD_I$$

$$D_V = V_H \cdot I_1 = S_1 \cdot THD_V \quad (4.3)$$

$$S_H = V_H \cdot I_H = S_1 \cdot THD_I \cdot THD_V$$

Com isso, a potência aparente não-fundamental pode ser representada em função das taxas de distorção harmônica, obtido da substituição da equação (4.3) na equação (4.2), surgindo a equação (4.4).

$$S_N^2 = (S_1 \cdot THD_I)^2 + (S_1 \cdot THD_V)^2 + (S_1 \cdot THD_I \cdot THD_V)^2 \quad (4.4)$$

$$\frac{S_N^2}{S_1^2} = THD_I^2 + THD_V^2 + (THD_I \cdot THD_V)^2$$

O fator de potência total pode ser representado em função das potências ativas e aparentes, fundamentais e não fundamentais, como mostra a equação (4.5).

$$FP = \cos \theta = \frac{P}{S}$$

$$FP = \frac{P}{S} = \frac{P_1 + P_H}{\sqrt{S_1^2 + S_N^2}} = \left(\frac{P_1}{S_1}\right) \cdot \frac{[1 + (P_H/P_1)]}{\sqrt{1 + (S_N/S_1)^2}} = FP_1 \cdot \frac{[1 + (P_H/P_1)]}{\sqrt{1 + (S_N/S_1)^2}} \quad (4.5)$$

$$FP = \cos \theta_1 \cdot \frac{[1 + (P_H/P_1)]}{\sqrt{1 + THD_I^2 + THD_V^2 + (THD_I \cdot THD_V)^2}}$$

O termo $\cos \theta_1 = FP_1$ é conhecido como fator de potência fundamental, ou chamado também de fator deslocamento, dado pelo ângulo formado entre a corrente e a tensão.

Diante dessas definições, as duas topologias de CEBI desse trabalho possuem algumas particularidades teóricas devido ao seu funcionamento. Devido ao fato da corrente na rede elétrica ser controlada, ela só possui a parcela fundamental, sendo senoidal, livre de harmônicos e de parcela reativa, como pode ser definido na equação (4.6).

$$\begin{aligned}
 I_{REDE} &= I_{REDE_1} + I_{REDE_H} \\
 I_{REDE_H} &= 0 \\
 I_{REDE} &= I_{REDE_1}
 \end{aligned} \tag{4.6}$$

Da mesma forma, no PAC da microrrede é controlado teoricamente uma tensão puramente senoidal, livre de harmônicos e de parcela reativa, restando apenas a tensão fundamental, como pode ser definido na equação (4.7).

$$\begin{aligned}
 V_{MR} &= V_{MR_1} + V_{MR_H} \\
 V_{MR_H} &= 0 \\
 V_{MR} &= V_{MR_1}
 \end{aligned} \tag{4.7}$$

Na aplicação do conversor de interligação (CEBI), o fator de potência da rede elétrica é unitário, pois o CEBI controla uma corrente puramente senoidal drenada ou injetada na rede elétrica.

No PAC da microrrede devido à possibilidade da conexão de cargas não lineares, o fator de potência pode ser diferente do unitário. De acordo com a discussão da equação (4.7), a tensão na microrrede é controlada e não possui harmônicos, portanto, não há potência ativa harmônica e não há taxa de distorção harmônica na tensão. Com isso, simplificando e aplicando o fato de potência da equação (4.5) para o caso do PAC da microrrede, temos a equação (4.8)

$$FP_{MR} = \frac{P_{MR_1}}{|S_{MR}|} = \frac{\cos \theta_{MR_1}}{\sqrt{1 + THD_{I_{MR}}^2}} \tag{4.8}$$

Quando o CEBI está em funcionamento, uma quantidade de potência é dissipada pelo barramento CC, pelos elementos passivos do sistema e pelas chaves de potência. Quando conectado na rede elétrica, a rede fornece a potência das cargas e a potência dissipada pelos elementos dos conversores, e essa potência dissipada pode ser modelado com uma parte da potência ativa da carga, denominada k_{BCC} . Equacionando o k_{BCC} temos a equação (4.9).

$$S_{REDE_1} = P_{MR_1} + P_{BCC} \quad (4.9)$$

$$S_{REDE_1} = P_{MR_1} + k_{BCC} \cdot P_{MR_1} = P_{MR_1} \cdot (1 + k_{BCC})$$

Isolando o k_{BCC} , temos a equação (4.10).

$$k_{BCC} = \frac{S_{REDE_1} - P_{MR_1}}{P_{MR_1}} \quad (4.10)$$

O termo k_{BCC} pode variar de acordo com o ponto de operação do conversor, pois dependendo do ponto de operação do sistema, a corrente é alterada e há mais ou menos potência dissipada em calor.

4.1 Fluxo de Potência do Back-to-Back

A topologia B2B possui dois conversores, um conversor fonte de corrente conectado no PAC da rede elétrica e um conversor fonte de tensão conectado no PAC da microrrede, como mostrado na Figura 3.1(a). Realizando o equacionamento do fluxo de potência do **conversor fonte de corrente**, temos que a potência do conversor fonte de corrente é a mesma potência aparente da rede elétrica, como mostrado na equação (4.11).

$$S_{FC} = V_{REDE} \cdot I_{REDE}^* \quad (4.11)$$

Utilizando a definição apresentada na equação (4.1) e as considerações das equações (4.6) e (4.7), a equação (4.11) pode ser escrita como a equação (4.12).

$$|S_{FC}| = \sqrt{S_{FC1}^2 + S_{FCN}^2} = \sqrt{(V_{REDE_1} \cdot I_{REDE_1})^2 + (V_{REDE_H} \cdot I_{REDE_1})^2} \quad (4.12)$$

Utilizando a definição de potência de distorção apresentado na definição da equação (4.3), temos a equação (4.13).

$$\begin{aligned}
|S_{FC}| &= \sqrt{(V_{REDE_1} \cdot I_{REDE_1})^2 + (THD_{V_REDE} \cdot S_{REDE_1})^2} \\
|S_{FC}| &= \sqrt{(S_{REDE_1})^2 + (THD_{V_REDE} \cdot S_{REDE_1})^2} \\
|S_{FC}| &= \sqrt{S_{REDE_1}^2 \cdot [1 + (THD_{V_REDE})^2]}
\end{aligned} \tag{4.13}$$

Como a potência aparente da rede elétrica é responsável por fornecer a potência para os elementos do conversor e para o PAC da microrrede, substituindo a equação (4.9) na equação (4.13), temos a equação (4.14).

$$\begin{aligned}
|S_{FC}| &= \sqrt{[P_{MR_1} \cdot (1 + k_{BCC})]^2 \cdot [1 + (THD_{V_REDE})^2]} \\
|S_{FC}| &= \sqrt{P_{MR_1}^2 \cdot (1 + k_{BCC})^2 \cdot (1 + THD_{V_REDE}^2)} \\
|S_{FC}| &= P_{MR_1} \cdot \sqrt{(1 + k_{BCC})^2 \cdot (1 + THD_{V_REDE}^2)}
\end{aligned} \tag{4.14}$$

Fazendo a normalização da potência processada pelo conversor fonte de corrente em relação à potência disponibilizada no PAC da microrrede do conversor bidirecional Back-to-Back, temos a equação (4.15).

$$\frac{|S_{FC}|}{|S_{MR}|} = \frac{P_{MR_1}}{\sqrt{S_{MR_1}^2 + S_{MR_N}^2}} \cdot \sqrt{(1 + k_{BCC})^2 \cdot (1 + THD_{V_REDE}^2)} \tag{4.15}$$

Utilizando a consideração da equação (4.8) e substituindo na equação (4.15), temos a potência processada no conversor fonte de corrente em relação à potência disponibilizada no barramento da microrrede apresentada na equação (4.16).

$$\begin{aligned}
\frac{|S_{FC}|}{|S_{MR}|} &= \frac{\cos \theta_{I_{MR_1}}}{\sqrt{1 + THD_{I_{MR}}^2}} \cdot \sqrt{(1 + k_{BCC})^2 \cdot (1 + THD_{V_REDE}^2)} \\
\frac{|S_{FC}|}{|S_{MR}|} &= \cos \theta_{I_{MR_1}} \cdot \sqrt{\frac{(1 + k_{BCC})^2 \cdot (1 + THD_{V_REDE}^2)}{(1 + THD_{I_{MR}}^2)}}
\end{aligned} \tag{4.16}$$

O **conversor fonte de tensão** do Back-to-Back está conectado no PAC da microrrede e o equacionamento do fluxo de potência do fonte de tensão é dado pela equação (4.17).

$$S_{FT} = V_{MR} \cdot I_{MR}^* = (V_{MR_1} \cdot I_{MR_1})^2 + (V_{MR_1} \cdot I_{MR_H})^2 \quad (4.17)$$

Utilizando da definição da equação (4.1) e as considerações realizada na equação (4.7), a potência aparente do conversor fonte de tensão pode ser dada pela equação (4.18).

$$|S_{FT}| = \sqrt{(S_{MR_1}^2 + S_{MR_N}^2)} \quad (4.18)$$

Ao realizar a normalização pela potência disponibilizada na microrrede, temos a equação (4.19).

$$\frac{|S_{FT}|}{|S_{MR}|} = \frac{\sqrt{(S_{MR_1}^2 + S_{MR_N}^2)}}{\sqrt{S_{MR_1}^2 + S_{MR_N}^2}} = 1 \quad (4.19)$$

A potência aparente processada pelo conversor fonte de tensão do Back-to-Back é a mesma disponibilizada no PAC microrrede, sendo que a sua relação é uma constante igual à unidade, independente dos distúrbios e alterações da tensão da rede elétrica em função da tensão da microrrede.

4.2 Fluxo de Potência do Delta UPQC

A análise de fluxo de potência da UPQC já vem sendo discutido em alguns trabalhos (CAMPANHOL, 2017; SILVA, 2001; BARRIVIERA, et al, 2012) e tem sido utilizado para projetar de maneira eficiente os inversores, baseado na potência que cada inversor processa.

Considerando o circuito da Figura 3.3(b), onde é apresentado a topologia Delta UPQC, em que é controlado uma corrente puramente senoidal no PAC da rede elétrica convencional e uma tensão puramente senoidal no PAC da microrrede, ambas

sem distorção harmônica e sem deslocamento angular em relação à tensão da rede elétrica, é possível obter o fluxo de potência que a topologia processa em cada conversor.

Primeiramente será obtido a relação de potência processada pelo conversor fonte de corrente em relação à potência na microrrede. O **conversor fonte de corrente**, conectado no PAC da rede elétrica por um transformador, tem a sua potência aparente complexa calculada pela equação (4.20).

$$S_{FC} = V_{TRAFO} \cdot I_{REDE}^* = (V_{REDE} - V_{MR}) \cdot I_{REDE}^* \quad (4.20)$$

A tensão no transformador será a diferença de tensão entre a rede elétrica e a microrrede. Utilizando as considerações das equações (4.6) e (4.7), a equação (4.20) pode ser reescrita na forma de variáveis fundamentais e harmônicas, como mostra a equação (4.21).

$$\begin{aligned} S_{FC} &= (V_{REDE_1} + V_{REDE_H} - V_{MR_1}) \cdot I_{REDE_1} \\ S_{FC} &= (V_{REDE_1} - V_{MR_1}) \cdot I_{REDE_1} + V_{REDE_H} \cdot I_{REDE_1} \end{aligned} \quad (4.21)$$

Obtendo o módulo do vetor da potência do conversor fonte de corrente, utilizando a definição da equação (4.1) a equação (4.21) pode ser escrita da forma da equação (4.22).

$$|S_{FC}| = \sqrt{S_{FC_1}^2 + S_{FC_N}^2} = \sqrt{[(V_{REDE_1} - V_{MR_1}) \cdot I_{REDE_1}]^2 + (V_{REDE_H} \cdot I_{REDE_1})^2} \quad (4.22)$$

Utilizando a definição da equação (4.3) temos a equação (4.23).

$$|S_{FC}| = \sqrt{[(V_{REDE_1} - V_{MR_1}) \cdot I_{REDE_1}]^2 + (THD_{V_{REDE}} \cdot S_{REDE_1})^2} \quad (4.23)$$

Realizando algumas manipulações matemáticas na equação (4.23), podemos reescrevê-la na forma da equação (4.24).

$$\begin{aligned}
|S_{FC}| &= \sqrt{[(V_{REDE_1} \cdot I_{REDE_1} - V_{MR_1} \cdot I_{REDE_1})]^2 + (THD_{V_{REDE}} \cdot S_{REDE_1})^2} \\
|S_{FC}| &= \sqrt{\left[V_{REDE_1} \cdot I_{REDE_1} \cdot \left(1 - \frac{V_{MR_1}}{V_{REDE_1}} \right) \right]^2 + (THD_{V_{REDE}} \cdot S_{REDE_1})^2} \\
|S_{FC}| &= \sqrt{\left[S_{REDE_1} \cdot \left(1 - \frac{V_{MR_1}}{V_{REDE_1}} \right) \right]^2 + (THD_{V_{REDE}} \cdot S_{REDE_1})^2} \\
|S_{FC}| &= \sqrt{S_{REDE_1}^2 \cdot \left[\left(1 - \frac{V_{MR_1}}{V_{REDE_1}} \right)^2 + (THD_{V_{REDE}})^2 \right]}
\end{aligned} \tag{4.24}$$

Como a potência aparente da rede elétrica fornece a energia para as perdas nos elementos passivos do sistema e para a microrrede, utilizando a equação (4.9) e substituindo na equação (4.24) temos a equação (4.25).

$$\begin{aligned}
|S_{FC}| &= \sqrt{[P_{MR_1} \cdot (1 + k_{BCC})]^2 \cdot \left[\left(1 - \frac{V_{MR_1}}{V_{REDE_1}} \right)^2 + (THD_{V_{REDE}})^2 \right]} \\
|S_{FC}| &= \sqrt{P_{MR_1}^2 \cdot (1 + k_{BCC})^2 \cdot \left[\left(1 - \frac{V_{MR_1}}{V_{REDE_1}} \right)^2 + (THD_{V_{REDE}})^2 \right]} \\
|S_{FC}| &= P_{MR_1} \cdot \sqrt{(1 + k_{BCC})^2 \cdot \left[\left(1 - \frac{V_{MR_1}}{V_{REDE_1}} \right)^2 + (THD_{V_{REDE}})^2 \right]}
\end{aligned} \tag{4.25}$$

Ao normalizar a potência aparente do conversor fonte de corrente $|S_{FC}|$ em relação à potência do PAC da microrrede $|S_{MR}|$ temos a equação (4.26).

$$\frac{|S_{FC}|}{|S_{MR}|} = \frac{P_{MR_1}}{\sqrt{S_{MR_1}^2 + S_{MR_N}^2}} \sqrt{(1 + k_{BCC})^2 \cdot \left[\left(1 - \frac{V_{MR_1}}{V_{REDE_1}} \right)^2 + (THD_{V_{REDE}})^2 \right]} \tag{4.26}$$

Utilizando a equação (4.8) e substituindo na equação (4.26), temos a relação da potência do conversor fonte de corrente pela potência da microrrede na equação (4.27).

$$\frac{|S_{FC}|}{|S_{MR}|} = \frac{\cos \theta_{I_{MR_1}}}{\sqrt{1 + THD_{I_{MR}}^2}} \cdot \sqrt{(1 + k_{BCC})^2 \cdot \left[\left(1 - \frac{V_{MR_1}}{V_{REDE_1}}\right)^2 + (THD_{V_{REDE}})^2 \right]} \quad (4.27)$$

$$\frac{|S_{FC}|}{|S_{MR}|} = \cos \theta_{I_{MR_1}} \cdot \sqrt{\frac{(1 + k_{BCC})^2 \cdot \left[\left(1 - \frac{V_{MR_1}}{V_{REDE_1}}\right)^2 + THD_{V_{REDE}}^2 \right]}{(1 + THD_{I_{MR}}^2)}}$$

A equação (4.27) mostra a potência que o conversor fonte de corrente processa em relação a potência disponibilizada no PAC da microrrede.

O **conversor fonte de tensão**, que está conectado no PAC da microrrede tem um valor diferente de potência processada, e para modelar a potência processada pelo conversor fonte de tensão podemos equacionar o seu fluxo de potência. A equação (4.28) mostra potência aparente no conversor fonte de tensão da Figura 3.3(b).

$$S_{FT} = S_{MR} - V_{MR} \cdot I_{BARRA} \quad (4.28)$$

A corrente que circula na barra de ligação da topologia UPQC, que liga um dos terminais do transformador à saída do filtro LC do conversor fonte de tensão, é a mesma corrente do conversor fonte de corrente e, que idealmente, é a mesma corrente da rede elétrica. Portanto, a equação (4.28) pode ser escrita como a equação (4.29).

$$S_{FT} = S_{MR} - V_{MR} \cdot I_{FC}^* \quad (4.29)$$

$$S_{FT} = S_{MR} - V_{MR} \cdot I_{REDE}^*$$

A potência aparente fundamental da rede elétrica pode ser escrita na forma da equação (4.30).

$$S_{REDE_1} = V_{REDE_1} \cdot I_{REDE_1} \quad (4.30)$$

Considerando a definição da equação (4.6) e isolando a corrente da equação (4.30), temos a equação (4.31).

$$I_{REDE} = \frac{S_{REDE_1}}{V_{REDE_1}} \quad (4.31)$$

Substituindo a equação (4.31) na equação (4.29), podemos escrever a potência do conversor fonte de tensão na forma da equação (4.32).

$$S_{FT} = S_{MR} - V_{MR} \cdot \frac{S_{REDE_1}}{V_{REDE_1}} \quad (4.32)$$

Obtendo o módulo da potência aparente da equação (4.32), temos a equação (4.33).

$$|S_{FT}| = |S_{MR} - \left[\frac{V_{MR}}{V_{REDE_1}} \cdot S_{REDE_1} \right]|$$

$$S_{FT} = \sqrt{S_{MR_1}^2 + S_{MR_N}^2 - \left(\frac{V_{MR}}{V_{REDE_1}} \cdot S_{REDE_1} \right)^2} \quad (4.33)$$

$$S_{FT} = \sqrt{\left[S_{MR_1} - \left(\frac{V_{MR}}{V_{REDE_1}} \cdot S_{REDE_1} \right) \right]^2 + S_{MR_N}^2}$$

Realizando uma manipulação matemática na equação (4.33), temos a equação (4.34).

$$S_{FT} = \sqrt{S_{MR_1}^2 - 2 \cdot S_{MR_1} \cdot \frac{V_{MR}}{V_{REDE_1}} \cdot S_{REDE_1} + \left[\left(\frac{V_{MR}}{V_{REDE_1}} \cdot S_{REDE_1} \right) \right]^2 + S_{MR_N}^2}$$

$$S_{FT} = \sqrt{S_{MR_1}^2 + S_{MR_N}^2 - 2 \cdot S_{MR_1} \cdot \frac{V_{MR}}{V_{REDE_1}} \cdot S_{REDE_1} + \left[\left(\frac{V_{MR}}{V_{REDE_1}} \cdot S_{REDE_1} \right) \right]^2} \quad (4.34)$$

$$S_{FT} = \sqrt{(S_{MR}^2) - 2 \cdot S_{MR_1} \cdot \frac{V_{MR}}{V_{REDE_1}} \cdot S_{REDE_1} + \left[\left(\frac{V_{MR}}{V_{REDE_1}} \cdot S_{REDE_1} \right) \right]^2}$$

A potência aparente fundamental da microrrede é igual a potência ativa fundamental da microrrede, ou seja, $S_{MR_1} = P_{MR_1}$. Além disso, a potência ativa fundamental disponível na microrrede e a potência de perdas dos elementos do CEBI

são dadas pela potência da rede elétrica, em que a equação (4.9) pode ser substituída na equação (4.34), dando a equação (4.35).

$$S_{FT} = \sqrt{(S_{MR}^2) - 2 \cdot P_{MR_1} \cdot \frac{V_{MR}}{V_{REDE_1}} \cdot (P_{MR_1} \cdot (1 + k_{BCC})) + \left[\left(\frac{V_{MR}}{V_{REDE_1}} \cdot (P_{MR_1} \cdot (1 + k_{BCC})) \right) \right]^2} \quad (4.35)$$

$$S_{FT} = \sqrt{(S_{MR}^2) - 2 \cdot (P_{MR_1}^2) \cdot \frac{V_{MR}}{V_{REDE_1}} \cdot (1 + k_{BCC}) + (P_{MR_1}^2) \cdot \left[\left(\frac{V_{MR}}{V_{REDE_1}} \cdot (1 + k_{BCC}) \right) \right]^2}$$

Isolando a potência aparente da microrrede da definição apresentada na equação (4.8) e elevando ao quadrado e substituindo na equação (4.35), temos a equação (4.36).

$$S_{FT} = \sqrt{\left(\frac{P_{MR_1}^2 \cdot [1 + THD_{LMR}^2]}{(\cos \theta_{MR_1})^2} \right) - 2P_{MR_1}^2 \cdot \frac{V_{MR}}{V_{REDE_1}} \cdot (1 + k_{BCC}) + P_{MR_1}^2 \left[\left(\frac{V_{MR}}{V_{REDE_1}} \cdot (1 + k_{BCC}) \right) \right]^2}$$

$$S_{FT} = \sqrt{P_{MR_1}^2 \left(\frac{[1 + THD_{LMR}^2]}{(\cos \theta_{MR_1})^2} \right) - 2P_{MR_1}^2 \cdot \frac{V_{MR}}{V_{REDE_1}} \cdot (1 + k_{BCC}) + P_{MR_1}^2 \left[\left(\frac{V_{MR}}{V_{REDE_1}} \cdot (1 + k_{BCC}) \right) \right]^2} \quad (4.36)$$

$$S_{FT} = \sqrt{P_{MR_1}^2 \cdot \left[\left(\frac{[1 + THD_{LMR}^2]}{(\cos \theta_{MR_1})^2} \right) - 2 \cdot \frac{V_{MR}}{V_{REDE_1}} \cdot (1 + k_{BCC}) + \left(\frac{V_{MR}}{V_{REDE_1}} \cdot (1 + k_{BCC}) \right)^2 \right]}$$

$$S_{FT} = P_{MR_1} \cdot \sqrt{\left[\left(\frac{[1 + THD_{LMR}^2]}{(\cos \theta_{MR_1})^2} \right) - 2 \cdot \frac{V_{MR}}{V_{REDE_1}} \cdot (1 + k_{BCC}) + \left(\frac{V_{MR}}{V_{REDE_1}} \cdot (1 + k_{BCC}) \right)^2 \right]}$$

Obtendo a relação da potência do conversor fonte de tensão pela potência disponível na microrrede, temos a equação (4.37).

$$\frac{S_{FT}}{S_{MR}} = \frac{P_{MR_1}}{\sqrt{S_{MR_1}^2 + S_{MR_N}^2}} \cdot \sqrt{\left[\left(\frac{[1 + THD_{LMR}^2]}{(\cos \theta_{MR_1})^2} \right) - 2 \cdot \frac{V_{MR}}{V_{REDE_1}} \cdot (1 + k_{BCC}) + \left(\frac{V_{MR}}{V_{REDE_1}} \cdot (1 + k_{BCC}) \right)^2 \right]} \quad (4.37)$$

Utilizando a definição da equação (4.8) e substituindo na equação (4.37), temos a equação (4.38).

$$\begin{aligned}
\frac{S_{FT}}{S_{MR}} &= \frac{\cos \theta_{MR_1}}{\sqrt{1 + THD_{I_{MR}}^2}} \cdot \sqrt{\left[\left(\frac{[1 + THD_{I_{MR}}^2]}{(\cos \theta_{MR_1})^2} \right) - 2 \cdot \frac{V_{MR}}{V_{REDE_1}} \cdot (1 + k_{BCC}) + \left(\frac{V_{MR}}{V_{REDE_1}} (1 + k_{BCC}) \right)^2 \right]} \\
\frac{S_{FT}}{S_{MR}} &= \frac{\cos \theta_{MR_1} \cdot \sqrt{\left[\left(\frac{[1 + THD_{I_{MR}}^2]}{(\cos \theta_{MR_1})^2} \right) - 2 \cdot \frac{V_{MR}}{V_{REDE_1}} \cdot (1 + k_{BCC}) + \left(\frac{V_{MR}}{V_{REDE_1}} (1 + k_{BCC}) \right)^2 \right]}}{\sqrt{1 + THD_{I_{MR}}^2}} \\
\frac{S_{FT}}{S_{MR}} &= \sqrt{\frac{(\cos \theta_{MR_1})^2 \cdot \left[\left(\frac{[1 + THD_{I_{MR}}^2]}{(\cos \theta_{MR_1})^2} \right) - 2 \cdot \frac{V_{MR}}{V_{REDE_1}} \cdot (1 + k_{BCC}) + \left(\frac{V_{MR}}{V_{REDE_1}} (1 + k_{BCC}) \right)^2 \right]}{1 + THD_{I_{MR}}^2}} \\
\frac{S_{FT}}{S_{MR}} &= \sqrt{\frac{[1 + THD_{I_{MR}}^2] - 2 \cdot (\cos \theta_{MR_1})^2 \cdot \frac{V_{MR}}{V_{REDE_1}} \cdot (1 + k_{BCC}) + (\cos \theta_{MR_1})^2 \cdot \left(\frac{V_{MR}}{V_{REDE_1}} (1 + k_{BCC}) \right)^2}{1 + THD_{I_{MR}}^2}} \\
\frac{S_{FT}}{S_{MR}} &= \sqrt{\frac{[1 + THD_{I_{MR}}^2] + \frac{(\cos \theta_{MR_1})^2 \cdot \left(\frac{V_{MR}}{V_{REDE_1}} (1 + k_{BCC}) \right)^2 - 2 \cdot (\cos \theta_{MR_1})^2 \cdot \frac{V_{MR}}{V_{REDE_1}} \cdot (1 + k_{BCC})}{1 + THD_{I_{MR}}^2}} \\
\frac{S_{FT}}{S_{MR}} &= \sqrt{1 + \frac{(\cos \theta_{MR_1})^2 \cdot \left(\frac{V_{MR}}{V_{REDE_1}} (1 + k_{BCC}) \right)^2 - 2 \cdot (\cos \theta_{MR_1})^2 \cdot \frac{V_{MR}}{V_{REDE_1}} \cdot (1 + k_{BCC})}{1 + THD_{I_{MR}}^2}}
\end{aligned} \tag{4.38}$$

Rearranjando matematicamente a equação (4.38), conseguimos obter a relação entre a potência processada pelo conversor fonte de tensão e a potência disponibilizada no PAC da microrrede pela equação (4.39).

$$\frac{S_{FT}}{S_{MR}} = \sqrt{1 + \frac{(\cos \theta_{MR_1})^2 \cdot \left(\frac{V_{MR}}{V_{REDE_1}} \right) \cdot (1 + k_{BCC}) \cdot \left[\left(\frac{V_{MR}}{V_{REDE_1}} \cdot (1 + k_{BCC}) \right) - 2 \right]}{1 + THD_{I_{MR}}^2}} \tag{4.39}$$

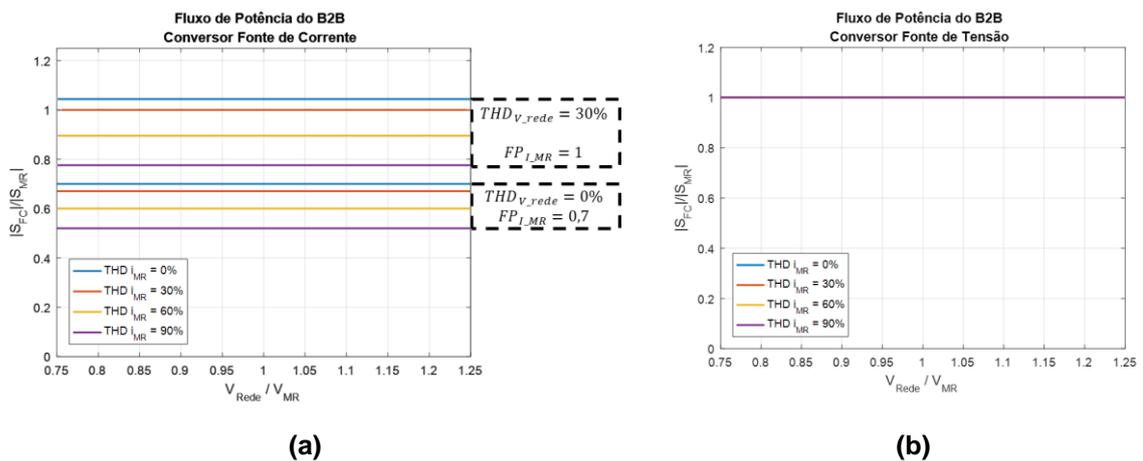
A partir da equação (4.39) é possível traçar as curvas do fluxo de potência do conversor fonte de tensão da topologia UPQC, variando a tensão da rede elétrica e as taxas de distorção harmônica.

4.3 Curvas do fluxo de potência das topologias

Com as equações (4.16) e (4.19) do conversor Back-to-Back e as equações (4.27) e (4.39) do UPQC é possível obter as curvas de potência aparente dos conversores fonte de corrente e fonte de tensão, normalizados pela potência disponibilizada na microrrede.

A Figura 4.1 mostra as curvas do B2B considerando o termo $k_{BCC} = 0$, em que não há perdas nos elementos do conversor, para algumas condições de distorção harmônica na tensão da rede elétrica e para diferentes fatores de potência e taxa de distorção harmônica da corrente na microrrede.

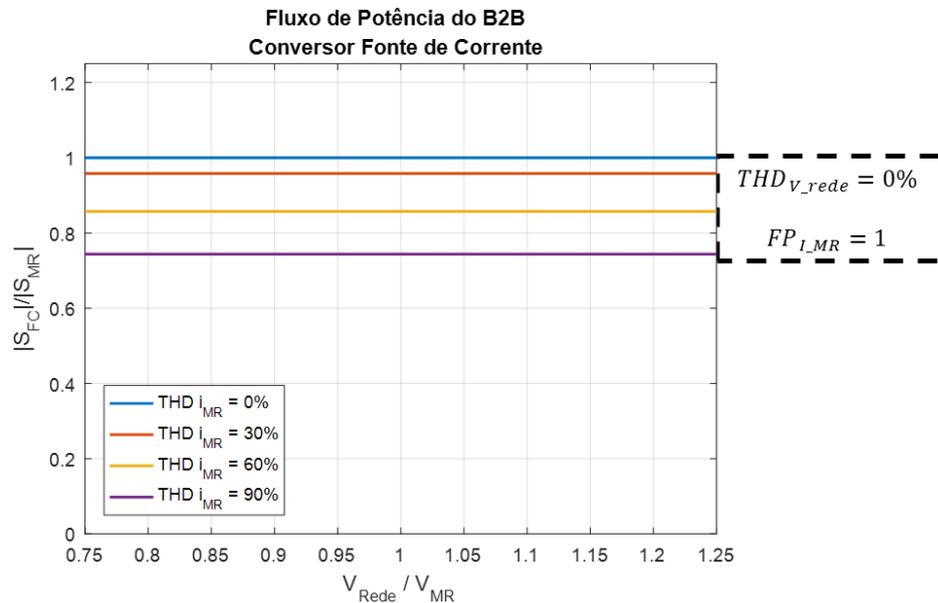
Figura 4-1 – Curvas das potências aparentes normalizadas sem perdas do Back-to-Back: (a) conversor fonte de corrente. (b) conversor fonte de tensão.



Fonte: o autor.

Para a condição de THD da tensão da rede elétrica ser nula e o fator de potência da corrente de carga ser unitário, as curvas de potência do conversor fonte de corrente se misturam com as outras condições da Figura 4.1(a). Na Figura 4.2 é mostrado as curvas do fluxo de potência para esse caso.

Figura 4-2 – Curvas das potências aparentes normalizadas sem perdas do conversor fonte de corrente do Back-to-Back: sem distorção na rede elétrica e fator de potência na microrrede unitário.



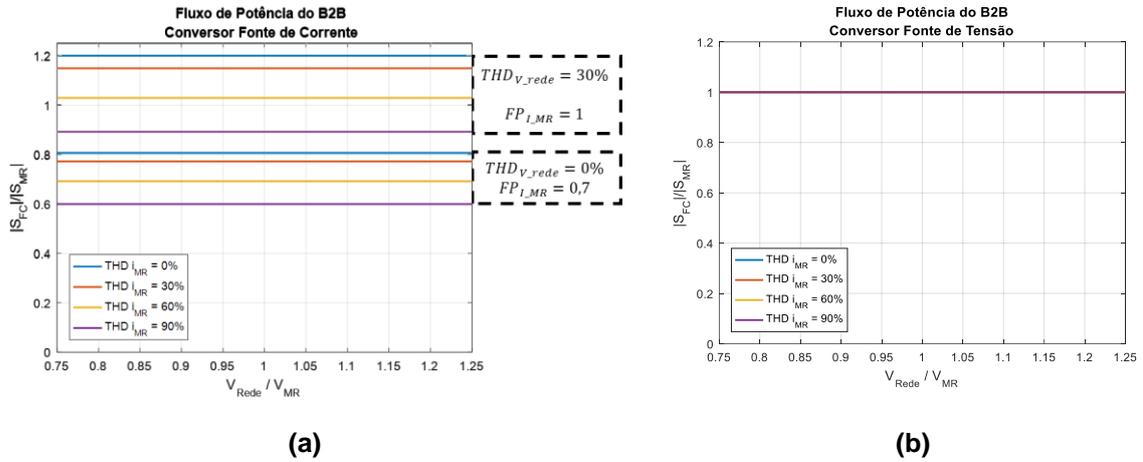
Fonte: o autor.

Como visto, a potência processada pelos conversores fonte de corrente e fonte de tensão do B2B não dependem da variação da tensão na rede elétrica em relação a tensão da microrrede. No conversor fonte de corrente é possível verificar que a potência processada mudará de acordo com a taxa de distorção harmônica da tensão da rede e a taxa de distorção harmônica da corrente da microrrede, além de variar de acordo com o fator de potência da microrrede. Quanto maior a taxa de distorção harmônica na corrente da microrrede em relação à taxa de distorção da tensão da rede elétrica, menor que a unidade será a potência processada pelo conversor fonte de corrente.

No conversor fonte de tensão para todos os casos, a potência processada por ele será a mesma da microrrede, uma vez que ele está diretamente conectado no PAC da microrrede.

Na Figura 4.3 foi considerado que as perdas nos elementos do conversor bidirecional seja de 15% em relação à potência disponibilizada no PAC da microrrede, ou seja, $k_{BCC} = 0,15$, mostrando as curvas do Back-to-Back considerando que há perdas nos elementos do conversor.

Figura 4-3 – Curvas das potências aparentes normalizadas com perdas de 15% do Back-to-Back: (a) conversor fonte de corrente. (b) conversor fonte de tensão.

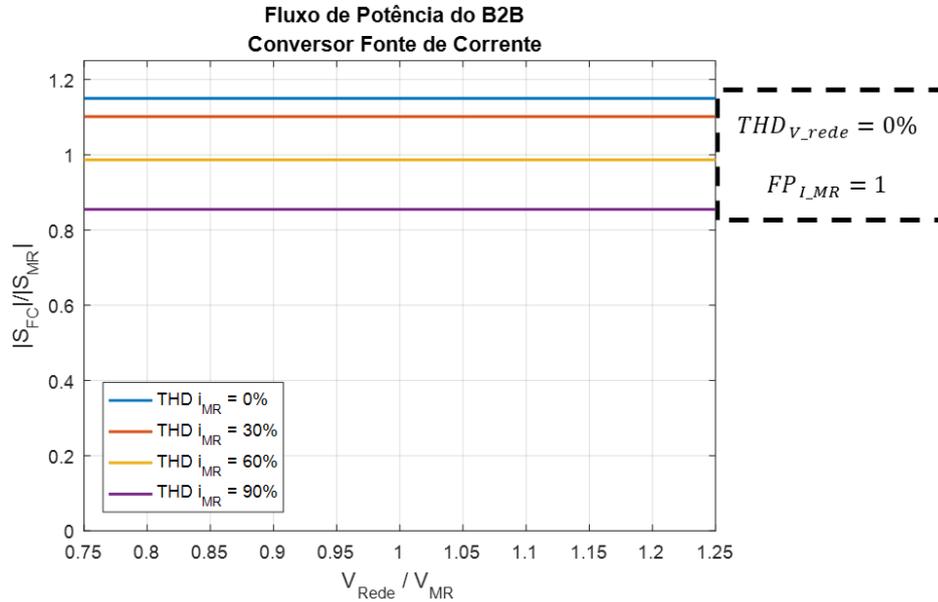


Fonte: o autor.

Quando é considerado as perdas no conversor bidirecional, como mostra as curvas da Figura 4.3 é possível verificar que há um aumento na potência processada pelo conversor fonte de corrente. No conversor fonte de tensão, como no caso em que é considerado as perdas, a potência processada por ele é igual a potência disponibilizada na microrrede.

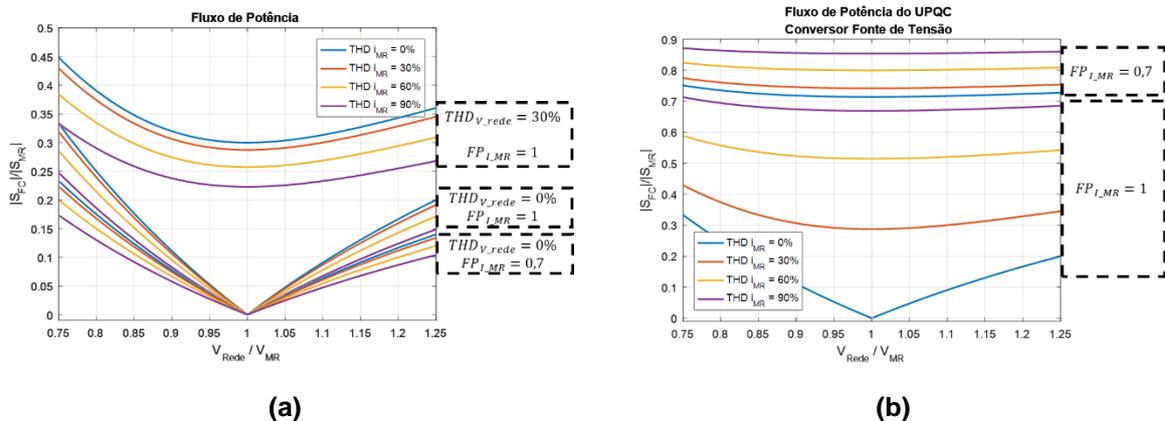
Para a condição de THD da tensão da rede elétrica ser nula e o fator de potência da corrente de carga ser unitário, as curvas de potência do conversor fonte de corrente se misturam com as outras condições da Figura 4.3(a). Na Figura 4.4 é mostrado as curvas do fluxo de potência para esse caso.

Figura 4-4 – Curvas das potências aparentes normalizadas com perdas de 15% do conversor fonte de corrente do Back-to-Back: sem distorção na rede elétrica e fator de potência na microrrede unitário.



Para o caso do Delta UPQC, as curvas serão alteradas de acordo com a mudança da relação entre tensão da rede elétrica e tensão da microrrede. A Figura 4.5 mostram as curvas do UPQC considerando o termo $k_{BCC} = 0$, em que não há perdas nos elementos do conversor.

Figura 4-5 – Curvas das potências aparentes normalizadas sem perdas do Delta UPQC: (a) conversor fonte de corrente. (b) conversor fonte de tensão.



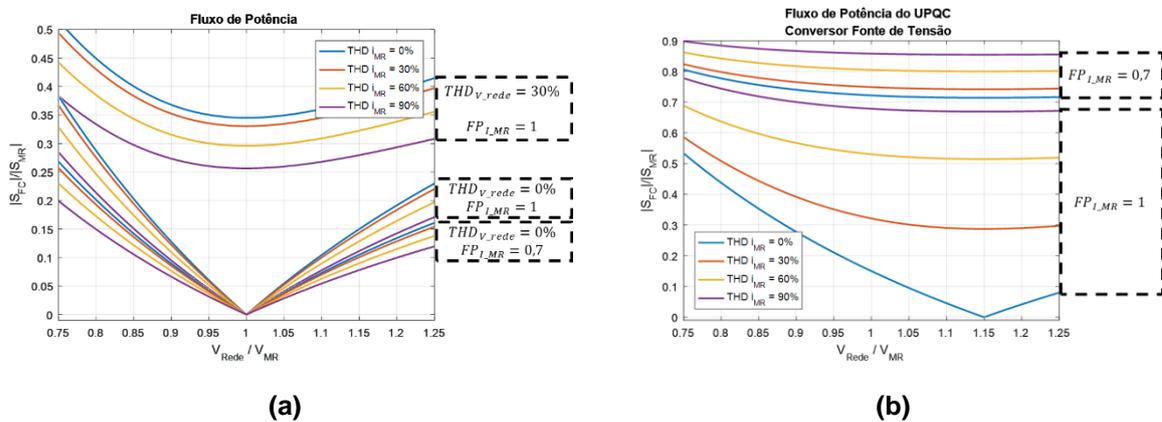
Para o caso da topologia UPQC, em que não é considerado o termo k_{BCC} como mostrado no gráfico da Figura 4.5, no conversor fonte de corrente quando há

distorção na rede elétrica de 30%, a energia que ele processa fica na faixa de 20% à 45%, dependendo da distorção harmônica da microrrede e da variação de tensão da rede elétrica em relação à tensão da microrrede. Quando não há distorção na rede elétrica, ocorre um ponto de inflexão que mostra que o conversor fonte de corrente não processa nenhuma potência quando a tensão da rede elétrica é igual à tensão da microrrede, independente da distorção e fator de potência da microrrede.

O conversor fonte de tensão não está sujeito à distorção da tensão da rede elétrica, estando apenas condicionado às distorções que ocorrem na microrrede. Quanto menor o fator de potência e maior a taxa de distorção harmônica, mais potência o conversor fonte de tensão irá processar. Quando o fator de potência é unitário e para o caso que a tensão da rede elétrica é a mesma que a tensão da microrrede, o conversor fonte de tensão não processa nenhuma potência, pois toda a potência para a microrrede vem da ligação direta com o transformador da UPQC.

A Figura 4.6 mostra as curvas do fluxo de potência da UPQC considerando o termo $k_{BCC} = 0,15$, em que há perdas nos elementos do conversor.

Figura 4-6 – Curvas das potências aparentes normalizadas com perdas de 15% do Delta UPQC: (a) conversor fonte de corrente. (b) conversor fonte de tensão.



Fonte: o autor.

Como mostra os gráficos da Figura 4.6, no caso em que há o termo k_{BCC} no equacionamento do fluxo de potência do UPQC, o conversor fonte de corrente tem uma variação de acordo com variação do termo k_{BCC} . Para o conversor fonte de tensão, as curvas e o ponto de inflexão de potência nula são deslocadas no eixo da relação das tensões, em que para as perdas de 15% em relação à potência disponível na microrrede, a potência processada pelo conversor fonte de tensão quando não há

distorção harmônica na corrente da microrrede, vai ser nula quanto a tensão da rede elétrica for 15% maior que a tensão controlada pelo conversor fonte de tensão.

Através dos gráficos das Figuras 4.3, 4.4 e 4.6 é possível comparar o funcionamento das topologias Back-to-Back e Delta UPQC em relação à potência processada por cada inversor.

Na prática, o valor do termo k_{BCC} muda de acordo com o ponto de operação da topologia em questão. Para a avaliação em cada ponto de operação é necessário se obter um valor do termo k_{BCC} .

Para efeito de comparação entre as duas topologias, podemos considerar alguns modos de operação, com alguns valores de taxa de distorção harmônica da tensão da rede elétrica e da corrente da microrrede, além do fator de potência da corrente da microrrede e razão da tensão da rede elétrica e da tensão da microrrede. Os dados estão dispostos no Quadro 4.1.

Quadro 4.1 – Casos analisados de fluxo de potência para comparação do comportamento das topologias estudadas.

Topologia	$THD_{V_{REDE}}$	$THD_{I_{MR}}$	$\cos \theta_{I_{MR_1}}$	$\frac{V_{REDE}}{V_{MR}}$	$\frac{ S_{FC} }{ S_{MR} }$	$\frac{ S_{FT} }{ S_{MR} }$
B2B	0%	60%	1	1	0,9861	1,0000
UPQC					0,0000	0,5303
B2B	30%	0%	1	0,9	1,2006	1,0000
UPQC					0,3637	0,0350
B2B	0%	30%	0,7	1,2	0,7711	1,0000
UPQC					0,1542	0,7845

Fonte: o autor.

Pelo Quadro 4.1 é possível verificar que para os casos mostrados a topologia Delta UPQC processa nos conversores fonte de corrente e fonte de tensão uma potência menor que na topologia Back-to-Back, em que na topologia UPQC a energia processada pelos conversores é apenas a potência devido às perdas dos elementos e a potência não fundamental, enquanto que o conversor B2B processa toda a potência entregue no PAC da microrrede. Os valores utilizados são apenas demonstrativos e servem para o entendimento das curvas de fluxo de potência.

4.4 Considerações finais do capítulo

Nesse capítulo foi equacionado o fluxo de potência das topologias comparadas nesse trabalho, obtendo a relação da potência do conversor fonte de corrente e do conversor fonte de tensão pela potência disponível na microrrede.

Com o equacionamento foi possível gerar curvas que representam como os dois conversores se comportam nas duas topologias estudadas. Com esses gráficos é possível justificar o dimensionamento dos inversores de cada uma das topologias, mostrando um ponto de diferença entre as topologias.

5. RESULTADOS DE SIMULAÇÃO

Nesse capítulo é apresentado alguns resultados de simulação das duas topologias utilizadas atuando como CEBI. Para obter resultados de simulação foi utilizado o software MATLAB/Simulink.

Foram obtidos resultados de simulação de dois modos de operação do CEBI, em que primeiramente foi avaliado o comportamento das topologias B2B e Delta UPQC alimentando uma carga não linear RL, e em seguida, com a mesma carga, foi conectado um emulador controlado em corrente no PAC da microrrede para injetar corrente na rede elétrica convencional, passando pelo CEBI.

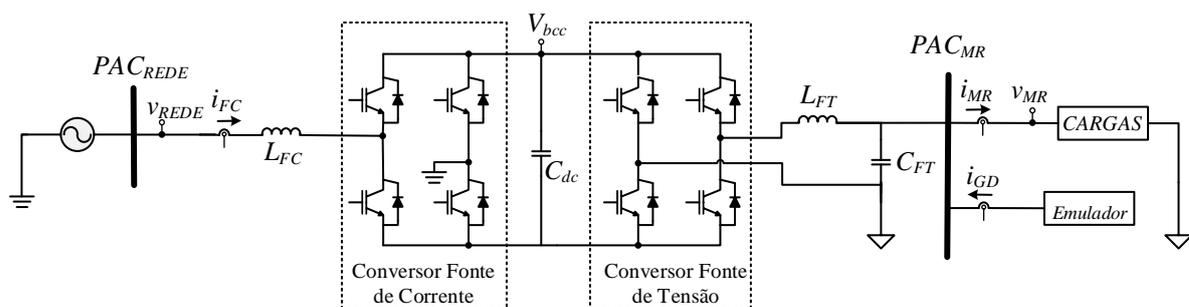
A carga utilizada para ambos os modos de operação consiste em um retificador em ponte completa com uma carga resistiva e outra indutiva em série. A carga resistiva é de $R_{carga} = 12 \Omega$ e a carga indutiva é de $L_{carga} = 57 \text{ mH}$.

Para as duas topologias, a avaliação do CEBI alimentando a carga não linear ocorre até 1 segundo. A partir de 1 segundo o emulador começa injetar corrente no PAC da microrrede. No início é injetado no PAC da microrrede uma corrente de 5A eficaz, e depois de 1,15 segundos injetado uma corrente de 16A eficaz no PAC da microrrede, de forma que o excedente de corrente seja injetado na rede elétrica.

5.1 Simulação com o Back-to-Back

Foi montado em simulação a topologia Back-to-Back, com os parâmetros mais próximos possíveis do protótipo físico. A figura 5.1 mostra circuito da topologia B2B, com as devidas localizações de medição.

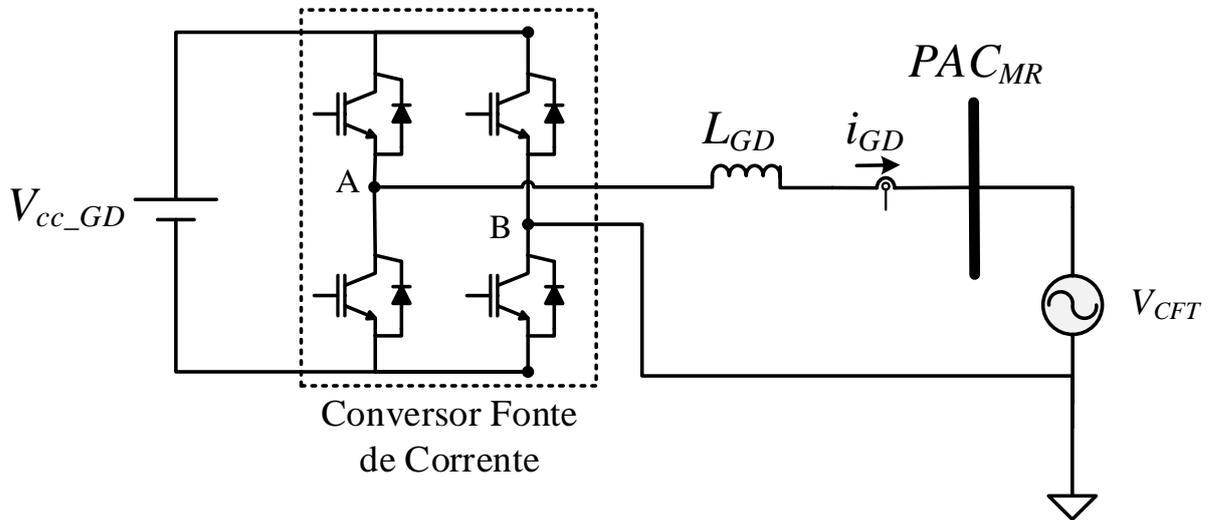
Figura 5-1 – Circuito utilizado em simulação da topologia B2B.



Fonte: o autor.

O emulador é composto por um conversor fonte de corrente, conectado no PAC da microrrede através de um indutor, como pode ser visto na Figura 5.2.

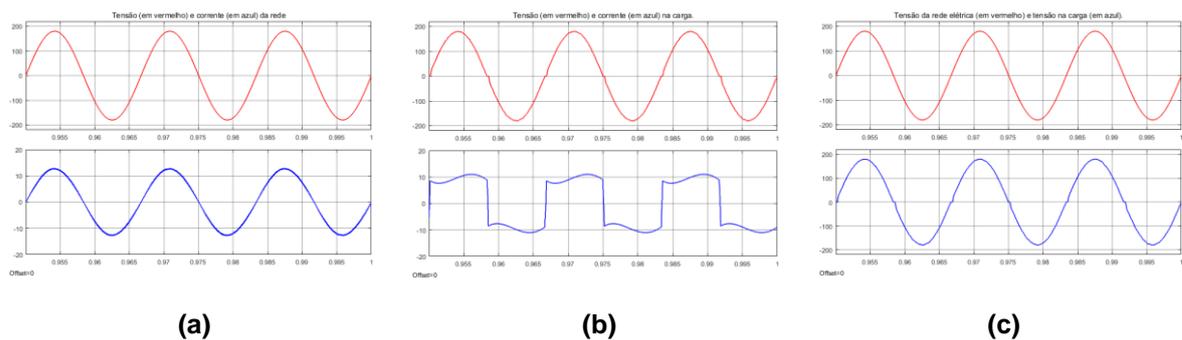
Figura 5-2 – Circuito utilizado em simulação do emulador de GD.



Fonte: o autor.

Na Figura 5.3 são apresentadas as curvas de tensão e corrente da rede elétrica, da tensão e corrente na carga e da tensão da rede elétrica juntamente com a tensão na carga.

Figura 5-3 – Curvas de tensão e corrente da simulação do B2B: (a) tensão v_{REDE} (em vermelho) e da corrente i_{FC} (em azul). (b) tensão v_{MR} (em vermelho) e corrente i_{MR} (em azul). (c) tensão v_{REDE} (em vermelho) e tensão v_{MR} (em azul).



Fonte: o autor.

Como a tensão e a corrente da rede elétrica são as mesmas que a tensão e corrente do conversor fonte de corrente do B2B, a Figura 5.3(a) mostra o comportamento da energia processada pelo conversor fonte de corrente. Da mesma

forma, a tensão e corrente na carga são as mesmas que a tensão e corrente do conversor fonte de tensão do B2B, mostrado na figura 5.3(b).

Na figura 5.3(c) foi mostrado que a tensão na carga está em fase com a tensão da rede elétrica, como proposto.

Os valores de corrente e tensão, da rede elétrica e na carga, podem ser visto no Quadro 5.1.

Quadro 5.1 – Valores medidos na simulação do B2B drenando corrente da rede elétrica.

Variáveis medidas	PAC da rede elétrica		PAC da microrrede (na carga)	
	Tensão	Corrente	Tensão	Corrente
RMS	127,3 V	8,923 A	127,3 V	8,678 A
THD	0,010%	1,424%	1,674%	41,01%
-	Potência		Potência	
-	Ativa (P)	Reativa (Q)	Ativa (P)	Reativa (Q)
-	1136 W	0,5 VAr	1093 W	160,3 VAr

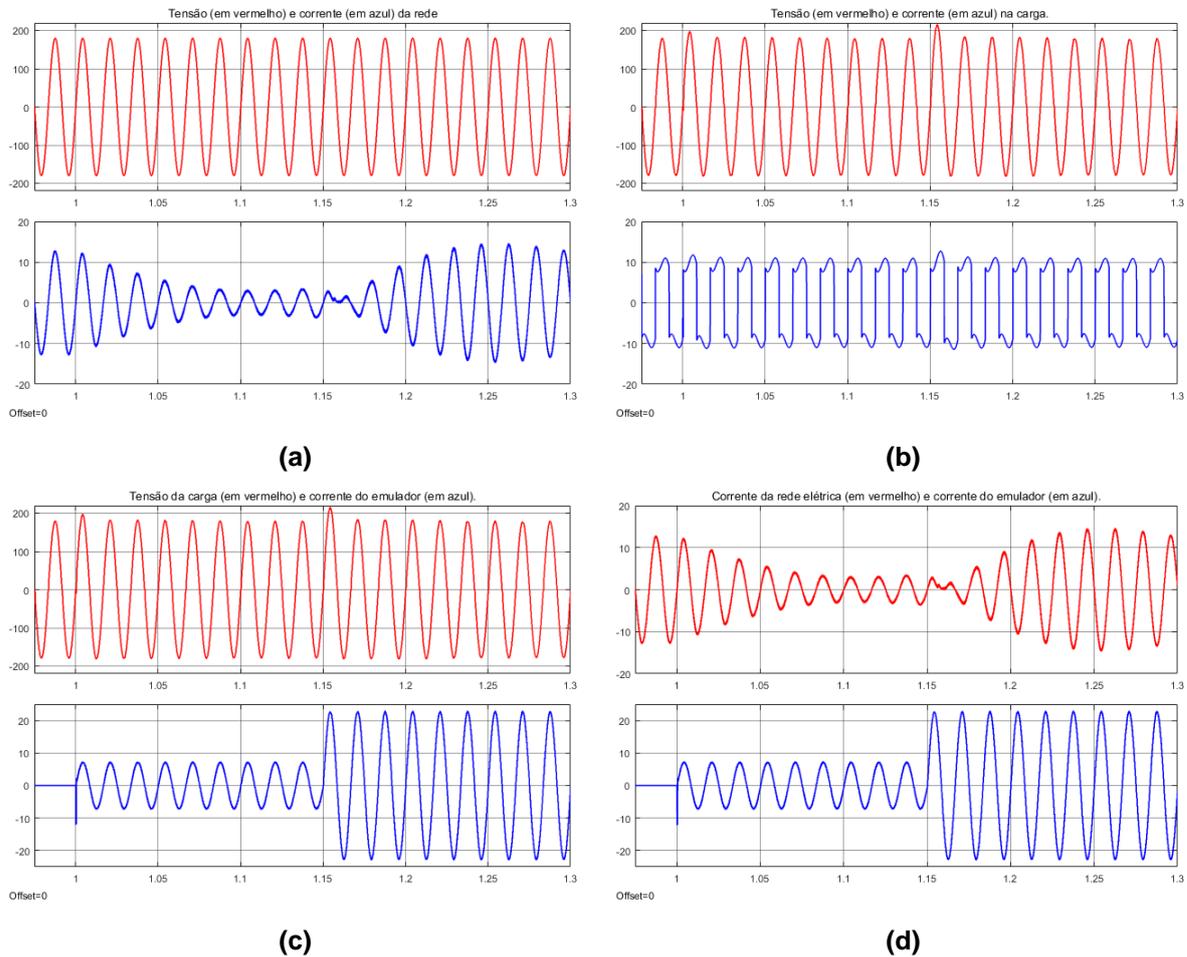
Fonte: o autor.

De acordo com a simulação, a potência aparente da rede elétrica é de 1135,90 VA e a potência aparente na carga é de 1104,71 VA. Pode ser visto que de acordo com o Quadro 5.1, a corrente de entrada possui uma taxa de distorção harmônica de 1,424% e a corrente na carga é de 41,01%, mostrando que o Back-to-Back funciona como um filtro para as cargas não lineares. Além disso, a THD da tensão na carga é de 1,674%, mostrando que o B2B está com a malha de controle do fonte de tensão ajustado.

No instante de 1 segundo foi conectado um emulador de fonte de geração distribuída, fornecendo primeiramente uma corrente RMS de 5 A, e depois de 0,15 ms foi injetado uma corrente RMS total de 16 A no PAC da microrrede.

Na figura 5.4 são apresentadas as curvas da tensão e corrente da rede elétrica, a tensão e corrente no PAC da microrrede, tensão no PAC da microrrede com a corrente fornecida pela GD, e por último a corrente da rede elétrica com a corrente fornecida pela GD.

Figura 5-4 – Curvas de tensão e corrente da topologia B2B no momento de conexão do emulador: (a) tensão v_{REDE} (em vermelho) e corrente i_{FC} (em azul). (b) tensão v_{MR} (em vermelho) e corrente i_{MR} (em azul). (c) tensão v_{MR} (em vermelho) e corrente i_{GD} (em azul). (d) corrente i_{FC} (em vermelho) e corrente i_{GD} (em azul).



Fonte: o autor.

Na Figura 5.4(a) pode ser visto que no instante em que o emulador começa a fornecer energia, a corrente drenada da rede elétrica começa a diminuir. A dinâmica é gradual pois quem informa o nível de corrente a ser fornecida é o controle do barramento CC, e quando a corrente injetada no PAC da microrrede, no instante 1,15 segundos, a corrente muda de fase, mostrando que o excedente da corrente do emulador está sendo fornecida para a rede elétrica.

Na figura 5.4(b), nos degraus de corrente para o PAC da microrrede é possível observar uma pequena elevação na tensão da microrrede, que ocorre devido ao comportamento do barramento CC com o excedente de energia, mas em um ciclo essa tensão é regulada novamente.

Na figura 5.4(c) pode ser visto a tensão do PAC da microrrede juntamente com a corrente do emulador, mostrando que no aumento de corrente do emulador há uma pequena elevação na tensão.

Na figura 5.4(d) pode ser visto o comportamento da corrente da rede elétrica quando ocorre o chaveamento para o fornecimento de energia pelo emulador.

Os valores medidos na simulação após a conexão e operação em regime permanente do emulador de fonte de energia renovável, na operação com uma corrente de 16 A, pode ser visto no Quadro 5.2.

Quadro 5.2 – Valores medidos na simulação do B2B injetando corrente da rede elétrica.

Variáveis medidas	Rede elétrica		Carga		GD
	Tensão	Corrente	Tensão	Corrente	Corrente
RMS	127,3 V	7,198 A	127,3 V	8,678 A	16,02 A
THD	0,010%	1,755%	1,651%	41,03%	0,786%

Fonte: o autor.

Como visto no Quadro 5.2, o emulador de geração distribuída consegue controlar uma corrente suficiente para suprir a carga e ter um excedente, que o CEBI faz a injeção na rede elétrica, mostrando a bidirecionalidade da topologia Back-to-Back.

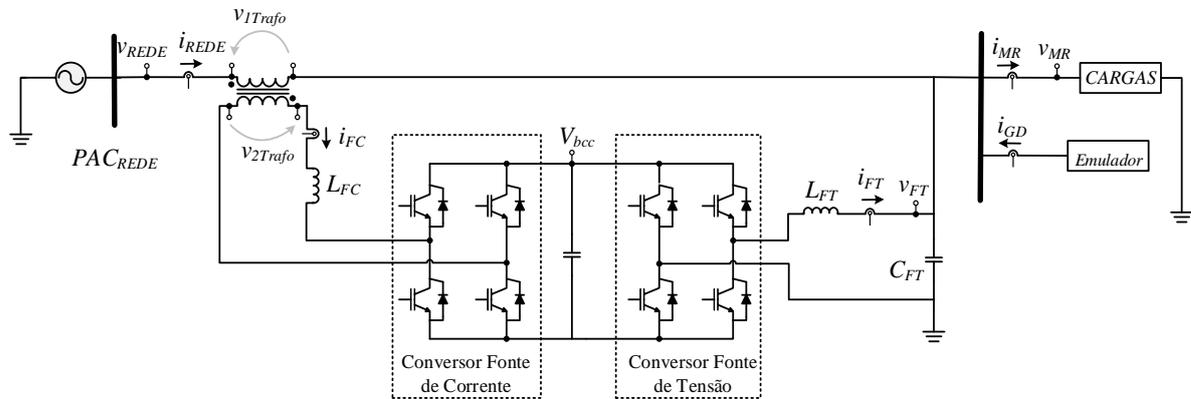
O emulador consegue fornecer uma corrente de 16 A_{RMS}, desses, a carga consome 8,678 A_{RMS} e 7,198 A_{RMS} é injetado na rede elétrica, e uma pequena parcela desse total é consumido pelos elementos do B2B.

As THD da corrente controlada da rede elétrica e da tensão controlada no PAC da microrrede, e da corrente do emulador, atendem os índices especificados em normas, como apresentado.

5.2 Simulação com o Delta UPQC

Implementou-se em simulação a topologia Delta UPQC, com os parâmetros mais próximos possíveis do protótipo físico, e o seu circuito pode ser visto na Figura 5.5, com as devidas localizações das medições.

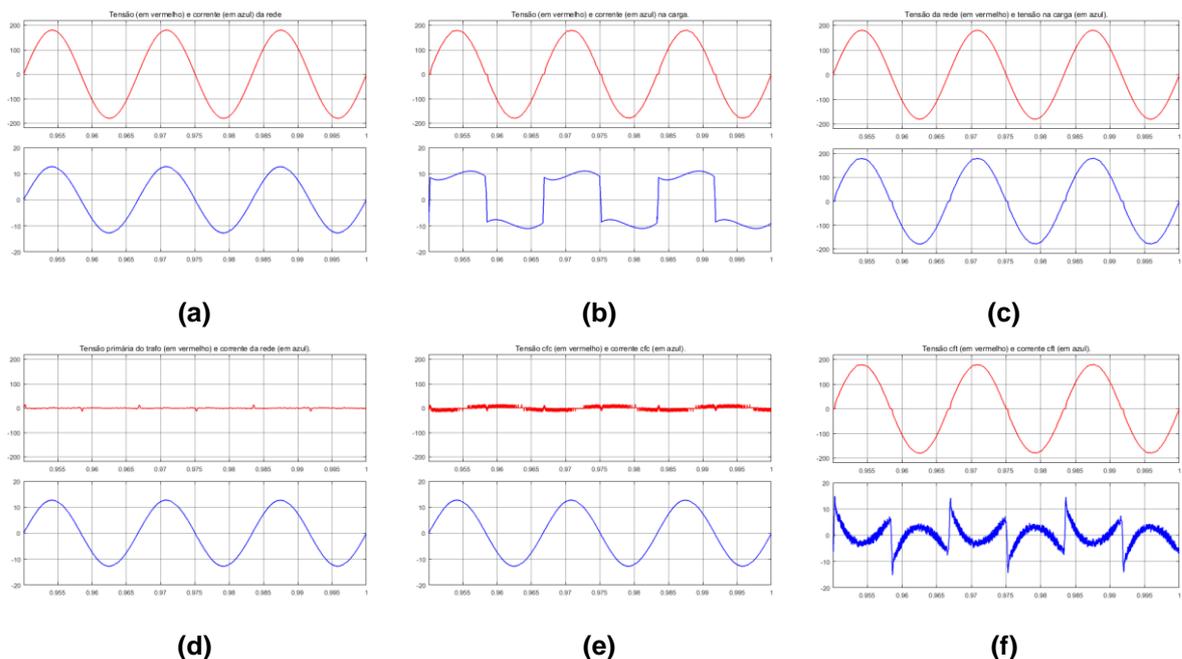
Figura 5-5 – Circuito utilizado em simulação da topologia Delta UPQC.



Fonte: o autor.

Pode ser observado que a referência de terra para o Delta UPQC é o mesmo no PAC da microrrede e no PAC da rede elétrica. Na topologia Delta UPQC foi avaliado as variáveis da rede elétrica, do PAC da microrrede, do conversor fonte de corrente e do fonte de tensão. A figura 5.6 mostra as curvas de tensão e corrente na operação em que a rede elétrica fornece corrente para a carga não linear RL.

Figura 5-6 – Curvas de tensão e corrente da simulação do Delta UPQC: (a) tensão v_{REDE} (em vermelho) e da corrente i_{REDE} (em azul). (b) tensão v_{MR} (em vermelho) e corrente i_{MR} (em azul). (c) tensão v_{REDE} (em vermelho) e tensão v_{MR} (em azul). (d) tensão v_{1TRAFO} (em vermelho) e corrente i_{REDE} (em azul). (e) tensão v_{2TRAFO} (em vermelho) e corrente i_{FC} (em azul). (f) tensão v_{FT} (em vermelho) e corrente i_{FT} (em azul).



Fonte: o autor.

Na figura 5.6(a) foi mostrado a tensão e a corrente da rede elétrica, em que é possível verificar que mesmo alimentando uma carga não linear a corrente não distorce. Na figura 5.6(b) é mostrado as curvas de tensão e corrente na carga, em que é possível verificar que a carga é não linear mas a tensão se mantém controlada. Na figura 5.6(c) é possível verificar que a tensão na carga está em fase com a tensão da rede elétrica.

Na figura 5.6(d) é mostrado a tensão do lado primário do transformador com a corrente da rede elétrica, representando a potência processada pelo conversor fonte de corrente com as perdas no transformador. Na figura 5.6(e) é mostrado as curvas de tensão e corrente do conversor fonte de corrente, que efetivamente é processada por ele, sem considerar as perdas do transformador. Na figura 5.6(f) é mostrado a tensão e corrente processada pelo conversor fonte de tensão.

Os valores medidos de corrente e tensão da rede elétrica e da carga podem ser vistos no Quadro 5.3.

Quadro 5.3 – Valores medidos na simulação do UPQC drenando corrente da rede elétrica.

Variáveis medidas	PAC da rede elétrica		PAC da microrrede (na carga)	
	Tensão	Corrente	Tensão	Corrente
RMS	127,3 V	8,958 A	127,3 V	8,686 A
THD	0,010%	0,928%	1,557%	41,25%
-	Potência		Potência	
-	Ativa (P)	Reativa (Q)	Ativa (P)	Reativa (Q)
-	1140 W	0,027 VAr	1094 W	164,9 VAr

Fonte: o autor.

Na topologia Delta UPQC, os conversores fonte de corrente e fonte de tensão não estão diretamente conectados na rede elétrica e na carga, então a energia processada por cada um deles é diferente da rede elétrica e da carga. Os valores medidos de corrente, tensão e potência dos conversores fonte de corrente e fonte de tensão podem ser vistos no Quadro 5.4.

Quadro 5.4 – Valores medidos para os conversores Fonte de Corrente e Fonte de Tensão na simulação do UPQC drenando corrente da rede elétrica.

Variáveis medidas	Fonte de Corrente ($V_{1\text{trafo}}$ e I_{REDE})	Fonte de Corrente ($V_{2\text{trafo}}$ e I_{FC})	Fonte de Tensão (V_{FT} e I_{FT})
Tensão (V_{RMS})	1,986 V	3,564 V	127,3 V
Corrente (I_{RMS})	8,958 A	8,961 A	3,985 A
Potência Ativa (W)	- 0,4715 W	- 13,470 W	58,110 W
Potência Reativa (VAr)	0,2852 VAr	- 5,167 VAr	79,790 VAr

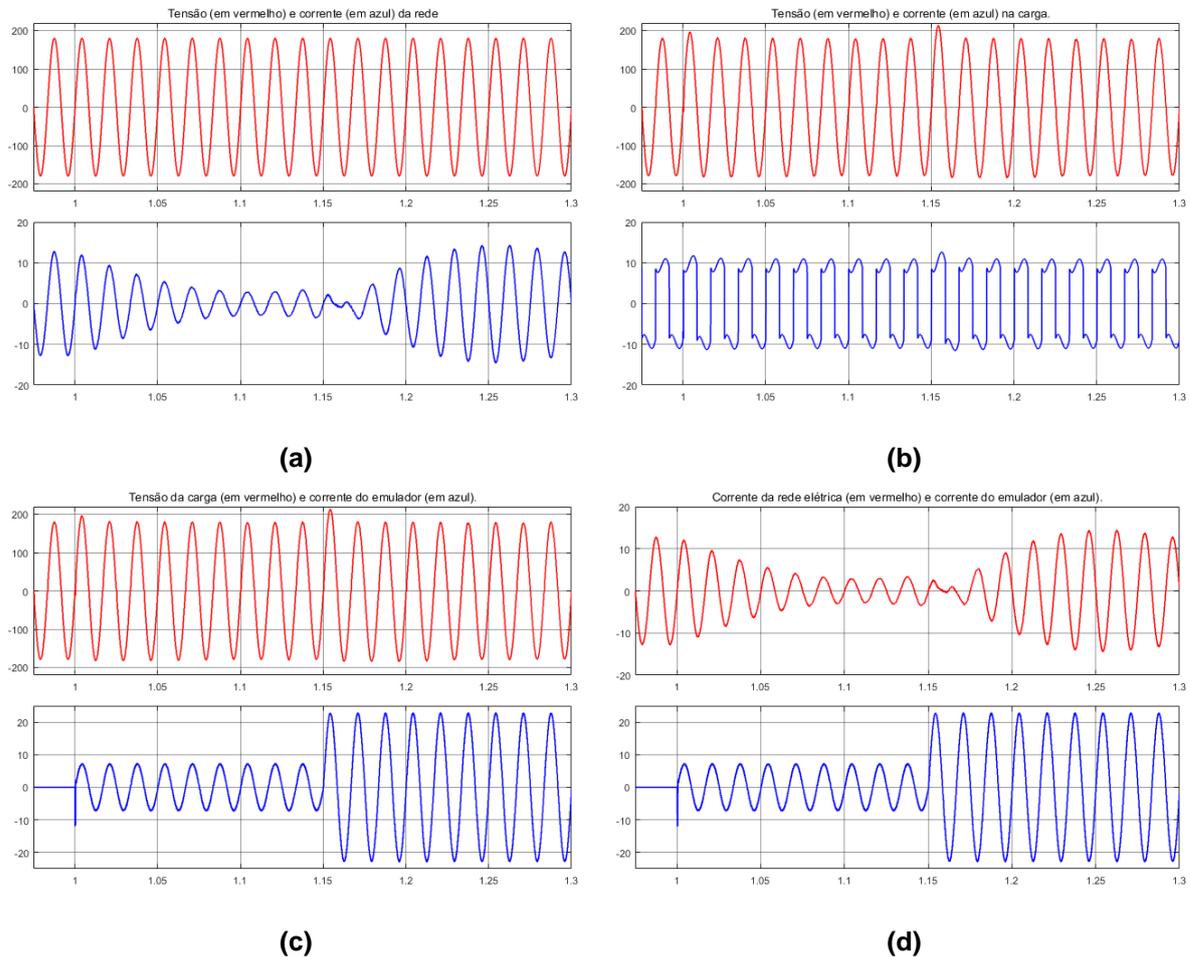
Fonte: o autor.

No quadro 5.4 é possível verificar que as potências processadas pelos conversores fonte de corrente e fonte de tensão são menores que as potências da carga e da rede elétrica. Devido à isso, o dimensionamento do conversor pode ser diferente em relação à topologia B2B.

Para o conversor fonte de corrente foram obtidos duas medições, uma considerando as perdas do transformador e outra sem as perdas do transformador. Como o transformador é um elemento passivo, ele está sujeito à perdas pela circulação da corrente. Como o nível de corrente varia de acordo com o ponto de operação do Delta UPQC, as perdas exatas ficam difíceis de se obter, onde por vezes é necessário obter as medidas considerando e desconsiderando o transformador, medindo o primário e o secundário, respectivamente, para estimar as perdas no ponto de operação avaliado.

Com a finalidade de se verificar a operação bidirecional do Delta UPQC no processamento de energia, foi emulado uma fonte de geração distribuída controlado em corrente, de forma a injetar uma corrente no PAC da microrrede. A partir de 1 segundo o emulador fornece uma corrente eficaz de 5 A no PAC da microrrede, e no momento de 1,15 segundos há degrau nessa corrente eficaz para 16 A. Na figura 5.7 pode ser visto as curvas de tensão e corrente da rede elétrica, do PAC da microrrede e do emulador.

Figura 5-7 – Curvas de tensão e corrente da topologia Delta UPQC no momento de conexão do emulador: (a) tensão v_{REDE} (em vermelho) e corrente i_{FC} (em azul). (b) tensão v_{MR} (em vermelho) e corrente i_{MR} (em azul). (c) tensão v_{MR} (em vermelho) e corrente i_{GD} (em azul). (d) corrente i_{FC} (em vermelho) e corrente i_{GD} (em azul).



Fonte: o autor.

Na figura 5.7(a) é mostrado as curvas da tensão e da corrente da rede elétrica, em que no instante de 1 segundo uma parte da corrente que é drenada pela carga passa a ser fornecida pelo emulador, e no instante de 1,15 segundos a corrente no emulador se torna maior e uma parte da corrente começa a ser fornecida para a rede elétrica. Na figura 5.7(b) é mostrado a tensão do PAC da microrrede e a corrente na carga, e como pode ser visto que nos momentos em que ocorre os degraus de corrente fornecida pelo emulador, a tensão no PAC da microrrede sofre uma pequena elevação e isso ocorre devido à disponibilidade repentina de energia no PAC da microrrede.

Na figura 5.7(c) é possível verificar a tensão no PAC da microrrede e a corrente fornecida pelo emulador, sendo mostrado o instante da elevação da tensão do PAC da microrrede devido ao degrau de corrente do emulador. Na figura 5.7(d) é

mostrado a corrente da rede elétrica e a corrente fornecida pelo emulador, mostrando os momentos em que ocorrem a mudança no sentido de fluxo de corrente.

No Quadro 5.5 é possível verificar os valores medidos da operação com a fonte de energia fornecida pela GD.

Quadro 5.5 – Valores medidos na simulação do UPQC injetando corrente na rede elétrica.

Variáveis medidas	Rede elétrica		Carga		GD
	Tensão	Corrente	Tensão	Corrente	Corrente
RMS	127,3 V	7,172 A	127,3 V	8,678 A	16,02 A
THD	0,010%	1,363%	1,477%	41,50%	0,782%

Fonte: o autor.

Para a topologia Delta UPQC é possível verificar a operação como conversor bidirecional, mantendo os índices de qualidade de energia.

Com os resultados do funcionamento das duas topologias em simulação e a verificação da operação de cada topologia, foi possível implementar em protótipo e comparar com resultados práticos o comportamento e evidenciar as diferenças entre as topologias.

5.3 Considerações finais do capítulo

Nesse capítulo foi apresentado os resultados obtidos da simulação do conversor bidirecional, utilizando a topologia Back-to-Back e Delta UPQC utilizando o software MatLab/Simulink.

As malhas de controle foram montadas de acordo com a implementação em protótipo, considerando os atrasos nas medições e a discretização das variáveis lidas dos sensores.

Na simulação foram considerados os elementos mais próximos dos elementos físicos, o que proporcionou resultados bem próximos do que se espera no protótipo. Na simulação não é considerado algumas perdas que acontecem no protótipo real, mas essas variações não interferiram na operação da coleta de resultados da simulação.

Para a coleta de resultados na simulação foi esperado um tempo para o sistema entrar em regime permanente, buscando coletar os resultados depois do regime transitório, para avaliar o comportamento de ambas as topologias.

Nos resultados de simulação foi mostrado que o conversor Back-to-Back e a conversor Delta UPQC são capazes de atuarem como conversor bidirecional de energia, além de manter os índices de qualidade de energia dentro de valores limitados por normas, mesmo utilizando uma carga não linear RL.

Devido à proximidade da simulação com o protótipo implementado, se espera que os resultados obtidos na simulação sejam parecidos com os resultados experimentais do protótipo real, validando a proposta desse trabalho e mostrando a possível operação das duas topologias como CEBI e os critérios que definem a diferença entre as topologias.

6. RESULTADOS EXPERIMENTAIS

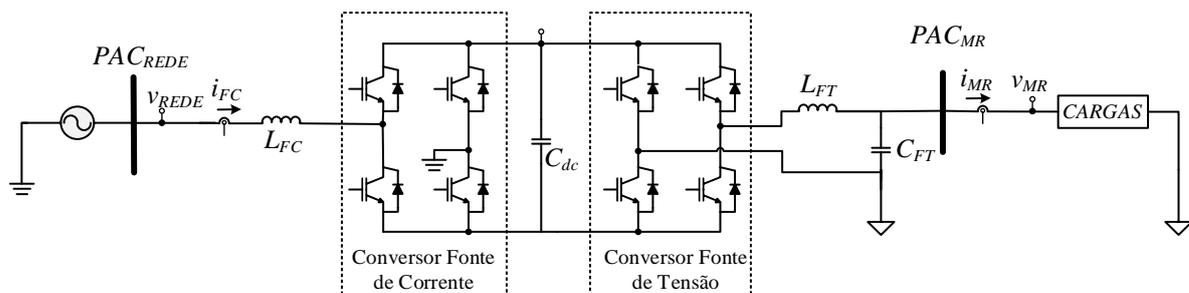
Esse capítulo apresenta os resultados experimentais implementados em protótipo com as duas topologias. Devido ao fato das topologias serem semelhantes, foi possível implementar as duas topologias em um mesmo protótipo alterando algumas conexões, sendo simples a mudança de operação entre as topologias.

Foram realizados ensaios com as duas topologias, em operação com carga linear e carga não linear, além de ensaios com a variação da tensão de entrada para avaliar o fluxo de potência e operação sem carga. Para a implementação foi utilizado dois inversores monofásicos da Semicron, do tipo SKS 30F B2CI 10 V12, controlado pelo microcontrolador TMS320F28335 da Texas Instruments em um sistema embarcado.

Para a coleta de resultados foram utilizados um osciloscópio com ponteira de tensão e ponteira de corrente, além de um analisador de energia portátil CW500 da marca Yokogawa.

Na Figura 6.1 é mostrado o circuito do Back-to-Back implementado em protótipo, para a realização dos ensaios em laboratório.

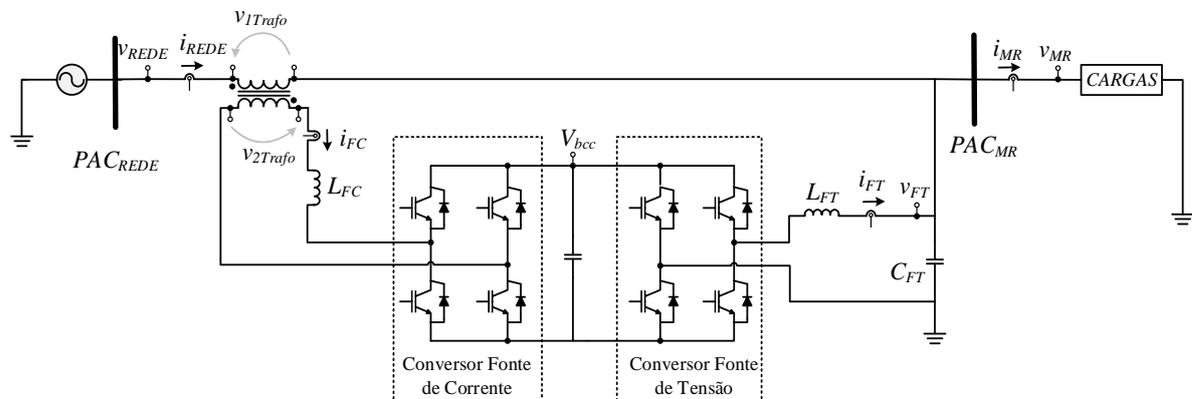
Figura 6-1 – Circuito implementado em protótipo da topologia B2B.



Fonte: o autor.

A figura 6.2 mostra o circuito da topologia Delta UPQC, implementada em protótipo no laboratório.

Figura 6-2 – Circuito implementado em protótipo da topologia Delta UPQC.



Fonte: o autor.

Em ambos os circuitos é possível verificar os pontos de medições avaliados. No B2B foi avaliado a tensão da rede elétrica v_{REDE} e corrente da rede elétrica i_{FC} , que são as mesmas que a tensão e corrente do conversor fonte de corrente, e foi avaliado a tensão na carga v_{MR} e corrente da carga i_{MR} , que são as mesmas variáveis do conversor fonte de tensão.

Na Delta UPQC foi avaliado a tensão da rede elétrica v_{REDE} e corrente da rede elétrica i_{REDE} , a tensão do primário do transformador v_{1trafo} , a tensão do secundário do transformador v_{2trafo} , a corrente de entrada do conversor fonte de corrente i_{FC} , a tensão do conversor fonte de tensão v_{FT} , a corrente do conversor fonte de tensão i_{FT} e a tensão na carga v_{MR} e a corrente na carga i_{MR} .

Os resultados experimentais obtidos foram unidirecionais, em que a rede elétrica alimenta cargas no PAC da microrrede. Foi avaliado o funcionamento do protótipo em cargas lineares e não lineares, como descrito no quadro 6.1.

Quadro 6.1 – Ensaio experimentais realizados no protótipo.

Característica da carga	Elementos da carga	Situação da tensão da rede elétrica
Carga linear	Resistência de 16 Ω .	Tensão de entrada da rede elétrica.
Carga não linear RC	Retificador Ponte Completa com Capacitor de 110 μF e Resistência de 16 Ω em paralelo.	
Carga não linear RL	Retificador Ponte Completa com Indutor de 57 mH e Resistência de 12 Ω em série.	
Carga linear com VARIAC	Resistência de 24 Ω .	Varição da tensão de entrada de -20% à +20% da tensão da rede elétrica.
Carga não linear RL com VARIAC	Retificador Ponte Completa com Indutor de 57 mH e Resistência de 24 Ω em série.	Varição da tensão de entrada de -20% à +20% da tensão da rede elétrica.
Sem carga com VARIAC	Sem carga	Tensão de entrada igual à tensão de saída.

Fonte: o autor.

No primeiro teste foi colocado uma carga resistiva com uma potência aproximada de 1 kVA, avaliando os índices de qualidade de energia e para validar o funcionamento das duas topologias.

No segundo teste foi avaliado uma carga não linear RC, com a intenção de alimentar uma carga de aproximadamente 1 kVA, verificando os índices de qualidade de energia e o comportamento das duas topologias para essa carga.

No terceiro teste foi avaliado o comportamento das duas topologias para uma carga não linear RL com potência aproximada de 1kVA, verificando os índices de qualidade para essa carga.

No quarto teste foi avaliado o comportamento dinâmico de ambas as topologias, verificando como o controle se comporta na mudança de carga, para a carga linear e para a carga não linear RL.

No quinto teste foi avaliado o fluxo de potência para uma carga linear e para uma carga não linear RL com VARIAC, analisando e validando o equacionamento do fluxo de potência, discutido nesse trabalho.

Em um sexto ensaio foi ligado os protótipos sem alimentar nenhuma carga e sendo alimentados por um variac regulado na tensão de 127,3 V_{RMS} , a mesma tensão regulada no conversor fonte de tensão.

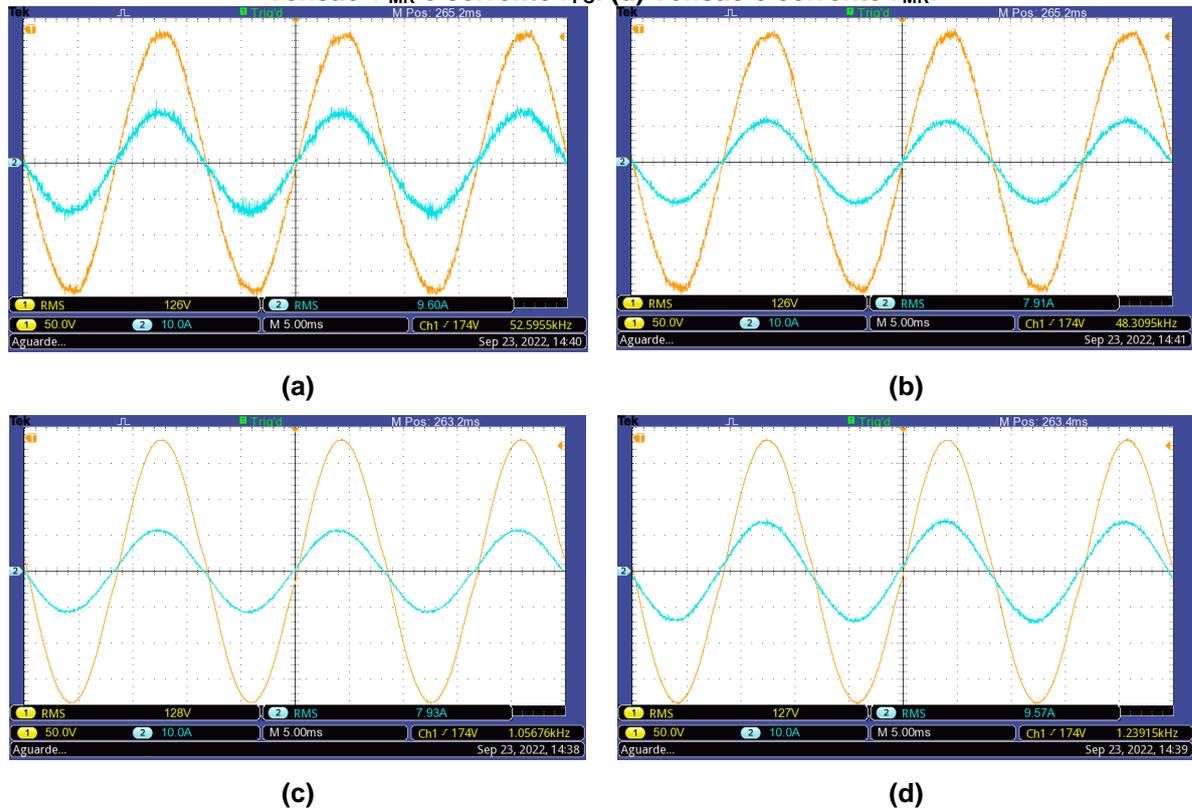
Em toda coleta de resultado foi adotado uma metodologia para garantir que todos os elementos estivessem em sua operação em regime permanente. Foi aguardado dez minutos antes de coletar os resultados, esperando que todos os elementos estivessem em sua temperatura nominal de operação e funcionamento.

6.1 Carga linear resistiva

Foi realizado um teste com carga linear, com uma resistência de 16 Ω no PAC da microrrede de forma a processar uma potência mínima de 1 kVA. Foi regulado a tensão eficaz do PAC da microrrede em 127,3 V, independente do valor de tensão da rede elétrica. Além disso, a tensão no PAC da microrrede foi sintonizada para estar em fase com a tensão da rede elétrica.

Na Figura 6.3 é possível observar as tensões e correntes da rede elétrica e do PAC da microrrede para a carga resistiva da topologia **Back-to-Back**.

Figura 6-3 – Curvas de tensão (em amarelo com 50V/div) e corrente (em azul com 10A/div) em 5ms/div da topologia B2B: (a) Tensão v_{REDE} e corrente i_{FC} . (b) Tensão v_{REDE} e corrente i_{MR} . (c) Tensão v_{MR} e corrente i_{FC} . (d) Tensão e corrente i_{MR} .

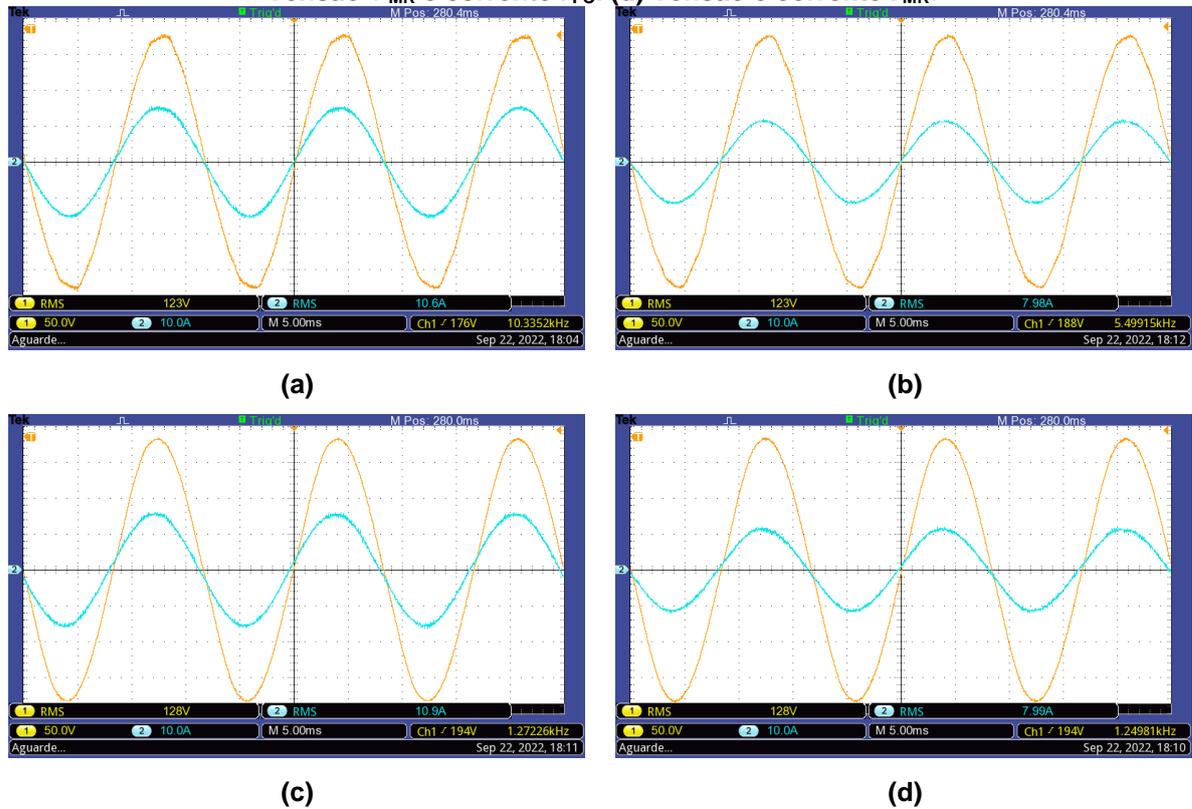


Fonte: o autor.

Como pode ser visto na Figura 6.3, a tensão da rede elétrica serve como referência, e a tensão do PAC da microrrede e as correntes estão em fase com a tensão da rede elétrica.

Na Figura 6.4 é possível observar as tensões e correntes da rede elétrica e do PAC da microrrede para a carga resistiva da topologia **Delta UPQC**.

Figura 6-4 – Curvas de tensão (em amarelo com 50V/div) e corrente (em azul com 10A/div) em 5ms/div da topologia UPQC: (a) Tensão v_{REDE} e corrente i_{FC} . (b) Tensão v_{REDE} e corrente i_{MR} . (c) Tensão v_{MR} e corrente i_{FC} . (d) Tensão e corrente i_{MR} .



Fonte: o autor.

Da mesma forma que o B2B, a topologia UPQC está ajustado para ter a tensão do PAC da microrrede em fase com a rede elétrica convencional, e conseqüentemente, as correntes da rede elétrica e da carga também estão em fase com a tensão da rede elétrica. O PLL implementado é responsável por manter a tensão do PAC da microrrede em fase com a rede elétrica, o que demonstra que o controle do PLL implementado para ambas as topologias funciona de maneira satisfatória.

No Quadro 6.2 é possível verificar as medidas dos valores das variáveis do PAC da rede elétrica e do PAC da microrrede, para ambas as topologias.

Quadro 6.2 – Valores medidos na operação das topologias em protótipo para carga linear.

Back-to-Back			Delta UPQC		
Variáveis	Rede	Carga	Variáveis	Rede	Carga
Tensão RMS	125,8	127,3	Tensão RMS	124,1	127,2
Corrente RMS	9,449	7,941	Corrente RMS	10,37	7,813
Potência P (W)	1185	1009	Potência P (W)	1284	993
Potência Q (VAr)	75,71	45,13	Potência Q (VAr)	66,51	0
Potência S (VA)	1187	1010	Potência S (VA)	1286	993
Rendimento	85,09%		Rendimento	77,22%	
Fator de Potência	0,997	0,999	Fator de Potência	0,998	1
F. Deslocamento	0,998222	0,999987	F. Deslocamento	0,998612	1
THD da tensão	1,12%	1,951%	THD da tensão	1,27%	1,59%
THD da corrente	1,924%	2,926%	THD da corrente	1,32%	1,66%

Fonte: o autor.

Através dos valores apresentados no quadro 6.2 é possível verificar que para as duas topologias, na condição de uma carga linear, elas atendem os índices de qualidade já discutidos. A topologia Back-to-Back apresenta uma corrente drenada da rede elétrica com um valor maior de THD, no entanto, ele atende o que é especificado nas normas de qualidade de energia.

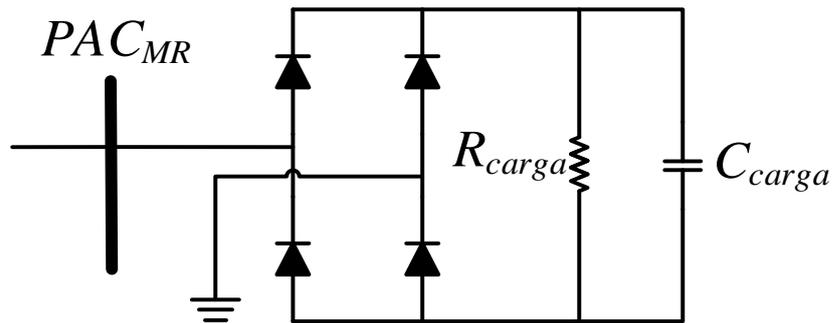
No teste com carga linear pode-se observar que há uma diferença no rendimento entre os conversores, em que a topologia Back-to-Back possui um rendimento de 85,09% enquanto a topologia UPQC possui um rendimento de 77,22%.

6.2 Carga não linear RC

Como vem sendo discutido, para atender os critérios de qualidade de energia, tanto para a rede elétrica, quanto para a carga, o sistema deve drenar uma corrente puramente senoidal da rede elétrica e fornecer uma tensão puramente senoidal para a carga, com baixa distorção harmônica e com a corrente da rede elétrica em fase com a tensão da rede elétrica.

A carga não linear RC é composta por um Retificador em Ponte Completa com uma resistência equivalente de 16 Ω e capacitores com uma capacitância equivalente de 110 μF , como mostra a Figura 6.5.

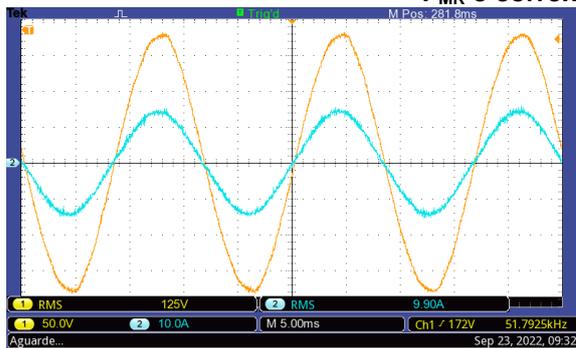
Figura 6-5 – Circuito da carga não linear RC.



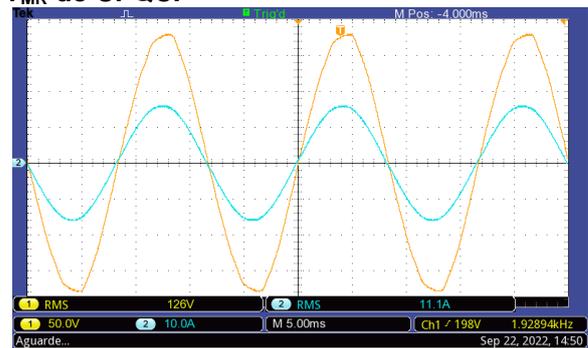
Fonte: o autor.

Na Figura 6.6 são apresentadas as curvas de tensão e corrente da rede elétrica e da carga, para a carga não linear RC, das topologias B2B e UPQC.

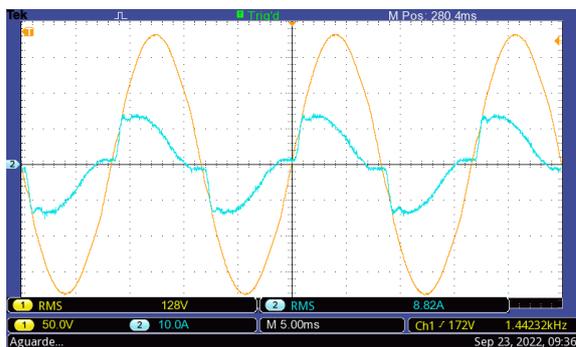
Figura 6-6 – Curvas de tensão (em amarelo com 50V/div) e corrente (em azul com 10A/div) em 5ms/div das duas topologias para carga não linear RC: (a) Tensão v_{REDE} e corrente i_{FC} do B2B. (b) Tensão v_{REDE} e corrente i_{REDE} do UPQC. (c) Tensão v_{MR} e corrente i_{MR} do B2B. (d) Tensão v_{MR} e corrente i_{MR} do UPQC.



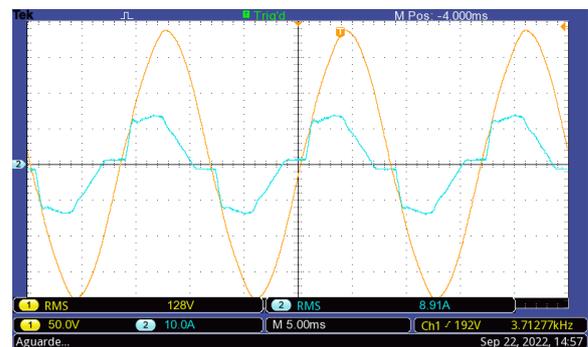
(a)



(b)



(c)



(d)

Fonte: o autor.

Nas curvas da Figura 6.6 é possível verificar que, para a carga não linear RC, o funcionamento de ambas as topologias são equivalentes, em que na presença de energia reativa e harmônicos na carga, a corrente drenada da rede elétrica continua

senoidal e sem deslocamento angular. Os valores das variáveis medidas podem ser vistas no quadro 6.3.

Quadro 6.3 – Valores medidos na operação das topologias em protótipo para carga não linear RC.

Back-to-Back			Delta UPQC		
Variáveis	Rede	Carga	Variáveis	Rede	Carga
Tensão RMS	124,7	127,3	Tensão RMS	123,9	127,3
Corrente RMS	9,836	8,871	Corrente RMS	10,69	8,732
Potência P (W)	1223	1026	Potência P (W)	1322	1005
Potência Q (VAr)	78,65	- 470,1	Potência Q (VAr)	71,21	- 471,3
Potência S (VA)	1226	1129	Potência S (VA)	1324	1110
Rendimento	92,09%		Rendimento	83,84%	
Fator de Potência	0,997	- 0,909	Fator de Potência	0,998	- 0,905
F. Deslocamento	0,998312	0,93495	F. Deslocamento	0,998614	0,933705
THD da tensão	1,359%	1,825%	THD da tensão	1,564%	2,736%
THD da corrente	2,973%	24,31%	THD da corrente	1,788%	23,94%

Fonte: o autor.

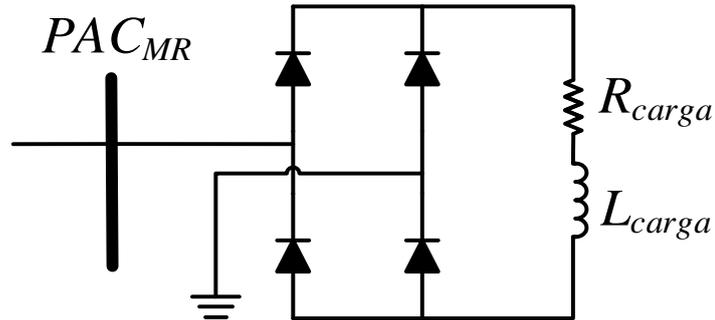
Como visto no quadro 6.3, mesmo na presença de uma carga com uma alta distorção harmônica na carga, em torno de 24%, a THD da corrente drenada da rede elétrica é baixa para ambas as topologias, sendo menor que 3%.

Para esse teste de carga não linear RC, o rendimento do B2B é maior que o rendimento do UPQC, sendo de 8,25% de diferença.

6.3 Carga não linear RL

A carga não linear RL é composta por um Retificador em Ponte Completa com uma resistência equivalente de 12 Ω e indutores com uma indutância equivalente de 57 mH, ligados em série, como mostra a Figura 6.7.

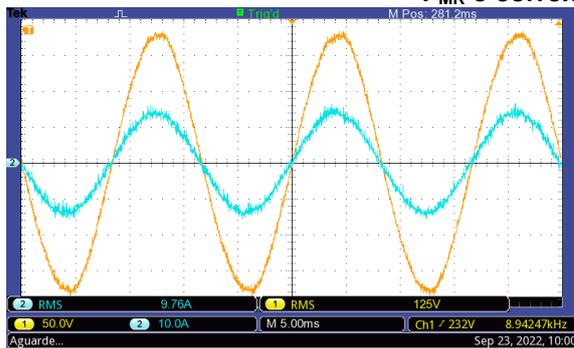
Figura 6-7 – Circuito da carga não linear RL.



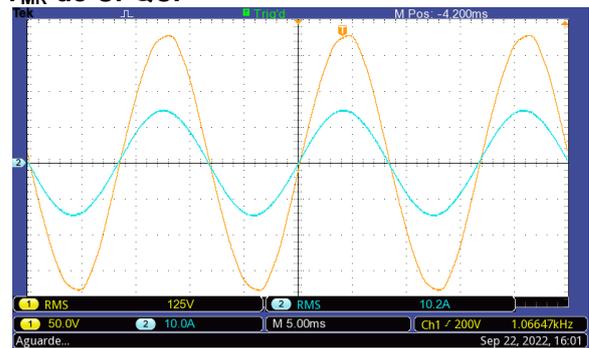
Fonte: o autor.

Na Figura 6.8 são apresentadas as curvas de tensão e corrente da rede elétrica e da carga, para a carga não linear RL, das topologias B2B e UPQC.

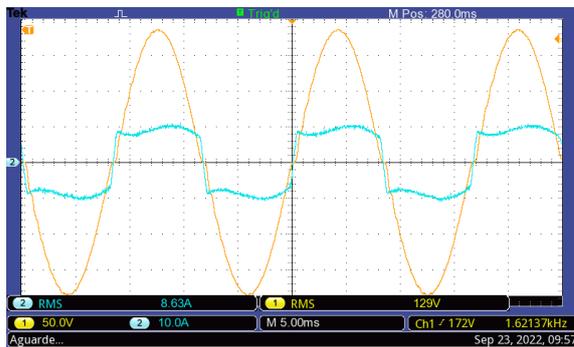
Figura 6-8 – Curvas de tensão (em amarelo com 50V/div) e corrente (em azul com 10A/div) em 5ms/div das duas topologias para carga não linear RL: (a) Tensão v_{REDE} e corrente i_{FC} do B2B. (b) Tensão v_{REDE} e corrente i_{REDE} do UPQC. (c) Tensão v_{MR} e corrente i_{MR} do B2B. (d) Tensão v_{MR} e corrente i_{MR} do UPQC.



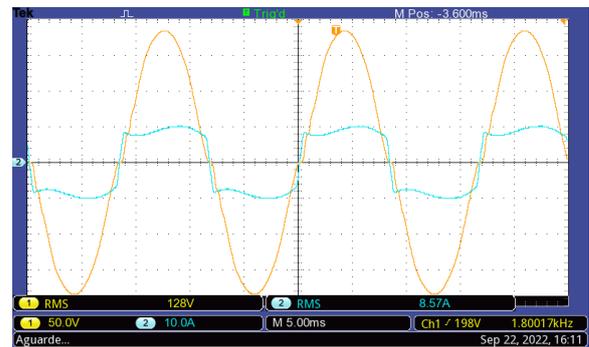
(a)



(b)



(c)



(d)

Fonte: o autor.

Para ambas as topologias de CEBI, as curvas da Figura 6.8 demonstram que para a carga não linear RL, o funcionamento são equivalentes, drenando uma corrente puramente senoidal independente da corrente distorcida da carga, além de

manter uma tensão senoidal para a carga. No quadro 6.4 são apresentados as medições obtidas das duas topologias.

Quadro 6.4 – Valores medidos na operação das topologias em protótipo para carga não linear RL.

Back-to-Back			Delta UPQC		
Variáveis	Rede	Carga	Variáveis	Rede	Carga
Tensão RMS	126	127,4	Tensão RMS	125,2	127,3
Corrente RMS	9,627	8,697	Corrente RMS	10,24	8,431
Potência P (W)	1210	1019	Potência P (W)	1279	975,7
Potência Q (VAr)	80,19	433,7	Potência Q (VAr)	71,19	445,4
Potência S (VA)	1212	1107	Potência S (VA)	1281	1073
Rendimento	91,34%		Rendimento	83,76%	
Fator de Potência	0,997	0,92	Fator de Potência	0,998	0,909
F. Deslocamento	0,998222	0,987436	F. Deslocamento	0,998622	0,98507
THD da tensão	1,208%	3,53%	THD da tensão	1,422%	5,269%
THD da corrente	1,76%	34,24%	THD da corrente	0,7331%	35,12%

Fonte: o autor.

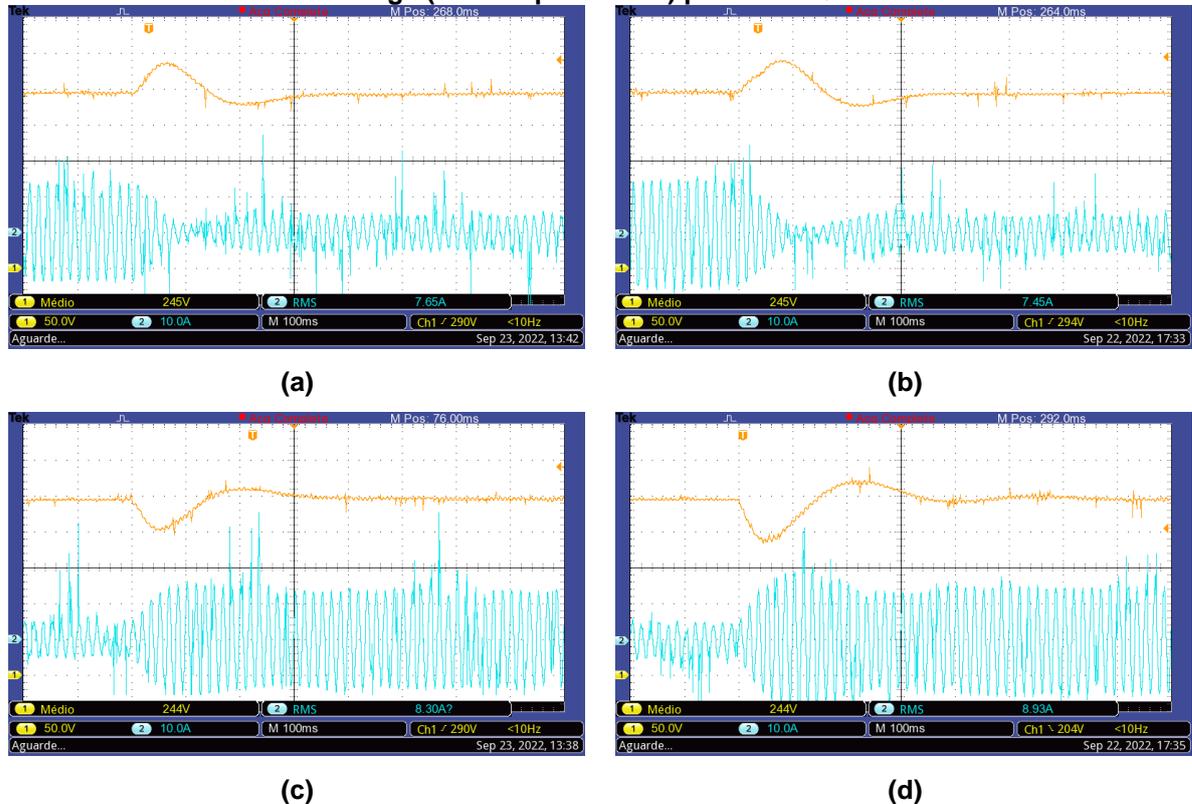
Apesar da alta THD da corrente da carga, em torno de 35%, ambas as topologias drenam uma corrente da rede elétrica com baixa THD. Além disso, como ocorreu nas demais cargas, o rendimento do B2B é maior que o rendimento do UPQC.

6.4 Resultados dinâmicos

Para avaliar a rejeição à distúrbios foi realizado um teste com a variação repentina da carga e avaliado o comportamento do barramento CC e das corrente de entrada e da carga com o auxílio do osciloscópio. Para realizar a comparação do desempenho das duas topologias, as curvas de tensão e corrente de uma topologia foram colocadas ao lado da outra topologia.

Para a carga linear foi realizado um degrau de carga de 16 Ω para 48 Ω , e dos 48 Ω para 16 Ω . A Figura 6.9 mostra as curvas da corrente da rede elétrica para as topologias B2B e UPQC, na diminuição de carga e, posteriormente, no aumento de carga.

Figura 6-9 – Curvas da tensão do barramento CC V_{bCC} (em amarelo com 50V/div) e corrente da rede i_{REDE} (em azul com 10A/div) em 100ms/div das duas topologias para carga linear: (a) na diminuição de carga (de 100% para 33%) para o B2B. (b) na diminuição de carga (de 100% para 33%) para o UPQC. (c) no aumento de carga (de 33% para 100%) para o B2B. (d) no aumento de carga (de 33% para 100%) para o UPQC.



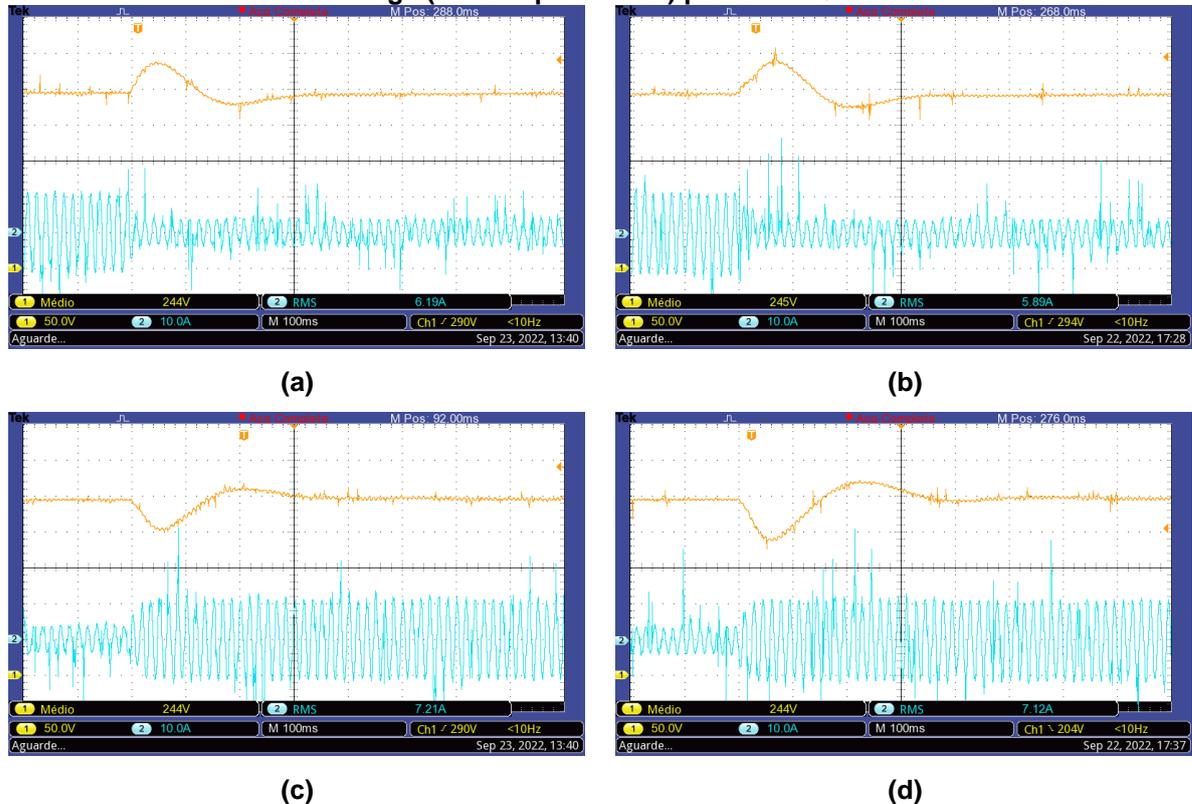
Fonte: o autor.

Como pode ser visto, na diminuição de carga, as duas topologias se comportam de maneira semelhantes, levando cerca de 300ms para o barramento CC voltar ao seu valor de referência do controle. A corrente da rede elétrica sofre um afundamento quando há mudança de carga, para ambas as topologias, no entanto, para B2B, o afundamento ocorre de forma mais repentina e na topologia UPQC o afundamento ocorre de forma gradual.

Já para o aumento de carga, a topologia UPQC demora um tempo maior para regular a tensão do barramento CC, em torno de 500ms, enquanto que no B2B leva em torno de 300ms. A oscilação na topologia UPQC é maior, tanto na tensão do barramento CC quanto na corrente drenada da rede elétrica, em comparação com a topologia B2B.

Da mesma forma, foi avaliado a corrente na carga para ambas as topologias no degrau de carga resistiva, como pode ser visto na Figura 6.10.

Figura 6-10 – Curvas da tensão do barramento CC $V_{b_{cc}}$ (em amarelo com 50V/div) e corrente da carga i_{MR} (em azul com 10A/div) em 100ms/div das duas topologias para carga linear: (a) na diminuição de carga (de 100% para 33%) para o B2B. (b) na diminuição de carga (de 100% para 33%) para o UPQC. (c) no aumento de carga (de 33% para 100%) para o B2B. (d) no aumento de carga (de 33% para 100%) para o UPQC.

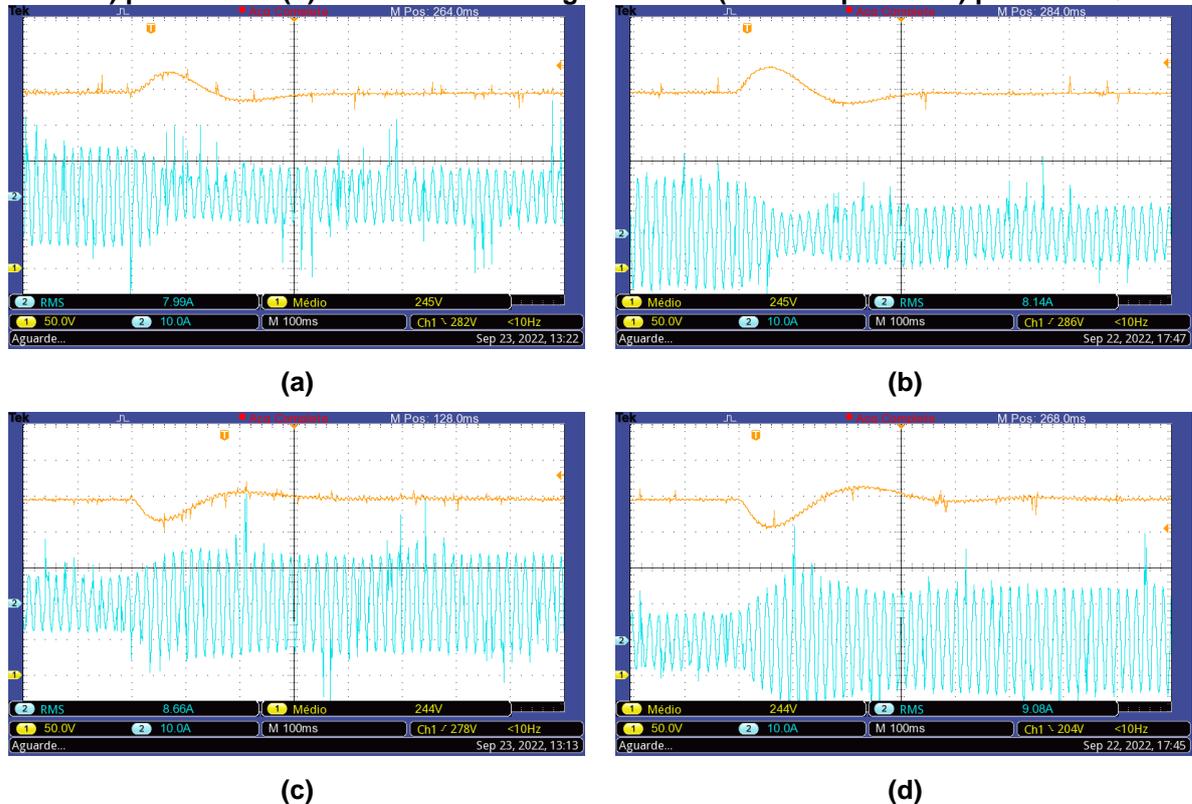


Fonte: o autor.

Na Figura 6.10 é mostrado que a corrente da carga, tanto na diminuição quanto no aumento de carga, se mantém regulada com o degrau de carga e, conseqüentemente, a tensão controlada na carga também se mantém regulada.

Com a intenção de se verificar o comportamento das topologias na presença de distúrbios na carga, foi realizado o teste com um degrau de carga para uma carga não linear RL. O degrau de carga ocorreu apenas na carga resistiva, passando de 48 Ω para 24 Ω , mantendo a indutância equivalente de 57mH. A Figura 6.11 mostra as curvas de tensão do barramento CC e da corrente da rede elétrica para o degrau de carga nas operação com as duas topologias, B2B e UPQC.

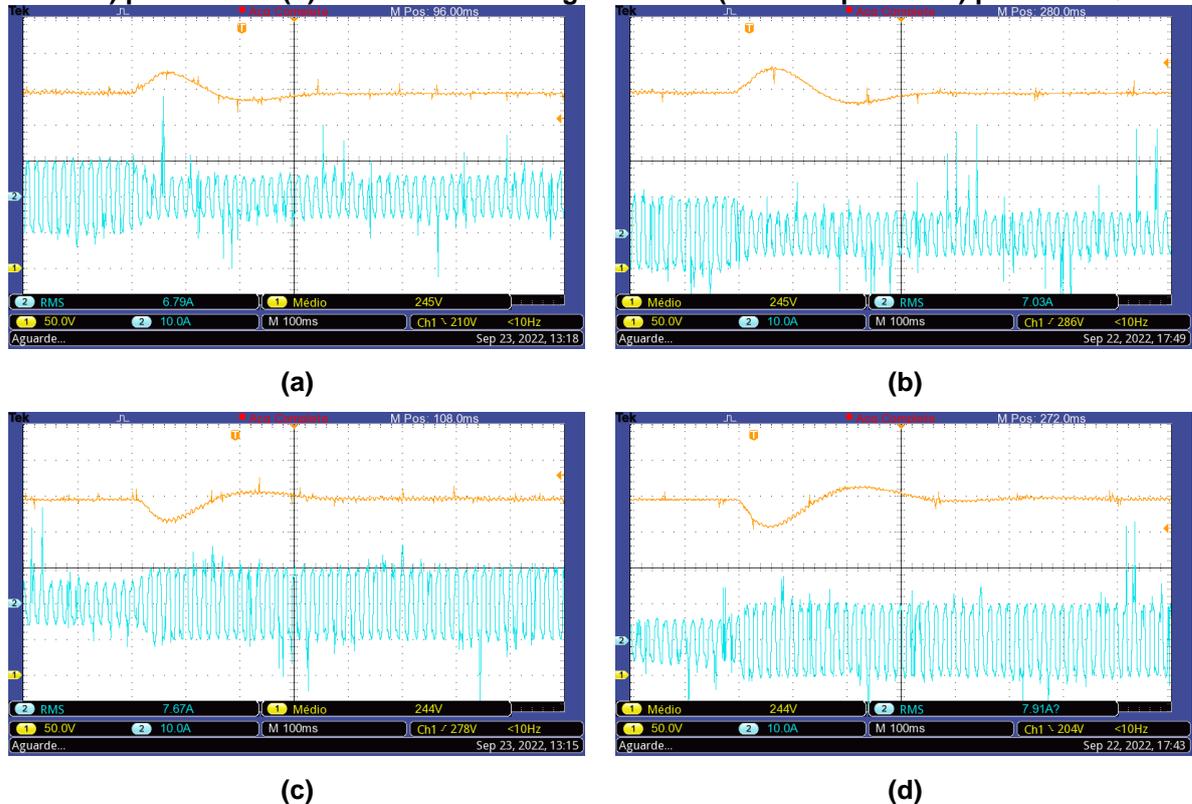
Figura 6-11 – Curvas da tensão do barramento CC V_{bCC} (em amarelo com 50V/div) e corrente da rede i_{REDE} (em azul com 10A/div) em 100ms/div das duas topologias para carga não linear RL: (a) na diminuição da carga resistiva (de 100% para 50%) para o B2B. (b) na diminuição da carga resistiva (de 100% para 50%) para o UPQC. (c) no aumento da carga resistiva (de 100% para 50%) para o B2B. (d) no aumento da carga resistiva (de 100% para 50%) para o UPQC.



Fonte: o autor.

Como visto na Figura 6.11, mesmo na presença de uma corrente de carga com alta distorção harmônica, as duas topologias rejeitam distúrbios causados na carga. No caso do B2B, na presença do distúrbio o barramento CC sofre com menos oscilação, ocasionando um transiente de corrente da rede elétrica menor, quando comparado com a UPQC. Na Figura 6.12 é possível verificar o comportamento da corrente de carga com o barramento CC para o degrau de carga, diminuindo e aumentando a carga para as duas topologias.

Figura 6-12 – Curvas da tensão do barramento CC $V_{b_{cc}}$ (em amarelo com 50V/div) e corrente da carga i_{MR} (em azul com 10A/div) em 100ms/div das duas topologias para carga não linear RL: (a) na diminuição da carga resistiva (de 100% para 50%) para o B2B. (b) na diminuição da carga resistiva (de 100% para 50%) para o UPQC. (c) no aumento da carga resistiva (de 100% para 50%) para o B2B. (d) no aumento da carga resistiva (de 100% para 50%) para o UPQC.



Fonte: o autor.

Para a carga não linear, as duas topologias se mostraram eficientes na rejeição de distúrbios na carga, com a aplicação de degrau de carga. No caso da UPQC, o barramento CC oscilou mais e levou um tempo maior para voltar ao valor de regime permanente, mas o controle conseguiu se regular.

No comportamento dinâmico, na oscilação da carga, ambas as topologias conseguiram rejeitar esse tipo de distúrbio, retornando ao funcionamento em regime permanente, como esperado.

6.5 Variação da tensão de entrada

Nesse trabalho foi avaliado o fluxo de potência do conversor bidirecional, com o intuito de conhecer a potência processada pelo conversor fonte de corrente e pelo conversor fonte de tensão das topologias Back-to-Back e Delta UPQC com os parâmetros da rede elétrica e da carga que está sendo alimentada.

Para se avaliar o fluxo de potência foi realizado a variação da tensão da rede elétrica com a utilização de um variador de tensão (Variac). Para esse ensaio havia disponível um variador de tensão com corrente nominal de 8 A.

Utilizou-se dois tipos de cargas no PAC da microrrede, uma carga linear de 24Ω e em um segundo momento, uma carga não linear com retificador monofásico em ponte completa com uma carga resistiva de 24Ω com uma indutância equivalente de 57 mH em série.

Fixando a tensão no PAC da microrrede em 127,3 V eficaz, se variou a tensão da rede elétrica em -20% , -15% , $+15\%$ e $+20\%$ da tensão nominal da rede elétrica, sendo a tensão de 101,8V, 108,2V, 146,4V e 152,8V, respectivamente.

Para cada variação da tensão de entrada foi gerado as curvas das principais tensões e correntes, um quadro com as medidas realizadas e as curvas da potência processada pelos conversores fonte de corrente e fonte de tensão de cada topologia.

No quadro foram apresentadas as medidas da tensão eficaz, da corrente eficaz, da potência ativa (P), da potência reativa (Q) e da potência aparente (S). Além disso, foi apresentado o fator de potência total (FP) e o fator de deslocamento (FD) calculado de acordo com o ângulo entre a tensão e a corrente, e a THD da tensão e a THD da corrente, além do termo kbcc para cada ponto de operação.

A curva do fluxo de potência processada por cada conversor foi plotada com os dados medidos para cada ponto de operação, considerando os parâmetros de entrada e saída de cada conversor, e para comparação, foi plotado o ponto da potência aparente medida naquele ponto de operação para aquele conversor mostrado no gráfico.

Para a topologia **Back-to-Back**, as medidas principais de tensão e corrente são a tensão e corrente da rede elétrica, que é a mesma do conversor fonte de corrente, e a tensão e corrente do PAC da microrrede, que são as mesmas variáveis do conversor fonte de tensão.

Para tensão da rede elétrica eficaz $V_{REDE} = 101,8 \text{ V}$ temos a Figura 6.13 com a curvas de tensão e corrente da rede elétrica e tensão e corrente da carga, para a carga linear. No quadro 6.5 é apresentado as variáveis medidas e na Figura 6.14 as curvas com o ponto marcado da potência processada por cada conversor.

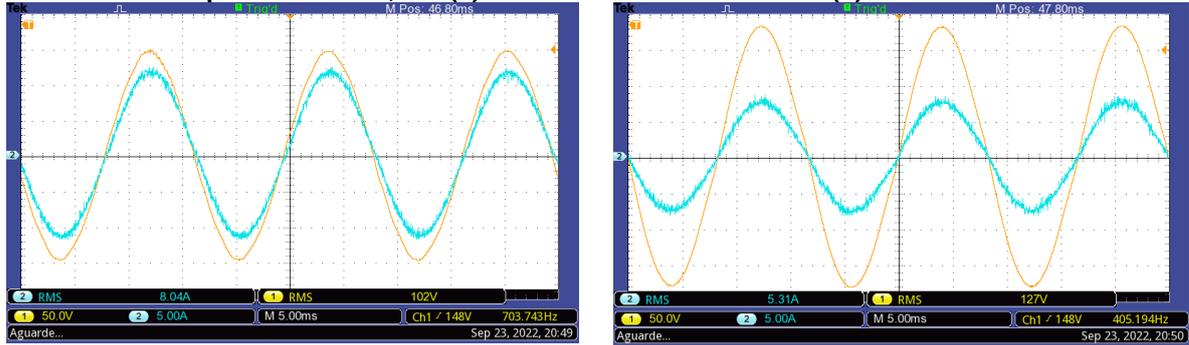
Para tensão da rede elétrica eficaz $V_{REDE} = 108,2 \text{ V}$ temos a Figura 6.15 com a curvas de tensão e corrente da rede elétrica e tensão e corrente da carga, para

a carga linear. No quadro 6.6 é apresentado as variáveis medidas e na Figura 6.16 as curvas com o ponto marcado da potência processada por cada conversor.

Para tensão da rede elétrica eficaz $V_{REDE} = 146,4 \text{ V}$ temos a Figura 6.17 com a curvas de tensão e corrente da rede elétrica e tensão e corrente da carga, para a carga linear. No quadro 6.7 é apresentado as variáveis medidas e na Figura 6.18 as curvas com o ponto marcado da potência processada por cada conversor.

Para tensão da rede elétrica eficaz $V_{REDE} = 152,7 \text{ V}$ temos a Figura 6.19 com a curvas de tensão e corrente da rede elétrica e tensão e corrente da carga, para a carga linear. No quadro 6.8 é apresentado as variáveis medidas e na Figura 6.20 as curvas com o ponto marcado da potência processada por cada conversor.

Figura 6-13 – Curvas de tensão (em amarelo com 50V/div) e corrente (em azul com 5A/div) em 5ms/div do B2B para $v_{REDE}=101,8\text{ V}$: (a) Tensão v_{REDE} e corrente i_{FC} . (b) Tensão v_{MR} e corrente i_{MR} .



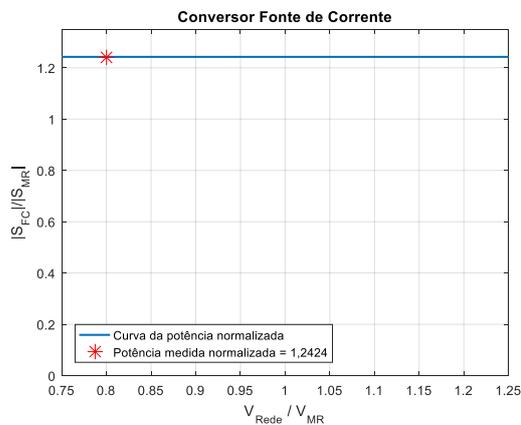
(a)

(b)

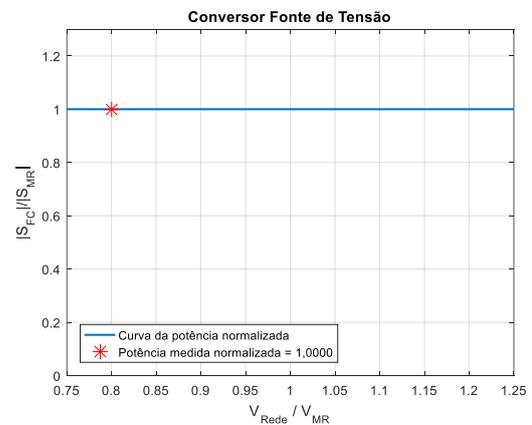
Quadro 6.5 – Valores medidos do B2B para carga linear e $v_{REDE}=101,8\text{ V}$.

Variáveis	Rede	Carga
Tensão	101,8 V	127,3 V
Corrente	8,181 A	5,269 A
Potência P	828,4 W	669,9 W
Potência Q	81,1 VAR	13,72 VAR
Potência S	832,4 VA	670 VA
F. de Potência	0,995	0,999
F.Deslocamento	0,998515	0,999996
THD tensão	1,623%	1,806%
THD corrente	3,067%	2,161%
Kbcc	0,242573518	

Figura 6-14 – Curvas das potências normalizadas do B2B para $v_{REDE} = 101,8\text{ V}$ e carga linear: (a) Conversor fonte de corrente. (b) Conversor fonte de tensão.



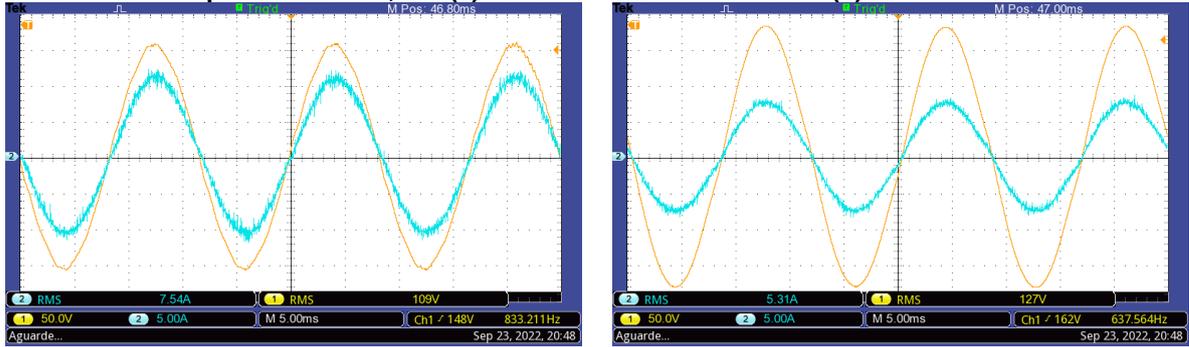
(a)



(b)

Fonte: o autor.

Figura 6-15 – Curvas de tensão (em amarelo com 50V/div) e corrente (em azul com 5A/div) em 5ms/div do B2B para $v_{REDE}=108,2\text{ V}$: (a) Tensão v_{REDE} e corrente i_{FC} . (b) Tensão v_{MR} e corrente i_{MR} .



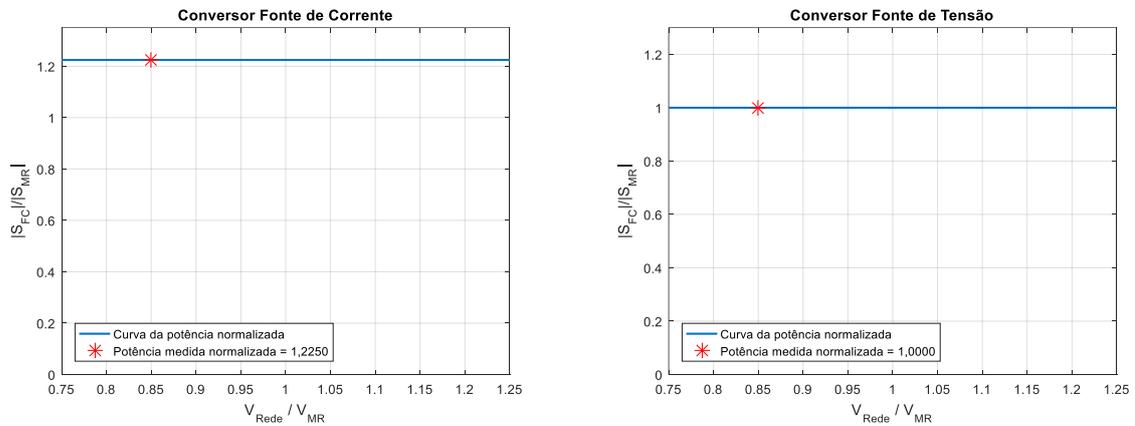
(a)

(b)

Quadro 6.6 – Valores medidos do B2B para carga linear e $v_{REDE}=108,2\text{ V}$.

Variáveis	Rede	Carga
Tensão	108,2 V	127,3 V
Corrente	7,612 A	5,286 A
Potência P	819,4 W	671,8 W
Potência Q	79,61 VAR	- 20,07 VAR
Potência S	823,3 VA	672,1 VA
F. de Potência	0,995	- 0,999
F.Deslocamento	0,998553	0,999232
THD tensão	1,54%	1,799%
THD corrente	3,219%	2,275%
Kbcc	0,225513546	

Figura 6-16 – Curvas das potências normalizadas do B2B para $v_{REDE} = 108,2\text{ V}$ e carga linear: (a) Conversor fonte de corrente. (b) Conversor fonte de tensão.

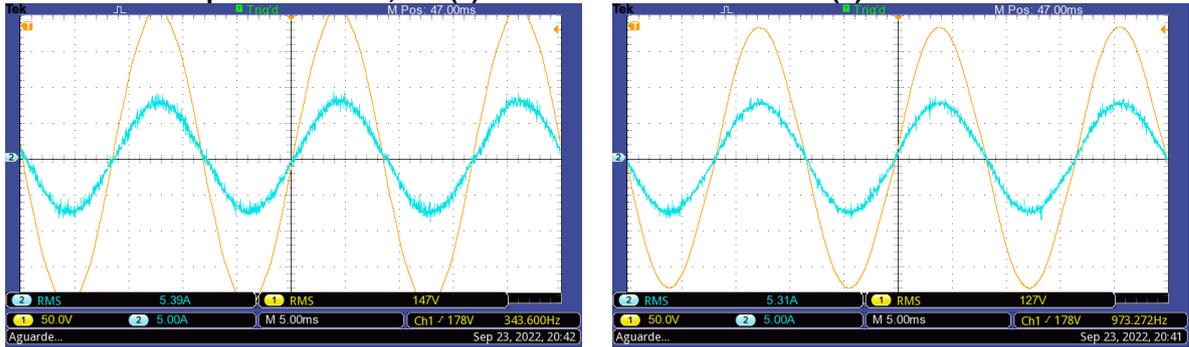


(a)

(b)

Fonte: o autor.

Figura 6-17 – Curvas de tensão (em amarelo com 50V/div) e corrente (em azul com 5A/div) em 5ms/div do B2B para $v_{REDE}=146,4\text{ V}$: (a) Tensão v_{REDE} e corrente i_{FC} . (b) Tensão v_{MR} e corrente i_{MR} .



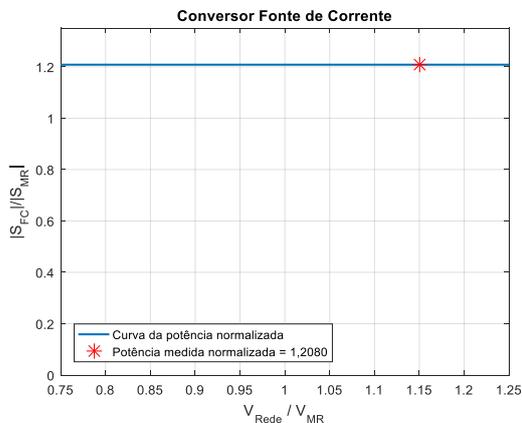
(a)

(b)

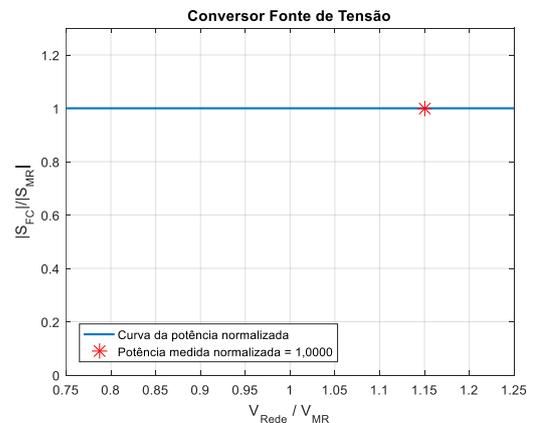
Quadro 6.7 – Valores medidos do B2B para carga linear e $v_{REDE}=146,4\text{ V}$.

Variáveis	Rede	Carga
Tensão	146,4 V	127,3 V
Corrente	5,428 A	5,168 A
Potência P	789,9 W	656,7 W
Potência Q	77,77 VAR	24,2 VAR
Potência S	793,8 VA	657,1 VA
F. de Potência	0,995	0,999
F.Deslocamento	0,998514	0,999995
THD tensão	1,127%	1,814%
THD corrente	3,826%	3,009%
Kbcc	0,208771128	

Figura 6-18 – Curvas das potências normalizadas do B2B para $v_{REDE} = 146,4\text{ V}$ e carga linear: (a) Conversor fonte de corrente. (b) Conversor fonte de tensão.



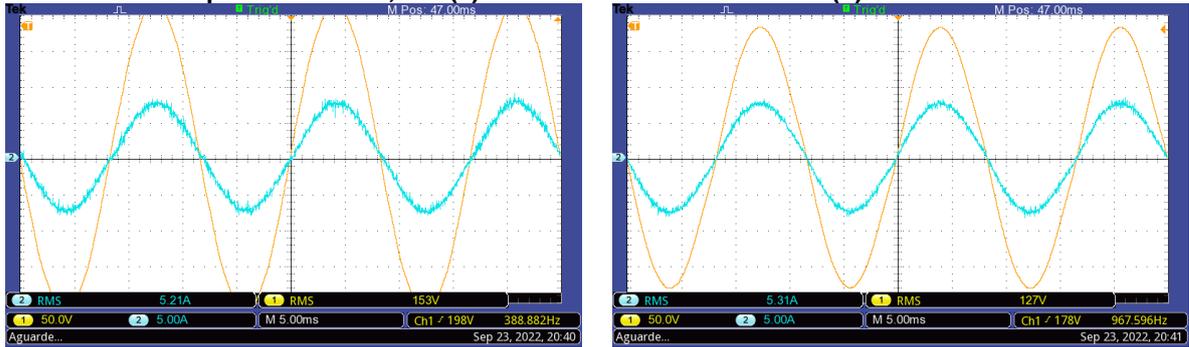
(a)



(b)

Fonte: o autor.

Figura 6-19 – Curvas de tensão (em amarelo com 50V/div) e corrente (em azul com 5A/div) em 5ms/div do B2B para $v_{REDE}=152,7\text{ V}$: (a) Tensão v_{REDE} e corrente i_{FC} . (b) Tensão v_{MR} e corrente i_{MR} .



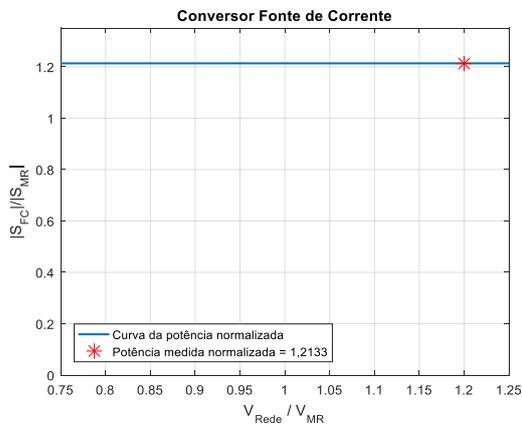
(a)

(b)

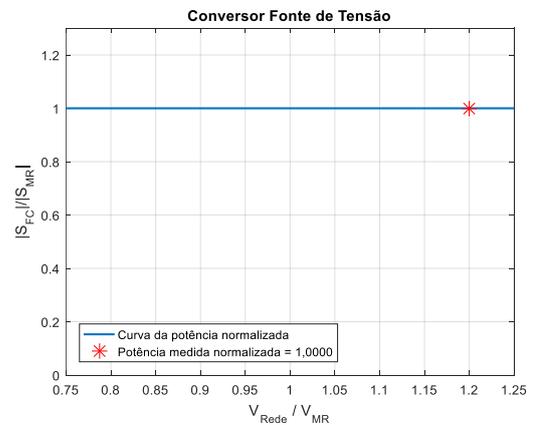
Quadro 6.8 – Valores medidos do B2B para carga linear e $v_{REDE}=152,7\text{ V}$.

Variáveis	Rede	Carga
Tensão	152,7 V	127,3 V
Corrente	5,191 A	5,133 A
Potência P	787,9 W	652,3 W
Potência Q	79,68 VAR	20,84 VAR
Potência S	791,9 VA	652,7 VA
F. de Potência	0,994	0,999
F.Deslocamento	0,998465	0,999986
THD tensão	0,9752%	1,872%
THD corrente	3,738%	3,004%
Kbcc	0,214011958	

Figura 6-20 – Curvas das potências normalizadas do B2B para $v_{REDE} = 152,7\text{ V}$ e carga linear: (a) Conversor fonte de corrente. (b) Conversor fonte de tensão.



(a)



(b)

Fonte: o autor.

No caso da carga linear, o deslocamento angular entre a tensão e a corrente, e a THD da tensão da rede elétrica e a THD da corrente da carga não são significativas no equacionamento dos conversores. Para verificar a contribuição dessas medições foi realizado a análise do fluxo de potência entre os conversores fonte de corrente e fonte de tensão ao colocar uma carga não linear.

Foi utilizado no PAC da microrrede uma carga não linear, composto por um retificador monofásico em ponte completa com um resistência de 24Ω e uma indutância em série de 57 mH.

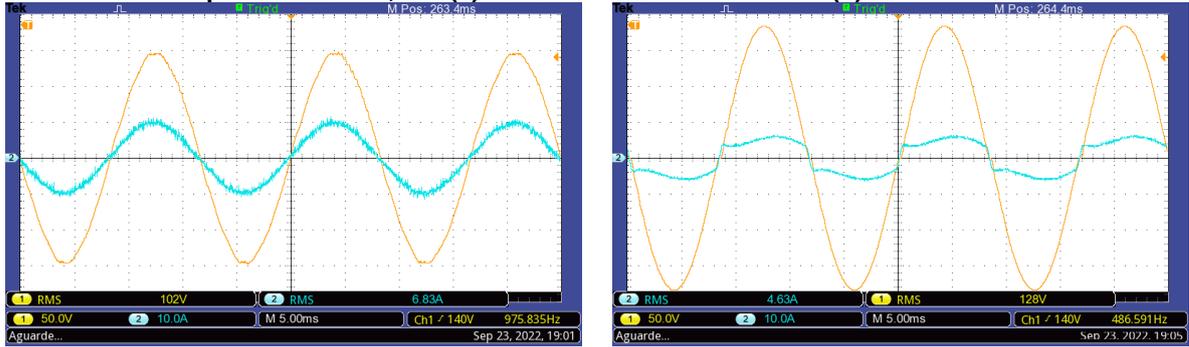
Para tensão da rede elétrica eficaz $V_{REDE} = 101,8 \text{ V}$ temos a Figura 6.21 com a curvas de tensão e corrente da rede elétrica e tensão e corrente da carga, para a carga não linear. No quadro 6.9 é apresentado as variáveis medidas e na Figura 6.22 as curvas com o ponto marcado da potência processada por cada conversor.

Para tensão da rede elétrica eficaz $V_{REDE} = 108,6 \text{ V}$ temos a Figura 6.23 com a curvas de tensão e corrente da rede elétrica e tensão e corrente da carga, para a carga não linear. No quadro 6.10 é apresentado as variáveis medidas e na Figura 6.24 as curvas com o ponto marcado da potência processada por cada conversor.

Para tensão da rede elétrica eficaz $V_{REDE} = 146,3 \text{ V}$ temos a Figura 6.25 com a curvas de tensão e corrente da rede elétrica e tensão e corrente da carga, para a carga não linear. No quadro 6.11 é apresentado as variáveis medidas e na Figura 6.26 as curvas com o ponto marcado da potência processada por cada conversor.

Para tensão da rede elétrica eficaz $V_{REDE} = 152,6 \text{ V}$ temos a Figura 6.27 com a curvas de tensão e corrente da rede elétrica e tensão e corrente da carga, para a carga não linear. No quadro 6.12 é apresentado as variáveis medidas e na Figura 6.28 as curvas com o ponto marcado da potência processada por cada conversor.

Figura 6-21 – Curvas de tensão (em amarelo com 50V/div) e corrente (em azul com 10A/div) em 5ms/div do B2B para $v_{REDE}=101,8\text{ V}$: (a) Tensão v_{REDE} e corrente i_{FC} . (b) Tensão v_{MR} e corrente i_{MR} .



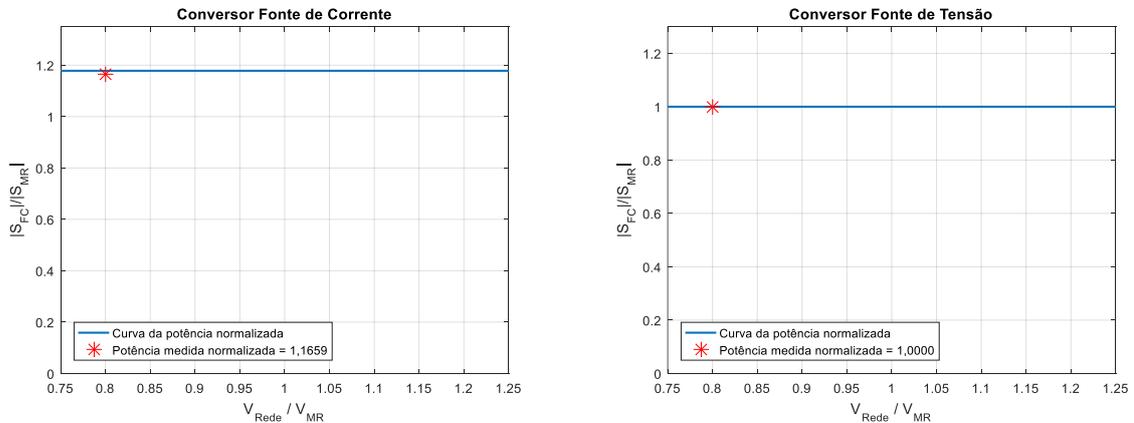
(a)

(b)

Quadro 6.9 – Valores medidos do B2B para carga não linear RL e $v_{REDE}=101,8\text{ V}$.

Variáveis	Rede	Carga
Tensão	101,8 V	127,3 V
Corrente	6,687 A	4,589 A
Potência P	678 W	545,6 W
Potência Q	56,23 VAR	207 VAR
Potência S	680,4 VA	583,6 VA
F. de Potência	0,996	0,934
F.Deslocamento	0,998479	0,978293
THD tensão	1,629%	2,704%
THD corrente	3,617%	26,91%
Kbcc	0,247067449	

Figura 6-22 – Curvas das potências normalizadas do B2B para $v_{REDE} = 101,8\text{ V}$ e carga não linear RL: (a) Conversor fonte de corrente. (b) Conversor fonte de tensão.

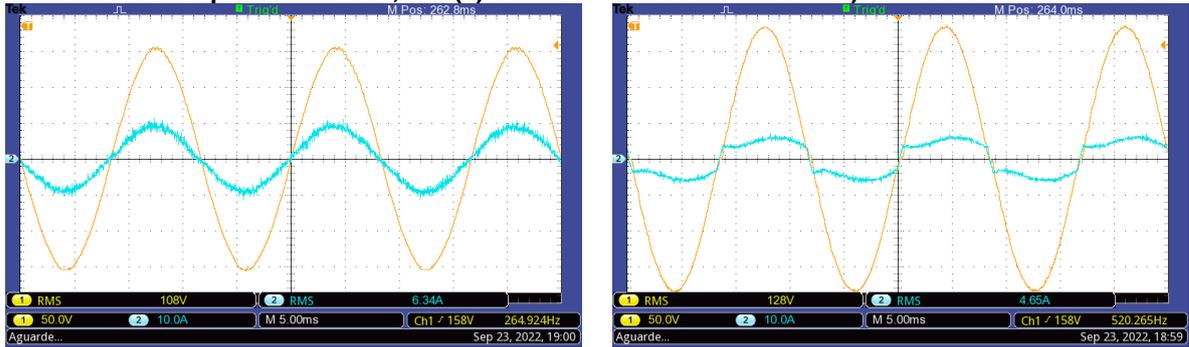


(a)

(b)

Fonte: o autor.

Figura 6-23 – Curvas de tensão (em amarelo com 50V/div) e corrente (em azul com 10A/div) em 5ms/div do B2B para $v_{REDE}=108,6\text{ V}$: (a) Tensão v_{REDE} e corrente i_{FC} . (b) Tensão v_{MR} e corrente i_{MR} .



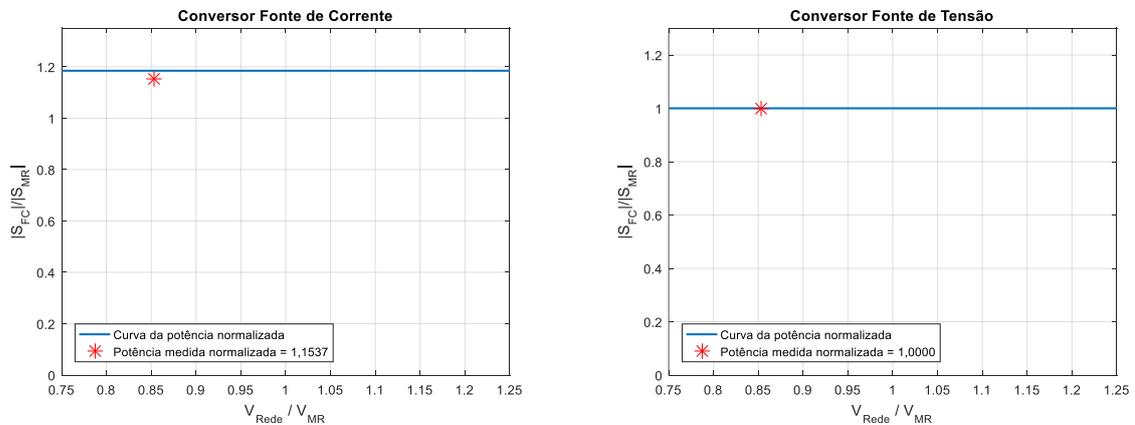
(a)

(b)

Quadro 6.10 – Valores medidos do B2B para carga não linear RL e $v_{REDE}=108,6\text{ V}$.

Variáveis	Rede	Carga
Tensão	108,6 V	127,3 V
Corrente	6,23 A	4,604 A
Potência P	671,5 W	547,9 W
Potência Q	75,04 VAR	206,9 VAR
Potência S	675,7 VA	585,7 VA
F. de Potência	0,993	0,935
F.Deslocamento	0,998456	0,986615
THD tensão	1,358%	2,446%
THD corrente	3,696%	23,47%
Kbcc	0,233254243	

Figura 6-24 – Curvas das potências normalizadas do B2B para $v_{REDE} = 108,6\text{ V}$ e carga não linear RL: (a) Conversor fonte de corrente. (b) Conversor fonte de tensão.

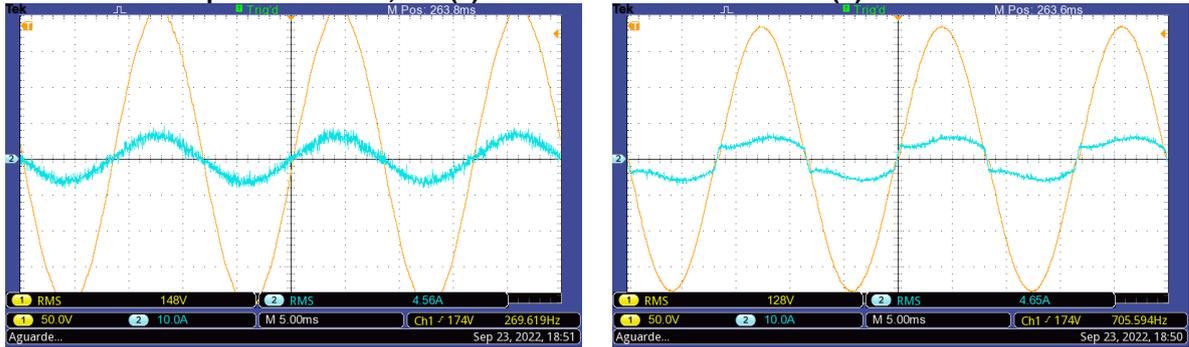


(a)

(b)

Fonte: o autor.

Figura 6-25 – Curvas de tensão (em amarelo com 50V/div) e corrente (em azul com 10A/div) em 5ms/div do B2B para $v_{REDE}=146,3\text{ V}$: (a) Tensão v_{REDE} e corrente i_{FC} . (b) Tensão v_{MR} e corrente i_{MR} .



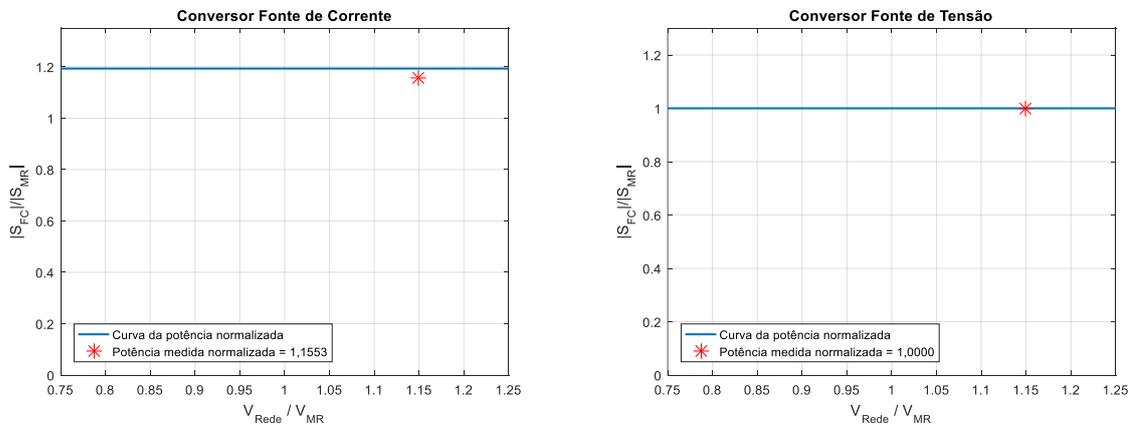
(a)

(b)

Quadro 6.11 – Valores medidos do B2B para carga não linear RL e $v_{REDE}=146,3\text{ V}$.

Variáveis	Rede	Carga
Tensão	146,3 V	127,3 V
Corrente	4,484 A	4,459 A
Potência P	651,4 W	529,1 W
Potência Q	71,89 VAR	204,7 VAR
Potência S	655,4 VA	567,3 VA
F. de Potência	0,993	0,932
F.Deslocamento	0,998454	0,992132
THD tensão	0,8723%	2,609%
THD corrente	4,164%	24,69%
Kbcc	0,238707239	

Figura 6-26 – Curvas das potências normalizadas do B2B para $v_{REDE} = 146,3\text{ V}$ e carga não linear RL: (a) Conversor fonte de corrente. (b) Conversor fonte de tensão.

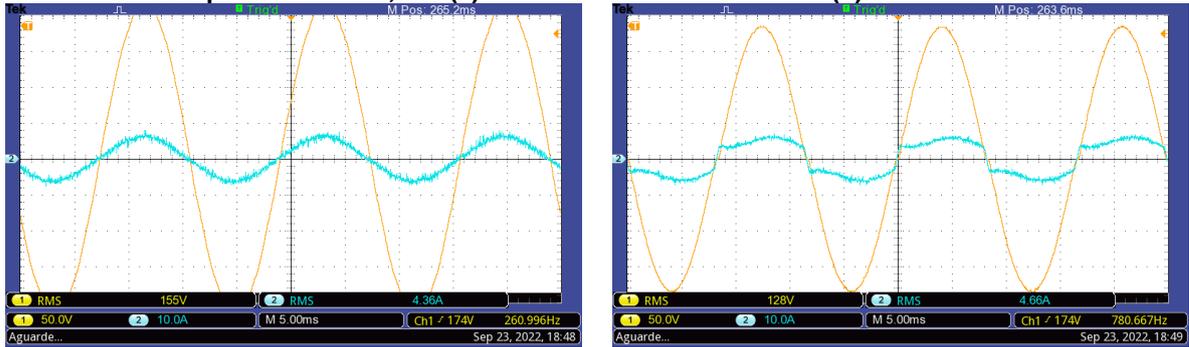


(a)

(b)

Fonte: o autor.

Figura 6-27 – Curvas de tensão (em amarelo com 50V/div) e corrente (em azul com 10A/div) em 5ms/div do B2B para $v_{REDE}=152,6\text{ V}$: (a) Tensão v_{REDE} e corrente i_{FC} . (b) Tensão v_{MR} e corrente i_{MR} .



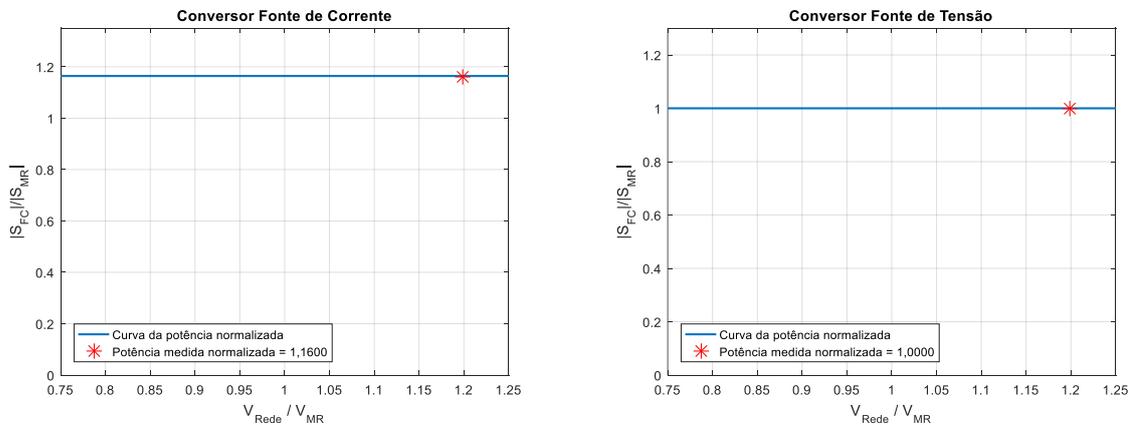
(a)

(b)

Quadro 6.12 – Valores medidos do B2B para carga não linear RL e $v_{REDE}=152,6\text{ V}$.

Variáveis	Rede	Carga
Tensão	152,6 V	127,3 V
Corrente	4,279 A	4,422 A
Potência P	649,1 W	524 W
Potência Q	67,71 VAR	204,6 VAR
Potência S	652,6 VA	562,6 VA
F. de Potência	0,994	0,931
F.Deslocamento	0,998473	0,96349
THD tensão	0,9391%	2,618%
THD corrente	4,396%	25%
Kbcc	0,245419847	

Figura 6-28 – Curvas das potências normalizadas do B2B para $v_{REDE} = 152,6\text{ V}$ e carga não linear RL: (a) Conversor fonte de corrente. (b) Conversor fonte de tensão.



(a)

(b)

Fonte: o autor.

Como visto, nas medições dos quadros 6.5 à 6.12 para os diversos pontos de operação para a variação de tensão de entrada da topologia Back-to-Back, e nos gráficos plotados do fluxo de potência, o conversor fonte de tensão é responsável por processar toda a potência elétrica entregue à carga, quando vem da rede elétrica. Já o conversor fonte de corrente tem a função de processar a potência elétrica entregue à carga com o adicional das perdas nos elementos de ambos os conversores, como as perdas nas chaves e nos elementos passivos, como capacitor do barramento CC, do capacitor do filtro LC e dos indutores do fonte de corrente e do fonte de tensão.

Foi possível verificar também que a distorção harmônica na corrente da carga não altera a potência processada pelo conversor fonte de tensão, mas altera a potência processada pelo conversor fonte de corrente, diminuindo a potência processada pelo conversor, como pode ser visto ao se comparar os ábacos da carga linear e não linear para os mesmos níveis de tensão da rede elétrica.

Para a comparação entre as duas topologias de CEBI, foi realizado os mesmos ensaios com o UPQC, primeiramente com carga linear composta por uma resistência de 24Ω , e logo em seguida, para uma carga não linear RL.

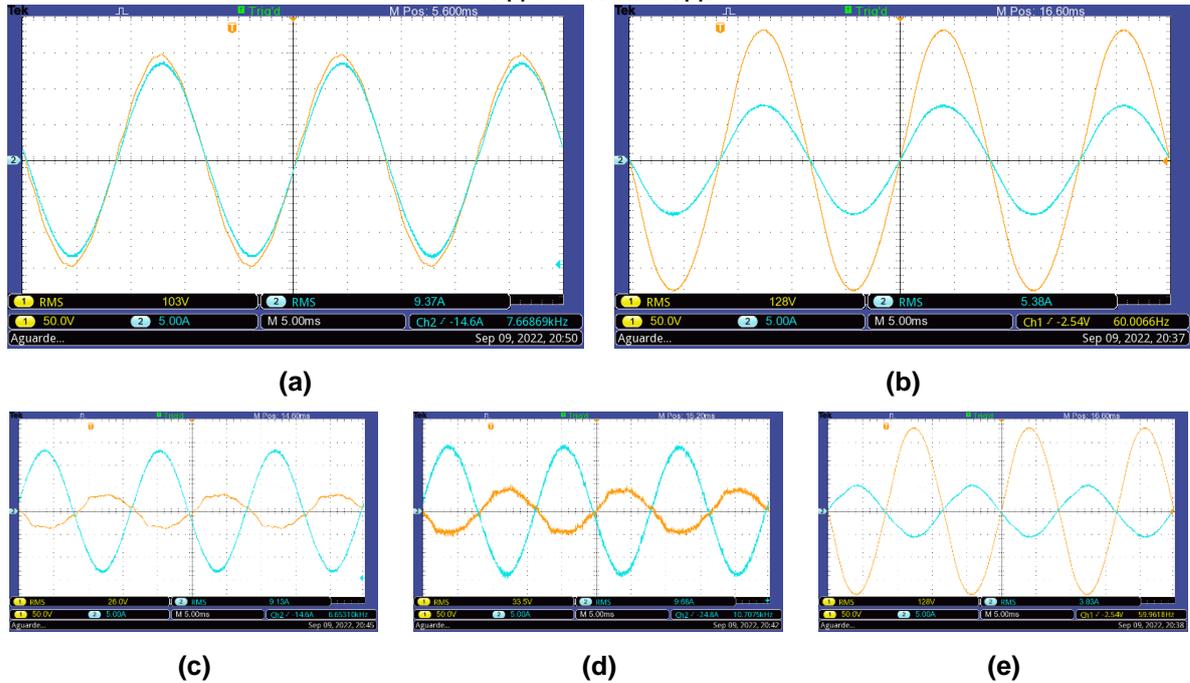
Para a topologia **UPQC**, as medidas de tensão e corrente realizadas foram a tensão e corrente da rede elétrica, e a tensão e corrente na carga. Além dessas, foram realizadas as medições da tensão do primário do transformador com a corrente da rede elétrica, no intuito de se obter a potência processada pelo conversor fonte de corrente, considerando as perdas no transformador de isolamento galvânica, denominado nos quadros como **CFC + Trafo**. Também foi obtido a medição de tensão do secundário do transformador e da corrente que entra no conversor fonte de corrente, que é a potência real processada pelo conversor fonte de corrente, sem considerar a potência dissipada pelo transformador, denominada nos quadros como **CFC**. Por último, foi obtido as medições de tensão e corrente na saída do conversor fonte de tensão para saber a potência processada por ele, para a comparação com o equacionamento obtido.

Devido à dificuldade na prática em se obter a potência dissipada no transformador, a potência considerada na avaliação do fluxo de potência é a potência considerando as perdas do transformador, ou seja, a tensão no primário do transformador e a corrente da rede elétrica.

Para tensão da rede elétrica eficaz $V_{REDE} = 101,8 \text{ V}$ temos a Figura 6.29 com a curvas de tensão e corrente da rede elétrica e tensão e corrente da carga, para

a carga linear. No quadro 6.13 é apresentada as variáveis medidas e na Figura 6.30 as curvas com o ponto marcado da potência processada por cada conversor.

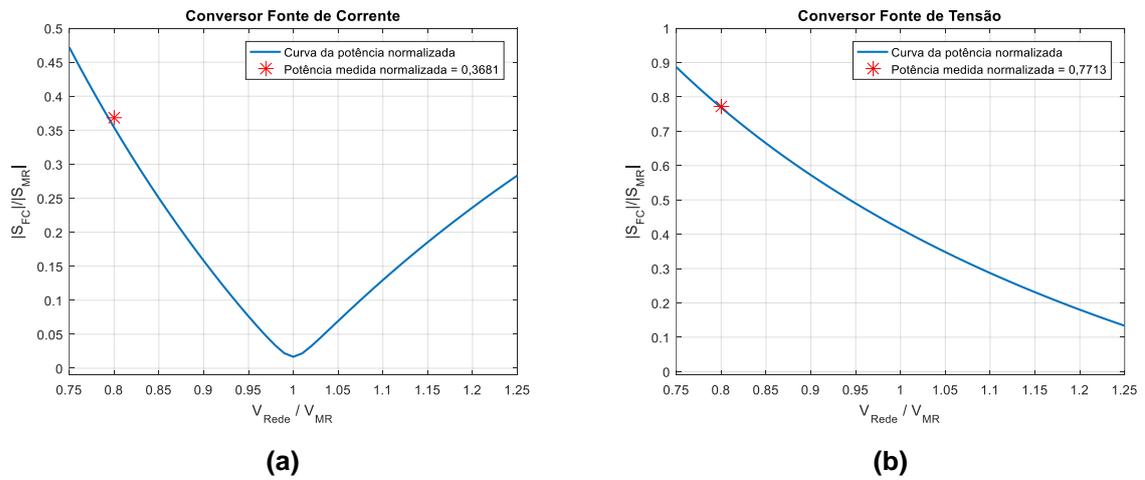
Figura 6-29 – Curvas de tensão (em amarelo com 50V/div) e corrente (em azul com 5A/div) em 5ms/div do UPQC para $v_{REDE} = 101,8$ V: (a) Tensão v_{REDE} e corrente i_{REDE} . (b) Tensão v_{MR} e corrente i_{MR} . (c) Tensão v_{1TRAFO} e corrente i_{REDE} . (d) Tensão v_{2TRAFO} e corrente i_{FC} . (e) Tensão v_{FT} e corrente i_{FT} .



Quadro 6.13 – Valores medidos do UPQC para carga linear e $v_{REDE}=101,8$ V.

Variáveis	Rede	CFC + Trafo	CFC	CFT	Carga
Tensão	101,8 V	26,55 V	34,07 V	127,3 V	127,3 V
Corrente	9,29 A	9,265 A	9,73 A	4,048 A	5,248 A
Potência P	943,9 W	- 239 W	- 329,4 W	- 513,4 W	667,7 W
Potência Q	38,26 VAr	57,11 VAr	34,33 VAr	40,11 VAr	0
Potência S	944,7 VA	245,8 VA	331,2 VA	515 VA	667,7 VA
F. de Potência	0,999	0,972	0,994	0,996	1
F.Deslocamento	0,999329	- 0,97887	- 0,99664	- 0,99939	0,999998
THD tensão	1,189%	8,448%	6,846%	1,782%	1,771%
THD corrente	1,498%	1,497%	2,124%	4,403%	2,037%
Kbcc	0,414856972				

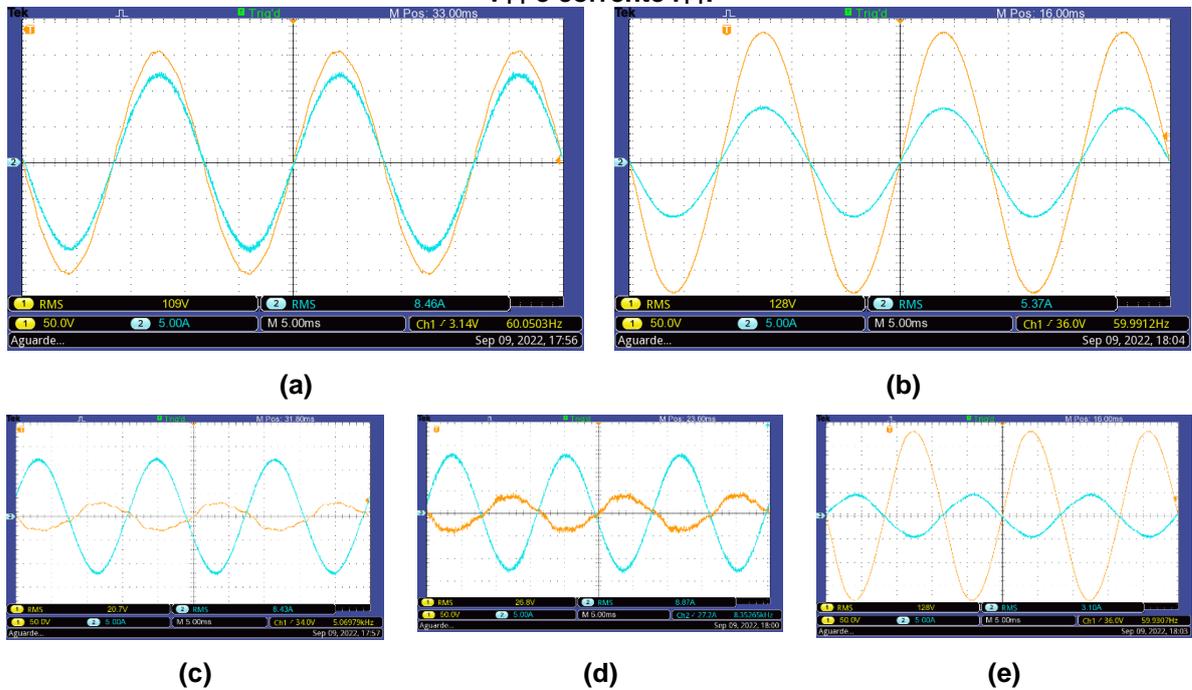
Figura 6-30 – Curvas das potências normalizadas do UPQC para $v_{REDE} = 101,8\text{ V}$ e carga linear: (a) Conversor fonte de corrente. (b) Conversor fonte de tensão.



Fonte: o autor.

Para tensão da rede elétrica eficaz $V_{REDE} = 108,1\text{ V}$ temos a Figura 6.31 com a curvas de tensão e corrente da rede elétrica e tensão e corrente da carga, para a carga linear. No quadro 6.14 é apresentado as variáveis medidas e na Figura 6.32 as curvas com o ponto marcado da potência processada por cada conversor.

Figura 6-31 – Curvas de tensão (em amarelo com 50V/div) e corrente (em azul com 5A/div) em 5ms/div do UPQC para $v_{REDE} = 108,1\text{ V}$: (a) Tensão v_{REDE} e corrente i_{REDE} . (b) Tensão v_{MR} e corrente i_{MR} . (c) Tensão v_{1TRAFO} e corrente i_{REDE} . (d) Tensão v_{2TRAFO} e corrente i_{FC} . (e) Tensão v_{FT} e corrente i_{FT} .

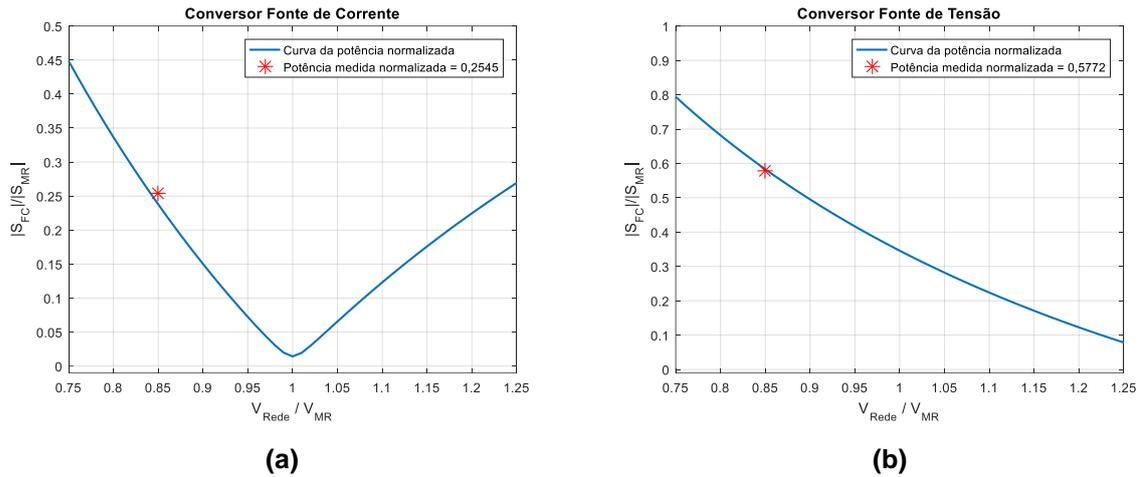


Quadro 6.14 – Valores medidos do UPQC para carga linear e $v_{REDE}=108,1\text{ V}$.

Variáveis	Rede	CFC + Trafo	CFC	CFT	Carga
Tensão	108,1 V	20,46 V	26,92V	127,3 V	127,3 V
Corrente	8,319 A	8,319 A	8,726 A	3,031 A	5,251 A
Potência P	898,1 W	- 162,7 W	- 232,2 W	- 384,4 W	668 W
Potência Q	30,84 VAr	49,32 VAr	34,05 VAr	30,89 VAr	0
Potência S	898,7 VA	170 VA	234,7 VA	385,6 VA	668 VA
F. de Potência	0,999	0,956	0,989	0,996	1
F.Deslocamento	0,99926	- 0,61566	- 0,89021	- 0,99926	0,999997
THD tensão	1,055	11,26	7,835	1,605	1,596
THD corrente	1,487	1,489	2,092	4,433	1,863
Kbcc	0,345359281				

Figura 6-32 – Curvas das potências normalizadas do UPQC para $v_{REDE} = 108,1\text{ V}$ e carga linear:

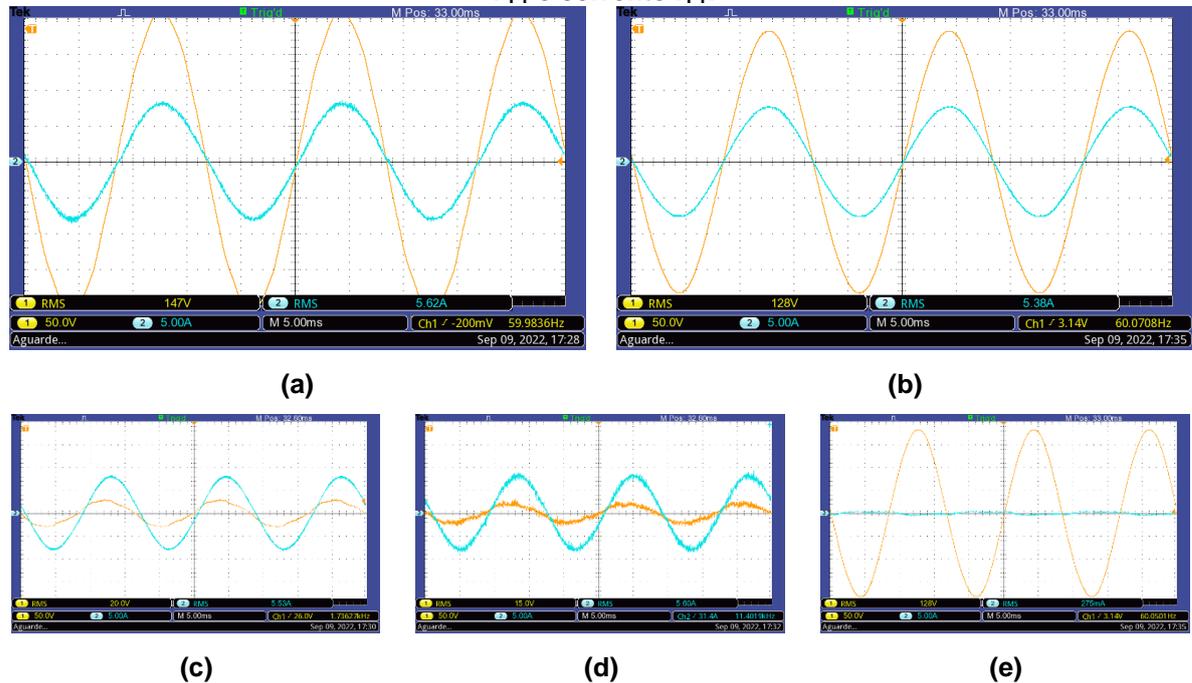
(a) Conversor fonte de corrente. (b) Conversor fonte de tensão.



Fonte: o autor.

Para tensão da rede elétrica eficaz $V_{REDE} = 146,3\text{ V}$ temos a Figura 6.33 com a curvas de tensão e corrente da rede elétrica e tensão e corrente da carga, para a carga linear. No quadro 6.15 é apresentado as variáveis medidas e na Figura 6.34 as curvas com o ponto marcado da potência processada por cada conversor.

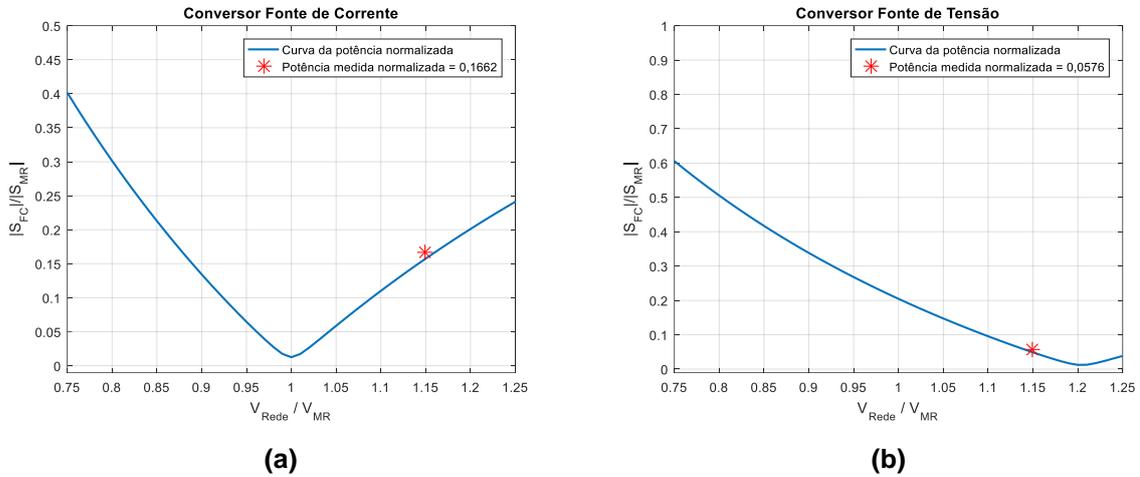
Figura 6-33 – Curvas de tensão (em amarelo com 50V/div) e corrente (em azul com 5A/div) em 5ms/div do UPQC para $v_{REDE} = 146,3 \text{ V}$: (a) Tensão v_{REDE} e corrente i_{REDE} . (b) Tensão v_{MR} e corrente i_{MR} . (c) Tensão v_{1TRAFO} e corrente i_{REDE} . (d) Tensão v_{2TRAFO} e corrente i_{FC} . (e) Tensão v_{FT} e corrente i_{FT} .



Quadro 6.15 – Valores medidos do UPQC para carga linear e $v_{REDE}=146,3 \text{ V}$.

Variáveis	Rede	CFC + Trafo	CFC	CFT	Carga
Tensão	146,3 V	20,21 V	14,42 V	127,3 V	127,3 V
Corrente	5,488 A	5,482 A	5,691 A	0,3017 A	5,238 A
Potência P	800 W	102,2 W	74,83 W	- 29,55 W	666,1 W
Potência Q	59,23 VAR	42,44 VAR	33,55 VAR	- 24,49 VAR	0
Potência S	802,2 VA	110,7 VA	82,01 VA	38,38 VA	666,1 VA
F. de Potência	0,997	0,923	0,912	- 0,769	1
F.Deslocamento	0,997789	0,934888	0,930992	- 0,96902	0,999992
THD tensão	1,041%	9,231%	13,56%	0,96%	0,96%
THD corrente	2,074%	1,877%	3,151%	45,7%	1,11%
Kbcc	0,204323675				

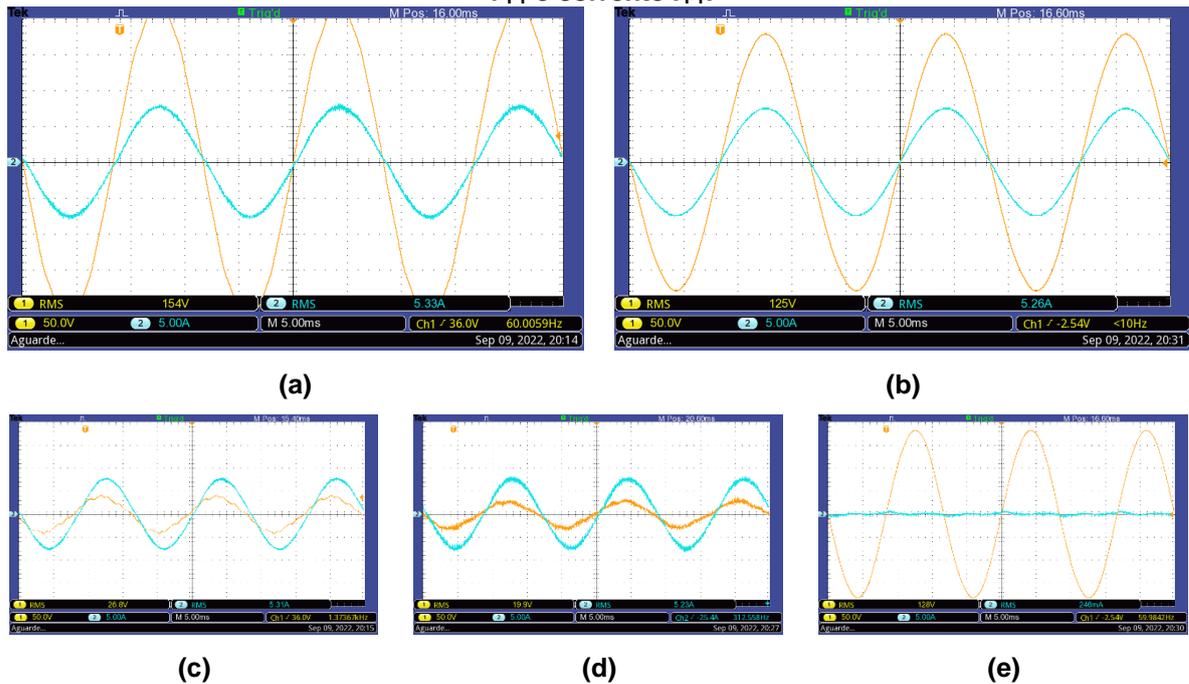
Figura 6-34 – Curvas das potências normalizadas do UPQC para $v_{REDE} = 146,3\text{ V}$ e carga linear: (a) Conversor fonte de corrente. (b) Conversor fonte de tensão.



Fonte: o autor.

Para tensão da rede elétrica eficaz $V_{REDE} = 152,8\text{ V}$ temos a Figura 6.35 com a curvas de tensão e corrente da rede elétrica e tensão e corrente da carga, para a carga linear. No quadro 6.16 é apresentada as variáveis medidas e na Figura 6.36 as curvas com o ponto marcado da potência processada por cada conversor.

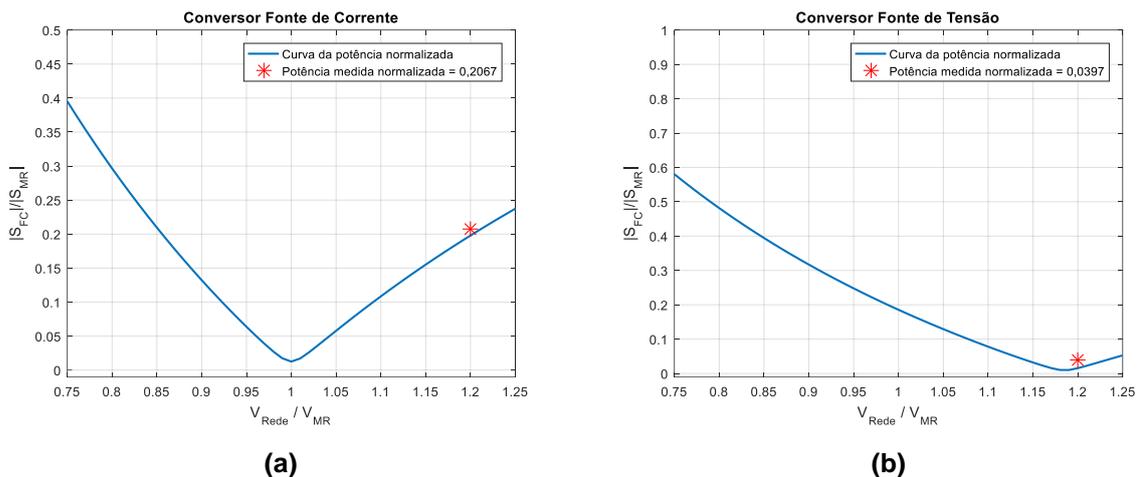
Figura 6-35 – Curvas de tensão (em amarelo com 50V/div) e corrente (em azul com 5A/div) em 5ms/div do UPQC para $v_{REDE} = 152,8\text{ V}$: (a) Tensão v_{REDE} e corrente i_{REDE} . (b) Tensão v_{MR} e corrente i_{MR} . (c) Tensão v_{1TRAFO} e corrente i_{REDE} . (d) Tensão v_{2TRAFO} e corrente i_{FC} . (e) Tensão v_{FT} e corrente i_{FT} .



Quadro 6.16 – Valores medidos do UPQC para carga linear e $v_{REDE}=152,8\text{ V}$.

Variáveis	Rede	CFC + Trafo	CFC	CFT	Carga
Tensão	152,8 V	26,67 V	21,02 V	127,3 V	127,3 V
Corrente	5,184 A	5,178 A	5,426 A	0,2087 A	5,248 A
Potência P	788,8 W	129,7 W	107,5 W	7,47 W	667,7 W
Potência Q	62,78 VAr	47,19 VAr	37,74 VAr	- 25,46 VAr	0
Potência S	791,3 VA	138 VA	113,9 VA	26,54 VA	667,7 VA
F. de Potência	0,996	0,939	0,943	- 0,281	1
F.Deslocamento	0,997327	0,945972	0,956966	0,43303	1
THD tensão	1,056%	7,865%	8,508%	0,953%	0,9203%
THD corrente	2,255%	2,366%	3,429%	---	0,9074%
Kbcc	0,185113075				

Figura 6-36 – Curvas das potências normalizadas do UPQC para $v_{REDE} = 152,8\text{ V}$ e carga linear:
(a) Conversor fonte de corrente. (b) Conversor fonte de tensão.

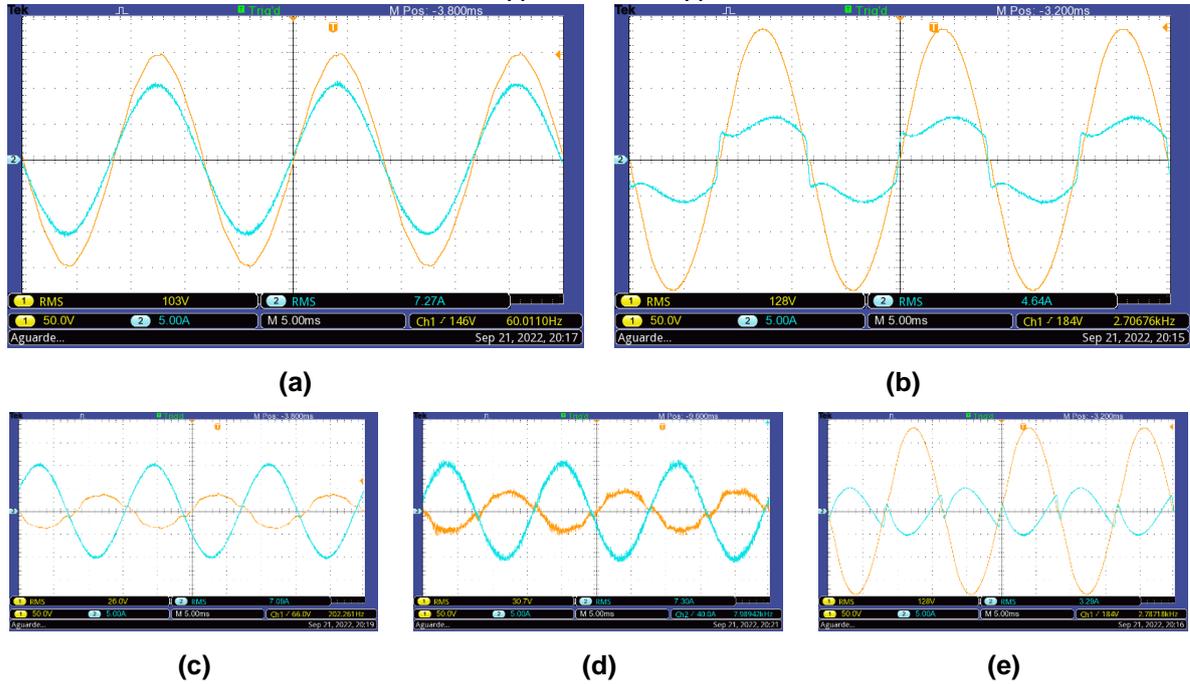


Fonte: o autor.

Além da carga linear, realizou-se ensaios com uma carga não linear composta por um retificador monofásico em ponte completa com um resistência de $24\ \Omega$ e uma indutância em série de 57 mH .

Para tensão da rede elétrica eficaz $V_{REDE} = 101,8\text{ V}$ temos a Figura 6.37 com a curvas de tensão e corrente da rede elétrica e tensão e corrente da carga, para a carga não linear. No quadro 6.17 é apresentado as variáveis medidas e na Figura 6.38 as curvas com o ponto marcado da potência processada por cada conversor.

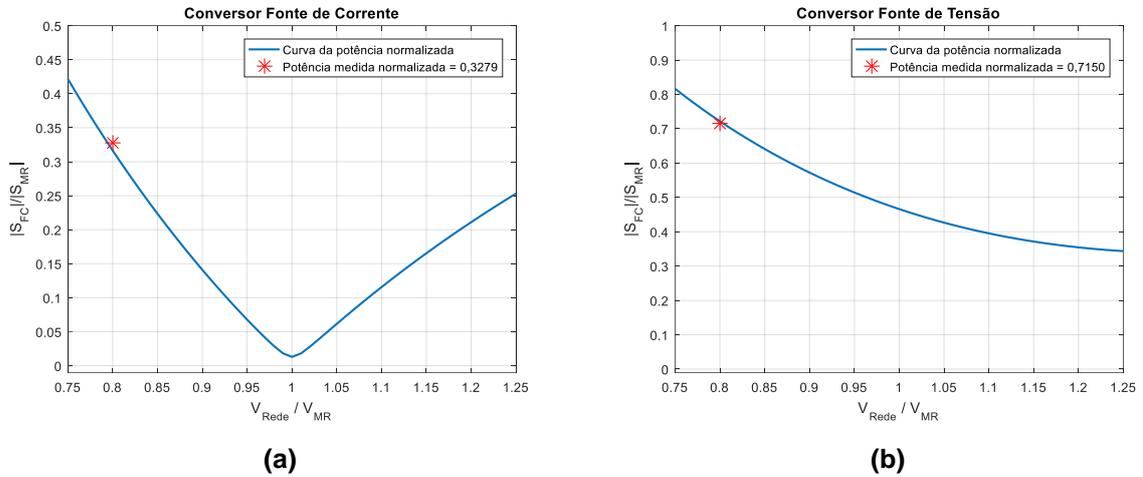
Figura 6-37 – Curvas de tensão (em amarelo com 50V/div) e corrente (em azul com 5A/div) em 5ms/div do UPQC para $v_{REDE} = 101,8 \text{ V}$: (a) Tensão v_{REDE} e corrente i_{REDE} . (b) Tensão v_{MR} e corrente i_{MR} . (c) Tensão v_{1TRAFO} e corrente i_{REDE} . (d) Tensão v_{2TRAFO} e corrente i_{FC} . (e) Tensão v_{FT} e corrente i_{FT} .



Quadro 6.17 – Valores medidos do UPQC para carga não linear RL e $v_{REDE}=101,8 \text{ V}$.

Variáveis	Rede	CFC + Trafo	CFC	CFT	Carga
Tensão	101,8 V	26,67 V	31,15 V	127,3 V	127,3 V
Corrente	7,189 A	7,183 A	7,499 A	3,281 A	4,589 A
Potência P	730,4 W	- 184,3 W	---	- 362,7 W	544,5 W
Potência Q	29,46 VAR	51,67 VAR	---	206,6 VAR	210,6 VAR
Potência S	731 VA	191,4 VA	---	417,4 VA	583,8 VA
F. de Potência	0,999	0,962	---	0,868	0,932
F.Deslocamento	0,999284	- 0,93295	- 0,99276	- 0,9438	0,97947
THD tensão	1,03%	13,38%	11,24%	2,631%	2,7%
THD corrente	1,24%	1,372%	1,778%	44,15%	28,6%
Kbcc	0,34251607				

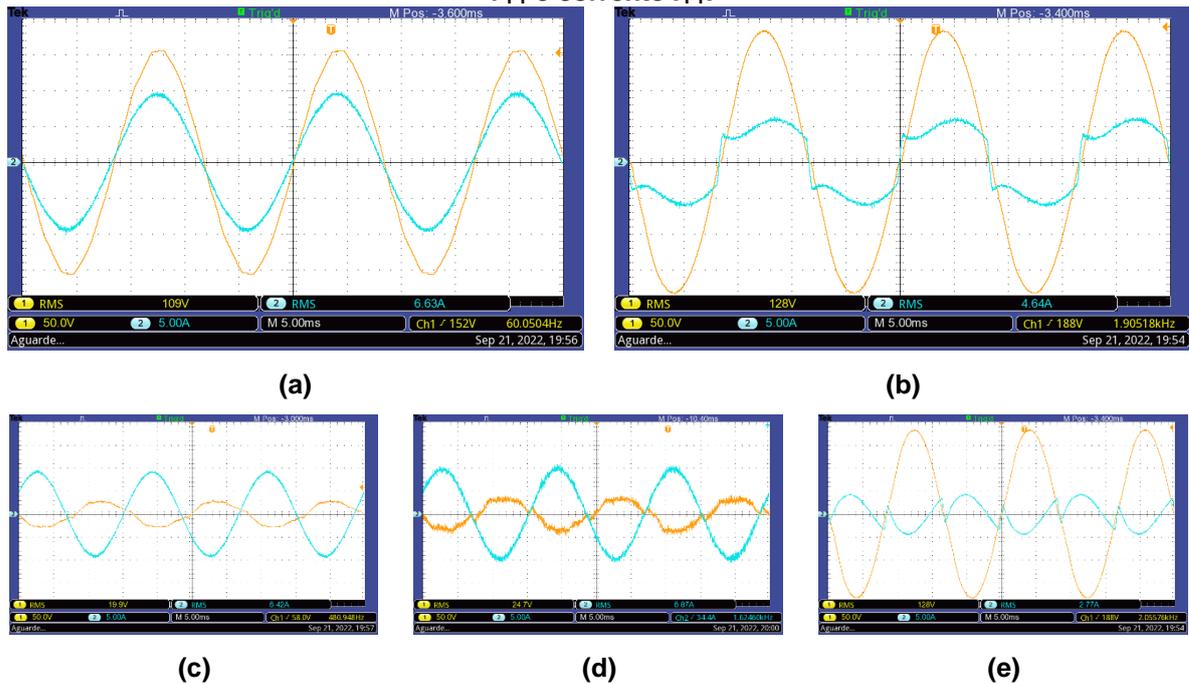
Figura 6-38 – Curvas das potências normalizadas do UPQC para $v_{REDE} = 101,8\text{ V}$ e carga não linear RL: (a) Conversor fonte de corrente. (b) Conversor fonte de tensão.



Fonte: o autor.

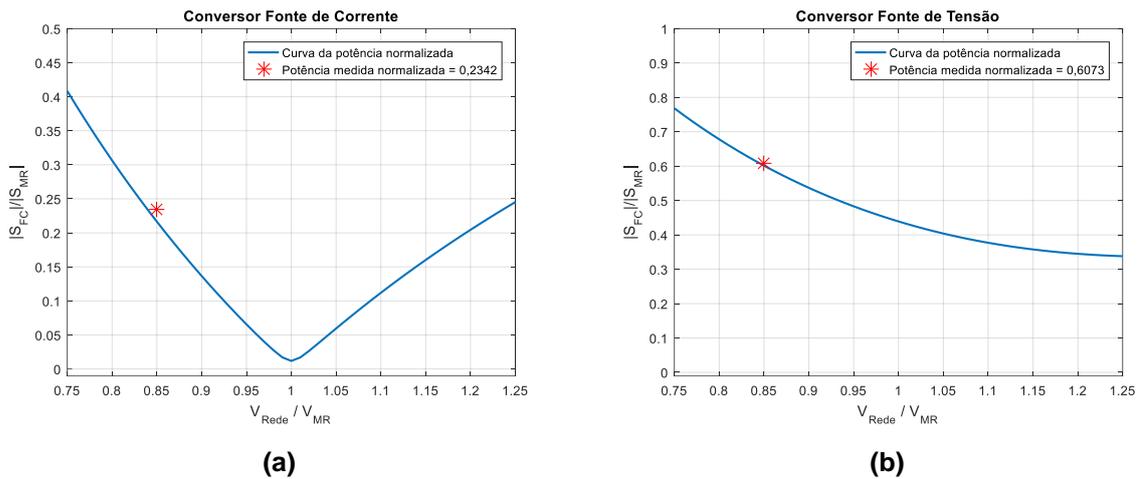
Para tensão da rede elétrica eficaz $V_{REDE} = 108,2\text{ V}$ temos a Figura 6.39 com a curvas de tensão e corrente da rede elétrica e tensão e corrente da carga, para a carga não linear. No quadro 6.18 é apresentado as variáveis medidas e na Figura 6.40 as curvas com o ponto marcado da potência processada por cada conversor.

Figura 6-39 – Curvas de tensão (em amarelo com 50V/div) e corrente (em azul com 5A/div) em 5ms/div do UPQC para $v_{REDE} = 108,2\text{ V}$: (a) Tensão v_{REDE} e corrente i_{REDE} . (b) Tensão v_{MR} e corrente i_{MR} . (c) Tensão v_{1TRAFO} e corrente i_{REDE} . (d) Tensão v_{2TRAFO} e corrente i_{FC} . (e) Tensão v_{FT} e corrente i_{FT} .



Quadro 6.18 – Valores medidos do UPQC para carga não linear RL e $v_{REDE}=108,2$ V.

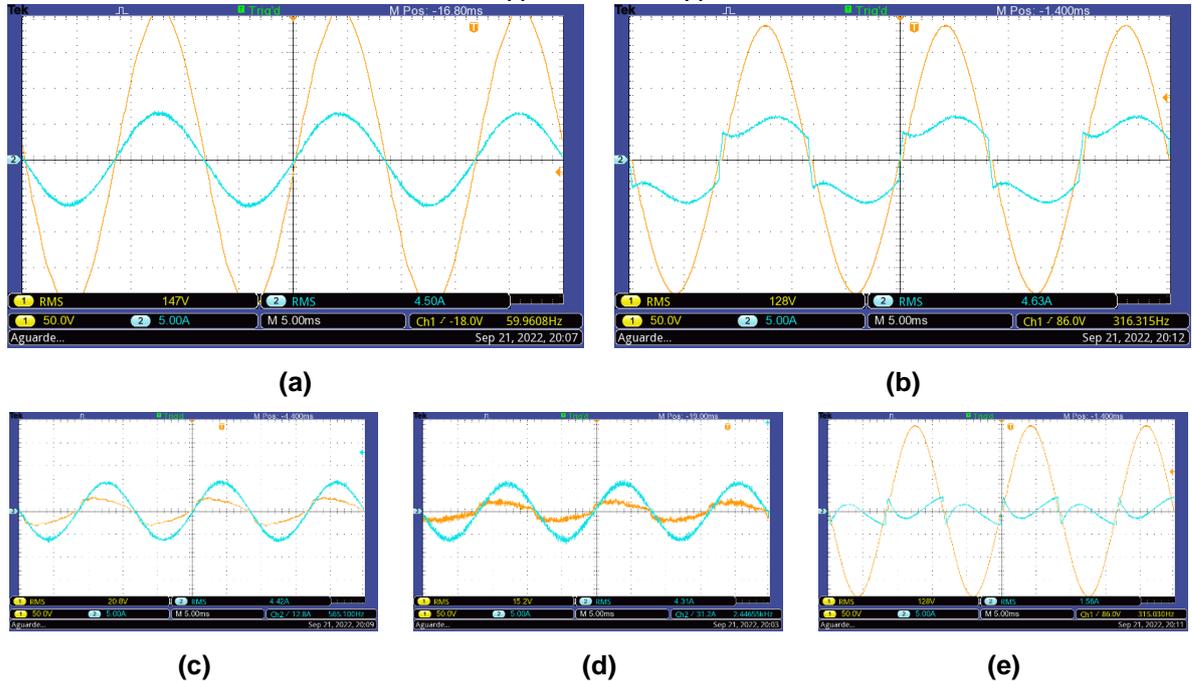
Variáveis	Rede	CFC + Trafo	CFC	CFT	Carga
Tensão	108,2 V	20,89 V	24,99 V	127,3 V	127,3 V
Corrente	6,544 A	6,548 A	6,831 A	2,785 A	4,587 A
Potência P	706,8 W	- 127,3 W	---	- 288,1 W	544 W
Potência Q	27,44 VAr	49,81 VAr	---	206,3 VAr	211,2 VAr
Potência S	707,3 VA	136,7 VA	---	354,4 VA	583,6 VA
F. de Potência	0,999	0,931	---	0,813	0,932
F.Deslocamento	0,999297	- 0,95319	- 0,9857	- 0,91283	0,97947
THD tensão	0,961%	20,6%	16,07%	2,836%	2,886%
THD corrente	1,224%	1,16%	1,767%	54,21%	28,51%
Kbcc	0,300183824				

Figura 6-40 – Curvas das potências normalizadas do UPQC para $v_{REDE} = 108,2$ V e carga não linear RL: (a) Conversor fonte de corrente. (b) Conversor fonte de tensão.

Fonte: o autor.

Para tensão da rede elétrica eficaz $V_{REDE} = 146,4$ V temos a Figura 6.41 com a curvas de tensão e corrente da rede elétrica e tensão e corrente da carga, para a carga não linear. No quadro 6.19 é apresentado as variáveis medidas e na Figura 6.42 as curvas com o ponto marcado da potência processada por cada conversor.

Figura 6-41 – Curvas de tensão (em amarelo com 50V/div) e corrente (em azul com 5A/div) em 5ms/div do UPQC para $v_{REDE} = 146,4\text{ V}$: (a) Tensão v_{REDE} e corrente i_{REDE} . (b) Tensão v_{MR} e corrente i_{MR} . (c) Tensão v_{1TRAFO} e corrente i_{REDE} . (d) Tensão v_{2TRAFO} e corrente i_{FC} . (e) Tensão v_{FT} e corrente i_{FT} .

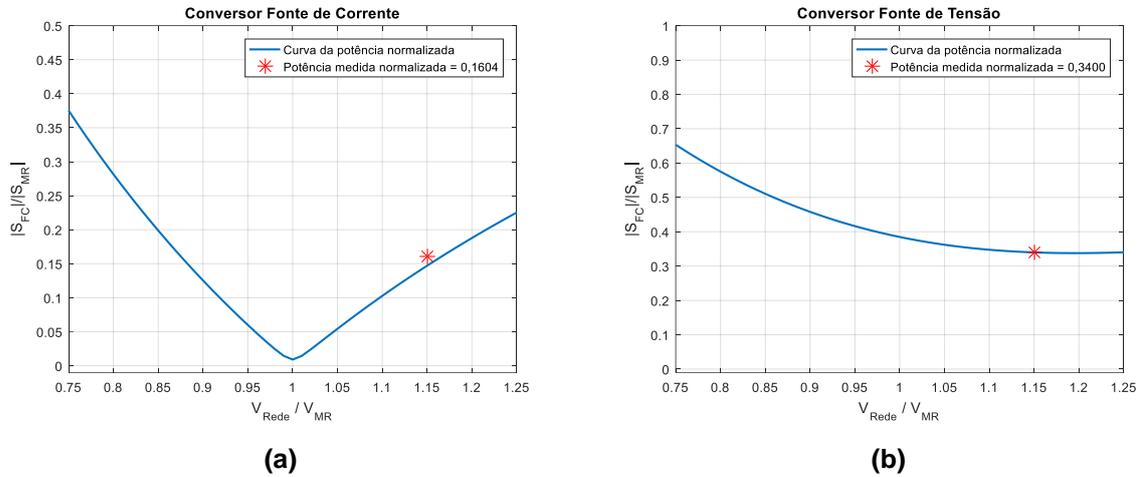


Fonte: o autor.

Quadro 6.19 – Valores medidos do UPQC para carga não linear RL e $v_{REDE}=146,4\text{ V}$.

Variáveis	Rede	CFC + Trafo	CFC	CFT	Carga
Tensão	146,4 V	21,14 V	16,6 V	127,3 V	127,3 V
Corrente	4,418 A	4,414 A	4,627 A	1,554 A	4,571 A
Potência P	644,6 W	82,73 W	66,76 W	- 22,27 W	540,5 W
Potência Q	47,13 VAr	42,96 VAr	37,84 VAr	196,3 VAr	213,7 VAr
Potência S	646,3 VA	93,22 VA	76,73 VA	197,6 VA	581,2 VA
F. de Potência	0,997	0,887	0,869	0,112	0,929
F.Deslocamento	0,997381	0,920573	0,91989	- 0,15195	0,977856
THD tensão	0,8067%	23,39%	28,98%	3,552%	3,569%
THD corrente	1,349%	1,408%	2,483%	---	28,17%
Kbcc	0,195744681				

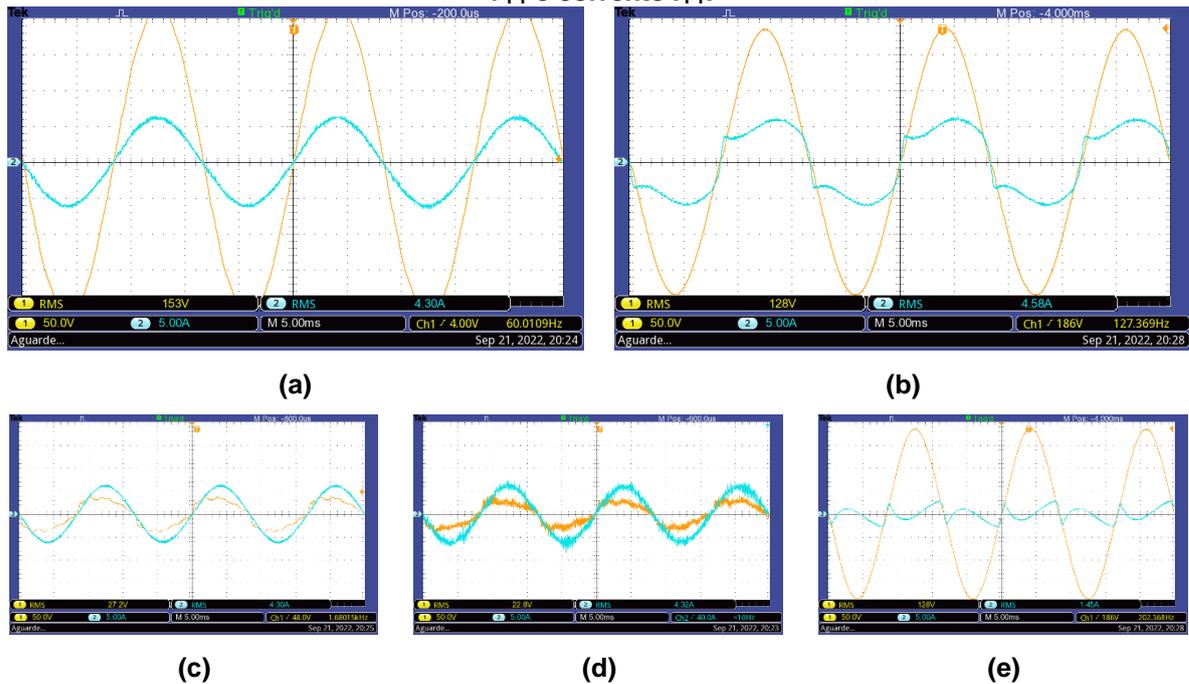
Figura 6-42 – Curvas das potências normalizadas do UPQC para $v_{REDE} = 146,4 \text{ V}$ e carga não linear RL: (a) Conversor fonte de corrente. (b) Conversor fonte de tensão.



Fonte: o autor.

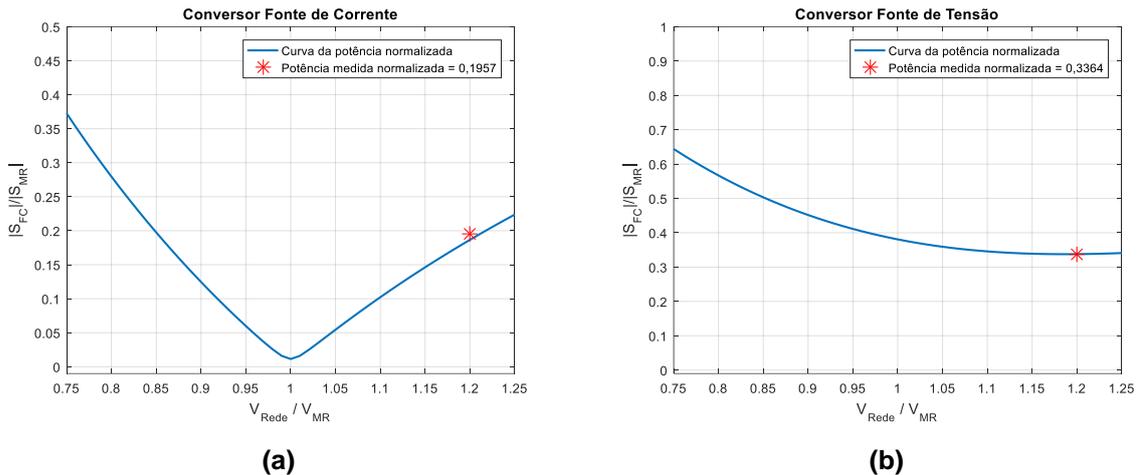
Para tensão da rede elétrica eficaz $V_{REDE} = 152,8 \text{ V}$ temos a Figura 6.43 com a curvas de tensão e corrente da rede elétrica e tensão e corrente da carga, para a carga não linear. No quadro 6.20 é apresentado as variáveis medidas e na Figura 6.44 as curvas com o ponto marcado da potência processada por cada conversor.

Figura 6-43 – Curvas de tensão (em amarelo com 50V/div) e corrente (em azul com 5A/div) em 5ms/div do UPQC para $v_{REDE} = 152,8 \text{ V}$: (a) Tensão v_{REDE} e corrente i_{REDE} . (b) Tensão v_{MR} e corrente i_{MR} . (c) Tensão v_{1TRAFO} e corrente i_{REDE} . (d) Tensão v_{2TRAFO} e corrente i_{FC} . (e) Tensão v_{FT} e corrente i_{FT} .



Quadro 6.20 – Valores medidos do UPQC para carga não linear RL e $v_{REDE}=152,8$ V.

Variáveis	Rede	CFC + Trafo	CFC	CFT	Carga
Tensão	152,8	27,11	22,32	127,3	127,3
Corrente	4,209	4,207	4,449	1,539	4,575
Potência P	640,7	105,8	92,14	7,181	541,5
Potência Q	50,8	42,21	36,78	195,7	213,4
Potência S	642,7	113,9	99,21	195,8	582
F. de Potência	0,996	0,928	0,928	0,036	0,93
F.Deslocamento	0,996884	0,946424	0,958073	0,122909	0,97782
THD tensão	1,018	16,16	18,3	3,328	3,319
THD corrente	1,678	1,639	2,496	---	28,13
Kbcc	0,186888273				

Figura 6-44 – Curvas das potências normalizadas do UPQC para $v_{REDE} = 152,8$ V e carga não linear RL: (a) Conversor fonte de corrente. (b) Conversor fonte de tensão.

Fonte: o autor.

No caso da topologia Delta UPQC, dependendo de alguns parâmetros, o conversor fonte de corrente e o conversor fonte de tensão irão processar mais ou menos potência elétrica. Além disso, a direção do fluxo de potência também se altera na mudança desses parâmetros.

Os parâmetros que influenciam na quantidade de potência processada pelos conversores da UPQC são as variações entre a tensão da rede elétrica e da carga, a distorção harmônica da tensão da rede, distorção harmônica da corrente da carga e o fator kbcc.

O fator kbcc varia de acordo com a variação da tensão da rede elétrica, em que quanto menor a tensão da rede elétrica, maior é o kbcc, chegando a mais de 40%.

Isso se deve as perdas nos elementos da topologia UPQC, em que o transformador tem suas perdas mais significativas para menores tensões de entrada em comparação com tensões de entrada maiores, devido a corrente que circula por ele.

No caso da carga linear, quando a tensão de entrada é de 101,8V, o transformador tem uma perda de potência aparente de 85,4 VA (diferença entre a potência medida no primário do transformador e do secundário do transformador do quadro 6.13). Considerando a mesma carga linear, para a tensão de entrada de 146,3V o transformador tem uma perda de potência aparente de 28,69 VA (diferença entre a potência medida no primário do transformador e do secundário do transformador do quadro 6.15). Essa diferença ocorre devido à corrente que passa pelo conversor fonte de corrente, que acaba sendo maior para tensões menores que a nominal.

A variação de tensão entre a entrada da UPQC e da carga mostra a direção que a potência elétrica dos conversores é processada, como será discutido adiante. A não linearidade da carga afeta pouco o conversor fonte de corrente, mas afeta mais o conversor fonte de tensão, pelo fato dele ser responsável por fornecer a parcela harmônica para a carga, como pode ser visto ao se comparar os ábacos de potência para uma mesma tensão de entrada.

Em alguns pontos de operação, a medição da potência considerando o secundário do transformador fica difícil de ser obtida por conter muito ruído EMC. Para contornar essa dificuldade foram utilizados os dados medidos pelo primário do transformador e a corrente da rede elétrica para avaliar o fluxo de potência no conversor fonte de corrente.

Em todos os casos da topologia Delta UPQC, a potência processada por cada conversor é menor quando comparado com a topologia Back-to-Back, no entanto, para o caso do conversor fonte de corrente do UPQC, a corrente que circula por ele é a mesma que a corrente da rede elétrica, sendo próxima da corrente da topologia B2B.

6.6 Operação sem carga

Com a finalidade de se avaliar as perdas das topologias, foi realizado um ensaio com os sistemas operando sem carga, ligados no mesmo valor de tensão

regulado no PAC da microrrede, ou seja, $V_{REDE} = V_{MR}$. No Quadro 6.21 é apresentado as medições realizadas na alimentação do conversor B2B.

Quadro 6.21 – Valores medidos da rede elétrica para o B2B sem carga.

Variáveis	Rede
Tensão	127,4 V
Corrente	518,6 mA
Potência P	54,55 W
Potência Q	37,17 VAR
Potência S	66,01 VA
F. de Potência	0,826
F.Deslocamento	0,9988
THD tensão	1,528%
THD corrente	28,15%

Fonte: o autor.

Como visto, nas medições do Quadro 6.21 há uma corrente sendo drenada da rede elétrica para alimentar o conversor Back-to-Back sem carga. A corrente drenada da rede elétrica na topologia B2B sem carga é de 518,6 mA. No Quadro 6.22 são mostrados os valores medidos na topologia UPQC sem alimentar carga na saída, além de mostrar a potência em cada etapa do conversor UPQC.

Quadro 6.22 – Valores medidos da rede elétrica para o UPQC sem carga.

Variáveis	Rede	CFC + Trafo	CFC	CFT
Tensão	127,2 V	6,777 V	6,466 V	127,3 V
Corrente	436,0 mA	442,2 mA	427,7 mA	429,8 mA
Potência P	53,19 W	0 W	--- W	- 52,46 W
Potência Q	15,43 VAR	2,991 VAR	--- VAR	15,31 VAR
Potência S	55,39 VA	2,994 VA	--- VA	54,65 VA
F. de Potência	0,960	0,044	---	0,959
F.Deslocamento	0,99996	0,07341	- 0,03455	- 0,99950
THD tensão	1,274%	21,33%	28,99%	1,009%
THD corrente	7,753%	6,19%	19,69%	7,631%

Fonte: o autor.

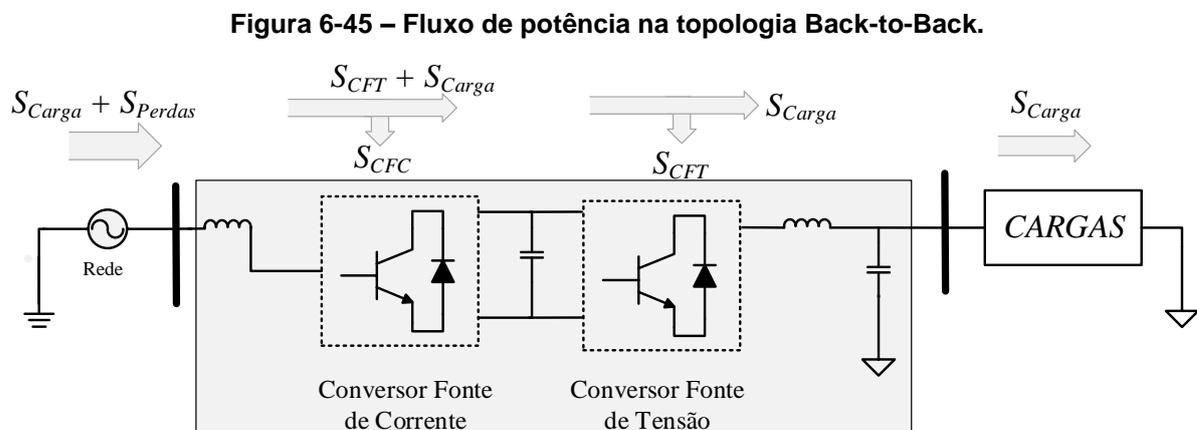
Em comparação com a topologia B2B, a topologia UPQC drena uma corrente menor da rede elétrica, com o valor de 436,0 mA. Como pode ser visto a potência consumida pelos elementos do UPQC é processada pelo conversor fonte de tensão. Além disso, pode ser visto que o conversor fonte de corrente processa uma potência tão pequena que não consegue ser mensurada pelo instrumento e toda a potência consumida pelos elementos passivos são fornecidos pela conversor fonte de tensão, mostrando o sinal negativo no seu valor de potência.

6.7 Fluxo de potência do Back-to-Back e da UPQC

Uma das diferenças entre as topologias Back-to-Back e UPQC é a forma que se comporta o fluxo de potência pelos conversores fonte de corrente e fonte de tensão. Com o intuito de simplificar a análise será utilizado apenas os resultados da carga linear, pois a potência ativa possui um valor próximo da potência aparente.

Para a topologia Back-to-Back, a potência dissipada na carga passa integralmente pelos dois inversores, o conversor fonte de corrente e o conversor fonte de tensão. Como o conversor fonte de corrente está conectado diretamente na rede elétrica, a potência processada por esse conversor é a mesma potência fornecida pela rede elétrica.

O conversor fonte de tensão do B2B está conectado na carga, sendo ele responsável por processar a potência da carga. Na Figura 6.45 é mostrado o fluxo de potência da topologia Back-to-Back.



Fonte: o autor.

Na Figura 6.45 é possível verificar que a rede elétrica fornece a potência aparente S para a carga e para suprir as perdas do conversor fonte de corrente S_{CFC} e para as perdas do conversor fonte de tensão S_{CFT} , além da potência aparente da carga S_{Carga} . Toda a potência drenada pela rede elétrica é processada pelo conversor fonte de corrente e a potência da carga é processada pelo conversor fonte de tensão, independente da relação entre a tensão da rede elétrica e da carga.

De acordo com as medições obtidas nos quadros 6.5 à 6.8, a potência de perdas da topologia sofre variação de acordo com a tensão da rede elétrica, indo de 133,2W até o valor de 158,5W. Essa variação ocorreu uma parte devido à pequena variação da carga, que pode ter uma pequena variação instantânea na sua resistência de carga, e uma outra parte ocorre devido às perdas pelo nível de corrente drenada na rede elétrica nos elementos passivos do protótipo.

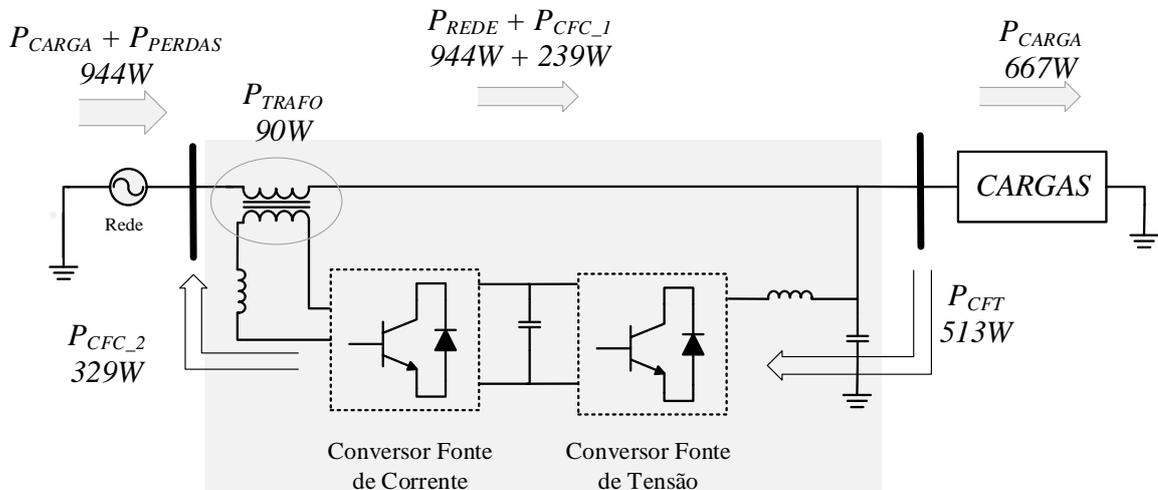
Na topologia B2B para se projetar o conversor fonte de corrente é necessário se levar em consideração o fator $kbcc$, como apresentado nos ábacos de fluxo de potência. Já o conversor fonte de tensão se leva em conta apenas a potência da carga.

Para a topologia UPQC, a análise do fluxo de potência tem que ser considerado três situações:

- Primeira situação ocorre quando a tensão da rede elétrica é menor que a tensão no PAC da Microrrede, $V_{REDE} < V_{MR}$;
- Segunda situação ocorre quando a tensão da rede elétrica é maior que a tensão no PAC da Microrrede em um fator abaixo do termo $kbcc$, ou seja, $V_{REDE} > V_{MR}$ e $V_{REDE}/V_{MR} < (1)+kbcc$;
- Terceira situação ocorre quando a tensão de entrada é maior que a tensão no PAC da Microrrede para um fator maior que o $kbcc$, ou seja, $V_{REDE} > V_{MR}$ e $V_{REDE}/V_{MR} > (1)+kbcc$;

Na Figura 6.46 é mostrado o comportamento da primeira situação, em que a tensão da rede elétrica é menor que a tensão da carga, mostrando as medições de potência para a tensão da rede de 101,8 V, mostradas no quadro 6.13.

Figura 6-46 – Fluxo de potência na topologia Delta UPQC para $v_{REDE} = 101,8 \text{ V}$.



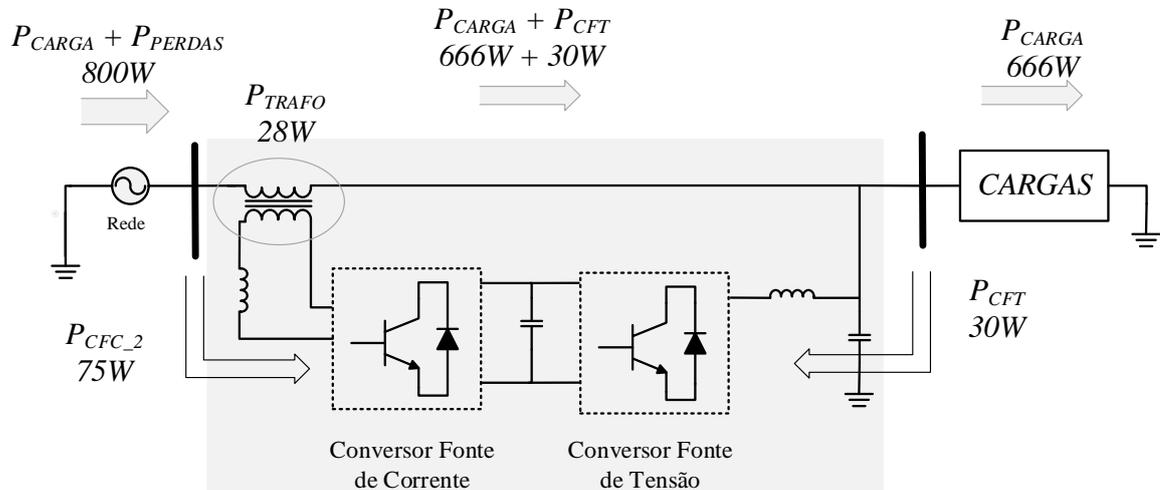
Fonte: o autor.

Para a situação mostrada na Figura 6.46, o sistema consome a potência ativa total de 944 W. Uma parcela dessa potência, $P_{CFC_2} = 329 \text{ W}$, é processada pelo conversor fonte de corrente, que sai do conversor indo na direção do transformador. O transformador dissipa 90 W e o restante, $P_{CFC_1} = 239 \text{ W}$, é somada à potência da rede $P_{REDE} = 944 \text{ W}$, fornecendo a potência da carga $P_{CARGA} = 667 \text{ W}$ e a potência que circula pelo conversor fonte de tensão $P_{CFT} = 513 \text{ W}$.

Como pode ser visto, a potência de perdas da topologia UPQC entra pelo conversor fonte de tensão, sendo consumido nas chaves e nos elementos passivos a potência de 184 W. Como a potência no conversor fonte de tensão é maior que a potência de perdas, o restante sai pelo conversor fonte de corrente.

Na Figura 6.47 é apresentada a segunda situação da UPQC, quando a tensão da rede elétrica é maior que a tensão da carga e com a relação entre as tensões abaixo do valor de k_{bcc} , que nesse caso para a tensão da rede de 146,3 V, conforme as medições obtidas no quadro 6.15.

Figura 6-47 – Fluxo de potência na topologia Delta UPQC para $v_{REDE} = 146,3 \text{ V}$.



Fonte: o autor.

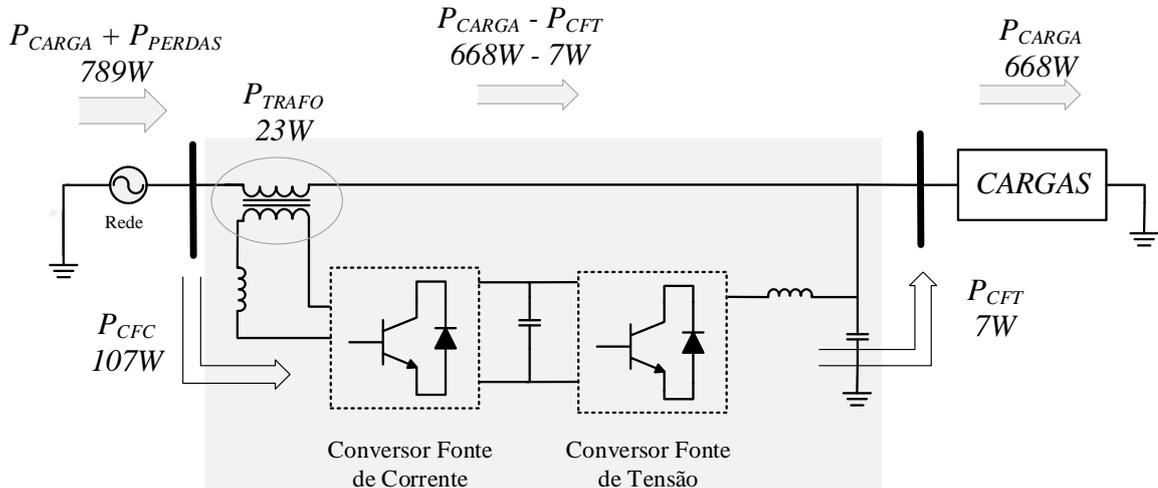
Para a situação em que a tensão da rede elétrica é maior que a tensão da carga, a direção da potência do conversor fonte de corrente se inverte, como mostrado nos ábacos de fluxo de potência e como mostra a Figura 6.47.

Nesse caso, a rede elétrica fornece uma potência $P_{REDE} = 800 \text{ W}$. Uma parte vai para o conversor fonte de corrente, em que no transformador é dissipada a potência de 28 W , entrando 75 W no conversor fonte de corrente para suprir as perdas dos elementos passivos e das chaves. Uma outra parte da potência fornecida pela rede segue para a carga, em que $P_{CARGA} = 666 \text{ W}$ e outra parte entra pelo conversor fonte de tensão, sendo $P_{CFT} = 30 \text{ W}$. Como a potência está entrando nos dois conversores, a potência de perdas é a soma das potências processadas pelos conversores fonte de corrente e fonte de tensão.

Esse comportamento se mantém até a relação entre a tensão de entrada e a tensão na carga ser menor que a soma da relação entre a tensão de entrada nominal e a tensão da carga nominal com o termo k_{bcc} , como foi mostrado nos ábacos de potência para a tensão da rede elétrica de $152,8 \text{ V}$.

Na Figura 6.48 é mostrado o fluxo de potência na UPQC para a tensão da rede elétrica de $152,8 \text{ V}$, como mostrado pelas medições do quadro 6.16.

Figura 6-48 – Fluxo de potência na topologia Delta UPQC para $v_{REDE} = 152,8 \text{ V}$.



Fonte: o autor.

Na situação que o ponto no ábaco do fluxo de potência do conversor fonte de tensão da UPQC muda a inclinação para ascendente, a direção da potência processada pelo conversor fonte de tensão muda. A rede elétrica fornece a potência $P_{REDE} = 789 \text{ W}$, em que o transformador consome uma potência de 23 W e o conversor fonte de corrente processa a potência $P_{CFC} = 107 \text{ W}$, que dessa potência 100 W é consumida como perdas pelos indutores, chaves e capacitor do conversor fonte de tensão, e ao mesmo tempo o conversor fonte de tensão fornece $P_{CFT} = 7 \text{ W}$ para a carga. O restante é fornecido diretamente pela rede, totalizando na carga uma potência $P_{CARGA} = 668 \text{ W}$.

O termo k_{bcc} na topologia UPQC tem o comportamento variável, diminuindo conforme se aumenta a tensão da rede elétrica. Isso mostra que para tensões maiores que a tensão da rede elétrica, a topologia UPQC possui menos perdas nos seus elementos.

Pelas curvas dos ábacos de potência e a compreensão do funcionamento do fluxo de potência nas duas topologias, é possível o dimensionamento eficiente dos conversores, impactando na diferença de custos na implementação de ambas as topologias.

6.8 Dimensionamento dos conversores

No dimensionamento é importante conhecer a potência processada pelos conversores que compõem as topologias, no entanto, é necessário conhecer as correntes que passam pelos elementos, tanto as chaves dos conversores, quanto os indutores e o transformador.

Será discutido sobre o dimensionamento para saber qual topologia teria o maior custo para uma certa aplicação. A topologia Back-to-Back tem a estrutura bem parecida com a topologia UPQC, e através da análise do fluxo de potência é possível verificar as diferenças entre as potências processadas pelos conversores em cada topologia.

Para a comparação entre as topologias foi utilizado os resultados obtidos da operação com carga linear conectada na rede elétrica, apresentado e discutido no capítulo 6.1 desse trabalho, para ambas as topologias Back-to-Back e UPQC.

No quadro 6.23 é apresentado as medições realizadas nos conversores fonte de corrente e fonte de tensão nas topologias Back-to-Back e Delta UPQC, ambas na operação conectada na rede elétrica alimentando uma carga linear.

Quadro 6.23 – Variáveis medidas dos conversores fonte de corrente e fonte de tensão das duas topologias para carga linear, conectados na rede elétrica.

Variáveis	Back-to-Back			Delta UPQC		
	CFC	CFT	Carga	CFC + Trafo	CFT	Carga
Tensão RMS	125,8 V	127,3 V	127,3 V	8,829 V	127,3 V	127,2 V
Corrente RMS	9,449A	7,941 A	7,941 A	10,39 A	2,678 A	7,813 A
Potência P	1185 W	1009 W	1009 W	- 34,62 W	- 339,3 W	993 W
Potência Q	75,71VAr	45,1 VAr	45,1 VAr	84,89 VAr	28,48 VAr	0
Potência S	1187 VA	1010 VA	1010 VA	91,68 VA	340,5 VA	993 VA

Fonte: o autor.

Como na implementação prática deve ser levado em consideração os valores de corrente e tensão suportados pelos elementos. Para o correto dimensionamento deve ser analisado a potência e os limites de corrente e tensão que os elementos suportam. A classe de isolamento de tensão atende com folga as aplicações desse trabalho, uma vez que se opera com baixas tensões.

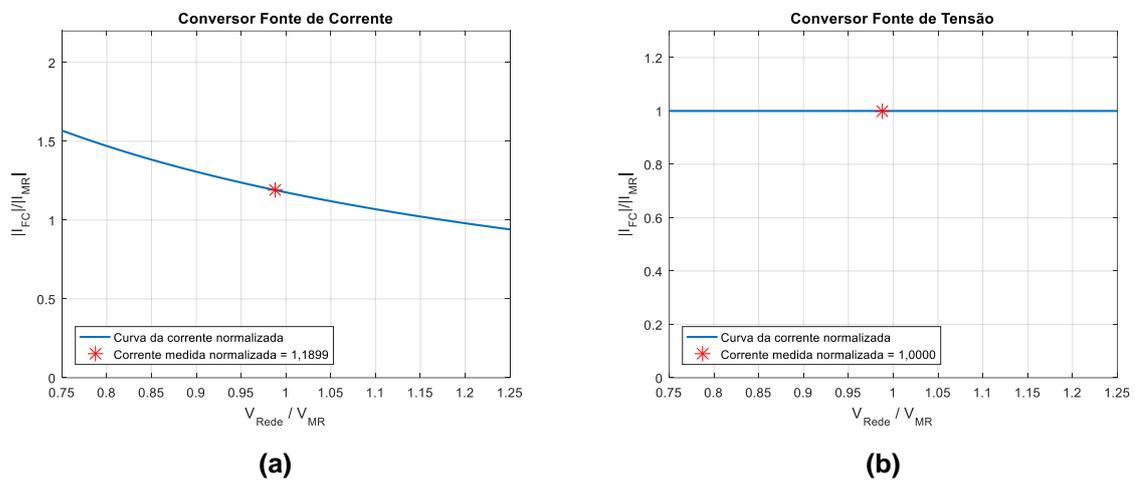
Com o conhecimento sobre os ábacos de potência, é possível construir ábacos de corrente, para conseguir se projetar as chaves dos conversores, os indutores dos filtros e o transformador para o caso do UPQC.

Para o Back-to-Back, que a potência e a corrente da rede elétrica é a mesma que a potência e corrente que circula no conversor fonte de corrente, ao utilizar o equacionamento do conversor fonte de corrente e dividindo a relação de potências para a relação de tensão da rede elétrica e na microrrede, é possível obter a relação da corrente do conversor fonte de corrente pela corrente da microrrede, ou seja, I_{FC}/I_{MR} .

No caso do conversor fonte de tensão, como a tensão na microrrede é constante, a corrente do conversor fonte de tensão pela tensão da microrrede será uma constante unitária.

Na figura 6.49 é mostrado os ábacos de corrente para os dois conversores, fonte de corrente e fonte de tensão, para a topologia B2B, com a sinalização do ponto de operação apresentado no quadro 6.23.

Figura 6-49 – Curvas dos ábacos de corrente do Back-to-Back: (a) do conversor fonte de corrente. (b) do conversor fonte de tensão.



Fonte: o autor.

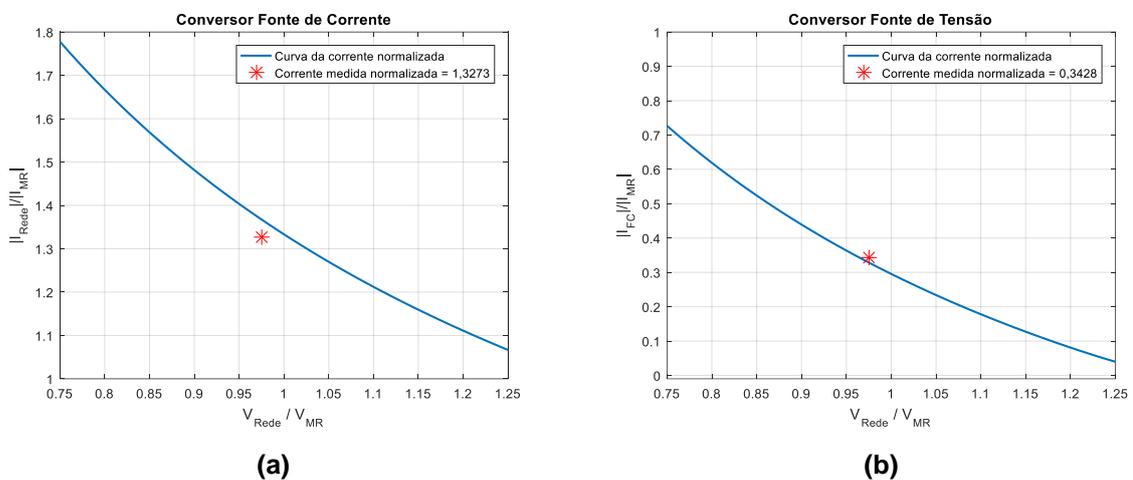
Normalizando a corrente que circula pelos conversores fonte de corrente e fonte de tensão na Figura 6.49, é possível verificar que na tensão nominal da rede elétrica, a corrente a ser projetada para o conversor fonte de corrente é de 1,1899 vezes a corrente da carga e para o conversor fonte de tensão, a corrente é a mesma corrente da carga.

No caso da topologia UPQC, a corrente que circula pelo conversor fonte de corrente é a mesma corrente da rede elétrica. Como está se adotando a referência da corrente do conversor em função da corrente da carga, para esse caso será utilizado como parâmetro de relação entre as duas correntes o rendimento médio do UPQC, de maneira a conseguir a relação de corrente do conversor pela corrente da carga. Como avaliado de forma experimental, a topologia Delta UPQC possui um rendimento entre 77,22% e 83,76%, e para o dimensionamento será adotado um rendimento de 75%.

Já para o conversor fonte de tensão é possível utilizar o equacionamento de fluxo de potência, pois a tensão é controlada e fixa nos terminais do conversor e para se obter a relação entre a corrente do conversor e da corrente da microrrede, basta dividir a relação de potência pela relação de tensão.

Na figura 6.50 é apresentado os ábacos de corrente para os dois conversores, fonte de corrente e fonte de tensão, para a topologia Delta UPQC, com a sinalização do ponto de operação apresentado no quadro 6.23.

Figura 6-50 – Curvas dos ábacos de corrente do Delta UPQC: (a) do conversor fonte de corrente. (b) do conversor fonte de tensão.



Fonte: o autor.

Pelos ábacos da Figura 6.50, a corrente que circula no conversor fonte de corrente do UPQC é a mesma que a corrente da rede elétrica, e para estimar a corrente de entrada em relação à corrente de saída do UPQC se utilizou a eficiência de 75%. Para esse caso, a corrente da rede elétrica é 1,3273 vezes a corrente de carga.

No caso da corrente do conversor fonte de tensão, na tensão nominal de entrada, a corrente do conversor fonte de tensão é 0,3428 vezes a corrente de carga.

Os ábacos de corrente permitem dimensionar para uma faixa de variação de tensão de entrada pela tensão de saída, mas para a simplificação será adotado os valores na tensão nominal de operação. Além disso, quando é realizado um projeto de algum equipamento, é necessário utilizar fatores de segurança, de forma a resistir à situações inesperadas que podem acontecer, no entanto, para a apresentação das diferenças entre as topologias de CEBI, será adotado os valores nominais dos elementos.

No quadro 6.24 é apresentado os valores de corrente que serão adotados para o dimensionamento das duas topologias.

Quadro 6.24 – Relação entre as correntes dos conversores com a corrente da microrrede.

Relação entre correntes	B2B	UPQC
I_{FC}/I_{MR}	1,1899	1,3273
I_{FT}/I_{MR}	1,0000	0,3428

Fonte: o autor.

Devido à semelhança entre as duas topologias, há poucos elementos que se diferenciam de uma ou outra topologia. Para uma avaliação de custos entre as topologias, pode ser avaliado o custo dos elementos que são e podem ser diferentes entre as duas topologias.

Os elementos que podem ter características diferentes entre as topologias são os indutores, em relação à corrente que suportam, as chaves dos inversores e o transformador de relação unitária do Delta UPQC. Os indutores possuem uma variação de preço pequena em relação à capacidade de corrente, portanto eles serão desconsiderados nesse estudo.

Basicamente, a comparação de custos vai ocorrer entre o preço das chaves dos inversores e o preço do transformador do Delta UPQC. Considerando a tensão eficaz da rede elétrica de 127,3V, a tensão eficaz da microrrede, na carga, de 127,3V e os fatores de corrente apresentados no quadro 6.24.

No quadro 6.25 é apresentado alguns exemplos de potência de carga, as devidas correntes que cada conversor processa e o valor dos elementos que compõem a topologia Back-to-Back.

Quadro 6.25 – Preço das chaves utilizadas no Back-to-Back em função da potência da carga.

Potência da carga	1000 VA	2350 VA	6200 VA	9250 VA	12700 VA	14300 VA
Corrente do CFC	9,35 A	21,97 A	57,95 A	86,46 A	118,71 A	133,67 A
Preço do IGBT	0,04969 pu	0,04969 pu	0,09029 pu	0,12051 pu	0,14127 pu	0,14127 pu
Corrente do CFT	7,86 A	18,46 A	48,70 A	72,66 A	99,76 A	112,33 A
Preço do IGBT	0,04969 pu	0,04969 pu	0,09029 pu	0,12051 pu	0,12051 pu	0,14127 pu
Valor total	0,09939 pu	0,09939 pu	0,18059 pu	0,24102 pu	0,26178 pu	0,28253 pu

Fonte: o autor.

No quadro 6.26 é apresentado o custo dos elementos diferentes entre as topologias para diversos valores de potência de carga para a topologias Delta UPQC.

Quadro 6.26 – Preço das chaves utilizadas no Delta UPQC em função da potência da carga.

Potência da carga	1000 VA	2350 VA	6200 VA	9250 VA	12700 VA	14300 VA
Corrente do CFC	10,43 A	24,50 A	64,64 A	96,45 A	132,42 A	149,10 A
Preço do IGBT	0,04969 pu	0,04969 pu	0,09029 pu	0,12051 pu	0,14127 pu	0,14127 pu
Corrente do CFT	2,69 A	6,33 A	16,70 A	24,91 A	34,20 A	38,51 A
Preço do IGBT	0,04969 pu	0,04969 pu	0,04969 pu	0,04969 pu	0,05677 pu	0,09029 pu
Corrente no trafo	10,43 A	24,50 A	64,64 A	96,45 A	132,42 A	149,10 A

Preço do trafo	0,17112 pu	0,21176 pu	0,42246 pu	1,00000 pu	1,00000 pu	1,00000 pu
Valor total	0,27051 pu	0,31115 pu	0,56245 pu	1,17020 pu	1,19804 pu	1,23156 pu

Fonte: o autor.

A potência que o transformador precisa suportar é a potência processada pelo conversor fonte de corrente da topologia Delta UPQC, no entanto, os seus enrolamentos devem suportar a corrente da rede elétrica. O preço do transformador foi estimado baseado em cotações realizadas em algumas empresas.

Comparando o valor final, do B2B no quadro 6.25 com o UPQC no quadro 6.26, é possível verificar que a topologia Back-to-Back tem um preço menor nos elementos variáveis. Na topologia UPQC, a diferença do custo está no transformador, em que a diferença dos custos das chaves IGBT entre as duas topologias deve compensar o valor do transformador.

Como foi abordado no estudo do fluxo de potência e nos resultados obtidos, o transformador do UPQC processa a potência do conversor fonte de corrente, e como visto nos ábacos, essa potência é baixa devido à queda de tensão baixa nos terminais do transformador. No caso estudado, como a relação é unitária, os enrolamentos do transformador precisam suportar a corrente da rede elétrica, mas caso a relação entre o primário e o secundário fosse diferente do unitário, o enrolamento do secundário poderia ser projetado para processar uma corrente menor e melhor utilizaria as chaves do conversor fonte de corrente.

O estudo foi realizado com o transformador disponível em laboratório, não sendo projetado especificamente para a topologia UPQC.

6.9 Comparativo entre Back-to-Back e Delta UPQC

As topologias Back-to-Back e Delta UPQC tem estruturas semelhantes, mas há algumas diferenças no seu funcionamento. Com isso, no quadro 6.27 será apresentado algumas diferenças observadas no desenvolvimento desse trabalho.

Quadro 6.27 – Diferenças gerais entre as topologias Back-to-Back e Delta UPQC.

	Topologia Back-to-Back	Topologia Delta UPQC
Quantidade de elementos	Dois inversores em ponte completa, filtro LC e L.	Dois inversores, filtro LC e L, um transformador.
Eficiência	Entre 85% e 92%.	Abaixo de 85%.
Rejeição à distúrbios	Barramento CC oscila menos que o UPQC.	Barramento oscila mais que o B2B.
Processamento de potência pelos conversores	Conversores processam a potência da carga e potência de perdas.	Conversores processam uma parcela da potência da carga.
Varição do kbcc em relação à variação da tensão da rede e da carga	Menor variação do kbcc	Maior variação do kbcc
Corrige THD de tensão e corrente	Atende os índices de qualidade de energia	Atende os índices de qualidade de energia
Diferenças na malha de controle.	Na malha de controle do conversor fonte de tensão tem a corrente do PAC da microrrede como distúrbio.	Na malha de controle do conversor fonte de tensão tem a corrente do PAC da microrrede e da corrente da rede elétrica como distúrbio.
Custo da topologia	Menor custo para as potências avaliadas.	Maior custo para as potências avaliadas, tendo a possibilidade de mudar o transformador para diminuir o custo.

Fonte: o autor.

No Quadro 6.27 foi apresentado alguns itens comparativos entre as duas topologias.

6.10 Considerações finais do capítulo

Nesse capítulo foi apresentado os resultados experimentais obtidos do protótipo implementado. Foi avaliado o comportamento do conversor eletrônico bidirecional de interligação nas duas topologias avaliadas, sendo a Back-to-Back e a Delta UPQC, apenas na operação de drenar corrente da rede elétrica.

No primeiro experimento foi avaliado uma carga resistiva e foi verificado o funcionamento das duas topologias e o comportamento de ambas as topologias conectadas na rede elétrica. Nesse ensaio foi verificado que ambas as topologias atendem os índices de qualidade de energia, e a diferença predominou na eficiência maior que o B2B tem em relação à UPQC.

No segundo e terceiro experimento se utilizou cargas não lineares com alta THD, de forma que ambas as topologias conseguiram corrigir as distorções harmônicas, impedindo que se propagassem para a rede elétrica e mantendo o fornecimento de uma tensão livre de harmônicos para a carga, além da maior eficiência da topologia B2B.

No quarto experimento foi verificado a rejeição das topologias à distúrbios na carga e como o barramento CC se comporta com essas variações, e ambas as topologias se mostraram robustas suficientes para não perder a sintonia na regulação do protótipo.

No quinto experimento foi avaliado o fluxo de potência ao variar a tensão da rede elétrica, obtendo os resultados das potências processadas pelos conversores que compõem as topologias e validando os resultados obtidos por equacionamento do fluxo de potência.

No sexto experimento foi ligado as duas topologias sem carga para avaliar as perdas da operação em vazio quando a tensão da rede elétrica é igual à tensão da microrrede.

Com esses resultados e discussões foi apresentado as condições para o dimensionamento dos conversores, e um comparativo de custo entre as topologias. Por fim, foi apresentado um quadro que traz as diferenças e semelhanças entre as duas topologias avaliadas.

7. CONCLUSÃO E DISCUSSÃO

Esse trabalho consiste em se comparar duas topologias de conversor bidirecional, o Back-to-Back e o Delta UPQC, utilizado para conectar a rede elétrica convencional com uma microrrede CA. Para justificar a escolha e realizar essa comparação sob diversos aspectos, foi discutido sobre as tecnologias utilizadas para realizar essa interligação, mostrando alguns trabalhos na literatura que utilizam uma ou outra topologia e os problemas de qualidade de energia que podem estar presentes em um sistema com microrrede.

Foi apresentado no trabalho a forma de controle dos inversores, e a capacidade da mesma malha de controle ser utilizada para controlar as duas topologias, mostrando as semelhanças e a diferença no distúrbio que ocorre na topologia Delta UPQC.

Para demonstrar as características no processamento de energia pelos conversores fonte de corrente e fonte de tensão de cada topologia, foi realizado um estudo e uma modelagem do fluxo de potência processada por cada conversor que compõem cada topologia, que além de entender como a direção da energia se comporta dentro do CEBI, ajuda na escolha e dimensionamento dos elementos, subsidiando a escolha do melhor custo-benefício.

Em simulação foi implementado as duas topologias e foi verificado o seu funcionamento para uma carga não linear, de forma a verificar o comportamento na correção dos índices de qualidade de energia. Foi implementado, também em simulação, um emulador de fonte de geração distribuída, de maneira a produzir energia elétrica no ponto de acoplamento da microrrede, para suprir uma carga e o excedente ser injetado na rede elétrica, mostrando que a topologia B2B e UPQC podem atuar como conversor bidirecional de energia.

Implementou-se na prática um protótipo com as duas topologias no mesmo sistema. Para a utilização de uma ou outra topologia era realizada a conexão e desconexão de algumas ligações, o que facilitou na questão de espaço e de comparação com os mesmos elementos. Utilizou-se um sistema embarcado para o controle das chaves dos conversores fonte de corrente e fonte de tensão, além da leitura e aquisição de dados de corrente e tensão para as malhas de controle. No controle do conversor fonte de tensão havia a necessidade de considerar (no caso do

UPQC) e desconsiderar (no caso do B2B) a corrente do conversor fonte de corrente na malha de controle.

O controle foi implementado no eixo dq com controladores PI e P. O barramento CC entre os conversores era carregado pela energia da rede elétrica, em que foi montado um circuito de pré-carga para os capacitores do barramento CC.

Na coleta de resultados foi adotado uma metodologia que consistia em se aguardar um tempo de dez minutos para começar a coleta de resultados, para que os elementos estivessem em regime permanente de operação e os resultados obtidos representassem o regime permanente de ambas as topologias.

Foram realizados ensaios com as topologias fornecendo energia para cargas lineares e não lineares, quando conectados na rede elétrica. Foi avaliado o comportamento do barramento CC de ambas as topologias na presença de distúrbios na carga. Em todos os casos, as duas topologias atenderam o esperado, controlando uma tensão senoidal no ponto de acoplamento da microrrede e drenando uma corrente senoidal da rede elétrica. A diferença nas taxas de distorção harmônicas entre as topologias foram mínimas, estando dentro do estabelecido em normas.

Foi averiguado que sob carga a topologia UPQC possui uma eficiência menor, e isso ocorre pelo transformador que ela possui. Quando se conectou as duas topologias em vazio verificou-se que o consumo da topologia UPQC é menor.

Com o auxílio de um variador de tensão foram realizados testes com a mudança da tensão da rede elétrica, de forma a verificar o comportamento do fluxo de potência entre os conversores. No caso do B2B, a potência processada por cada conversor não depende da variação de tensão, já no caso do UPQC, a variação de tensão de entrada cria três formas que o fluxo de potência se comporta. Para avaliar como a potência passa pelos elementos foi realizado a variação de tensão em quatro pontos. No caso do transformador do UPQC, como é uma tarefa difícil de averiguar as suas perdas, foi realizado medições nos dois lados do transformador, para entender como ocorre a direção do fluxo de potência, apresentado no trabalho.

Com o estudo do fluxo de potência, o estudo foi expandido para uma análise dos custos na implementação prática de cada topologia. Foi avaliado os elementos que eram diferentes entre as topologias e o custo de cada um, baseado no protótipo. Chegou-se à conclusão, de que apesar da potência processada pelos conversores fonte de corrente e fonte de tensão do UPQC processarem menos energia, quando comparados com o B2B, no dimensionamento das duas topologias

era necessário em se considerar a corrente que passa pelos elementos do UPQC, em que foi constatado que o transformador utilizado na topologia UPQC não era adequado pois não foi projetado para essa aplicação, estando fora de um ponto ótimo de operação.

Foi verificado que a diferença de potência processada pelo conversor fonte de corrente seria melhor aproveitada se o transformador do UPQC fosse projetado de forma adequada e específico para o funcionamento do UPQC. Além disso, poderia se utilizar um projeto ótimo para os indutores utilizados, pois no caso do UPQC foram utilizados indutores que suportam uma corrente muito maior que realmente passava por eles, o que poderia diminuir as perdas por estarem operando em um ponto ótimo de operação.

7.1 Proposta de continuidade

Como continuação desse trabalho poderia ser verificado a questão do projeto ideal para o transformador da topologia UPQC, sendo específico para a aplicação de tensão e corrente processada. Além disso, poderia ser verificado se a mudança de relação entre primário e secundário impactaria no funcionamento e nos custos, pois as chaves IGBT suportam uma tensão muito maior que a tensão processada pelo conversor fonte de corrente.

Uma outra proposta de continuidade é a implementação de uma fonte de energia de geração distribuída, controlada por um inversor de corrente, e a implementação de um sistema de armazenamento de energia, para continuar com os estudos do comportamento de ambas as topologias operando com a rede elétrica desconectada.

APÊNDICE A – Modelagem dos conversores

Nas topologias Back-to-Back e Delta UPQC se encontra dois inversores monofásicos *full-bridge*, sendo o primeiro que atua como fonte de corrente, controlado em corrente, e o segundo que atua como fonte de tensão, controlado em tensão. Além disso, há um barramento CC entre esses inversores, que estabiliza o nível de tensão na entrada dos inversores e regula o correto funcionamento de ambos os inversores.

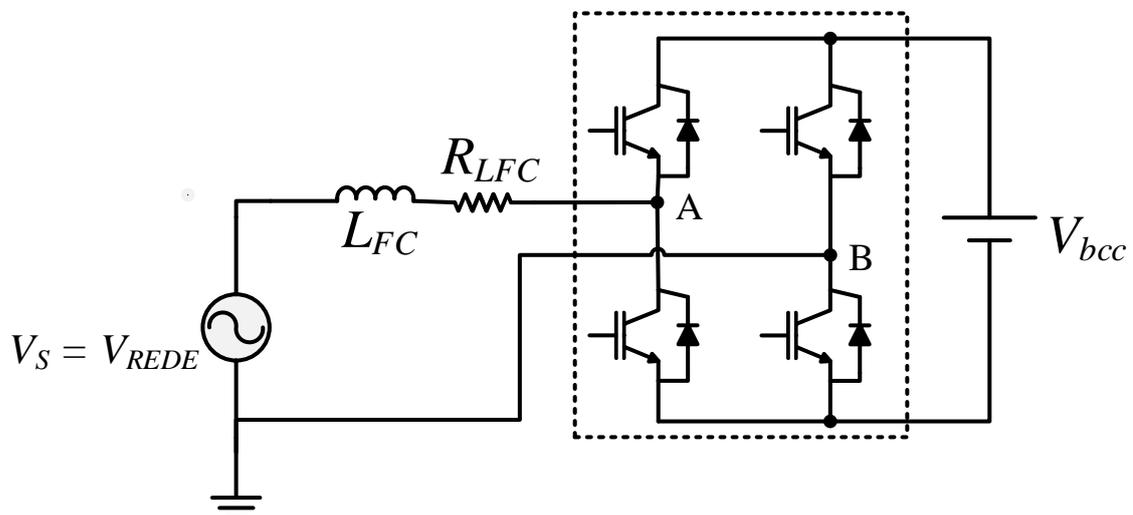
No PAC da microrrede há um inversor monofásico *full-bridge* controlado em corrente, que extrai a energia de uma fonte de geração distribuída e insere no sistema da microrrede.

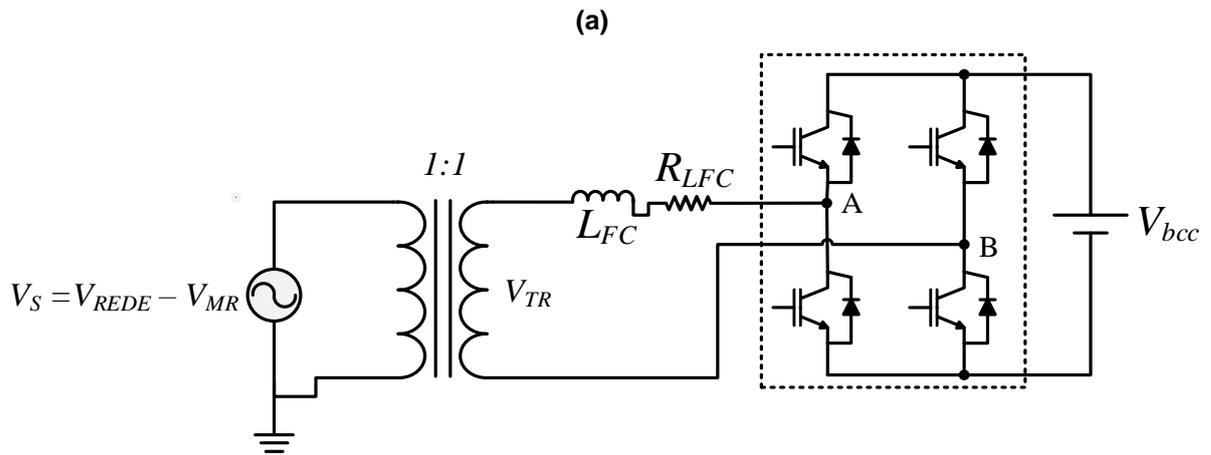
Para projetar os controladores adequados para esses sistemas foi obtido o seu modelo matemático, para então ser projetado os ganhos dos controladores Proporcional e Proporcional-Integrativo.

9.1 Modelagem do conversor fonte de corrente

O conversor fonte de corrente é composto pelo barramento CC na sua alimentação, que tem o comportamento de uma fonte de tensão contínua, e um filtro indutivo L_{FC} na sua saída. Devido a presença do transformador na topologia Delta UPQC, o circuito equivalente do Delta UPQC difere um pouco do circuito equivalente da topologia B2B, como é possível verificar na Figura A.1.

Figura A.1 – Circuito do Conversor Fonte de Corrente: (a) Na topologia Back-to-Back. (b) Na topologia Delta UPQC.





Fonte: o autor.

Considerando um transformador ideal na topologia Delta UPQC, e de relação de transformação de 1:1, a tensão nos terminais do transformador V_{TR} em relação à tensão da rede elétrica pode ser dado pela equação (A.1).

$$\frac{V_S}{V_{TRAFO}} = \frac{N_1}{N_2} = \frac{1}{1} \quad (A.1)$$

$$V_{TRAFO} = \frac{N_2}{N_1} \cdot V_S = \frac{1}{1} \cdot V_S = V_S$$

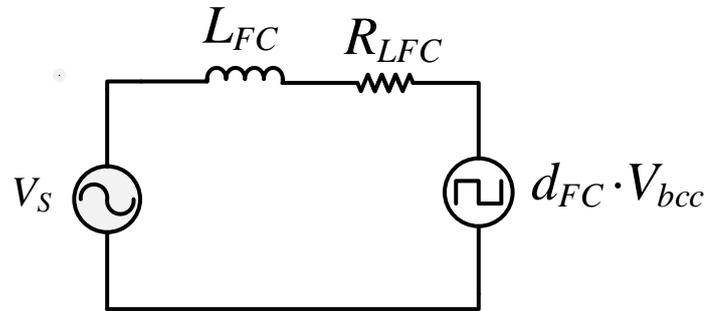
Portanto, a tensão no transformador V_{TR} idealmente é a diferença da tensão da rede elétrica pela tensão do conversor fonte de tensão, que vamos denominar de V_S . No caso do Back-to-Back, pode ser visto que a tensão de entrada é a própria tensão da rede elétrica, que chamaremos de V_S . Além disso, como o indutor possui perdas devido ao enrolamento do fio e dispersão no núcleo, essas perdas são modeladas por uma resistência R_{LFC} , como mostrado na Figura A.1.

A tensão entre os terminais A e B varia de acordo com a razão cíclica do conversor fonte de corrente d_{FC} , e o valor médio entre os pontos A e B é dado pela equação (A.2).

$$\langle v_{AB}(t) \rangle = d_{FC}(t) \cdot V_{bcc} \quad (A.2)$$

O circuito equivalente do conversor fonte de corrente é dado pela Figura A.2.

Figura A.2 –Circuito equivalente do conversor fonte de corrente.



Fonte: O autor.

Realizando a análise da malha de tensão do circuito da Figura A.2, temos a equação (A.3).

$$d_{FC} \cdot v_{bcc} - V_{Lfc} - V_{RLfc} - V_S = 0$$

$$d_{FC} \cdot v_{bcc} - \frac{di_{FC}}{dt} \cdot L_{FC} - i_{FC} \cdot R_{LFC} - V_S = 0 \quad (\text{A.3})$$

Como a frequência de chaveamento é muito maior que a frequência da rede elétrica e da diferença entre a tensão da rede elétrica com o conversor fonte de tensão, a tensão V_S pode ser considerada constante em um período de comutação das chaves do inversor, ela pode ser expressada como uma constante, como mostra a equação (A.4).

$$\langle V_S(t) \rangle = V_S \quad (\text{A.4})$$

Utilizando o modelo de pequenos sinais e aplicando as perturbações nas variáveis da equação (A.3), obtemos a equação (A.5) abaixo.

$$D_{FC} \cdot V_{bcc} + \hat{d}_{FC} \cdot V_{bcc} = L_{FC} \cdot \frac{dI_{FC}}{dt} + L_{FC} \cdot \frac{\hat{d}i_{FC}}{dt} + R_{LFC} \cdot I_{FC} + R_{LFC} \cdot \hat{i}_{FC} + V_S \quad (\text{A.5})$$

Para se analisar o comportamento transitório é necessário desprezar os termos de regime permanente da equação (A.5), obtendo a equação (A.6).

$$\hat{d}_{FC}(t) \cdot V_{bcc} = L_{FC} \cdot \frac{d\hat{i}_{FC}(t)}{dt} + R_{LFC} \cdot \hat{i}_{FC}(t) \quad (\text{A.6})$$

Aplicando a transformada de Laplace na equação (A.6), temos a equação (A.7).

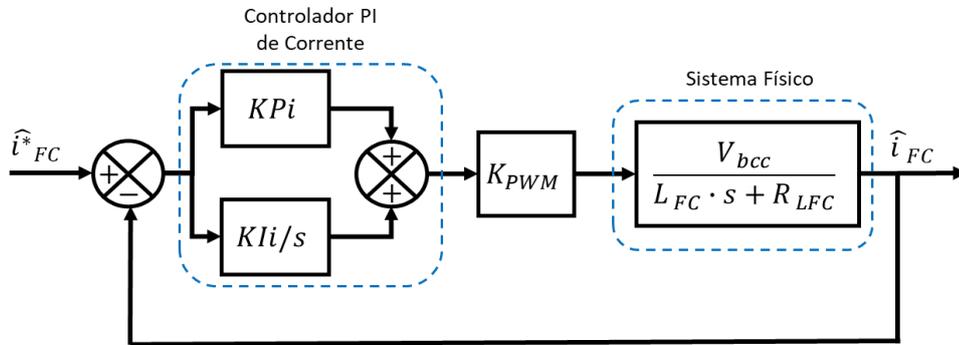
$$\hat{d}_{FC}(s) \cdot V_{bcc} = L_{FC} \cdot \hat{i}_{FC}(s) \cdot s + R_{LFC} \cdot \hat{i}_{FC}(s) \quad (\text{A.7})$$

Rearranjando, obtemos a função de transferência da malha de corrente do conversor CC/CA fonte de corrente, como mostrado na equação (A.8).

$$G_{id_{FC}}(s) = \frac{\hat{i}_{FC}(s)}{\hat{d}_{FC}(s)} = \frac{V_{bcc}}{L_{FC} \cdot s + R_{LFC}} \quad (\text{A.8})$$

O diagrama de blocos do controlador de corrente do conversor fonte de corrente é dado pela Figura A.3.

Figura A.3 – Diagrama de blocos da malha de corrente do conversor fonte de corrente.



Fonte: O autor.

Através dos pulsos PWM nas chaves de potência, o conversor controla o fluxo de corrente que é drenado ou injetado na rede elétrica. A referência de corrente ainda é transformada em variáveis contínuas, através da Transformada de Clarke e Park, como foi visto no capítulo 3.

A referência de corrente é obtida do comportamento do barramento CC e da corrente SRF. A corrente SRF serve para informar ao conversor fonte de corrente a variação de carga no PAC da microrrede, aliviando alterações bruscas no

barramento CC. Para manter o barramento CC controlado é necessário projetar um controlador para o mesmo, de forma a manter a sua tensão o mais constante possível.

9.2 Modelagem do barramento CC

O inversor fonte de corrente faz o controle do barramento CC, com o intuito de manter a tensão no barramento CC o mais estável possível. Devido à dinâmica do sistema não é possível manter uma tensão constante, pois essa malha de tensão necessita ser mais lenta que a malha de corrente processada pelo conversor fonte de corrente e essa lentidão provoca afundamentos e elevações transitórias no barramento CC.

Como é o inversor fonte de corrente que faz esse controle, é necessário analisar o fluxo de potência que passa pelo inversor. Considerando que não há perdas no inversor, a potência instantânea da rede elétrica CA é igual a potência instantânea de saída do barramento CC, como mostra a equação (A.9).

$$P_{CC} = P_{CA} \quad (\text{A.9})$$

Em termos de tensão e corrente, podemos reescrever como mostrado na equação (A.10).

$$v_{CC} \cdot i_{CC} = v_{REDE} \cdot i_{REDE} \quad (\text{A.10})$$

Considerando que a tensão e a corrente de entrada são senoidais e equilibradas, em um período de onda, a potência instantânea é dada pelo valor eficaz da tensão e da corrente, temos a equação (A.11).

$$v_{CC} \cdot i_{CC} = \frac{v_{REDE_pico}}{\sqrt{2}} \cdot \frac{i_{REDE_pico}}{\sqrt{2}} = \frac{v_{REDE_pico} \cdot i_{REDE_pico}}{2} \quad (\text{A.11})$$

A corrente e a tensão CC correspondem à corrente e à tensão sobre o capacitor, respectivamente. A equação (A.12) mostra em termos das variáveis sobre o capacitor.

$$v_{bcc} \cdot C_{DC} \cdot \frac{d}{dt} v_{bcc} = \frac{v_{REDE_pico} \cdot \hat{i}_{REDE_pico}}{2} \quad (A.12)$$

Utilizando o modelo de pequenos sinais e aplicando perturbações nas variáveis da equação (A.12), temos a equação (A.13).

$$\langle V_{bcc} + \hat{v}_{bcc} \rangle \cdot \frac{d}{dt} \langle V_{bcc} + \hat{v}_{bcc} \rangle = \frac{\langle V_{REDE_pico} + \hat{v}_{REDE_pico} \rangle \cdot \langle I_{REDE_pico} + \hat{i}_{REDE_pico} \rangle}{2 \cdot C_{DC}} \quad (A.13)$$

Fazendo a distributiva no lado direito da equação (A.13) e considerando que do lado direito, pode ser ignorado as perturbações sobre a tensão de pico, temos a equação (A.14).

$$V_{bcc} \cdot \frac{d V_{bcc}}{dt} + V_{bcc} \cdot \frac{d \hat{v}_{bcc}}{dt} + \hat{v}_{bcc} \cdot \frac{d V_{bcc}}{dt} + \hat{v}_{bcc} \cdot \frac{d \hat{v}_{bcc}}{dt} = \frac{V_{pico} \cdot I_{pico} + V_{pico} \cdot \hat{i}_{pico}}{2 \cdot C_{DC}} \quad (A.14)$$

Desconsiderando a parte contínua e as variáveis de segunda ordem, e sabendo que a derivada de uma constante é nula, temos a equação (A.15).

$$V_{bcc} \cdot \frac{d \hat{v}_{bcc}}{dt} = \frac{V_{REDE_pico} \cdot \hat{i}_{REDE_pico}}{2 \cdot C_{DC}} \quad (A.15)$$

Aplicando a transformada de Laplace na equação (A.15), temos a equação (A.16).

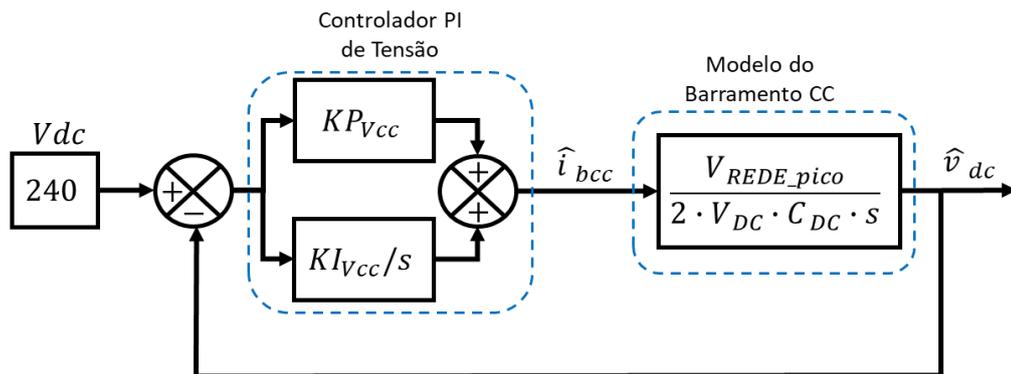
$$V_{bcc} \cdot s \cdot \hat{v}_{bcc} = \frac{V_{REDE_pico} \cdot \hat{i}_{REDE_pico}}{2 \cdot C_{DC}} \quad (A.16)$$

Rearranjando de forma a obter a relação da variação da tensão do barramento CC pela variação da corrente da entrada do inversor, temos a equação (A.17).

$$G_{vi_{FC}}(s) = \frac{\hat{v}_{bcc}(s)}{\hat{i}_{FCpico}(s)} = \frac{V_{REDE_pico}}{2 \cdot V_{DC} \cdot C_{DC} \cdot s} \quad (A.17)$$

Com a função de transferência do barramento CC é possível realizar o projeto de compensadores para regular a tensão do barramento CC de acordo com a variação na corrente drenada ou injetada na rede elétrica (dependendo do modo de operação). O diagrama de blocos do controlador do barramento CC é apresentado na Figura A.4.

Figura A.4 – Diagrama de blocos da malha de controle do barramento CC.



Fonte: O autor.

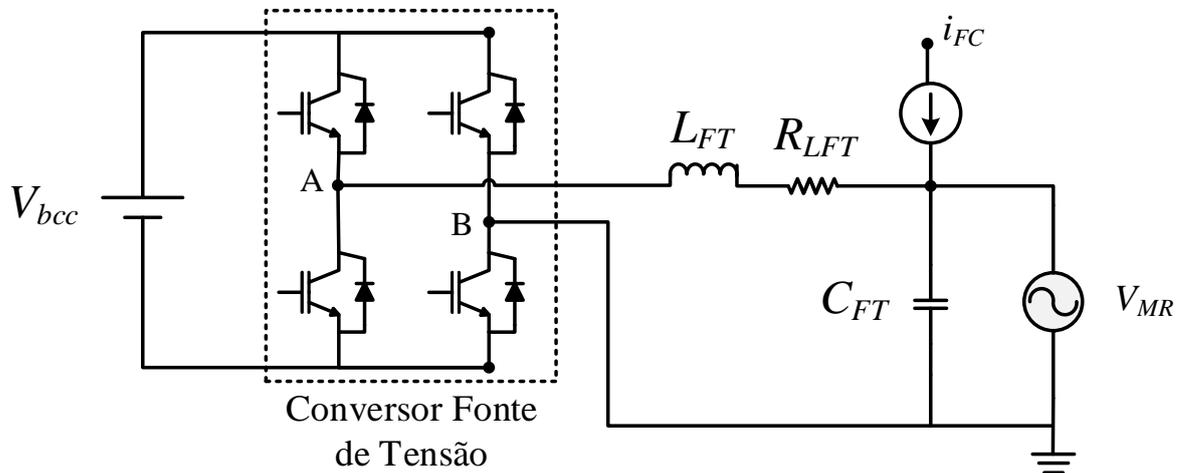
O controlador de tensão do barramento CC fornece o valor de referência de corrente para manter o barramento CC regulado, essa corrente é somada com a corrente do SRF, como discutido no capítulo 3.

9.3 Modelagem do conversor fonte de tensão

O CEBI possui um conversor fonte de tensão que está conectado no PAC da microrrede e ele é composto por um barramento de capacitores CC, que pode ser modelado por uma fonte de tensão contínua, que alimenta um inversor monofásico em ponte completa, com um filtro LC indutivo-capacitivo L_{FC} - C_{FC} em sua saída. Na topologia Delta UPQC em modo dual há a conexão física com um dos terminais do transformador, que corresponde à uma interferência da corrente do conversor de entrada, que é modelado como uma fonte de corrente senoidal. Essa corrente pode ser considerada um distúrbio, que aparece na topologia Delta UPQC, mas que não aparece na topologia B2B.

O circuito do conversor fonte de tensão pode ser visto na Figura A.5.

Figura A.5 – Circuito do conversor fonte de tensão.



Fonte: O autor.

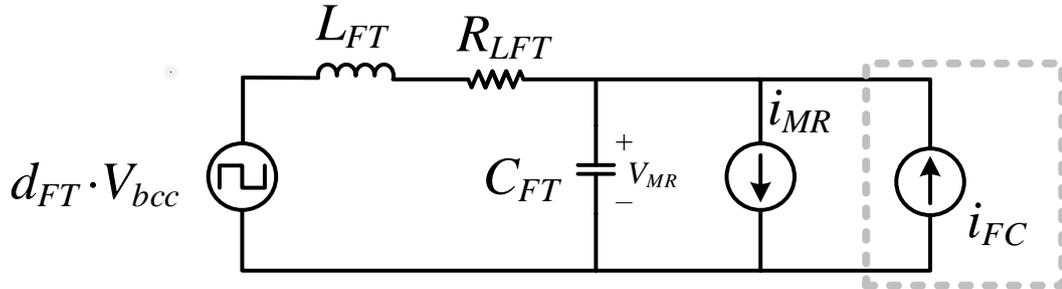
A tensão entre os terminais A e B pode ser equacionado como valor médio da razão cíclica das chaves multiplicado pela tensão do barramento CC, como mostra a equação (A.18).

$$\langle v_{AB}(t) \rangle = d_{FT}(t) \cdot V_{bcc} \quad (\text{A.18})$$

Apenas na topologia Delta UPQC há a conexão com um dos terminais do transformador, como indicado na Figura A.5 por i_{FC} . Essa conexão é considerada um distúrbio na malha de controle do conversor fonte de tensão da topologia Delta UPQC.

e pode ser desconsiderada do modelo. Ao desconsiderar do modelo, o conversor fonte de tensão da Delta UPQC tem o mesmo circuito do conversor fonte de tensão do B2B. O circuito equivalente do conversor fonte de tensão das duas topologias pode ser mostrado na Figura A.6.

Figura A.6 – Circuito equivalente do conversor fonte de tensão.



Fonte: O autor.

O distúrbio i_{FC} ocorre apenas na topologias Delta UPQC, não ocorrendo na topologia B2B. De forma a simplificar, iremos considerar uma corrente de distúrbio, de maneira que:

- Para o B2B: $i_{DIST} = i_{MR}$
- Para o UPQC: $i_{DIST} = i_{MR} - i_{FC}$

Ao realizar a análise da malha do circuito da Figura A.6, ele pode ser equacionado de acordo com a equação (A.19).

$$d_{FT} \cdot v_{bcc} - V_{Lft} - V_{RLft} - V_{cft} = 0$$

$$d_{FT} \cdot v_{bcc} - \frac{di_{FT}}{dt} \cdot L_{FT} - i_{FT} \cdot R_{LFT} - \int \frac{i_{FT}}{C_{FT}} = 0 \quad (A.19)$$

A tensão no PAC da microrrede é a mesma que a tensão do capacitor, como mostra a equação (A.20).

$$v_{MR} = v_{cft} = \int \frac{i_{FT}}{C_{FT}} \quad (A.20)$$

Aplicando oscilações nas variáveis do equacionamento, em que é o barramento CC é considerado como constante, e a razão cíclica e a corrente são consideradas o valor oscilatório, como mostra a equação (A.21).

$$\begin{aligned}
d_{FT} &= \langle D_{FT} + \widehat{d}_{FT} \rangle = \widehat{d}_{FT} \\
v_{bcc} &= \langle V_{bcc} + \widehat{v}_{bcc} \rangle = V_{bcc} \\
i_{FT} &= \langle I_{FT} + \widehat{i}_{FT} \rangle = \widehat{i}_{FT} \\
v_{MR} &= \langle V_{MR} + \widehat{v}_{MR} \rangle = \widehat{v}_{MR}
\end{aligned} \tag{A.21}$$

Substituindo as considerações da equação (A.21) na equação (A.19), temos a equação (A.22).

$$\widehat{d}_{FT} \cdot V_{bcc} - \frac{d\widehat{i}_{FT}}{dt} \cdot L_{FT} - \widehat{i}_{FT} \cdot R_{LFT} - \frac{1}{C_{FT}} \cdot \int \widehat{i}_{FT} = 0 \tag{A.22}$$

Da mesma forma, utilizando as considerações da equação (A.21) na equação (A.20), temos a equação (A.23).

$$\widehat{v}_{MR} = \frac{1}{C_{FT}} \cdot \int \widehat{i}_{FT} \tag{A.23}$$

Aplicando a Transformada de Laplace na equação (A.22), temos a equação (A.24).

$$\widehat{d}_{FT}(s) \cdot V_{bcc} - \widehat{i}_{FT} \cdot s \cdot L_{FT} - \widehat{i}_{FT} \cdot R_{LFT} - \frac{1}{C_{FT}} \cdot \frac{\widehat{i}_{FT}}{s} = 0 \tag{A.24}$$

Aplicando a Transformada de Laplace na equação (A.23), temos a equação (A.25).

$$\widehat{v}_{MR} = \frac{1}{C_{FT}} \cdot \frac{\widehat{i}_{FT}}{s} \tag{A.25}$$

$$\widehat{i}_{FT} = \widehat{v}_{MR} \cdot C_{FT} \cdot s$$

Substituindo a equação (A.25) na equação (A.24), de forma a obter a relação da tensão do conversor fonte de tensão pela sua razão cíclica, temos a equação (A.26).

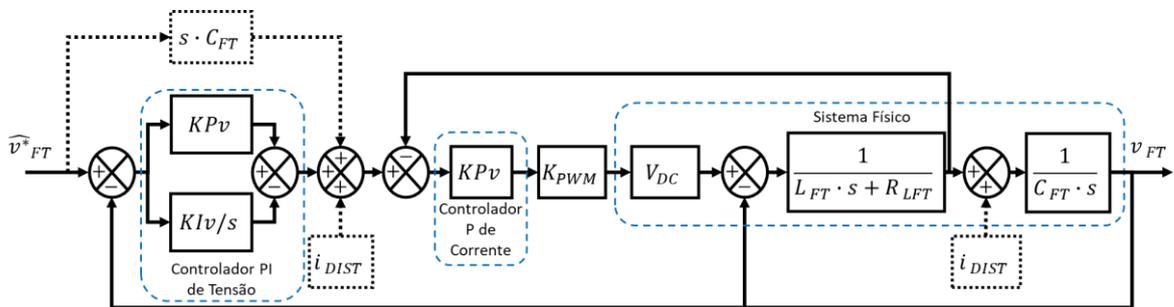
$$\begin{aligned}\widehat{d}_{FT}(s) \cdot V_{bcc} &= \widehat{v}_{MR} \cdot C_{FT} \cdot s \cdot s \cdot L_{FT} + \widehat{v}_{MR} \cdot C_{FT} \cdot s \cdot R_{LFT} + \frac{\widehat{v}_{MR} \cdot C_{FT} \cdot s}{C_{FT} \cdot s} \\ \widehat{d}_{FT}(s) \cdot V_{bcc} &= \widehat{v}_{MR}(s) \cdot C_{FT} \cdot L_{FT} \cdot s^2 + \widehat{v}_{MR}(s) \cdot C_{FT} \cdot R_{LFT} \cdot s + \widehat{v}_{MR}(s) \\ \widehat{d}_{FT}(s) \cdot V_{bcc} &= \widehat{v}_{MR}(s) \cdot (C_{FT} \cdot L_{FT} \cdot s^2 + C_{FT} \cdot R_{LFT} + 1)\end{aligned}\tag{A.26}$$

Rearranjando a equação (A.26), para obter a função de transferência, temos a equação (A.27).

$$G_{vd_FT} = \frac{\widehat{v}_{MR}(s)}{\widehat{d}_{FT}(s)} = \frac{V_{bcc}}{C_{FT} \cdot L_{FT} \cdot s^2 + C_{FT} \cdot R_{LFT} + 1}\tag{A.27}$$

O diagrama de blocos da malha de controle do conversor fonte de tensão é mostrado na Figura A.7.

Figura A.7 – Diagrama de blocos da malha de controle do conversor fonte de tensão.



Fonte: O autor.

No diagrama de blocos da Figura A.7 é mostrado em pontilhado os distúrbios que ocorre na malha de controle e que são utilizados na malha de controle, como é o caso da estimativa de corrente do capacitor do filtro de saída do CEBI e da corrente no PAC da microrrede, no caso do B2B, ou a corrente do PAC da microrrede subtraída da corrente do conversor fonte de corrente para o UPQC, como apresentado no capítulo 3.

Da malha externa de controle da tensão pode ser desmembrado na malha interna de controle em corrente, em que a função de transferência da malha de corrente é dado pela equação (A.28).

$$G_{id_FT} = \frac{\widehat{i}_{MR}(s)}{\widehat{d}_{FT}(s)} = K_{PWM} \cdot \frac{V_{bcc}}{L_{FT} \cdot s + R_{LFT}} \quad (\text{A.28})$$

A partir da malha interna de corrente com o seu controlador é possível obter a função de transferência da malha externa de tensão para o projeto dos controladores PI da malha de tensão, como pode ser visto na equação (A.29).

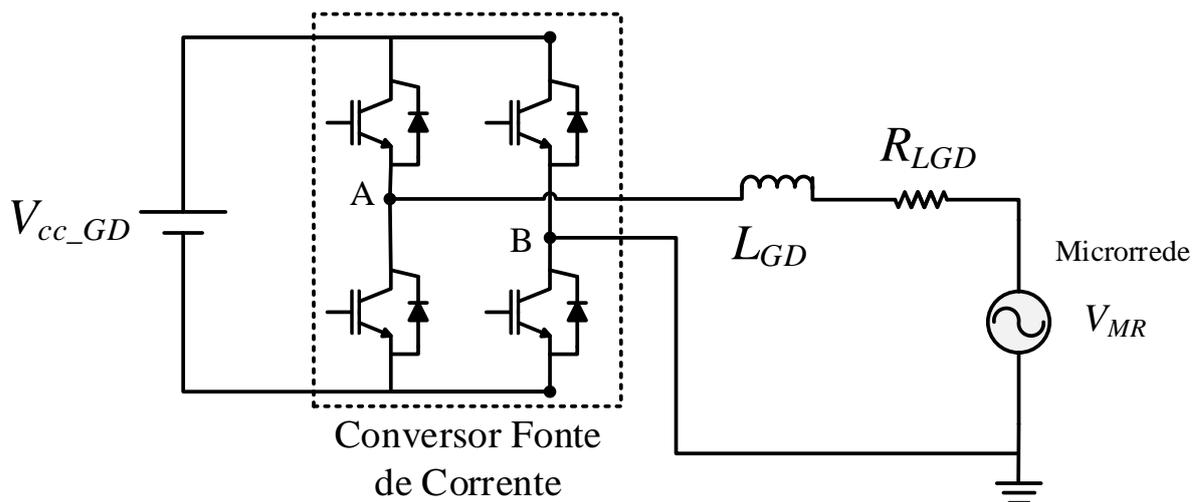
$$G_{vd_FT} = \frac{\widehat{v}_{MR}(s)}{\widehat{d}_{FT}(s)} = [FTMF(K_{P_i} \cdot G_{id_FT})] \cdot \frac{1}{C_{FT} \cdot s} \quad (\text{A.29})$$

Na equação (A.29), FTMF representa a função de transferência em malha fechada da função apresentada.

9.4 Modelagem do emulador fonte de corrente

No PAC da microrrede é conectado um emulador de fonte de geração distribuída, formada por uma fonte de tensão contínua que alimenta um inversor de frequência full-bridge, o qual tem em sua saída um filtro indutivo, como mostra o circuito da Figura A.8.

Figura A.8 – Circuito do emulador de fonte de geração distribuída controlado em corrente.



Fonte: O autor.

O modelo matemático da fonte de geração distribuída é o mesmo que o conversor fonte de corrente do CEBI, como apresentado. A função de transferência é dado pela equação (A.30).

$$G_{id_{GD}}(s) = \frac{\hat{i}_{GD}(s)}{\hat{d}_{GD}(s)} = \frac{V_{CC}}{L_{GD} \cdot s + R_{LGD}} \quad (\text{A.30})$$

A tensão VCC não é controlada, como é o caso do barramento CC do conversor fonte de corrente, essa tensão pode ser de uma fonte renovável de energia, caracterizando um sistema como uma microrrede.

APÊNDICE B – Projeto dos Controladores

Na literatura há diversas técnicas para o projeto de controladores proporcional e integrativo, e nesse trabalho será utilizado a técnica da definição de margem de fase, como abordado em ANGÉLICO (2014), em que foi proposto um método para o cálculo dos ganhos do controlador PI analisando o diagrama de Bode da função de transferência do sistema a ser controlado.

O método consiste em implementar um controlador de forma que o sistema controlado tem seu módulo cruzando em 0 dB em uma certa frequência de cruzamento (ω_c) definida pelo projetista, deslocando o ângulo de fase para uma margem de fase desejada (MF_d), através da análise do diagrama de Bode da magnitude e da fase. Após definido essas variáveis para o projeto, se segue as seguintes etapas:

1º. Plotar o diagrama de Bode do sistema a ser controlado em malha aberta e avaliar a fase ϕ_g que o sistema possui na frequência de cruzamento (ω_c) desejada.

2º. Calcular a margem de fase MF_g do sistema pela equação (B.1).

$$MF_g = 180^\circ + \phi_g \quad (\text{B.1})$$

3º. Verificar quanto deve ser acrescentado no ângulo de fase com o PI, inserindo um atraso de fase que é dada pela equação (B.2).

$$\phi_c = MF_d - MF_g \quad (\text{B.2})$$

4º. Calcular o tempo do ganho integrador T_i dado pela equação (B.3).

$$T_i = \frac{tg(\phi_c + 90)}{\omega_c} \quad (\text{B.3})$$

5º. Plotar novamente o Diagrama de Bode, mas agora da seguinte função de transferência $C'(s) \cdot G(s)$, em que $C'(s)$ é dado pela equação (B.4).

$$C'(s) = \left(\frac{T_i \cdot s + 1}{s} \right) \quad (\text{B.4})$$

Com isso se calcula o ganho necessário para que o sistema controlado cruze em 0 dB na frequência de cruzamento definida. Esse valor de ganho é numericamente o mesmo de K_i e pode ser obtido da equação (B.5).

$$K_i = \frac{1}{10^{(G_{\omega_c}/20)}} \quad (\text{B.5})$$

Em que G_{ω_c} é o módulo do ganho na frequência de cruzamento, obtido do segundo diagrama de bode.

6º. Calcular o ganho K_p pela equação (B.6).

$$K_p = K_i \cdot T_i \quad (\text{B.6})$$

Como visto, para o projeto dos controladores é necessário conhecer a função de transferência do sistema a ser controlado, a margem de fase de atraso que será inserida e qual será a frequência de cruzamento de operação do sistema a ser compensado. A função de transferência do controlador PI é dada pela equação (B.7).

$$C(s) = K_p + \frac{K_i}{s} = K_p \cdot \left(1 + \frac{1}{T_i \cdot s}\right) \quad (\text{B.7})$$

Com esse método é possível projetar os controladores para o correto funcionamento do CEBI. Os controladores PI atuam muito bem para eliminar erro em regime permanente de um sinal contínuo, no entanto, a rede elétrica possui variáveis de referência senoidais, que variam à todo instante o seu valor. Apesar do controlador PI ter um bom funcionamento para variáveis senoidais, em teoria quando as referências de controle são variáveis contínuas os controladores PI tradicionais tem um melhor desempenho. Como as variáveis de referências são senoidais, foi utilizado as Transformadas de Clarke e Park para transformar os sinais de referência senoidais para sinais contínuos.

Nesse trabalho foi projetado controladores PI e P dos seguintes sistemas:

- Controlador PI de corrente do conversor fonte de corrente;
- Controlador PI de tensão do barramento CC;
- Controlador P de corrente do conversor fonte de tensão;
- Controlador PI de tensão do conversor fonte de tensão;

- Controlador PI de corrente do emulador de fonte de geração distribuída.
O cálculo dos ganhos dos controladores é apresentado a seguir.

10.1 Projeto do controlador PI de corrente do conversor fonte de corrente

A malha de controle de corrente do conversor fonte de corrente será controlada por um controlador PI que atuará com variáveis contínuas, vindas de sinais no eixo dq. Essa malha de corrente tem o intuito de garantir que a corrente drenada ou injetada na rede elétrica esteja em fase com a própria rede elétrica e possa fornecer a corrente para manter o barramento CC regulado e que monitore a corrente no barramento da microrrede através do algoritmo SRF.

A tabela B.1 mostra as especificações utilizadas para o projeto do controlador PI de corrente do fonte de corrente.

Tabela B.1 – Parâmetros de projeto para os controladores PI da malha de corrente do Conversor Fonte de Corrente			
Definição	Variável	Valor	
Tensão de referência do barramento CC	V_{bcc}	240 V	
Indutor do filtro	L_{FC}	3,14 mH	
Resistor de perdas do indutor de filtro	R_{LFC}	0,38 Ω	
Ganho do modulador PWM	K_{PWM}	$\frac{2}{3750}$	
Frequência de cruzamento do controlador da malha de corrente do Conversor Fonte de Corrente	$\omega_{C_{LFC}}$	$2\pi \cdot \frac{20000}{7}$	
Margem de fase desejada do controlador da malha de corrente do Conversor Fonte de Corrente	MFd_{LFC}	89,9°	

Fonte: Autor.

A equação (B.8) representa a planta para o projeto do controlador PI, considerando o ganho do modulador PWM.

$$G_{id_{FC}}(s) = K_{PWM} \cdot \frac{V_{bcc}}{L_{FC} \cdot s + R_{LFC}} = \frac{2}{3750} \cdot \frac{240}{(3,14 \times 10^{-3}) \cdot s + 0,38} = \frac{0,128}{(3,14 \times 10^{-3}) \cdot s + 0,38} \quad (\text{B.8})$$

Na frequência de cruzamento $\omega_{c_{I_{FC}}}$ escolhida, a fase possui o valor de $\phi_g = -89,6138^\circ$, calculando a margem de fase da malha de corrente temos a equação (B.9).

$$MF_g = 180^\circ + \phi_g = 180^\circ - 89,6138^\circ = 90,3862^\circ \quad (\text{B.9})$$

De acordo com a tabela B.1 a margem de fase acrescentada é de $MFd_{I_{FC}} = 89,9^\circ$, portanto o atraso de fase ϕ_c é dado pela equação (B.10).

$$\phi_c = MFd_{I_{Gid}} - MF_g = 89,9^\circ - 90,3862^\circ = -0,4862^\circ \quad (\text{B.10})$$

O tempo de integração do controlador PI da malha de corrente do inversor pode ser calculada pela equação (B.11).

$$T_i = \frac{tg(\phi_c + 90)}{\omega_c} = \frac{tg(-0,4862^\circ + 90)}{2 \cdot \pi \cdot 2857,1} = 6,5637 \text{ ms} \quad (\text{B.11})$$

Com o tempo de integração é possível obter a função do compensador $C'(s)$ apresentado na equação (B.12).

$$C'(s) = \left(\frac{T_i \cdot s + 1}{s} \right) = \left(\frac{6,5637 \times 10^{-3} \cdot s + 1}{s} \right) \quad (\text{B.12})$$

O compensador da equação (B.12) está em série com a função de transferência da malha de corrente, que foi apresentada na equação (B.13).

$$C'(s) \cdot G_{id_{cFC}}(s) = \left(\frac{6,5637 \times 10^{-3} \cdot s + 1}{s} \right) \cdot \frac{0,128}{(3,14 \times 10^{-3}) \cdot s + 0,38} \quad (\text{B.13})$$

Ao plotar o diagrama de Bode da equação (B.13), se verifica que na frequência de cruzamento definida, o módulo é de $-96,5335 \text{ dB}$, em que o K_i é calculado pela equação (B.14).

$$K_i = \frac{1}{10^{(G\omega_c/20)}} = \frac{1}{10^{(-96,5335/20)}} = 67,093 \times 10^3 \quad (\text{B.14})$$

E o ganho K_p é calculado pela equação (B.15).

$$K_p = K_i \cdot T_i = 67,093 \times 10^3 \cdot 6,5637 \times 10^{-3} = 440,3781 \quad (\text{B.15})$$

Na tabela B.2 é apresentado os ganhos do controlador PI de corrente utilizado na malha de corrente do conversor fonte de corrente.

Tabela B.2 – Valores dos ganhos dos controladores PI da malha de corrente do conversor fonte de corrente.		
Definição	Variável	Valor
Ganho proporcional da malha de corrente do conversor fonte de corrente	Kp_{id_FC}	440,3781
Ganho integral da malha de corrente do conversor fonte de corrente	Ki_{id_FC}	67093

Fonte: O autor.

Os ganhos do controlador PI mostrado na tabela B.2 são discretizados pelo método de Tustin para ser implementado no sistema embarcado pela equação de diferenças, com uma frequência de amostragem de 60 kHz.

10.2 Projeto do controlador PI de tensão do barramento CC

O barramento CC, formado por um banco de capacitores, tem a função de manter um nível de tensão suficiente para que os inversores sintetizem uma tensão senoidal, e conseqüentemente uma corrente senoidal, através do chaveamento dos IGBTs.

No barramento CC pode ocorrer elevações e afundamentos da tensão, de acordo com a variação da corrente processada pelo inversor fonte de corrente. Essas variações devem ser corrigidas, mantendo o barramento CC estável, para que ele não perca a sua regulação. Para manter o barramento CC regulado é necessário um controlador, que nesse trabalho será utilizado um controlador PI, que tem a função de manter a tensão no barramento regulada em um nível pré-definido. Essa malha de tensão deve ser independente de outras malhas de controle e com uma velocidade de atuação inferior à malha de corrente do conversor fonte de corrente, para que a sua ação não prejudique o funcionamento da malha de corrente.

Na tabela B.3 são apresentados os valores utilizados no projeto dos controladores PI de tensão do barramento CC.

Tabela B.3 – Parâmetros de projeto para os controladores PI da malha de tensão do Barramento CC.			
Definição	Variável	Valor	
Tensão de referência do barramento CC	V_{bcc}	240 V	
Capacitores do barramento CC	C_{DC}	1410 μ F	
Frequência de cruzamento do controlador da malha de corrente do Inversor	$\omega c_{V_{bcc}}$	$2 \cdot \pi \cdot 5$	
Margem de fase desejada do controlador da malha de corrente do Inversor	$MFd_{V_{bcc}}$	50°	

Fonte: Autor.

A equação (B.16) representa o comportamento do barramento CC, com os valores dos elementos apresentados na tabela B.3..

$$G_{vi_{FC}}(s) = \frac{V_{REDE_{pico}}}{2 \cdot V_{DC} \cdot C_{DC} \cdot s} = \frac{180}{2 \cdot 240 \cdot 1410 \times 10^{-6} \cdot s} = \frac{180}{0,6768 \cdot s} \quad (B.16)$$

Na frequência de cruzamento $\omega c_{V_{bcc}}$ escolhida, a fase possui o valor de $\phi_g = -90^\circ$, calculando a margem de fase da malha de corrente temos a equação (B.17).

$$MF_g = 180^\circ + \phi_g = 180^\circ - 90^\circ = 90^\circ \quad (B.17)$$

De acordo com a tabela B.3 a margem de fase acrescentada é de $MFd_{V_{bcc}} = 50^\circ$, portanto o atraso de fase ϕ_c é dado pela equação (B.18).

$$\phi_c = MFd_{I_{Gid}} - MF_g = 50^\circ - 90^\circ = -40^\circ \quad (B.18)$$

O tempo de integração do controlador PI da malha de corrente do inversor pode ser calculada pela equação (B.19).

$$T_i = \frac{tg(\phi_c + 90)}{\omega_c} = \frac{tg(-40^\circ + 90)}{2 \cdot \pi \cdot 5} = 37,9347 \text{ ms} \quad (B.19)$$

Com o tempo de integração é possível obter a função do compensador $C'(s)$ apresentado na equação (B.20).

$$C'(s) = \left(\frac{T_i \cdot s + 1}{s} \right) = \left(\frac{37,9347 \times 10^{-3} \cdot s + 1}{s} \right) \quad (\text{B.20})$$

O compensador da equação (B.20) está em série com a função de transferência da malha de corrente, que foi apresentada na equação (B.21).

$$C'(s) \cdot G_{id_{cfc}}(s) = \left(\frac{37,9347 \times 10^{-3} \cdot s + 1}{s} \right) \cdot \frac{180}{0,6768 \cdot s} \quad (\text{B.21})$$

Ao plotar o diagrama de Bode da equação (B.21), se verifica que na frequência de cruzamento definida, o módulo é de $-7,5511 \text{ dB}$, em que o K_i é calculado pela equação (B.22).

$$K_i = \frac{1}{10^{(G_{\omega c}/20)}} = \frac{1}{10^{(-7,5511/20)}} = 2,3854 \quad (\text{B.22})$$

E o ganho K_p é calculado pela equação (B.23).

$$K_p = K_i \cdot T_i = 2,3854 \cdot 37,9347 \times 10^{-3} = 0,09049 \quad (\text{B.23})$$

Na tabela B.4 é apresentado os ganhos do controlador PI de tensão utilizado na malha de tensão do barramento CC.

Tabela B.4 – Valores dos ganhos dos controladores PI da malha de tensão do barramento CC.

Definição	Variável	Valor
Ganho proporcional da malha de tensão do barramento CC	Kp_{vi_bcc}	2,3854
Ganho integral da malha de tensão do barramento CC	Ki_{vi_bcc}	0,09049

Fonte: O autor.

Os ganhos do controlador PI mostrado na tabela B.4 são discretizados pelo método de Tustin para ser implementado no sistema embarcado pela equação de diferenças, com uma frequência de amostragem de 60 kHz.

10.3 Projeto do controlador P de corrente do conversor fonte de tensão

O conversor fonte de tensão possui duas malhas de controle, uma malha interna de corrente e outra malha externa de tensão. O controle da malha de tensão tem o objetivo de controlar o fluxo de corrente no indutor do filtro de saída por um controlador proporcional. Já o controle externo de tensão tem por objetivo controlar uma tensão puramente senoidal sobre o capacitor de saída do filtro, por um controlador PI em série com a malha de corrente em malha fechada.

O controlador de corrente do conversor fonte de tensão atua no erro de variáveis contínuas, vindas da transformação da corrente medida no eixo dq. A tabela B.5 apresenta as especificações para o projeto do controlador PI de corrente do fonte de tensão.

Tabela B.5 – Parâmetros de projeto para os controladores PI da malha de corrente do Conversor Fonte de Tensão

Definição	Variável	Valor
Tensão de referência do barramento CC	V_{bcc}	240 V
Indutor do filtro	L_{FT}	354 μ H
Resistor de perdas do indutor de filtro	R_{LFT}	0,12 Ω
Ganho do modulador PWM	K_{PWM}	$\frac{2}{3750}$
Frequência de cruzamento do controlador da malha de corrente do Conversor Fonte de Corrente	ωC_{LFT}	$2 \cdot \pi \cdot 2500$

Fonte: Autor.

A equação (B.24) representa a planta para o projeto do controlador P, considerando o ganho do modulador PWM.

$$G_{id_{FT}} = K_{PWM} \cdot \frac{V_{bcc}}{L_{FT} \cdot s + R_{LFT}} = \frac{2}{3750} \cdot \frac{240}{(354 \times 10^{-6}) \cdot s + 0,12} = \frac{0,128}{(354 \times 10^{-6}) \cdot s + 0,12} \quad (\text{B.24})$$

Como o controlador é apenas de ganho proporcional, na frequência de cruzamento $\omega c_{I_{FT}}$ escolhida é necessário que o ganho em dB seja igual à zero. O controlador proporcional vai dar um ganho na malha de controle de forma que a magnitude do diagrama de Bode cruze o 0 dB na frequência de cruzamento. O valor da magnitude na frequência de cruzamento da função de transferência da equação (B.24) é de $|G\omega c| = -32,7603 \text{ dB}$, em que o controlador P deve dar esse ganho na malha de corrente. Ao passar esse valor para absoluto temos a equação (B.25).

$$K_p = \frac{1}{10^{(G\omega c/20)}} = \frac{1}{10^{(-32,7603/20)}} = 43,4525 \quad (\text{B.25})$$

Na tabela B.6 é apresentado o ganho do controlador P de corrente utilizado na malha de corrente do conversor fonte de tensão.

Tabela B.6 – Valores do ganho do controlador P da malha de corrente do conversor fonte de tensão.

Definição	Variável	Valor
Ganho proporcional da malha de corrente do conversor fonte de corrente	$Kp_{id_{FT}}$	43,4525

Fonte: O autor.

O ganho do controlador P mostrado na tabela B.6 são discretizados pelo método de Tustin para ser implementado no sistema embarcado pela equação de diferenças, com uma frequência de amostragem de 60 kHz.

10.4 Projeto do controlador PI de tensão do conversor fonte de tensão

No controle multi-malhas do conversor fonte de tensão existe uma malha interna de corrente e uma malha externa de tensão. A frequência de atuação da malha interna deve ser maior que a frequência da malha externa, tornando a malha interna muito mais rápida que a malha externa. A malha externa de tensão do conversor fonte de tensão tem o objetivo controlar uma tensão puramente senoidal na sua saída, através da atuação nas chaves de potência por PWM. Os parâmetros utilizados para

o projeto dos controladores PI da malha de tensão do conversor fonte de tensão são mostrados na tabela B.7.

Tabela B.7 – Parâmetros de projeto para os controladores PI da malha de tensão do Conversor Fonte de Tensão		
Definição	Variável	Valor
Capacitância do filtro de saída do conversor fonte de tensão	C_{FT}	$40 \mu F$
Frequência de cruzamento do controlador da malha de corrente do Conversor Fonte de Corrente	$\omega C_{V_{FT}}$	$2 \cdot \pi \cdot 700$
Margem de fase desejada do controlador da malha de corrente do Conversor Fonte de Corrente	$MFd_{V_{FT}}$	70°

Fonte: Autor.

A equação (B.26) representa a planta para o projeto do controlador PI, considerando a malha interna de corrente já controlada.

$$G_{vd_{FT}} = [FTMF(K_{P_i} \cdot G_{id_{FT}})] \cdot \frac{1}{C_{FT} \cdot s} = \frac{5,562}{1,416 \times 10^{-8} \cdot s^2 + 2,273 \times 10^{-4} \cdot s} \quad (B.26)$$

Na frequência de cruzamento $\omega C_{V_{FT}}$ escolhida, a fase possui o valor de $\phi_g = -105,3242^\circ$, calculando a margem de fase da malha de corrente temos a equação (B.27).

$$MF_g = 180^\circ + \phi_g = 180^\circ - 105,3242^\circ = 74,6758^\circ \quad (B.27)$$

De acordo com a tabela B.7 a margem de fase acrescentada é de $MFd_{I_{FC}} = 70^\circ$, portanto o atraso de fase ϕ_c é dado pela equação (B.28).

$$\phi_c = MFd_{I_{FC}} - MF_g = 70^\circ - 74,6758^\circ = -4,6758^\circ \quad (B.28)$$

O tempo de integração do controlador PI da malha de corrente do inversor pode ser calculada pela equação (B.29).

$$T_i = \frac{tg(\phi_c + 90)}{\omega_c} = \frac{tg(-4,6758^\circ + 90)}{2 \cdot \pi \cdot 700} = 2,7798 \text{ ms} \quad (B.29)$$

Com o tempo de integração é possível obter a função do compensador $C'(s)$ apresentado na equação (B.30).

$$C'(s) = \left(\frac{T_i \cdot s + 1}{s} \right) = \left(\frac{2,7798 \times 10^{-3} \cdot s + 1}{s} \right) \quad (\text{B.30})$$

O compensador da equação (B.30) está em série com a função de transferência da malha de corrente, que foi apresentada na equação (B.31).

$$C'(s) \cdot G_{vd_{FT}}(s) = \left(\frac{2,7798 \times 10^{-3} \cdot s + 1}{s} \right) \cdot \frac{5,562}{1,416 \times 10^{-8} \cdot s^2 + 2,273 \times 10^{-4} \cdot s} \quad (\text{B.31})$$

Ao plotar o diagrama de Bode da equação (B.31), se verifica que na frequência de cruzamento definida, o módulo é de $-36,4972 \text{ dB}$, em que o K_i é calculado pela equação (B.32).

$$K_i = \frac{1}{10^{(G_{\omega c}/20)}} = \frac{1}{10^{(-36,4972/20)}} = 66,8130 \quad (\text{B.32})$$

E o ganho K_p é calculado pela equação (B.33).

$$K_p = K_i \cdot T_i = 66,8130 \cdot 2,7798 \times 10^{-3} = 0,1857 \quad (\text{B.33})$$

Na tabela B.8 é apresentado os ganhos do controlador PI de tensão utilizado na malha externa de tensão do conversor fonte de tensão.

Tabela B.8 – Valores dos ganhos dos controladores PI da malha de tensão do conversor fonte de tensão.

Definição	Variável	Valor
Ganho proporcional da malha de corrente do conversor fonte de tensão	$K_{p_{vd_{FT}}}$	0,1857
Ganho integral da malha de corrente do conversor fonte de tensão	$K_{i_{vd_{FT}}}$	66,8130

Fonte: O autor.

Os ganhos do controlador PI mostrado na tabela B.8 são discretizados pelo método de Tustin para ser implementado no sistema embarcado pela equação de diferenças, com uma frequência de amostragem de 60 kHz.

10.5 Projeto do controlador PI de corrente do emulador de geração distribuída

No emulador da fonte de geração distribuída optou-se realizar o controle com as variáveis senoidais, se realizar as transformadas de Clarke e Park, com o intuito de economizar processamento do microcontrolador e o CEBI deve ser robusto o suficiente para não ser afetado pela distorção harmônica da corrente da microrrede.

O objetivo da malha de controle de corrente do emulador é injetar uma corrente alternada em fase com a tensão no PAC da microrrede a partir de uma fonte renovável de energia no barramento CC do inversor full-bridge com filtro indutivo.

A tabela B.9 mostra as especificações utilizadas para o projeto do controlador PI da malha de corrente do emulador.

Tabela B.9 – Parâmetros de projeto para os controladores PI da malha de corrente do Emulador de Geração Distribuída			
Definição	Variável	Valor	
Tensão de referência do barramento CC	V_{CC}	240 V	
Indutor do filtro	L_{GD}	3,14 mH	
Resistor de perdas do indutor de filtro	R_{LGD}	0,38 Ω	
Ganho do modulador PWM	K_{PWM}	$\frac{2}{3750}$	
Frequência de cruzamento do controlador da malha de corrente do Conversor Fonte de Corrente	$\omega_{c_{LGD}}$	$2 \cdot \pi \cdot 2000$	
Margem de fase desejada do controlador da malha de corrente do Conversor Fonte de Corrente	MFd_{LGD}	61°	

Fonte: Autor.

A equação (B.34) representa a planta para o projeto do controlador PI, considerando o ganho do modulador PWM.

$$G_{id_{GD}}(s) = K_{PWM} \cdot \frac{V_{CC}}{L_{GD} \cdot s + R_{LGD}} = \frac{0,128}{(3,14 \times 10^{-3}) \cdot s + 0,38} \quad (\text{B.34})$$

Na frequência de cruzamento $\omega_{c_{I_{GD}}}$ escolhida, a fase possui o valor de $\phi_g = -89,4482^\circ$, calculando a margem de fase da malha de corrente temos a equação (B.35).

$$MF_g = 180^\circ + \phi_g = 180^\circ - 89,4482^\circ = 90,5518^\circ \quad (\text{B.35})$$

De acordo com a tabela B.9 a margem de fase acrescentada é de $MFd_{I_{GD}} = 61^\circ$, portanto o atraso de fase ϕ_c é dado pela equação (B.36).

$$\phi_c = MFd_{I_{GD}} - MF_g = 61^\circ - 90,4482^\circ = -29,5518^\circ \quad (\text{B.36})$$

O tempo de integração do controlador PI da malha de corrente do inversor pode ser calculada pela equação (B.37).

$$T_i = \frac{tg(\phi_c + 90)}{\omega_c} = \frac{tg(-29,5518^\circ + 90^\circ)}{2 \cdot \pi \cdot 2000} = 140,36 \mu s \quad (\text{B.37})$$

Com o tempo de integração é possível obter a função do compensador $C'(s)$ apresentado na equação (B.38).

$$C'(s) = \left(\frac{T_i \cdot s + 1}{s} \right) = \left(\frac{140,36 \times 10^{-6} \cdot s + 1}{s} \right) \quad (\text{B.38})$$

O compensador da equação (B.38) está em série com a função de transferência da malha de corrente, que foi apresentada na equação (B.39).

$$C'(s) \cdot G_{id_{CFC}}(s) = \left(\frac{140,36 \times 10^{-6} \cdot s + 1}{s} \right) \cdot \frac{0,128}{(3,14 \times 10^{-3}) \cdot s + 0,38} \quad (\text{B.39})$$

Ao plotar o diagrama de Bode da equação (B.39), se verifica que na frequência de cruzamento definida, o módulo é de $-125,6238 \text{ dB}$, em que o K_i é calculado pela equação (B.40).

$$K_i = \frac{1}{10^{(G\omega c/20)}} = \frac{1}{10^{(-125,6238/20)}} = 1,9107 \times 10^6 \quad (\text{B.40})$$

E o ganho K_p é calculado pela equação (B.41).

$$K_p = K_i \cdot T_i = 1,9107 \times 10^6 \cdot 140,36 \times 10^{-6} = 268,1787 \quad (\text{B.41})$$

Na tabela B.10 é apresentado os ganhos do controlador PI utilizado na malha de corrente do emulador fonte de corrente.

Tabela B.10 – Valores dos ganhos dos controladores PI da malha de corrente do emulador de geração distribuída.

Definição	Variável	Valor
Ganho proporcional da malha de corrente do emulador	Kp_{id_GD}	$1,9107 \times 10^6$
Ganho integral da malha de corrente do emulador	Ki_{id_GD}	268,1787

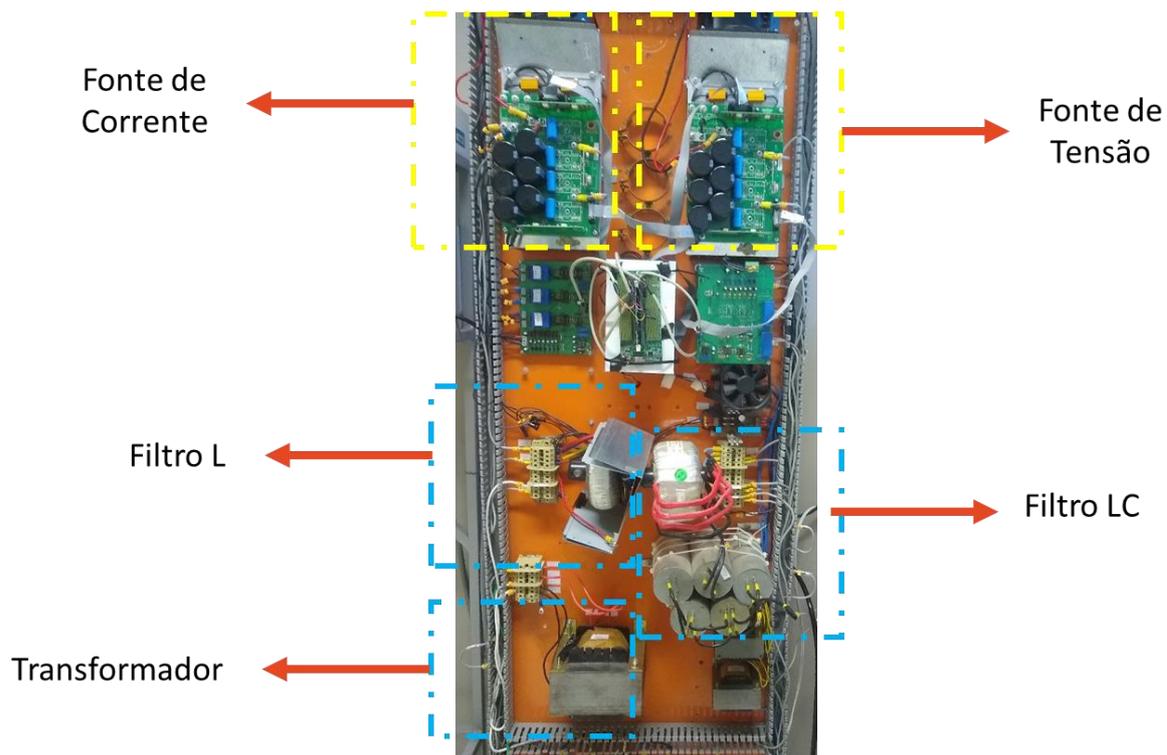
Fonte: O autor.

Os ganhos do controlador PI mostrado na tabela B.10 serão discretizados pelo método de Tustin para ser implementado no sistema embarcado pela equação de diferenças, com uma frequência de amostragem de 60 kHz.

APÊNDICE C – FOTO DO PROTÓTIPO

O protótipo implementado serviu para as duas topologias, necessitando apenas da mudança de algumas ligações quando se estudou uma ou outra topologia. Abaixo se encontra a foto do protótipo.

Figura C-1 – Foto do protótipo implementado em laboratório.



Fonte: O autor.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANEEL. **MÓDULO 8 – QUALIDADE DO FORNECIMENTO DE ENERGIA ELÉTRICA. ANEXO VIII DA RESOLUÇÃO NORMATIVA Nº 956, DE 7 DE DEZEMBRO 2021 PROCEDIMENTOS DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA NO SISTEMA ELÉTRICO NACIONAL – PRODIST, 2021.**

ANGÉLICO, B.A., CAMPANHOL, L.B., SILVA, S.A.O. **Proportional – integral / proportional – integral – derivative tuning procedure of a single-phase shunt active power filter using bode diagram.** IET Power Electron., 2014, 7, (10), pp. 2647–2659.

BACON, Vinícius Dário. **Sistema UPQC multifuncional proposto para operar como interface entre microrredes híbridas e redes concessionárias de energia elétrica.** Tese (Doutorado) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Programa de Pós-Graduação Associado em Engenharia Elétrica. Cornélio Procópio, 2020.

BACON, Vinícius Dário; SILVA, Sérgio Augusto Oliveira da; GUERRERO, Josep M. **Multifunctional UPQC operating as an interface converter between hybrid AC-DC microgrids and utility grids.** International Journal of Electrical Power & Energy Systems, Volume 136, 2022.

BARRIVIERA, R.; SILVA, S. A .O.; KASTER, M.; MODESTO, R. A. **Implementação de um Sistema UPS Monofásico com Condicionamento Ativo de Potência Série e Paralelo.** Eletrônica de Potência (Impresso), v. 17, p. 753-762, 2012.

BHATTACHARYA, S.; DIVAN, D. M.; BANERJEE, B. B. **Synchronous Frame Harmonic Isolator Using Active Series Filter,** EPE'91, vol. 3, pp. 30-35, 1991.

BORGES, Carolina Moreira. **Análise da operação do conversor fonte de tensão (VSC) em “back-to-back” para microrredes.** Dissertação (mestrado) – UFRJ/COPPE/ Programa de Engenharia Elétrica. Rio de Janeiro, 2010.

BOROYEVICH, D.; CVETKOVIC, I.; DONG, D.; BURGOS, F.; WANG, R.; LEE, F. C. **“Future electronic power distribution systems—A contemplative view,”** in Proc. IEEE 12th Int. Conf. Optim. Electr. Electron. Equip., pp. 1369–1380, May 2010.

CAMPANHOL, Leonardo Bruno Garcia. **SISTEMA FOTOVOLTAICO TRIFÁSICO DE ÚNICO ESTÁGIO CONECTADO A SISTEMAS DE GERAÇÃO DISTRIBUÍDA OPERANDO COMO CONDICIONADOR DE QUALIDADE DE ENERGIA UNIFICADO USANDO UMA ESTRATÉGIA DUAL DE COMPENSAÇÃO ATIVA DE POTÊNCIA.** Tese (Doutorado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e Área de Concentração em Sistemas Dinâmicos – Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo. São Carlos, 2017.

CARVALHO, E. F. A.; CALVETE, M. J. F. **Energia Solar: Um passado, um presente... um futuro auspicioso.** Rev. Virtual Quim., 2010, 2 (3), 192-203. Dez, 2010.

COSTA, Henrique. **Sistema de proteção para microrredes utilizando unidades de medição fasorial**. Dissertação (mestrado) – Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Florianópolis, 2019.

CHAKRABORTY, S.; SIMOES, M. G. **Experimental Evaluation of Active Filtering in a Single-Phase High-Frequency AC Microgrid**. IEEE Transactions on Energy Conversion, v. 24, n. 3, p. 673-682, 2009.

CHOUDHARY, N. P.; POTE, X. R. **"Controlling of Back to Back Converter for Load Sharing in Microgrid and Utility Grid"**. 2013 Third International Conference on Advances in Computing and Communications, pp. 287-291, 2013.

CHOWDHURY, S.; CHOWDHURY, S.P.; CROSSLEY, P. **Microgrids and Active Distribution Networks**. IET Renewable Energy Series 6, 2009.

DEWADASA, M. GHOSH, A. LEDWICH, G. **An inverse time admittance relay for fault detection in distribution networks containing DGs**, in: IEEE Asia-Pacific Region- 10 Conference TENCON'09, Singapore, 2009.

DONG, D.; CVETKOVIC, I.; BOROYEVICH, D.; ZHANG, W.; WANG, R.; MATTAVELLI, P. **"Grid-Interface Bidirectional Converter for Residential DC Distribution Systems—Part One: High-Density Two-Stage Topology,"** in IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 28, no. 4, pp. 1655-1666, April 2013.

EPE. **BEN Relatório Síntese 2022** - ano base 2021. Brasil, 2022.

EVERTS, J. et al. **Optimal ZVS Modulation of Single-Phase Single-Stage Bidirectional DAB AC–DC Converters**. IEEE Transactions on Power Electronics, v. 29, n. 8, p. 3954-3970, 2014.

FUJITA, H.; AKAGI, H. **The unified power quality conditioner: the integration of series- and shunt-active filters**. IEEE Transactions on Power Electronics, v. 13, n. 2, p. 315-322, 1998.

GARCIA CAMPANHOL, L. B.; OLIVEIRA DA SILVA, S. A.; GOEDEL, A. **Application of shunt active power filter for harmonic reduction and reactive power compensation in three-phase four-wire systems**. IET Power Electronics, v. 7, n. 11, p. 2825-2836, 2014.

GRZESIAK, L. M.; TOMASIK, J. **DC Link Balancing Method in Back-to-Back UPS System with Multi-Level Converters**. 2006 IEEE International Symposium on Industrial Electronics, 2006, pp. 908-913.

GUPTA, A. DOOLLA, S. CHATTERJEE, K. **Hybrid AC–DC Microgrid: Systematic Evaluation of Control Strategies**, in IEEE Transactions on Smart Grid, vol. 9, no. 4, pp. 3830-3843, July 2018.

HAN, B.; BAE, B. KIM, H.; BAEK, S. **Combined operation of unified power-quality conditioner with distributed generation**. IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 21, n. 1, pp. 330-338, Jan, 2006.

HUANG, Xiaozuo; CHEN, Dong; XU, Lie. **Microgrid design using folded P-f droop and new grid interface unit to minimize the need for communication.** International Journal of Electrical Power & Energy Systems, Volume 130, 2021.

IEC 61000-3-2. Electromagnetic compatibility (EMC). **Part 3-2: Limits – Limits for harmonic current emissions** (equipment input current < 16 A per phase), 2014.

IEEE 519. **IEEE Recommended Practice and Requirements for Harmonic Control in Electric Power Systems.** IEEE Std 519-2014 (Revision of IEEE Std 519-1992), pp. 1-29, March, 2014.

IEEE 1459. **Standard Definitions for the Measurement of Electric Power Quantities Under Sinusoidal, Nonsinusoidal, Balanced, or Unbalanced Conditions.** IEEE Std 1459-2010 (Revision of IEEE Std 1459-2000), pp. 1-50, March, 2010.

JIN, D.-G.; CHOI, J.-C.; WON, D.-J.; LEE, H.-J.; CHAE, W.-K.; PARK, J.-S. **A Practical Protection Coordination Strategy Applied to Secondary and Facility Microgrids.** Energies 2012, 5, 3248-3265. <https://doi.org/10.3390/en5093248>

KHADKIKAR, V. **Enhancing Electric Power Quality Using UPQC: A Comprehensive Overview.** IEEE Transactions on Power Electronics, v. 27, n. 5, p. 2284-2297, 2012.

KHORASANI, P. G.; JOORABIAN, M.; SEIFOSSADAT, S. G. **Smart grid realization with introducing unified power quality conditioner integrated with DC microgrid.** Electric Power Systems Research, v. 151, p. 68-85, 2017/10/01/ 2017.

LASSETER, B. **Microgrids** [distributed power generation]. 2001 IEEE Power Engineering Society Winter Meeting. Conference Proceedings, 2001, pp. 146-149 vol.1.

LASSETER, R. H. **MicroGrids**, 2002 IEEE Power Engineering Society Winter Meeting. Conference Proceedings (Cat. No.02CH37309), 2002, pp. 305-308 vol.1.

MAJUMDER, R. **A Hybrid Microgrid With DC Connection at Back to Back Converters.** IEEE Transactions on Smart Grid, v. 5, n. 1, p. 251-259, 2014.

MAJUMDER, R.; GHOSH, A.; LEDWICH, G.; ZARE, F. **"Power Management and Power Flow Control With Back-to-Back Converters in a Utility Connected Microgrid,"** in IEEE Transactions on Power Systems, vol. 25, no. 2, pp. 821-834, May 2010.

MALEKI, H.; KHEDERZADEH, M.; ASGHARIAN, V.; USTA, O. **"Managing microgrid power generation by using back to back voltage source convertor,"** IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies, Europe, pp. 1-6, 2014.

MERWE, J. W. V. D.; DU MOUTON, H. **The Solid-State Transformer Concept: A New Era in Power Distribution,"** in AFRICON 2009, 2009.

MICALLEF, A. et al. **Single-Phase Microgrid With Seamless Transition Capabilities Between Modes of Operation**. IEEE Transactions on Smart Grid, v. 6, n. 6, p. 2736-2745, 2015.

MOHAN, Ned. **Eletrônica de Potência: curso introdutório**. – 1. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2014.

NAIEM, A. F.; HEGAZY Y. G.; ABDELAZIZ, A. Y.; ELSHARKAWY M. **A classification technique for recloser-fuse coordination in distribution systems with distributed generation**. Power Delivery, IEEE Transactions on, v. 27, n. 1, p. 176-185, 2012.

NIKKHAJOEI, H. LASSETER, R. H. **Microgrid Protection**. 2007 IEEE Power Engineering Society General Meeting, pp. 1-6, 2007.

NUTKANI, I. U.; LOH, P. C.; BLAABJERG, F. **Distributed Operation of Interlinked AC Microgrids with Dynamic Active and Reactive Power Tuning**. IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 49, no. 5, pp. 2188-2196, Sept.-Oct. 2013.

ORDONO, ANDER. UNAMUNO, ENEKO. BARRENA, JON ANDONI. PANIAGUA, JULEN. **Interlinking converters and their contribution to primary regulation: a review**, International Journal of Electrical Power & Energy Systems, Volume 111, 2019, Pages 44-57.

PATRAO, I. et al. **Microgrid architectures for low voltage distributed generation**. Renewable and Sustainable Energy Reviews, v. 43, p. 415-424, 2015.

PLANAS, E. et al. **AC and DC technology in microgrids: A review**. Renewable and Sustainable Energy Reviews, v. 43, p. 726-749, 2015.

RAJESH, K. S. DASH, S.S. RAJAGOPAL, RAGAM. SRIDHAR, R. **A review on control of ac microgrid**, Renewable and Sustainable Energy Reviews, Volume 71, 2017, Pages 814-819.

RIBEIRO, R. L. d. A. et al. **A Robust DC-Link Voltage Control Strategy to Enhance the Performance of Shunt Active Power Filters Without Harmonic Detection Schemes**. IEEE Transactions on Industrial Electronics, v. 62, n. 2, p. 803–813, 2015.

ROBBA, E. J. **Introdução a sistemas elétricos de potência – componentes simétricas – 2a edição rev. e ampl.** – São Paulo: Blucher, 2000.

RODRIGUES WA, SANTANA RAS, COTA APL, OLIVEIRA TR, MORAIS LMF, CORTIZO PC. **Integration of solid state transformer with DC microgrid system**. In: 2016 IEEE 2nd annual southern power electronics conference, SPEC, 2016; 2016. p. 1–6.

SANKARAN, C. **Power Quality**. 1st edition. CRC Press, 2019.

SEKHAVATMANESH, H.; MOKHTARI, H.; HAMZEH, M.; ASBAFKAN, A. **"Power and voltage control in a grid-connected microgrid system with a back-to-back converter"**. The 6th Power Electronics, Drive Systems & Technologies Conference (PEDSTC2015), pp. 468-473, 2015.

SHALUKHO, A. V.; LIPUZHIN, I. A. VOROSHILOV, A. A. **Power Quality in Microgrids with Distributed Generation**. 2019 International Ural Conference on Electrical Power Engineering (UralCon), 2019, pp. 54-58.

SILVA, S. A. O. da. **Sistemas de Energia Ininterrupta Line interactive Trifásicos com Compensação Ativa de Potência Série e Paralela**. 2001. (Tese). Universidade Federal de Minas Gerais.

SILVA, S. A. O. et al. **A three-phase line-interactive UPS system implementation with series-parallel active power-line conditioning capabilities**. IEEE Transactions on Industry Applications, v. 38, n. 6, p. 1581-1590, 2002.

SILVA, S. A. O. DA. NOVOCHADLO, R. MODESTO, R. A. **Single-phase PLL structure using modified p-q theory for utility connected systems**. 2008 IEEE Power Electronics Specialists Conference, 2008.

SREENIVASULU, J.; RAJASEKHAR, S.; ALAGAPPAN, Pandian; VARMA, P. **An Integration of dual UPQC controller for power quality compensation by extending its voltage regulation at grid side as a STATCOM**. IOP: Conference Series. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2020.

SUN, K. et al. **Parallel Operation of Bidirectional Interfacing Converters in a Hybrid AC/DC Microgrid Under Unbalanced Grid Voltage Conditions**. IEEE Transactions on Power Electronics, v. 32, n. 3, p. 1872-1884, 2017.

SUSANTO, J.; SHAHNIA, F.; GHOSH, A.; RAJAKARUNA, S. **"Interconnected microgrids via back-to-back converters for dynamic frequency support"**. 2014 Australasian Universities Power Engineering Conference (AUPEC), pp. 1-6, 2014.

UNAMUNO, E.; BARRENA, J. A. **Hybrid ac/dc microgrids – Part I: Review and classification of topologies**. Renewable and Sustainable Energy Reviews, v. 52, p. 1251-1259, 2015.

VASCONCELOS, H. et al. **Advanced Control Solutions for Operating Isolated Power Systems: Examining the Portuguese islands**. IEEE Electrification Magazine, v. 3, n. 1, p. 25 – 35, 2015.

XU, YE. SHI, ZHAO-HONG. WANG, JIN-QUAN. HOU, PENG-FEI. **Discussion on the Factors Affecting the Stability of Microgrid Based on Distributed Power Supply**. Energy and Power Engineering, 2013, p. 1344-1346.

ZAHIRA, R.; LAKSHMI, D.; RAVI, C.N. **Power Quality Issues in Microgrid and its Solutions**. Book Chapter - Microgrid Technologies. Beverly, MA 01915, USA, 2021, p. 255-286.

ZHAO, B. SONG, Q. LIU, W. **Power characterization of isolated bidirectional dual-active-bridge dc-dc converter with dual-phase-shift control**. IEEE Trans. Power Electron., vol. 27, no. 9, pp. 4172–4176, 2012.

ZHOU, N.; YUAN, C.; WANG, Q. "**Control strategies for microgrid power quality enhancement with back-to-back converters connected to a distribution network**". 2012 IEEE 15th International Conference on Harmonics and Quality of Power, pp. 384-389, 2012.

ZOA, Y.; SASAKI, H.; YORINO, N.; KAWAHARA, K.; LIU, C. C. "**An interaction problem of distributed generators installed in a MicroGrid**". Proceedings of the IEEE International Conference on Electric Utility Deregulation, Restructuring and Power Technologies, vol. 2, pp. 795-799, Hong Kong, April 2004.