

UNIVERSIDADE DO ESTADO DE SANTA CATARINA – UDESC
CENTRO DE CIÊNCIAS TECNOLÓGICAS – CCT
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

MATHEUS MONTAGNER

**CONVERSOR iUPQC MULTIFUNCIONAL PARA OPERAÇÃO EM
MICRORREDES DE ENERGIA**

JOINVILLE

2022

MATHEUS MONTAGNER

**CONVERSOR IUPQC MULTIFUNCIONAL PARA OPERAÇÃO EM
MICRORREDES DE ENERGIA**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica do Centro de Ciências Tecnológicas da Universidade do Estado de Santa Catarina, como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Elétrica.
Orientador: Prof. Dr. Marcello Mezaroba.
Coorientador: Prof. Dr. Cassiano Rech.

JOINVILLE

2022

FICHA CATALOGRÁFICA

**Ficha catalográfica elaborada pelo programa de geração automática da
Biblioteca Setorial do CCT/UEDESC,
com os dados fornecidos pelo(a) autor(a)**

Montagner, Matheus
CONVERSOR iUPQC MULTIFUNCIONAL PARA
OPERAÇÃO EM MICRORREDES DE ENERGIA / Matheus
Montagner. -- 2023.
150 p.

Orientador: Marcello Mezaroba
Coorientador: Cassiano Rech
Dissertação (mestrado) -- Universidade do Estado de
Santa Catarina, Centro de Ciências Tecnológicas, Programa
de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Joinville, 2023.

1. iUPQC. 2. microrredes. 3. CATC. 4. conversores
multifuncionais. I. Mezaroba, Marcello. II. Rech, Cassiano. III.
Universidade do Estado de Santa Catarina, Centro de
Ciências Tecnológicas, Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Elétrica. IV. Título.

MATHEUS MONTAGNER

**CONVERSOR IUPQC MULTIFUNCIONAL PARA OPERAÇÃO EM
MICRORREDES DE ENERGIA**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica do Centro de Ciências Tecnológicas da Universidade do Estado de Santa Catarina, como requisito parcial para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia Elétrica.
Orientador: Prof. Dr. Marcello Mezaroba.
Coorientador: Prof. Dr. Cassiano Rech.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Marcello Mezaroba
CCT/UDESC (presidente/orientador)

Membros:

Prof. Dr. Francisco de Assis dos Santos Neves
Universidade Federal de Pernambuco

Prof. Dr. Felipe Joel Zimann
Centro Universitário Católica de Santa Catarina

Prof. Dr. Cassiano Rech
Universidade Federal de Santa Maria

Prof. Dr. Alessandro Luiz Batschauer
CCT/UDESC

Joinville, 24 de novembro de 2022.

Aos estudantes da Universidade do Estado
de Santa Catarina, pela inspiração de
sempre!.

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao meu orientador, Professor Marcello Mezaroba, por aceitar conduzir o meu trabalho de pesquisa e por todo o apoio concedido no desenvolvimento desse trabalho.

A todos os meus professores do curso de Engenharia Elétrica da Universidade do Estado de Santa Catarina – UDESC, pela excelência da qualidade técnica de cada um.

A minha noiva, Gabrielle de Melo Ferreira, por todo o apoio e pela companhia durante as várias horas dedicadas a esse trabalho.

Aos colegas Eduardo Brietzig dos Prazeres e Lucas Silva Sales do Nascimento por todo o apoio na montagem do protótipo e dos setups para realização dos testes.

Aos meus pais que sempre estiveram ao meu lado me apoiando ao longo de toda a minha trajetória. Sou grato à minha família pelo apoio que sempre me deram durante toda a minha vida.

“Gostaria que você soubesse que existe dentro de si uma força capaz de mudar sua vida. Basta que lute e aguarde um novo amanhecer.” (Margaret Thatcher)

RESUMO

O conversor unificado de qualidade de energia dual (iUPQC) originalmente foi concebido para operar como filtro ativo. Porém, nesse trabalho avaliou-se o conversor iUPQC operando como conversor multifuncional de interface para microrredes de energia (M-iUPQC). Nesse trabalho é apresentada uma análise qualitativa e quantitativa do fluxo de potência dos conversores do M-iUPQC na operação como conversor de interface e com a capacidade de fazer a injeção ou absorção de reativos da rede. Além disso, na análise desenvolvida, avaliou-se a eficácia da técnica do Controle Ativo do Ângulo de Carga (CATC) para fazer o compartilhamento e equalização da potência processada pelos conversores do iUPQC. Obteve-se um conjunto de equações que descrevem o fluxo de potência no conversor iUPQC estudado no presente trabalho. Validaram-se as equações obtidas via simulação numérica e resultados experimentais. Simulações e ensaios experimentais para validar o funcionamento do conversor M-iUPQC na operação como conversor de interface também estão apresentados.

Palavras-chave: iUPQC; microrredes; CATC; conversores multifuncionais.

ABSTRACT

The Unified Dual Power Quality Converter (iUPQC) was originally designed to operate as an active filter. However, in this work the iUPQC converter operating as a multifunctional interface converter for microgrids (M-iUPQC) was evaluated. This work presents a qualitative and quantitative analysis of the M-iUPQC converters power flow operating as an utility interface and with the function to inject or absorb reactive power from the grid. In addition, in this analysis, the effectiveness of the power angle control technique to share and equalize the power processed by each converter of the iUPQC was evaluated. A set of equations that describe the power flow in the M-iUPQC converter studied in this work was obtained. The equations obtained were validated through numerical simulation and experimental results. Simulations and experimental tests to validate the operation of the M-iUPQC converter in operation as an interface converter are also presented.

Keywords: iUPQC; Microgrids; power angle control; multifunctional converters.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Conversor de interface para microrredes de energia	15
Figura 2 – Diagrama de blocos geral do iUPQC	16
Figura 3 – Diagrama de blocos e principais formas de onda do UPQC.	21
Figura 4 – Diagrama de blocos e principais formas de onda do iUPQC.	22
Figura 5 – Inversores trifásicos que compõe a estrutura de potência do iUPQC	24
Figura 6 – Esquema de controle do iUPQC clássico utilizado como referência.....	27
Figura 7 – Esquema de controle do M-iUPQC utilizado nesse trabalho.....	33
Figura 8 - Potência aparente normalizada processada pelo (a) FAS e (b) FAP em um conversor iUPQC clássico.	37
Figura 9 – Polaridade de sinais adotada.	40
Figura 10 – Diagrama fasorial de um conversor M-iUPQC para cenário com fluxo de potência ativa da rede para a microrrede. (a) vetores em preto: θ e δ igual a 0° , vetores em verde θ positivo e δ igual a 0° , vetores em azul: θ e δ positivos. (b) vetores em preto: θ e δ igual a 0° , vetores em verde: vetores em verde θ negativo e δ igual a 0°	44
Figura 11 – Fluxo de potência ativa entre os conversores do iUPQC para situações de (a) subtensão e (b) sobretensão na tensão do PAC.....	45
Figura 12 – Diagrama fasorial de um conversor M-iUPQC para cenário com fluxo de potência ativa da microrrede para a rede. (a) vetores em preto: θ e δ igual a 0° , vetores em verde θ negativo e δ igual a 0° , vetores em azul: θ e δ negativos.	47
Figura 13 – Esquema elétrico do sistema simulado para a validação funcional.....	59
Figura 14 – Formas de onda simuladas da (a) tensão (50 V/div) e (b) corrente (2 A/div) no PAC para S1 e S2 abertas e θ e δ igual a 0° . Escala de tempo de 5 ms/div.	62
Figura 15 – Formas de onda simuladas da (a) tensão (50 V/div) e (b) corrente (2 A/div) na microrrede para S1 e S2 abertas e θ e δ igual a 0° . Escala de tempo de 5 ms/div.	62
Figura 16 – Formas de onda simuladas da (a) tensão no PAC, no FAS e na microrrede (50 V/div.). (b) forma de onda da corrente no lado primário do transformador do FAS, FAP e microrrede (2,5 A/div) para S1 e S2 abertas e θ e δ igual a 0° . Escala de tempo de 10 ms/div.	64

Figura 17 – Formas de onda simuladas da (a) tensão (50 V/div) e (b) corrente (2 A/div) no PAC para S1 e S2 abertas. θ igual a 30° e δ igual a 20° . Escala de tempo de 5 ms/div.	65
Figura 18 – Formas de onda simuladas da (a) tensão no PAC, no FAS e na microrrede (50 V/div.) e (b) forma de onda da corrente no lado primário do transformador do FAS, FAP e microrrede (2,5 A/div) para S1 e S2 abertas. θ igual a 30° e δ igual a 20° . Escala de tempo de 5 ms/div.	66
Figura 19 – Formas de onda simuladas da (a) tensão (50 V/div) e (b) corrente (2 A/div) no PAC para S1 e S2 fechadas. θ e δ igual a 0° . Escala de tempo de 5 ms/div.	68
Figura 20 – Formas de onda simuladas da (a) tensão (50 V/div) e (b) corrente (2,5 A/div) da microrrede para S1 e S2 fechadas. θ e δ igual a 0° . Escala de tempo de 5 ms/div.	68
Figura 21 – Formas de onda simuladas da (a) tensão no PAC, no FAS e na microrrede (50 V/div.). (b) forma de onda da corrente no lado primário do transformador do FAS, FAP e microrrede (2,5 A/div) para S1 e S2 fechadas. θ e δ iguais a 0° . Escala de tempo de 5 ms/div.	70
Figura 22 – Formas de onda simuladas da (a) tensão (50 V/div) e (b) corrente (2 A/div) no PAC para S1 e S2 fechadas. θ igual a -30° e δ igual a -20° . Escala de tempo de 5 ms/div.	71
Figura 23 – Formas de onda simuladas da (a) tensão no PAC, no FAS e na microrrede (50 V/div.). (b) forma de onda da corrente no lado primário do transformador do FAS, FAP e microrrede (2,5 A/div) para S1 e S2 fechadas. θ igual a -30° e δ igual a -20° . Escala de tempo de 5 ms/div.	72
Figura 24 – Formas de onda simuladas da (a) sinal do controlador da tensão total do barramento CC (0,5 V/div.), (b) tensão total do barramento CC (5 V/div) e (c) tensão da microrrede (50 V/div) na simulação do transitório após o chaveamento de S1. Escala de tempo de 50 ms/div.	74
Figura 25 – Formas de onda simuladas da (a) tensão no PAC (50 V/div.), (b) corrente no PAC (2 A/div) na simulação do transitório após o chaveamento de S1. Escala de tempo de 50 ms/div.	74
Figura 26 – Formas de onda simuladas da (a) sinal do controlador da tensão total do barramento CC (0,5 V/div.), (b) tensão total do barramento CC (10 V/div)	

e (c) tensão da microrrede (50 V/div) na simulação do transitório após o chaveamento de S2. Escala de tempo de 50 ms/div. Figura 27 – Formas de onda simuladas da (a) tensão no PAC (50 V/div.), (b) corrente no PAC (2 A/div) na simulação do transitório após o chaveamento de S2. Escala de tempo de 50 ms/div. Figura 28 - Resultados calculados (linhas contínuas) e simulados (pontos) das componentes fundamentais de potência ativa, reativa e aparente do FAS, (a), (b) e (c), e do FAP, (d), (e) e (f) respectivamente, para o cenário 1. Figura 29 - Resultados calculados (linhas contínuas) e simulados (pontos) das componentes não-fundamentais de potência do (a) FAS e (b) FAP e potência aparente do (c) FAS e (d) FAP, para o cenário 1. Figura 30 - Resultados calculados (linhas contínuas) e simulados (pontos) das componentes fundamentais de potência ativa, reativa e aparente do FAS, (a), (b) e (c), e do FAP, (d), (e) e (f) respectivamente, para o cenário 2. Figura 31 - Resultados calculados (linhas contínuas) e simulados (pontos) das componentes não-fundamentais de potência do (a) FAS e (b) FAP e potência aparente do (c) FAS e (d) FAP, para o cenário 2. Figura 32 - Resultados simulados (linhas contínuas) e calculados (marcadores em cruz) das componentes fundamentais de potência ativa, (a), (b) e (c), reativa, (d), (e) e (f) e aparente, (g), (h) e (i), do FAS no cenário 3. Figura 33 - Resultados simulados (linhas contínuas) e calculados (pontos) das componentes fundamentais de potência ativa, (a), (b) e (c), reativa, (d), (e) e (f) e aparente, (g), (h) e (i), do FAP no cenário 3. Figura 34 - Resultados simulados e calculados da potência aparente nas fases (a) A, (b) B e (c) C. Linhas tracejadas e pontilhadas são os resultados calculados do FAS e do FAP, respectivamente. Marcadores em cruz e circulares são respectivamente os resultados simulados do FAS e do FAP. Figura 35 - Resultados calculados (linhas contínuas) e simulados (pontos) das componentes fundamentais de potência ativa, reativa e aparente do FAS, (a), (b) e (c), e do FAP, (d), (e) e (f) respectivamente, para o cenário 4.	76 76 81 83 86 87 89 90 91 94
--	---

Figura 36 - Resultados calculados (linhas contínuas) e simulados (pontos) das componentes não-fundamentais de potência do (a) FAS e (b) FAP e potência aparente do (c) FAS e (d) FAP, para o cenário 4.	95
Figura 37 – Formas de onda da potência ativa (a), reativa (b) e aparente (c) do FAS e do FAP durante o transitório de variação dos ângulos θ e δ (d). Escala de tempo de 1 s/div. Escala das variáveis de potência em valores por unidade.	96
Figura 38 – Protótipo de conversor M-iUPQC montado.	99
Figura 39 – Esquema de potência dos conversores SPCIT 1000-60-20.	100
Figura 40 – Esquema eletrônico parcial da placa de controle do FAS.	101
Figura 41 – Placa de controle do FAS utilizada no protótipo.	102
Figura 42 – Esquema eletrônico parcial da placa de controle do FAP.	102
Figura 43 – Placa de controle do FAP utilizada no protótipo.	103
Figura 44 – IHM e gerador de referências utilizado no protótipo.	103
Figura 45 – Placa com os circuitos de controle do nível de tensão CC na tensão da microrrede.	105
Figura 46 – Esquemático parcial da placa de controle do nível CC da tensão da microrrede.	106
Figura 47 – Fonte auxiliar utilizada no protótipo.	107
Figura 48 – Diagrama do setup de testes montado para a realização dos testes. ...	108
Figura 49 – Setup de testes montado.	108
Figura 50 – Formas de onda medidas da tensão (100 V/div.) e corrente (5 A/div.) na microrrede com S_H aberta, θ e δ igual a 0° . Escala de tempo de 4 ms/div.	111
Figura 51 – Formas de onda medidas da tensão (100 V/div) e corrente (5 A/div) no PAC para S_H aberta e θ e δ igual a 0° . Escala de tempo de 4 ms/div.	112
Figura 52 – Formas de onda medidas da tensão (100 V/div) no PAC, no FAS e na microrrede, e das correntes (5 A/div) no PAC, no FAP e na microrrede com S_H aberta e θ e δ igual a 0° . Escala de tempo de 4 ms/div.	114
Figura 53 – Formas de onda medidas da tensão (100 V/div) e corrente (3 A/div) no PAC para S_H aberta e θ e δ iguais a 20° . Escala de tempo de 4 ms/div.	115

Figura 54 – Formas de onda medidas da tensão (100 V/div) no PAC, no FAS e na microrrede, e das correntes (5 A/div) no PAC, no FAP e na microrrede com S_H aberta e θ e δ igual a 20° . Escala de tempo de 4 ms/div.	116
Figura 55 – Formas de onda medidas da tensão (100 V/div) e corrente (2 A/div) no PAC para S_H fechada e θ e δ igual a 0° . Escala de tempo de 4 ms/div.	118
Figura 56 – Formas de onda medidas da tensão (100 V/div) e corrente (2 A/div nas fases A e C e 2,5 A/div na fase B) na microrrede com S_H fechada e θ e δ igual a 0° . Escala de tempo de 4 ms/div.	118
Figura 57 – Formas de onda medidas da tensão (100 V/div) e corrente no PAC (2 A/div), no FAP (2,5 A/div) e na microrrede (2 A/div) com S_H fechada e θ e δ igual a 0° . Escala de tempo de 4 ms/div.	120
Figura 58 – Formas de onda medidas da tensão (100 V/div) e corrente (2 A/div) no PAC para S_H fechada e θ e δ igual a -20° . Escala de tempo de 4 ms/div.	121
Figura 59 – Formas de onda medidas da tensão do controlador da tensão total do barramento CC (1 V/div.), tensão total do barramento CC (55 V/div) e corrente no PAC (1,5 A/div). Teste de degrau de inserção de 380 W de potência ativa. Escala de tempo de 100 ms/div.	123
Figura 60 – Formas de onda medidas da tensão na microrrede (100 V/div) e corrente no PAC (2 A/div) no teste de degrau de inserção de 380 W de potência ativa. Escala de tempo de 200 ms/div.	123
Figura 61 – Formas de onda medidas da tensão do controlador da tensão total do barramento CC (1 V/div.), tensão total do barramento CC (60 V/div) e corrente no PAC (1,5 A/div). Teste de degrau de inserção de 1,93 kW de potência ativa. Escala de tempo de 100 ms/div.	125
Figura 62 – Formas de onda medidas da tensão na microrrede (100 V/div) e corrente no PAC (2,5 A/div) no teste de degrau de inserção de 1,93 kW de potência ativa. Escala de tempo de 200 ms/div.	125
Figura 63 - Resultados calculados (linhas contínuas e pontilhadas) e medidos experimentalmente (pontos) das componentes fundamentais de potência ativa, reativa e aparente do FAS, (a), (b) e (c), e do FAP, (d), (e) e (f) respectivamente, para o cenário 1.	129

Figura 64 - Resultados calculados (linhas contínuas) e medidos (pontos) das componentes não-fundamentais de potência do (a) FAS e (b) FAP e potência aparente do (c) FAS e (d) FAP, para o cenário 1.....	131
Figura 65 - Resultados calculados (linhas contínuas e pontilhadas) e medidos experimentalmente (pontos) das componentes fundamentais de potência ativa, reativa e aparente do FAS, (a), (b) e (c), e do FAP, (d), (e) e (f) respectivamente, para o cenário 2.....	134
Figura 66 - Resultados calculados (linhas contínuas) e medidos (pontos) das componentes não-fundamentais de potência do (a) FAS e (b) FAP e potência aparente do (c) FAS e (d) FAP, para o cenário 2.....	135
Figura 67 - Resultados calculados (linhas contínuas) e medidos (pontos) das componentes fundamentais de potência ativa, (a), (b) e (c), reativa, (d), (e) e (f) e aparente, (g), (h) e (i) do FAS no cenário 3.	137
Figura 68 - Resultados calculados (linhas contínuas) e medidos (pontos) das componentes fundamentais de potência ativa, (a), (b) e (c), reativa, (d), (e) e (f) e aparente, (g), (h) e (i) do FAP no cenário 3.	137
Figura 69 - Resultados calculados (linhas contínuas) e medidos (pontos) das componentes não-fundamentais de potência, (a), (b) e (c), e potência aparente total, (d), (e) e (f), do FAS no cenário 3.	139
Figura 70 - Resultados calculados (linhas contínuas e pontilhadas) e medidos (pontos) das componentes não-fundamentais de potência, (a), (b) e (c), e potência aparente total, (d), (e) e (f), do FAP no cenário 3.....	139
Figura 71 - Resultados calculados (linhas contínuas) e medidos (pontos) das componentes fundamentais de potência ativa, reativa e aparente do FAS, (a), (b) e (c), e do FAP, (d), (e) e (f) respectivamente, para o cenário 4.....	142
Figura 72 - Resultados calculados (linhas contínuas) e medidos (pontos) das componentes não-fundamentais de potência do (a) FAS e (b) FAP e potência aparente do (c) FAS e (d) FAP, para o cenário 4.....	143

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Parâmetros para o projeto dos elementos de potência do conversor.....	25
Tabela 2 – Equações e valores obtidos para os elementos de potência do conversor utilizado no presente trabalho	25
Tabela 3 – Ganhos dos sensores de tensão e corrente utilizados	30
Tabela 4 – FT dos controladores projetados e FTMA's utilizadas no projeto.....	30
Tabela 5 – Frequência de cruzamento por 0 dB e margem de fase das malhas de controle projetadas	31
Tabela 6 – Equações obtidas que descrevem o fluxo de potência de um conversor M-iUPQC	57
Tabela 7 – Parâmetros utilizados na simulação para validação funcional do conversor M-iUPQC.....	60
Tabela 8 – DHT da tensão e corrente da microrrede e do PAC medida para a simulação feita com para S1 e S2 abertas e θ e δ igual a 0°	63
Tabela 9 – DHT da tensão e corrente da microrrede e do PAC medida para a simulação feita com para S1 e S2 abertas, θ igual a 30° e δ igual a 20°	66
Tabela 10 – DHT da tensão e corrente da microrrede e do PAC medida para a simulação feita com para S1 e S2 fechadas, θ e δ igual a 0°	69
Tabela 11 – DHT da tensão na microrrede e da corrente do PAC medida para a simulação feita com para S1 e S2 fechadas, θ igual a -30° e δ igual a -20°	71
Tabela 12 – Variáveis de potência medida e o índice da respectiva equação	78
Tabela 13 – Parâmetros utilizados na simulação do cenário 1 para validação das equações	79
Tabela 14 – Variáveis de entrada para as equações medidas nas simulações do cenário 1.....	80
Tabela 15 – Parâmetros utilizados na simulação do cenário 2 para validação das equações	84
Tabela 16 – Variáveis de entrada para as equações medidas nas simulações do cenário 2.....	85
Tabela 17 – Parâmetros utilizados na simulação do cenário 3 para validação das equações	88

Tabela 18 – Variáveis de entrada para as equações medidas nas simulações do cenário 3.	88
Tabela 19 – Parâmetros utilizados na simulação do cenário 4 para validação das equações	92
Tabela 20 – Variáveis de entrada para as equações medidas nas simulações do cenário 4.	93
Tabela 21 – Identificação dos componentes do protótipo do M-iUPQC montado	99
Tabela 22 – Identificação dos componentes setup de teste montado.	109
Tabela 23 – Parâmetros utilizados para validação funcional do conversor M-iUPQC para ensaio com o fluxo de potência ativa da rede para a microrrede.	111
Tabela 24 – DHT medida da tensão e corrente da microrrede e do PAC para o ensaio feito com S_H aberta e θ e δ igual a 0°	113
Tabela 25 – DHT medida da tensão da microrrede e da corrente do PAC para o ensaio feito com S_H aberta e θ e δ igual a 20°	115
Tabela 26 – Parâmetros utilizados para validação funcional do conversor M-iUPQC para setup com o fluxo de potência ativa da microrrede para a rede ...	117
Tabela 27 – DHT medida da tensão e corrente da microrrede e do PAC para o ensaio feito com S_H fechada e θ e δ igual a 0°	119
Tabela 28 – DHT medida da tensão da microrrede e da corrente do PAC para o ensaio feito com S_H fechada e θ e δ igual a -20°	121
Tabela 29 – Parâmetros utilizados no ensaio do cenário 1 para validação das equações	128
Tabela 30 – Variáveis de entrada para as equações que foram medidas nos ensaios do cenário 1.	128
Tabela 31 – Parâmetros utilizados no ensaio do cenário 2 para validação das equações	132
Tabela 32 – Variáveis de entrada para as equações que foram medidas nos ensaios do cenário 2.	133
Tabela 33 – Valores nominais dos parâmetros utilizados nos ensaios do cenário 3 para validação das equações	136
Tabela 34 – Variáveis de entrada para as equações que foram experimentalmente medidas nos ensaios do cenário 3.	136
Tabela 35 – Parâmetros utilizados no ensaio do cenário 4 para validação das equações	141

Tabela 36 – Variáveis de entrada para as equações que foram experimentalmente medidas nos ensaios do cenário 4.	141
--	-----

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AF	Alta Frequência
CATC	Controle Ativo do Ângulo de Carga
DHT	Distorção Harmônica Total
DHTi	Distorção Harmônica Total de Corrente
DSTATCOM	<i>Distribution Static Synchronous Compensator</i>
FAP	Filtro Ativo Paralelo
FD	Fator de Deslocamento
FT	Função de Transferência
FTMA	Função de Transferência de Malha Aberta
IEEE	<i>Institute of Electrical and Electronics Engineers</i>
iUPQC	<i>Dual Unified Power Quality Conditioner</i>
M-iUPQC	Conversor iUPQC Multifuncional de Interface Para Microrredes
PAC	Ponto de Acoplamento Comum
PLL	<i>Phase Locked Loop</i>
PWM	<i>Pulse Width Modulation</i>
STATCOM	<i>Static Synchronous Compensator</i>
UPQC	<i>Unified Power Quality Conditioner</i>

LISTA DE SÍMBOLOS

$\overrightarrow{V_{1fsX}}$	Vetor da componente fundamental da tensão do FAS
C_{B1}	Capacitor 1 do barramento CC
C_{B2}	Capacitor 2 do barramento CC
C_{fp}	Capacitor de filtro de alta frequência do FAP
$C_{fp}(s)$	Controlador de tensão do FAP
C_{fpX}	Capacitor de filtro de alta frequência do FAP na respectiva fase em que o X pode ser igual a A, B ou C
C_{fs}	Capacitor de filtro de alta frequência do FAS
C_{fsX}	Capacitor de filtro de alta frequência do FAS na respectiva fase em que o X pode ser igual a A, B ou C
$C_{ifs}(s)$	Controlador de corrente do FAS
$C_{vd}(s)$	Controlador da tensão de desequilíbrio do barramento CC
$C_{vt}(s)$	Controlador da tensão total do barramento CC
DHT_{iudX}	Distorção harmônica total da corrente da microrrede na respectiva fase
DHT_{vpcX}	Distorção harmônica total da tensão do PAC na respectiva fase
f_{nfp}	Frequência de ressonância do filtro de alta frequência do FAP
f_{rd}	Frequência da rede
f_{sw}	Frequência de comutação
I_{1fpX}	Corrente eficaz da componente fundamental da corrente do FAP na respectiva fase
I_{1udX}	Corrente eficaz da componente fundamental da corrente da microrrede na respectiva fase
i_{fp}	Sinal de corrente no FAP
i_{fpX}	Sinal de corrente no FAP na respectiva fase em que o X pode ser igual a A, B ou C
i_{fs}	Sinal de corrente no lado primário do transformador do FAS
i_{fsX}^*	Sinal de referência da malha de controle de corrente do FAS na respectiva fase em que o X pode ser igual a A, B ou C
i_{fsX_p}	Sinal de corrente no lado primário do transformador do FAS na respectiva fase em que o X pode ser igual a A, B ou C

i_{fsX_s}	Sinal de corrente no lado secundário do transformador do FAS na respectiva fase em que X pode ser igual A, B ou C
$i_{fsX'}$	Sinal de realimentação da malha de controle de corrente do FAS em que o X pode ser igual a A, B ou C
I_{HfpX}	Somatório dos valores eficazes das componentes não-fundamentais da corrente no FAP na respectiva fase
I_{HudX}	Somatório dos valores eficazes das componentes não-fundamentais da corrente da microrrede na respectiva fase
i_{ld}	Sinal de corrente na carga
i_{pc}	Sinal de corrente no PAC
I_{pc}	Corrente eficaz corrente no PAC
i_{pcX}	Sinal de corrente do PAC na respectiva fase em que o X pode ser igual a A, B ou C
i_{tfsX^*}	Componente CA do sinal de referência da malha de controle de corrente do FAS onde o X pode ser igual a A, B ou C
i_{ud}	Sinal de corrente da microrrede
i_{udX}	Sinal de corrente da microrrede na respectiva fase em que o X pode ser igual a A, B ou C
i_{vd}	Sinal de saída do controlador da tensão de desequilíbrio do barramento CC
i_{vt}	Sinal de saída do controlador da tensão total do barramento CC
K_{ifs}	Ganho do sensor de corrente do FAS
K_{vbc}	Ganho do sensor de tensão do barramento CC
K_{vfp}	Ganho do sensor de tensão do FAP
K_{vpc}	Ganho do sensor de tensão do PAC
L_{dfs}	Indutância de dispersão dos transformadores do FAS
L_{fp}	Indutor de filtro de alta frequência do FAP
L_{fpX}	Indutor de filtro de alta frequência do FAP na respectiva fase onde X pode ser igual a A, B ou C
L_{fs}	Indutor de filtro de alta frequência do FAS
L_{fsX}	Indutor de filtro de alta frequência do FAS na respectiva fase onde X pode ser igual a A, B ou C
L_{rd}	Indutância série da rede

ma	Índice de modulação
n_{fs}	Relação de transformação dos transformadores do FAS
n_p	Número de espiras do secundário do transformador
n_s	Número de espiras do primário do transformador
P_{1fpX}	Componente fundamental de potência ativa do FAS
P_{1fsX}	Componente fundamental de potência ativa do FAS
P_{pcT}	Potência ativa total medida no PAC
P_{pcX}	potência ativa na respectiva fase do PAC
P_{udT}	Potência ativa total medida da microrrede
P_{udX}	potência ativa na respectiva fase da microrrede
$Q_{1fp...Q_{6fp}}$	Sinais de comando das chaves do inversor do FAP
Q_{fpX}	Componente fundamental de potência reativa do FAP
$Q_{1fs...Q_{6fs}}$	Sinais de comando das chaves do inversor do FAS
Q_{fsX}	Componente fundamental de potência reativa do FAS
Q_{pcX}	Potência reativa do PAC na respectiva fase
Q_{udX}	Potência reativa da microrrede na respectiva fase
R_{rd}	Resistência série da rede
S_{1fpX}	Componente fundamental da potência aparente do FAP
S_{1fsX}	Componente fundamental da potência aparente do FAS
S_{fpX}	Potência aparente total do FAP na respectiva fase
S_{fsX}	Potência aparente total do FAS na respectiva fase
S_{NfpX}	Componente não-fundamental de potência do FAP na respectiva fase
S_{NfsX}	Componente não-fundamental da potência do FAS na respectiva fase
S_{nom}	Potência nominal do conversor
V_{1fsX}	Tensão eficaz da componente fundamental da tensão no FAS na respectiva fase
V_{1fsX}	Tensão eficaz da componente fundamental da tensão do FAS na respectiva fase
V_{1pcT}	Soma algébrica das componentes fundamentais das tensões do PAC nas fases A, B e C

V_{1pcX}	Tensão eficaz da componente fundamental da tensão no PAC na respectiva fase
V_{1pcX}	Tensão eficaz da componente fundamental da tensão do PAC na respectiva fase
V_B	Tensão do barramento CC
V_{B-}	Sinal de tensão negativo do barramento CC
V_{B+}	Sinal de tensão positivo do barramento CC
V_d	Sinal de tensão para realimentação do controlador de tensão de desequilíbrio do barramento CC
V_{fp}	Sinal de tensão no FAP
V_{fpX}	Sinal de tensão no FAP na respectiva fase onde X pode ser igual a A, B ou C
V_{fs}	Sinal de tensão no FAS
V_{fsX}	Sinal de tensão no FAS na respectiva fase onde X pode ser igual a A, B ou C
V_{HfsX}	Somatório dos valores eficazes das componentes não-fundamentais da tensão no FAS na respectiva fase
V_{HpcX}	Somatório dos valores eficazes das componentes não-fundamentais da tensão no PAC na respectiva fase
V_{Id}	Sinal de tensão na carga
V_{LD}	Sinal constante de referência para definir a amplitude do sinal senoidal de referência para o controlador de tensão do FAP
V_{IdX}	Sinal de tensão na carga na respectiva fase onde X pode ser A, B ou C
V_{IdX^*}	Sinal de referência para o controlador de tensão do FAP no iUPQC clássico na respectiva fase onde X pode ser A, B ou C
$V_{IdX'}$	Sinal de realimentação da tensão da carga na respectiva fase onde X pode ser A, B ou C
V_m	Inverso da tensão de pico da portadora
V_{pc}	Sinal de tensão no PAC
V_{pcX}	Sinal de tensão no PAC na respectiva fase onde X pode ser A, B ou C
V_{rd}	Tensão eficaz de fase da rede

V_{rfX}	Senoide de referência gerada pelo circuito de PLL na respectiva fase onde X pode ser igual a A, B ou C
V_{rud}	Sinal constante de referência para definir a amplitude do sinal senoidal de referência para o controlador de tensão do FAP no M-iUPQC
V_s	Fonte de tensão do alimentador do sistema elétrico
v_t	Sinal de tensão para realimentação do controlador de tensão total do barramento CC
V_{Tcc*}	Sinal de referência para controlador da tensão total do barramento CC
v_{ud}	Sinal de tensão da microrrede
V_{ud}	Tensão eficaz da tensão microrrede
V_{ud}	Tensão eficaz da microrrede
v_{udX}	Sinal de tensão da microrrede na respectiva fase onde X pode ser A, B ou C
V_{udX*}	Sinal de referência para o controlador de tensão do FAP no M-iUPQC na respectiva fase onde X pode ser A, B ou C
$v_{udX'}$	Sinal de realimentação da tensão da microrrede na respectiva fase onde X pode ser A, B ou C
Z_{rd}	Impedância série da rede
β_{1fsX}	Ângulo da componente fundamental da tensão no FAS
δ	Ângulo de defasagem entre a componente fundamental da tensão do PAC e a tensão da microrrede
ΔI_{Lfp}	Ondulação de corrente nos indutores do FAP
ΔI_{Lfs}	Ondulação de corrente nos indutores do FAS
ΔV_B	Ondulação de tensão no barramento CC
θ	Ângulo de defasagem entre a componente fundamental da tensão e a corrente do PAC
φ_{1fpX}	Ângulo da corrente do FAP na respectiva fase
φ_{1udX}	Ângulo da componente fundamental da corrente da microrrede em relação ao ângulo δ da tensão da microrrede
φ_{1udXR}	Ângulo da corrente da microrrede medida em relação a tensão de referência do PAC

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	15
1.1	ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO	19
2	CONDICIONADOR UNIFICADO DE QUALIDADE DE ENERGIA DUAL (IUPQC).....	20
2.1	COMPARATIVO ENTRE OS CONVERSORES UPQC E IUPQC	20
2.2	ESTRUTURA DE POTÊNCIA DO IUPQC.....	23
2.3	ESTRATÉGIA DE CONTROLE BASE PARA O IUPQC.....	26
2.3.1	Projeto dos controladores.....	29
3	CONVERSOR IUPQC MULTIFUNCIONAL DE INTERFACE APLICADO A MICRORREDES DE ENERGIA	32
3.1	IUPQC COMO CONVERSOR MULTIFUNCIONAL DE INTERFACE	32
3.1.1	Função Q no M-IUPQC	34
3.1.2	Função CATC no M-iUPQC	36
4	ANÁLISE DO FLUXO DE POTÊNCIA DO CONVERSOR M-IUPQC	40
4.1	ANÁLISE QUALITATIVA DO FLUXO DE POTÊNCIA DO CONVERSOR M-IUPQC	42
4.1.1	Primeiro cenário: fluxo de potência da rede para a microrrede.....	43
4.1.2	Segundo cenário: fluxo de potência da microrrede para a rede	47
4.1.3	Fluxo de potência das componentes não-fundamentais.....	48
4.2	ANÁLISE QUANTITATIVA DO FLUXO DE POTÊNCIA DO CONVERSOR M-IUPQC	49
4.2.1	Componentes fundamentais de potência	50
4.2.2	Componentes não-fundamentais de potência.....	54
4.2.3	Componentes totais de potência	55
4.2.4	Resumo das equações finais que descrevem o fluxo de potência no M-iUPQC	56
5	RESULTADOS DE SIMULAÇÕES NUMÉRICAS	58
5.1	VALIDAÇÃO FUNCIONAL POR SIMULAÇÕES NUMÉRICAS.....	58
5.1.1	Validação funcional – fluxo de potência ativa da rede para a microrrede.....	61
5.1.2	Validação funcional – fluxo de potência da microrrede para a rede..	67

5.1.3	Resultados de simulações para avaliar a dinâmica do controle no gerenciamento do fluxo de potência ativa entre a rede e a microrrede	73
5.2	SIMULAÇÕES NÚMERICAS PARA AVALIAÇÃO DO FLUXO DE POTÊNCIA DO CONVERSOR M-IUPQC	77
5.2.1	Cenário 1 – Fluxo de potência ativa da rede para a microrrede e cargas da microrrede equilibradas e fator de deslocamento de 0,82	79
5.2.2	Cenário 2 – Fluxo de potência ativa da rede para a microrrede e cargas da microrrede equilibrada e fator de deslocamento de 0,91	84
5.2.3	Cenário 3 – Fluxo de potência ativa da rede para a microrrede e cargas da microrrede desequilibradas	87
5.2.4	Cenário 4 - Fluxo de potência ativa da microrrede para a rede e cargas da microrrede equilibradas	92
5.3	SIMULAÇÕES COM O TRANSITÓRIO DA VARIAÇÃO DOS ÂNGULOS θ E Δ	96
6	RESULTADOS EXPERIMENTAIS.....	98
6.1	MONTAGEM DO PROTÓTIPO	98
6.1.1	Componentes do circuito de potência do FAS e do FAP	100
6.1.2	Placas de controle analógico e comando do FAS e do FAP	100
6.1.3	IHM e gerador de referências do FAS e do FAP	103
6.1.4	Placas de compensação do nível de tensão CC da microrrede	104
6.1.5	Fontes auxiliares	106
6.1.6	Setup montado	107
6.2	VALIDAÇÃO FUNCIONAL EXPERIMENTAL.....	110
6.2.1	Validação funcional experimental – fluxo de potência da rede para a microrrede.....	110
6.2.2	Validação funcional experimental – fluxo de potência da microrrede para a rede	116
6.2.3	Resultados experimentais para avaliar a dinâmica do controle no gerenciamento do fluxo de potência ativa entre a rede e a microrrede	122
6.3	VALIDAÇÃO VIA RESULTADOS EXPERIMENTAIS DO EQUACIONAMENTO DESENVOLVIDO	126

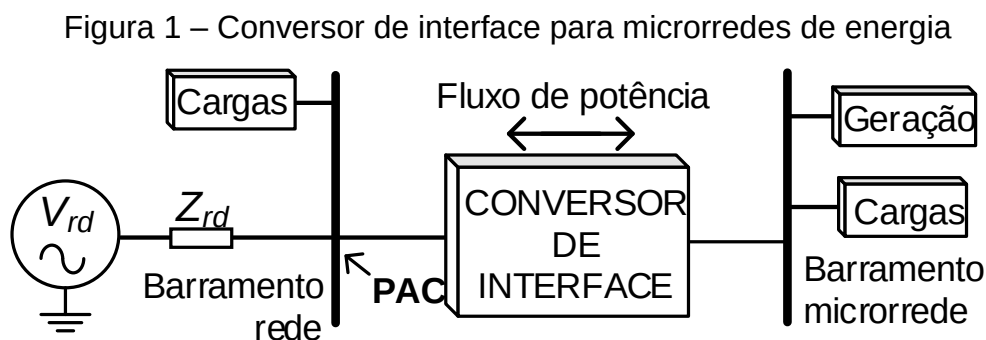
6.3.1	Cenário 1 – Fluxo de potência ativa da rede para a microrrede e cargas da microrrede equilibradas e fator de deslocamento de 0,82	127
6.3.2	Cenário 2 – Fluxo de potência ativa da rede para a microrrede e cargas da microrrede equilibradas	132
6.3.3	Cenário 3 - Fluxo de potência ativa da rede para a microrrede e cargas da microrrede desequilibradas	135
6.3.4	Cenário 4 - Fluxo de potência ativa da microrrede para a rede	140
7	CONCLUSÕES	144
7.1	SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS	145
7.2	PUBLICAÇÕES RESULTANTES DO PRESENTE TRABALHO	146
	REFERÊNCIAS.....	147

1 INTRODUÇÃO

A necessidade de redução da emissão de carbono vem motivando o crescimento da geração de energia elétrica por meio de fontes renováveis. Além disso, a tendência de aumento na demanda de energia elétrica é evidente em razão, principalmente, da crescente eletrificação dos meios de transportes. Nesse cenário, fontes renováveis e distribuídas de energia e microrredes de energia vêm sendo proposto para suprir esse aumento de demanda de energia elétrica bem como a migração dessas para fontes renováveis (ALTAF et al., 2022; REZAEI e UDDIN, 2021; SAEED, 2021; SHAHGHOLIAN, 2021; WU et al, 2019).

Entretanto, em função da intermitência das fontes renováveis, estratégias de controle e topologias de microrrede vêm sendo estudadas e propostas com o objetivo de garantir a operação estável do sistema elétrico (ALTAF et al., 2022; ESPINA et al., 2020; PAREDES; MOLINA; SERRANO, 2020; YAZDANINEJADI, 2019).

Nesse sentido, conversores de interface vêm sendo propostos como uma solução para o controle de microrredes de energia como mostrado nos trabalhos de Machado et al. (2017), Tenti et al. (2014) e Caldognetto, Buso, Tenti (2014). Conversores de interface, como o nome sugere, são conversores conectados entre a rede, em um ponto de acoplamento (PAC) e a microrrede, conforme mostrado na Figura 1.



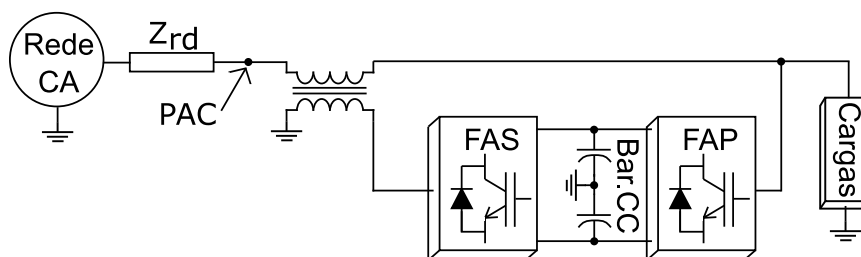
Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

A principal função de conversores de interface é controlar o fluxo de potência ativa entre a rede e a microrrede (CALDOGNETTO; BUSO; TENTI,

2014; MACHADO et al., 2017; TENTI et al., 2014). Isso facilita o controle do sistema elétrico de potência visto que é centralizado no conversor de interface o controle do fluxo de potência de um conjunto de cargas. Além disso, conversores de interface podem ser usados para regular a tensão do lado da microrrede, melhorando a qualidade de energia do lado da microrrede, ou ainda desempenhar funções ancilares com o objetivo de melhorar a qualidade da energia do lado da rede (KHAN; VIJAY; DOOLLA, 2021; TENTI et al., 2014)

O conversor iUPQC, originalmente foi concebido para operar como filtro ativo e é composto pela atuação conjunta de um filtro ativo série (FAS) e um filtro ativo paralelo (FAP) conectados no mesmo barramento CC em uma configuração tipo *back-to-back* (AREDES e FERNANDES, 2009; SANTOS, 2012). Na Figura 2 é mostrado um diagrama simplificado da estrutura de potência de um conversor iUPQC.

Figura 2 – Diagrama de blocos geral do iUPQC



Fonte: Elaborado pelo autor (2022)

Na operação como filtro ativo para a qual esse conversor foi concebido, o iUPQC pode compensar simultaneamente os distúrbios de tensão da rede, fornecendo à carga uma tensão equilibrada e livre de harmônicos, e os distúrbios de corrente da carga de modo que a corrente da rede para o conversor seja senoidal, equilibrada e em fase com a tensão da rede. Também, destaca-se que o FAS é controlado em corrente e controla a corrente de entrada que flui da rede para as cargas (SANTOS, 2012). Com isso, indiretamente o controla-se a potência absorvida da rede para as cargas.

Em função dessas características citadas, nesse trabalho é proposto a utilização do iUPQC como conversor de interface para microrredes de energia pois é possível fazer o controle do fluxo de potência ativa entre a rede e a

microrrede, regular a tensão para a microrrede, melhorando a qualidade de energia da mesma e compensando os distúrbios de corrente das cargas da microrrede, contribuindo com a melhora da qualidade de energia da rede.

Além dessas funções já citadas, no iUPQC podem ser adicionadas funções que utilizam como princípio de atuação a circulação de reativos entre o conversor e a rede. Um exemplo de função desse tipo é DSTATCOM (*distribution static synchronous compensator*) que consiste em fazer a regulação da tensão eficaz no PAC por meio da injeção ou absorção de reativos na rede. Essa funcionalidade de DSTATCOM no iUPQC foi implementada e validada no trabalho de França (2015). Outro ponto a ser comentado é a utilização de reativos para melhorar o despacho de energia em caso de o iUPQC operando como conversor de interface estar injetando potência ativa para a rede. Normas como a ABNT NBR 16149 (2014) que determinam que inversores solares conectados à rede elétrica tenham a capacidade de operar com fator de deslocamento de 0,9 indutivo ou capacitivo para, com isso, regular a tensão no ponto de acoplamento para permitir a continuidade do despacho da energia gerada e evitando sobretensões no sistema. Esse mesmo argumento pode ser estendido para conversores de interface. Diante do exposto, justificam-se as potenciais aplicações que um conversor iUPQC de interface pode desempenhar fazendo a injeção ou absorção de reativos na rede. Por ter mais de uma funcionalidade, denominou-se nesse trabalho como função Q a capacidade do conversor fazer a injeção ou absorção de reativos na rede.

Justifica-se o uso da função Q para otimizar o uso da potência disponível no conversor iUPQC em situações de baixa demanda de processamento de potência, aumentando as funcionalidades e viabilidade desse conversor ou, ainda, para melhorar o despacho de potência ativa para a rede. Nesse trabalho, denominou-se o conversor iUPQC operando como conversor de interface em microrredes de energia e com a função Q como conversor multifuncional de interface iUPQC, ou simplesmente M-iUPQC.

Entretanto, no iUPQC destaca-se uma tendência de desequilíbrio da potência processada pelos conversores FAS e FAP. Isso é consequência de o FAP processar todos os distúrbios de corrente da carga enquanto o FAS processa os distúrbios da tensão no PAC. Ou seja, com a tensão no PAC

próxima de 1,0 pu, a potência processada pelo FAP é muito superior à potência processada pelo FAS (SANTOS, 2012; SILVA, 2001). As consequências desse desbalanço no processamento da potência são que, na prática, o FAS fica subutilizado uma vez que a potência associada aos distúrbios de tensão no PAC é menor que os distúrbios de corrente da carga, aumentam-se as perdas do conversor visto que há circulação de corrente no FAS mas não há processamento de potência, dificulta a modularização do projeto dos conversores do FAS e do FAP, entre outros. No caso do M-iUPQC, esse desbalanço de potência é ainda mais crítico, especialmente para o caso de o conversor operar fornecendo potência reativa capacitiva para a rede, conforme mostrado por França et al. (2015). Nesse caso, no FAP é processada a potência reativa fornecida para a rede.

Como forma de atenuar esse desequilíbrio no processamento de potência do iUPQC, foi proposta a técnica do controle ativo do ângulo de carga (CATC). Essa técnica consiste em impor-se uma defasagem δ entre a componente fundamental da tensão no PAC e a tensão da carga de forma a permitir o compartilhamento e equalização da potência processada pelos conversores do iUPQC. Nesse assunto, destacam-se os trabalhos de Fagundes (2020) e Fagundes et al. (2021), nos quais estão apresentados em detalhes uma análise qualitativa e quantitativa da influência da variação do ângulo δ no fluxo de potência nos conversores FAS e FAP do iUPQC e demonstrou-se a eficácia do CATC para fazer o compartilhamento e equalização da potência processada pelos conversores do iUPQC.

Esse conceito do CATC pode ser estendido para o M-iUPQC com o objetivo de fazer o compartilhamento e equalização da potência processada pelos conversores FAS e FAP. No caso do M-iUPQC, a técnica do CATC consiste em aplicar uma defasagem δ entre a tensão do PAC e a tensão da microrrede. Há uma carência de estudos que apresentem de forma detalhada os efeitos da variação do ângulo δ no fluxo de potência de um conversor M-iUPQC. Por isso, o principal objetivo desse trabalho é apresentar uma análise qualitativa e quantitativa do fluxo de potência de um conversor M-iUPQC considerando a aplicação da técnica CATC. Equações que descrevem o fluxo de potência em um conversor M-iUPQC foram apresentadas e validadas via simulações

numéricas e resultados experimentais. Também, avaliou-se a eficácia da técnica do CATC para fazer o compartilhamento e equalização da potência processada pelos conversores do M-iUPQC em um cenário de operação como conversor de interface para microrredes de energia.

Como o objetivo é avaliar o fluxo de potência do conversor M-iUPQC, não foram desenvolvidos e implementados controladores em malha fechada para o CATC, pois estão fora do escopo desse trabalho. Já os controladores primários para o funcionamento do M-iUPQC foram projetados e validados seguindo a metodologia mostrada por Santos (2012). Além disso, simulações e ensaios experimentais foram realizados com o objetivo de avaliar a funcionalidade do conversor M-iUPQC operando como conversor de interface.

1.1 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

No Capítulo 2 é apresentada em detalhes a estrutura de potência do conversor iUPQC e estratégia de controle adotada. Também estão apresentados o projeto dos elementos do circuito de potência e dos controladores.

No Capítulo 3 está detalhada a operação do conversor M-iUPQC como conversor de interface e as alterações necessárias no sistema de controle do iUPQC usado como referência para desempenhar todas as funções previstas para o conversor M-iUPQC.

Mais adiante, no Capítulo 4 é apresentada uma análise qualitativa do fluxo de potência do conversor M-iUPQC com ênfase na avaliação da eficácia do CATC para fazer o compartilhamento e equalização da potência processada pelos conversores do M-iUPQC. Também, está apresentado o desenvolvimento das equações que descrevem o fluxo de potência em um conversor M-iUPQC.

Nos Capítulos 5 e 6 estão apresentados os resultados obtidos via simulação numérica e resultados experimentais, respectivamente. Tais resultados foram obtidos com o objetivo de validar a operação do conversor M-iUPQC como conversor de interface e, principalmente, validar a análise qualitativa e quantitativa apresentada no Capítulo 4.

Finalmente, no Capítulo 7 estão sintetizadas as principais conclusões do trabalho e são apresentadas sugestões para trabalhos futuros.

2 CONDICIONADOR UNIFICADO DE QUALIDADE DE ENERGIA DUAL (IUPQC)

Nessa seção está apresentada uma comparação do iUPQC com o UPQC avaliando as vantagens e desvantagens de cada um e justificando a escolha do iUPQC. Também está apresentado o projeto dos elementos de potência, a estratégia de controle e o projeto dos controladores do protótipo que foi montado. Os projetos dos elementos de potência bem como a estratégia de controle foram feitos com base no trabalho de Santos (2012).

2.1 COMPARATIVO ENTRE OS CONVERSORES UPQC E IUPQC

Ambos os conversores UPQC e iUPQC foram concebidos para operarem como filtros ativos. Por isso, são mais conhecidos na literatura na operação como condicionadores de energia. Também, para as explicações dessa seção considerou-se a operação deles como filtro ativo, para facilitar o cruzamento das informações com as referências.

Esses condicionadores são compostos pela atuação conjunta de dois conversores, sendo um filtro ativo série (FAS) conectado ao sistema via um transformador de acoplamento e um filtro ativo paralelo (FAP) que usualmente é conectado diretamente ao sistema (SANTOS, 2012). Os conversores compartilham o mesmo barramento CC em uma topologia *back-to-back*, conforme mostrado na Figura 2, mostrada no capítulo de Introdução.

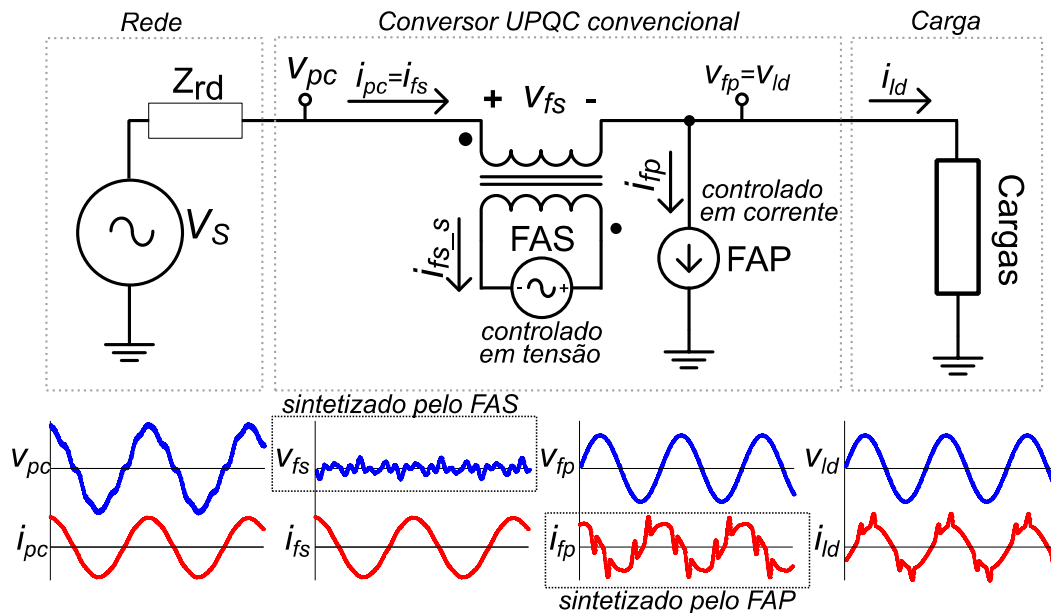
Por possuírem dois conversores, ambos UPQC e iUPQC podem atuar no condicionamento de tensão e corrente simultaneamente, compensando os distúrbios da tensão da rede, fornecendo uma tensão puramente senoidal com a amplitude desejada, e os distúrbios da corrente da carga, condicionando a corrente para a rede para que seja senoidal, equilibrada e em fase com a tensão da rede (SANTOS, 2012; FAGUNDES, 2020).

A principal diferença entre os conversores UQPC e iUPQC está nos sinais que são sintetizados pelos conversores FAS e FAP.

No UQPC, o FAS é controlado em tensão e o FAP é controlado em corrente. Dessa forma, para o condicionador compensar as harmônicas bem

como corrigir possíveis sobretensões ou subtensões da tensão do PAC, o FAS precisa sintetizar os contra-harmônicos e os sinais na frequência da rede para compensar as sobretensões ou subtensões na tensão do PAC. De forma análoga para o FAP, para o UPQC compensar as harmônicas e a componente em quadratura da corrente das cargas, o FAP precisa sintetizar os respectivos contra-harmônicos e o sinal da componente em quadratura da corrente das cargas. Na Figura 3 estão mostradas as principais formas de onda em um conversor UPQC e estão destacados os sinais sintetizados pelos conversores FAS e FAP do UPQC. Além disso, o FAS e o FAP foram modelados como fontes de tensão e corrente, respectivamente.

Figura 3 – Diagrama de blocos e principais formas de onda do UPQC.



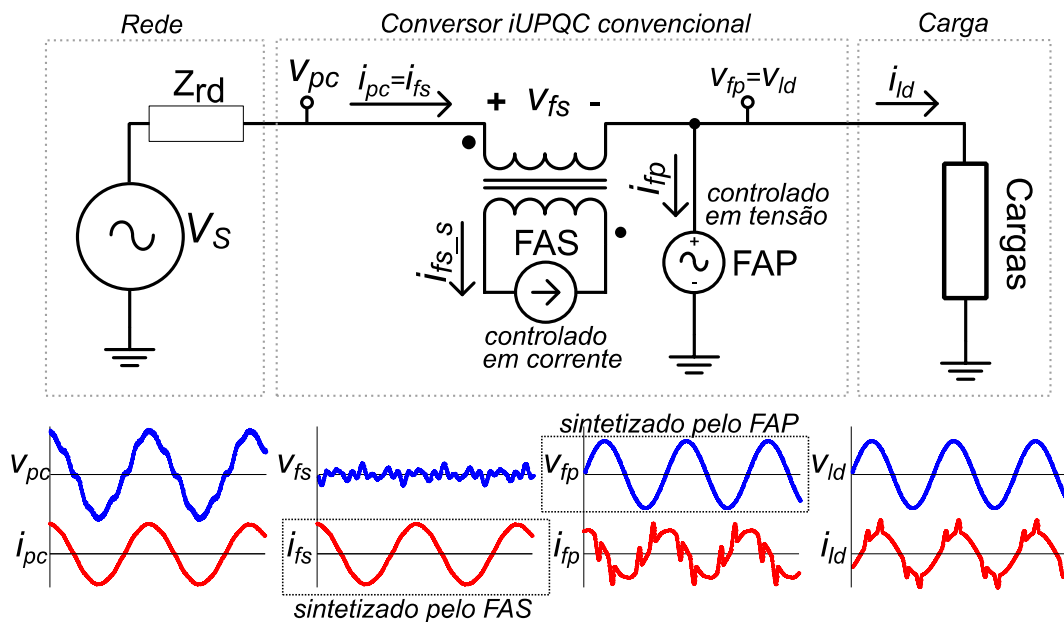
Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

Além disso, usualmente no UPQC o controle de tensão total e da tensão de desequilíbrio do barramento CC é feita pelo conversor controlado em corrente que, nesse caso, é o FAP. Por fim, salienta-se que no UPQC é possível modificar a disposição dos conversores em relação ao mostrado na Figura 3, onde o FAP poderia estar conectado junto ao PAC e o FAS após o ramo do FAP, conectado diretamente na carga, conforme mostrado por Dias (2010) e Khadkikar (2012).

No iUPQC, o FAS é controlado em corrente e impõe que a corrente no PAC seja senoidal, equilibrada e em fase com a tensão no PAC, ou seja, o FAS

sintetiza a corrente do PAC que é um sinal senoidal com a frequência da rede. Já o FAP é controlado em tensão e impõe uma tensão senoidal e com a amplitude nominal para a carga, ou seja, assim como no FAS, o FAP precisa sintetizar um sinal senoidal e com a frequência da rede. Na Figura 4 estão mostradas as principais formas de onda de um conversor iUPQC e estão destacados os sinais que são sintetizados pelos conversores FAS e FAP de um iUPQC. Destaca-se que, diferente do UPQC, o FAS e o FAP foram modelados como fontes de corrente e tensão, respectivamente.

Figura 4 – Diagrama de blocos e principais formas de onda do iUPQC.



Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

Com o FAS impondo uma corrente senoidal e em fase com a tensão no PAC, este se comporta como um caminho de alta impedância para os distúrbios da corrente da carga que são naturalmente forçados a circular pelo ramo do FAP. De forma análoga, com o FAP impondo a tensão na carga para que seja senoidal e com amplitude nominal, esse se comporta como um caminho de alta impedância para os distúrbios da tensão da rede e, com isso, esses distúrbios aparecem nos transformadores de acoplamento do FAS onde são processados.

Além disso, usualmente o controle da tensão total e de desequilíbrio do barramento CC é feito pelo FAS. Diferentemente do UPQC, no iUPQC apenas

uma disposição do FAS e do FAP é possível sendo essa conforme mostrado na Figura 3.

A principal vantagem do iUPQC em relação ao UPQC está no fato de que as variáveis com o objetivo de serem controladas (no caso, a tensão na carga e a corrente da rede) são controladas diretamente pelo FAP e FAS. No UPQC, essas variáveis são controladas indiretamente. Além disso, a sintetização dos sinais contra-harmônicos pelos conversores FAS e FAP no UPQC que possuem componentes harmônicas com frequências superiores à da rede é dificultada especialmente no FAS pois a impedância série dificulta o processamento dos contra-harmônicos de tensão o que pode piorar a qualidade da tensão entregue à carga, especialmente em aplicações de menor potência onde a impedância série do transformador tende a ser maior. No iUPQC esse efeito é minimizado uma vez que a tensão na carga é controlada diretamente pelo FAP.

A desvantagem do iUPQC em relação ao UPQC é que sendo o FAP controlado em tensão e processando os distúrbios de corrente da carga, significa que proteções adicionais para evitar sobrecorrente nesse conversor precisam ser implementadas. No UPQC, como o FAP é controlado em corrente, essa proteção ocorre naturalmente.

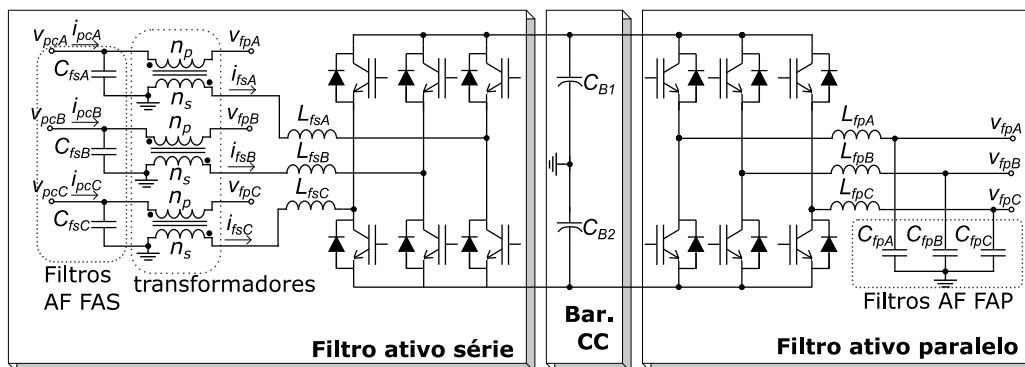
Vale salientar que esse problema pode ser contornado utilizando técnicas de limitação da potência de conversores controlados em tensão. Nesse sentido, destaca-se o trabalho de Maffezzolli (2019) no qual foi apresentado uma técnica de limitação da potência de saída de um conversor DSTATCOM controlado em tensão utilizando uma impedância virtual não-linear. Devido às similaridades dos conversores FAP de um iUPQC e o conversor DSTATCOM controlado em tensão, esse método citado poderia ser também implementado em conversores iUPQC e suas variações.

2.2 ESTRUTURA DE POTÊNCIA DO IUPQC

A estrutura de potência do iUPQC foi definida conforme proposto por Santos (2012), sendo os conversores do FAS e do FAP compostos de inversores trifásicos tipo VSI a quatro fios com seus respectivos filtros de alta frequência.

Esses compartilham o barramento CC com ponto médio, conforme mostrado na Figura 5.

Figura 5 – Inversores trifásicos que compõe a estrutura de potência do iUPQC



Fonte: Adaptado de Dos Santos (2012).

Os inversores do FAS e do FAP possuem diferentes ligações em suas saídas. No FAP, o filtro de alta frequência é conectado diretamente em sua saída enquanto no FAS o indutor é conectado diretamente na saída do inversor e o capacitor é conectado no secundário do transformador. Essa ligação é feita para minimizar o efeito das indutâncias do transformador (SANTOS, 2012).

Para o projeto dos elementos de potência, procedeu-se conforme descrito por Santos (2012), metodologia essa que foi utilizada com sucesso também por Santos, Cunha, Mezaroba (2014) e Fagundes (2020) e, por isso, não será abordada em detalhes no presente trabalho.

Utilizaram-se os parâmetros mostrados na Tabela 1 para o projeto dos elementos de potência do conversor.

Tabela 1 – Parâmetros para o projeto dos elementos de potência do conversor

Parâmetro	Valor
Potência nominal do conversor (S_{nom})	2,5 kVA
Tensão do barramento CC (V_B)	400 V
Tensão eficaz de fase da rede (V_{rd})	127 V
Ondulação de corrente nos indutores do FAP (ΔI_{Lfp})	50%
Ondulação de corrente nos indutores do FAS (ΔI_{Lfs})	30%
Ondulação de tensão no barramento CC (ΔV_B)	3%
Frequência de comutação (f_{sw})	20 kHz
Indutância de dispersão dos transformadores do FAS (L_{dfs})	2,1 mH
Relação de transformação dos transformadores do FAS (n_{fs})	1
Frequência de ressonância do filtro de alta frequência do FAP (f_{nfp})	1,9 kHz
Resistência série da rede (R_{rd})	0,3 Ω
Indutância série da rede (L_{rd})	2,7 mH
Frequência da rede (f_{rd})	60 Hz

Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

Na Tabela 2 estão mostradas as equações e os valores obtidos para os elementos de potência do conversor utilizado no presente trabalho.

Tabela 2 – Equações e valores obtidos para os elementos de potência do conversor utilizado no presente trabalho

Parâmetro	equação	Valor calculado	Valor utilizado
Indutância do indutor do FAS (L_{fs})	$L_{fs} \geq \frac{V_B}{4\Delta I_L f_{sw}} - L_{dfs}$	595 μ H	650 μ H
Capacitância do filtro de alta frequência do FAS (C_{fs})	-	-	1 μ F
Indutância do indutor do FAP (L_{fp})	$L_{fp} \geq \frac{V_B}{4\Delta I_L f_{sw}}$	1,0 mH	650 μ H
Capacitância do filtro de alta frequência do FAP (C_{fp})	$C_{fp} = \frac{1}{L_{fp}} \left(\frac{1}{2\pi f_{nfp}} \right)^2$	10,8 μ H	10 μ F
Capacitores do barramento CC (C_{B1} e C_{B2})	$C_{Bx} \geq 2 \cdot \frac{(S_{nom}/3)}{2\pi f_{rd} V_B \Delta V_B}$	920 μ F	1,88 mF

Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

Para a definição da capacitância de (C_{fs}), conforme feito por Santos (2012), definiu-se o valor mostrado na Tabela 2 com base na resposta em frequência do circuito.

Por fim, a diferença entre os valores calculados e os escolhidos se justificam pela disponibilidade de componentes para a montagem do protótipo.

2.3 ESTRATÉGIA DE CONTROLE BASE PARA O IUPQC

A estratégia de controle base utilizada no presente trabalho é a que foi proposta por Santos (2012) e reproduzida nos trabalhos de Santos, Cunha, Mezaroba (2014), Fagundes (2020) e Fagundes et al. (2021), demonstrando a sua eficácia.

No trabalho de Santos (2012), o esquema de controle proposto para iUPQC foi feito considerando a operação como condicionador de energia em redes de distribuição de baixa tensão. Nessa seção, foi abordada a explicação do esquema de controle bem como o projeto dos controladores utilizados nesse trabalho considerando a operação do iUPQC como condicionador de energia, conforme proposto por Santos (2012). Uma abordagem detalhada da operação do iUPQC como conversor multifuncional de interface está apresentada no Capítulo 3 do presente trabalho.

A estratégia de controle proposta por Santos (2012), o conversor iUPQC opera com dois sistemas de controle independentes sendo um para o FAS e outro para o FAP.

O sistema de controle do FAS é composto pelas malhas de controle de corrente, sendo uma para cada fase, as quais são responsáveis por sintetizar a corrente drenada da rede. Também, no FAS são implementadas as malhas de controle da tensão total e tensão de desequilíbrio da tensão do barramento CC. Já o sistema de controle do FAP é composto apenas pela malha de controle da tensão das cargas. Para ambas as malhas de controle de corrente do FAS e de tensão do FAP utilizou-se a modulação por variação da largura de pulso (PWM). Na Figura 6 é mostrado o esquema de controle do FAS onde os blocos em laranja representam as 3 malhas de controle de corrente do FAS, os verdes e os vermelhos representam as malhas de tensão total e tensão de desequilíbrio do barramento CC, respectivamente. Por fim, os blocos amarelos representam a malha de controle da tensão do FAP.

senoidais, com amplitude fixa e, na operação clássica do iUPQC, são mantidos em fase com a tensão do PAC. Dessa forma, a corrente no PAC ficará sempre em fase com a tensão no PAC e a amplitude da parcela CA dos sinais de referência para os controladores de corrente do FAS é definida pelo sinal de saída do controlador da tensão total do barramento CC, que é comum aos controladores de todas as fases. Assim, para manter a tensão do barramento CC com o valor da referência (V_{TCC*}) o controlador da tensão total do barramento CC estipula a amplitude da parcela ativa de corrente a ser drenada da rede para alimentar as cargas conectadas na saída do iUPQC, garantindo o equilíbrio energético nos capacitores do barramento CC.

A parcela CC dos sinais de referência para os controladores de corrente do FAS é estipulada pelo controlador da tensão de desequilíbrio do barramento CC ($C_{vd}(s)$). Essa malha é necessária para garantir que as tensões nos capacitores do barramento CC fiquem equilibradas mesmo em casos de pequenos desequilíbrios no sistema. Conforme mostrado na Figura 6, o sinal de realimentação dessa malha, que é formado pela diferença no módulo das tensões dos capacitores C_{B1} e C_{B2} , é comparado com o sinal de referência que é 0 V. Dessa forma, em caso de desequilíbrio nas tensões dos capacitores C_{B1} e C_{B2} , o controlador da tensão de desequilíbrio da tensão CC atua adicionando um nível CC ao sinal de referência para os controladores de corrente do FAS de modo a equilibrar a tensão nos capacitores do barramento CC.

Em relação à banda passante das malhas de controle do FAS, o controlador de corrente do FAS precisa ter uma banda passante na ordem de kHz para garantir que o controlador possa seguir a referência senoidal imposta. Muito embora a corrente do FAS seja puramente senoidal, o controlador de corrente do FAS precisa possuir uma banda passante na escala da frequência de chaveamento para que os harmônicos da tensão no PAC não distorçam a corrente do FAS. A malha de controle da tensão total possui banda passante na escala de Hz para garantir um desacoplamento entre essa malha de controle com a malha de corrente do FAS e, além disso, evitar que o conversor atue na compensação da ondulação da tensão do barramento CC. Por fim, a malha da tensão de desequilíbrio do barramento CC, visto que trabalha apenas na

compensação de níveis CC com dinâmica lenta, possui uma banda passante próxima ou menor que 1 Hz.

Em relação ao sistema de controle do FAP, conforme já foi adiantado, é formado apenas pela malha de controle da tensão da carga. Para isso, conforme mostrado na Figura 6, utiliza-se um controlador de tensão para cada fase. Similarmente ao controle da corrente do FAS, no FAP, por meio do monitoramento da tensão na carga (V_{IdA}' , V_{IdB}' e V_{IdC}') o controlador de tensão do FAP ($C_{fp}(s)$) garante que tensão na carga siga uma referência senoidal gerada pelo produto do sinal de saída do circuito PLL pela amplitude de referência da tensão de saída (V_{rLD}). No caso, o circuito PLL é comum para as malhas de controle do FAS e do FAP e, com isso, a tensão sintetizada pelo FAP é senoidal, equilibrada e em fase com a tensão do PAC.

Em relação à banda passante do controlador de tensão do FAP, assim como na malha de controle da corrente do FAS, é da ordem de kHz para garantir que o controlador consiga seguir instantaneamente o sinal senoidal de referência e que os harmônicos de corrente da carga não distorçam a tensão na carga.

Os projetos de cada um dos controladores estão mostrados no item a seguir.

2.3.1 Projeto dos controladores

Conhecendo a estratégia de controle proposta para o conversor iUPQC, projetaram-se os controladores seguindo tais critérios. Para o projeto, utilizou-se a técnica de resposta em frequência. Como regra geral para todos os controladores, definiram-se os requisitos mínimos que são propostos por Barbi (2007). Tais requisitos são: banda passante máxima de 1/4 da frequência de chaveamento, margem de fase entre 30° e 90° e inclinação de -20 dB/década na frequência de cruzamento por zero.

Conforme comentado anteriormente, as malhas de controle da tensão no FAP e da corrente do FAS são malhas que devem possuir elevada banda passante. Dessa forma, para essas definiu-se que a banda passante seria de 1/5 e 1/6 da frequência de chaveamento, respectivamente. Para as malhas de tensão total e de desequilíbrio do barramento CC definiu-se banda passante de

1/8 da frequência da rede e 1 Hz, respectivamente, o que garante que os controladores não irão responder as oscilações de tensão no barramento CC e, também, gera um desacoplamento entre as malhas rápidas e as malhas lentas.

Para o projeto dos controladores, utilizaram-se os parâmetros mostrados na Tabela 3 e os demais valores mostrados relacionados aos elementos do circuito de potência que estão mostrados na Tabela 1 e Tabela 2.

Tabela 3 – Ganhos dos sensores de tensão e corrente utilizados

Parâmetro	Valor
Ganho dos sensores de tensão do FAP (K_{vfp})	0,06
Ganho dos sensores de tensão do PAC (K_{vpc})	0,01
Ganho dos sensores de corrente do FAS (K_{ifs})	0,44
Ganho dos sensores de tensão do barramento CC (K_{vbc})	0,021
Inverso da tensão de pico da portadora (V_m)	0,091
Índice de modulação (ma)	0,45

Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

Por fim, para o projeto dos controladores utilizaram-se as funções de transferência (FT) deduzidas por Santos (2012). Na Tabela 4 estão mostradas as funções de transferência de malha aberta (FTMA) utilizadas para o projeto dos controladores bem como a FT dos controladores projetados.

Tabela 4 – FT dos controladores projetados e FTMA's utilizadas no projeto

Controlador	FTMA do sistema	FT do controlador
$C_{fp}(s)$	$\frac{V_B K_{vfp} V_m}{L_{fp} C_{fp}} C_{vfp}(s)$	$31,9 \frac{(s+1,24 \cdot 10^4)^2}{s(s+496)}$
$C_{ifs}(s)$	$\frac{V_B K_{ifs} V_m}{s \cdot n^2 (L_{dt} + L_{rd} + L_{fs})} \cdot C_{ifs}(s)$	$6,67 \cdot 10^5 \frac{(s+8,33 \cdot 10^3)}{s(s+6,39 \cdot 10^4)}$
$C_{vt}(s)$	$\frac{1,5 n_{fs} ma K_{vbc}}{s C_B K_{ifs}} C_{vd}(s)$	$3060 \frac{(s+25,1)}{s(s+1,01 \cdot 10^3)}$
$C_{vd}(s)$	$\frac{1,5 K_{vbc}}{s C_B K_{ifs}} C_{vd}(s)$	$141,5 \frac{(s+6,28)}{s(s+754)}$

Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

Na Tabela 5 estão mostradas a frequência de cruzamento e a margem de fase das funções de transferência de malha aberta compensadas pelos controladores projetados.

Tabela 5 – Frequência de cruzamento por 0 dB e margem de fase das malhas de controle projetadas

Controlador	Frequência de cruzamento	Margem de fase
$C_{fp}(s)$	4,2 kHz	36,9°
$C_{ifs}(s)$	3,1 kHz	49,9°
$C_{vt}(s)$	7,1 Hz	58,2°
$C_{vd}(s)$	1,0 Hz	44,7

Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

Demonstra-se que os requisitos de frequência de cruzamento e margem de fase foram atendidos por todos os controladores projetados.

As validações básicas do projeto dos controladores foram feitas por meio de simulações numéricas e experimentais e estão apresentados nos Capítulos 5 e 6. Entende-se como validação básica como sendo a avaliação da capacidade dos controladores de seguirem as referências impostas. Análises mais detalhadas da dinâmica dos controladores foram apresentadas em detalhes por Santos (2012) e Santos, Cunha, Mezaroba (2014) e estão fora do escopo do presente trabalho.

3 CONVERSOR IUPQC MULTIFUNCIONAL DE INTERFACE APLICADO A MICRORREDES DE ENERGIA

Nesse capítulo estão detalhados o funcionamento do conversor M-iUPQC na operação como conversor de interface. Além disso, estão explicadas as alterações no sistema de controle do iUPQC clássico para que sejam implementadas as funções Q e CATC no conversor M-iUPQC.

3.1 IUPQC COMO CONVERSOR MULTIFUNCIONAL DE INTERFACE

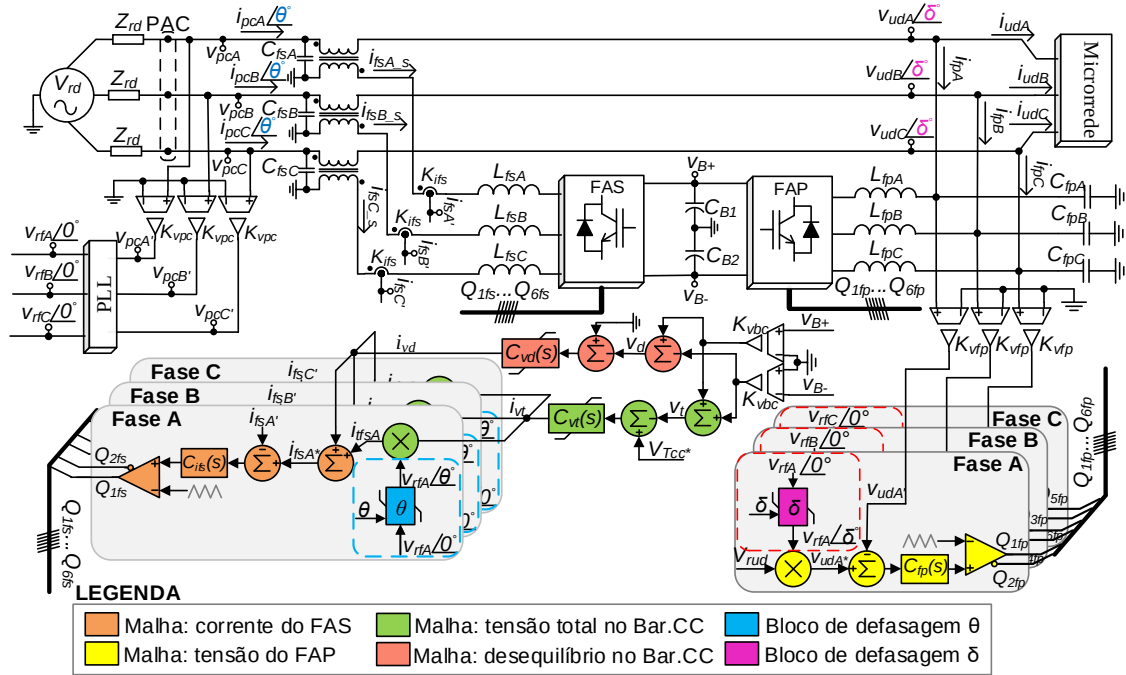
No presente trabalho, é proposta a utilização do conversor iUPQC como conversor multifuncional de interface para microrredes de energia, o qual denominou-se como M-iUPQC. Essa denominação foi criada para fazer a diferenciação do conversor iUPQC tradicional que foi concebido para operação como filtro ativo.

Para o M-iUPQC, conforme fundamentado no Capítulo de Introdução do presente trabalho, foi definido que o conversor irá desempenhar as seguintes funções:

- a) Controle do fluxo de potência bidirecional entre a rede e a microrrede.
- b) Regulação da tensão da microrrede e compensação dos distúrbios de tensão da rede.
- c) Compensação dos distúrbios de corrente da carga.
- d) Injeção ou absorção de reativo da rede (função Q).
- e) Controle ativo do ângulo de carga (CATC), que é uma função auxiliar para compartilhamento e equalização do fluxo de potência entre os conversores FAS e FAP do M-iUPQC.

Para isso, na Figura 7 é mostrado o esquema de controle do M-iUPQC, que foi feito com base no sistema de controle do iUPQC clássico mostrado na Figura 6.

Figura 7 – Esquema de controle do M-iUPQC utilizado nesse trabalho



Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

As alterações feitas no sistema de controle utilizado como referência estão destacadas pelas linhas tracejadas. As linhas tracejadas azuis demarcam as alterações no sistema de controle para permitir a implementação da função Q. As linhas tracejadas vermelhas, destacam as alterações no sistema de controle para implementação da função CATC. Uma explicação detalhada dessas alterações no sistema de controle do iUPQC para que o conversores possa desempenhar as funções Q e CATC estão detalhadas nos itens 3.1.1 e 3.1.2. Ainda, alterou-se a denominação do bloco de Cargas para Microrrede e suas respectivas variáveis, para ficar compatível com a aplicação do conversor como conversor de interface para microrredes.

Com o esquema de controle proposto por Santos (2012) e que está mostrado na Figura 6 do presente trabalho, as funções b) e c) são desempenhadas sem a necessidade de alterações no controle. Isso acontece em razão de o iUPQC ser concebido para operação como filtro e que regula a tensão e compensa os distúrbios de corrente da carga, características equivalentes às funções b) e c).

Além disso, no iUPQC clássico, o controle da tensão total do barramento CC define a amplitude da corrente de entrada do conversor e,

consequentemente, a potência necessária para a carga. Ou seja, o controle da tensão total do barramento CC indiretamente controla a potência ativa absorvida da rede e necessária para suprir a potência demandada pela carga. No M-iUPQC, o controle da tensão total do barramento CC controla o fluxo de potência ativa entre a rede, atendendo a função a) especificada para esse conversor. Para explicar isso, considera-se o cenário quando a geração da microrrede é menor que o seu consumo. Nesse caso, o controle da tensão total do barramento CC define a amplitude da corrente drenada da rede no PAC e, consequentemente, a potência ativa absorvida da rede necessária para suprir o déficit de potência ativa da microrrede. Aumentando-se a geração da microrrede mas ainda com déficit em relação ao consumo, a tensão no barramento CC tende a aumentar e o controle da tensão total do barramento CC reduz a amplitude da corrente de entrada de modo que a potência absorvida da rede seja menor. Caso a geração da microrrede seja maior que o seu consumo, a tensão no barramento CC tende a aumentar novamente e o controle da tensão total do barramento CC, nesse caso, será invertido em relação a situação anterior, permitindo que o conversor injete potência ativa na rede uma vez que a corrente passa a ter uma defasagem de 180° em relação a tensão no PAC.

As funções Q e CATC, funções d) e e) estão explicadas nos Itens Função Q no M-IUPQC e Função CATC no M-iUPQC, respectivamente.

3.1.1 Função Q no M-IUPQC

Conforme exposto no Capítulo de Introdução, a função Q foi uma denominação criada nesse trabalho para representar a condição de operação em que o conversor faz a injeção ou absorção de reativo para a rede. Essa é uma condição equivalente caso a função DSTATCOM fosse implementada nesse conversor ou, ainda, para melhorar o despacho de potência ativa para o caso de o fluxo de potência ativa ser da microrrede para a rede.

No iUPQC clássico, a corrente no PAC é controlada pelo FAS e essa é forçada a seguir uma senoide de referência que está em fase com a tensão no PAC, conforme mostrado na Figura 7. Com isso, não há circulação de reativo entre a rede e o conversor. Para a função ser executada no conversor M-iUPQC,

para que a corrente no PAC possua uma parcela em quadratura com a tensão, propõe-se que seja imposta uma defasagem na senoide de referência utilizada no controle de corrente do FAS em relação a tensão do PAC. Denominou-se esse ângulo de defasagem na senoide de referência do controle de corrente no FAS como θ . Na Figura 7 destacou-se com a linha tracejada azul a alteração no sistema de controle em relação ao iUPQC clássico.

Como a corrente no PAC é imposta pelo FAS e visto que os controladores de corrente do FAS seguem o sinal de referência na entrada do controlador (sinais i_{fsA}^* , i_{fsB}^* e i_{fsC}^* , mostrados na Figura 7), alterando-se o ângulo θ da senoide de referência do controle de corrente do FAS, a corrente no PAC terá a mesma fase θ em relação a tensão do PAC. Entretanto, ao alterar-se o ângulo θ e consequentemente alterar a defasagem entre a corrente e a tensão do PAC, altera-se o fluxo de potência ativa entre a rede e o conversor o que levaria ao aumento ou diminuição da tensão do barramento CC. Para que a tensão no barramento CC volte para o valor de referência, o controlador da tensão total do barramento CC atua aumentando ou diminuindo o módulo da amplitude da corrente de entrada de modo a manter-se o fluxo de potência ativa entre a rede e a microrrede em função da diferença da potência consumida e gerada pela microrrede. Com isso, é possível implementar a função Q .

Porém, para garantir a continuidade do fluxo de potência ativa entre a rede e a microrrede e a estabilidade da tensão do lado da microrrede, na teoria o ângulo θ precisa ser limitado a valores menores que o módulo de 90° e -90° , pois para valores fora dessa faixa inverte-se a lógica dos controladores e não seria possível fazer o controle do conversor. Outro ponto a ser considerado é que valores para θ muito próximos a 90° ou -90° tenderia levar o controle da tensão total do barramento CC a saturação pois a componente direta da corrente no PAC, responsável pelo fluxo de potência ativa, seria muito pequena em relação a componente em quadratura. Além disso, existe a limitação de projeto da corrente de entrada que o conversor pode processar. Por isso, na prática valores de θ mais próximos de 90° só seriam possíveis em situações em que o fluxo de potência ativa entre a rede e a microrrede é muito baixo. Nessas condições, a tendência é que a tensão no PAC esteja próxima do valor nominal. Dessa forma, nesse trabalho limitou-se o ângulo θ entre 45° e -45° .

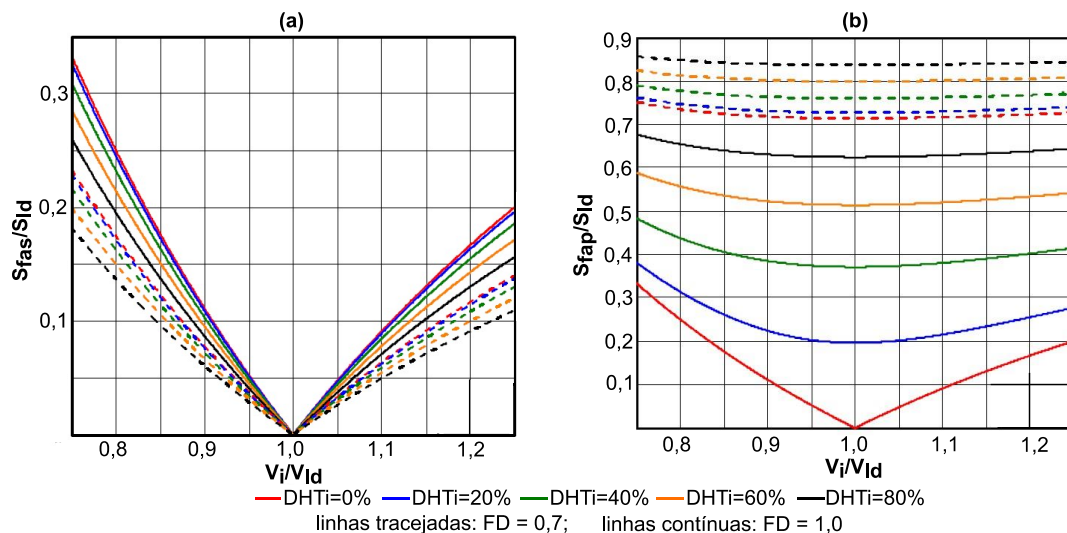
Por fim, salienta-se que não foi implementada nenhum sistema de controle em malha fechada para a determinação do ângulo θ , que é a variável alterada com a função Q habilitada. O objetivo desse trabalho é avaliar o fluxo de potência em um conversor M-iUPQC em função da variação do ângulo θ que, conforme já mencionado, pode estar associado a diferentes finalidades. Por isso, nesse trabalho o ângulo θ foi sempre definido para um determinado valor dentro dos limites previamente estabelecidos e de acordo com a necessidade e objetivo de cada teste.

3.1.2 Função CATC no M-iUPQC

Para justificar a utilização da função CATC para o M-iUPQC, inicialmente é necessário abordar o problema do desequilíbrio da potência processada pelos conversores do iUPQC clássico, assim como o seu dual, UPQC e suas variações.

Uma característica dos conversores iUPQC é o desequilíbrio da potência processada por cada um dos conversores, conforme demonstrado por Silva (2001) em uma análise do fluxo de potência de um conversor iUPQC clássico para diversas situações de carga e de tensão no PAC. Esse desequilíbrio na potência processada pelos conversores do iUPQC é facilmente observada na Figura 8. Nessa figura, plotaram-se as curvas de potência do FAS e do FAP em função da relação entre a tensão no PAC (V_i) e a tensão na carga (V_o) para diferentes configurações de carga. Sendo assim, os valores de DHT da corrente da carga (DHT_i) foram identificados pelas cores das linhas. Além disso, 2 fatores de deslocamento foram utilizados e estão representados pelas linhas tracejadas ($FD = 0,7$) e linhas contínuas ($FD = 1,0$). Por fim, as potências do FAS e do FAP foram normalizadas em relação à potência da carga (S_{ld}).

Figura 8 - Potência aparente normalizada processada pelo (a) FAS e (b) FAP em um conversor iUPQC clássico.



Esse desequilíbrio no processamento de potência ocorre em função de o FAS processar apenas os distúrbios na tensão do PAC e o FAP processar os distúrbios da corrente da carga. Na prática, os distúrbios de tensão demandam menos processamento de potência comparado aos distúrbios de corrente da carga (FAGUNDES, 2020). Por isso, no iUPQC clássico o FAP tende a processar muito mais potência que o FAS. Essa característica dos conversores iUPQC, dificulta o projeto de conversores modulares para o FAS e o FAP e subutiliza a capacidade de processamento da potência disponível no conversor.

Com o intuito de minimizar essa característica, destaca-se a técnica conhecida na literatura como Controle Ativo do ângulo de Carga (CATC) ou, no termo em inglês, *Power Angle Control*. Essa técnica consiste em aplicar uma defasagem na componente fundamental da tensão da carga em relação à componente fundamental da tensão no PAC de modo que ocorra o compartilhamento da potência reativa processada pelo FAS e pelo FAP. Denominou-se na literatura como sendo δ o ângulo de defasagem imposto entre a tensão da carga e a tensão no PAC.

Essa técnica foi proposta inicialmente por Khadkikar e Chandra (2008) para um conversor UPQC. Além da apresentação do conceito do CATC, nesse trabalho foi proposto um algoritmo para a determinação do ângulo δ com o

objetivo dividir de forma não igualitária a demanda de potência reativa da carga entre os conversores FAS e FAP.

Desde então, diversos trabalhos apresentando melhorias e adaptações em algoritmos para determinação no ângulo δ vêm sendo apresentados para o UPQC e as suas posteriores variações. Destacam-se os trabalhos de Khadkikar e Chandra (2011) no qual foi apresentada uma melhoria no algoritmo do CATC para compensar os efeitos de afundamentos ou elevações na tensão do PAC no processamento de potência dos conversores. Mais recentemente, destaca-se o trabalho de Devassy e Singh (2017) no qual foi implementada a técnica do CATC em conversores UPQC para aplicações como conversor de interface de plantas de geração fotovoltaica com a rede elétrica, conhecido na literatura como PV-UPQC.

Diante dos bons resultados obtidos com a aplicação da técnica do CATC nos conversores UPQC e suas variações, essa mesma técnica foi implementada no iUPQC onde destaca-se o trabalho de Fagundes e Mezaroba (2016) no qual foi proposto um algoritmo que busca a equalização da potência reativa processada pelos conversores do FAS e do FAP utilizando a técnica do CATC. Mais tarde, no trabalho de Stangler (2019) foi apresentado um algoritmo de controle em malha fechada para controlar a potência reativa processada por cada conversor com erro nulo em regime permanente.

Voltando a análise para o conversor M-iUPQC, esse problema do desequilíbrio da potência processada pelo FAS e FAP é ainda mais crítico quando a função Q estiver ativada e o conversor estiver fornecendo reativo capacitivo para rede, conforme demonstrado por França *et al.* (2015). Isso ocorre em função de o FAP fornecer toda a potência reativa para o lado da rede, sobrecarregando o mesmo e subutilizando o FAS.

Com isso, demonstra-se a vantagem da implementação do CATC no M-iUPQC. Para o caso do M-iUPQC, o ângulo de defasagem δ seria aplicado na tensão da microrrede em relação da tensão do PAC. Seguindo a nomenclatura adotada na literatura, manteve-se a denominação desse ângulo de defasagem como sendo δ .

Para implementar a defasagem δ na tensão da microrrede e de modo análogo ao proposto por Fagundes (2020), nesse trabalho aplicou-se a

defasagem δ desejada no sinal de referência para o controlador de tensão do FAP. Fazendo-se isso, como o FAP é controlado em tensão e controla a tensão da microrrede, o controlador de tensão do FAP irá seguir a referência imposta e, conseqüentemente, será feita a defasagem entre a tensão da microrrede e a tensão do PAC.

Na Figura 7 destacou-se com a linha tracejada vermelha a alteração no sistema de controle comparado ao iUPQC clássico, para que seja possível implementar a defasagem δ e a conseqüente função CATC.

No presente trabalho, não foi implementado um sistema de controle em malha fechada para determinar o ângulo δ pois o principal objetivo do trabalho é apresentar um estudo do fluxo de potência do conversor M-iUPQC avaliando principalmente os efeitos que a variação dos ângulos θ (relacionado a função Q) e δ (relacionado à função CATC).

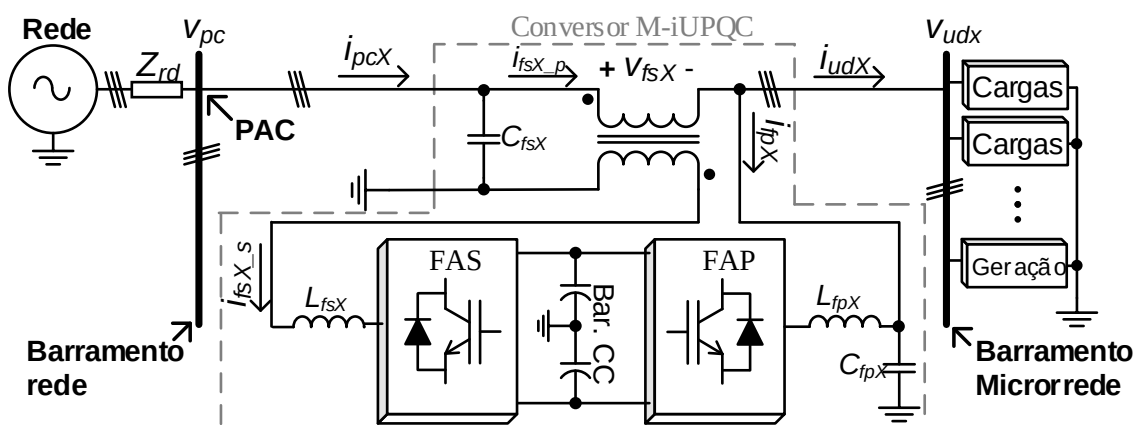
Por isso, assim como adotado para o ângulo θ , o ângulo δ foi sempre definido para um determinado valor de acordo com a necessidade e objetivo de cada teste.

4 ANÁLISE DO FLUXO DE POTÊNCIA DO CONVERSOR M-IUPQC

Nesse capítulo, inicialmente está apresentada uma análise quantitativa do fluxo de potência do conversor M-iUPQC enfatizando a influência da variação dos ângulos θ e δ e como o CATC pode ser útil para fazer o compartilhamento e equalização da potência processada pelos conversores FAS e FAP. Por fim, foi demonstrada uma análise qualitativa do fluxo de potência em um conversor M-iUPQC sendo demonstrado todo o equacionamento desenvolvido para se obter equações que descrevem o fluxo de potência nesse conversor em função de variáveis externas ao mesmo.

Nas análises apresentadas nesse capítulo, utilizou-se o sistema elétrico de um conversor M-iUPQC operando como conversor multifuncional de interface e a convenção de sinais mostrada na Figura 9.

Figura 9 – Polaridade de sinais adotada.



Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

O subscrito X representa qual é a respectiva fase do conversor.

Além disso, algumas simplificações e definições foram consideradas as quais estão listadas a seguir:

- Foi considerado o conversor operando em regime permanente.
- Não há consumo de potência ativa no conversor M-iUPQC.
- Desprezaram-se as componentes de tensão e corrente na frequência de chaveamento dos conversores. Com isso, sendo os capacitores C_{fsX} dimensionados para filtrar as componentes de alta frequência do

FAS, considerou-se que a corrente no primário do transformador do FAS (i_{fsx_p}) como sendo igual a corrente no PAC.

- d) Desconsideraram-se as ondulações de tensão no barramento CC.
- e) Consideraram-se a tensão na microrrede (v_{udx}) e corrente no PAC (i_{pcx}), que são variáveis controladas pelo M-iUPQC, como sendo puramente senoidais e na frequência da rede.
- f) Todas as tensões estão referenciadas ao neutro do sistema, exceto onde for informado.
- g) Todos os ângulos das componentes fundamentais de tensão e corrente estão referenciados ao ângulo de referência 0° da tensão do PAC, exceto onde for informado.

Ainda, convencionou-se a componente fundamental da tensão do PAC (v_{pcx}) como sendo o ângulo 0° . Com isso, todos os ângulos do sistema estão referenciados à tensão do PAC, exceto onde informado.

Como referência para fazer o cálculo e medição das potências processadas pelos conversores FAS e FAP, utilizaram-se os conceitos e a metodologia apresentada na prática recomendada IEEE Std 1459:2010, intitulada *IEEE Standard Definitions for the Measurement of Electric Power Quantities Under Sinusoidal, Nonsinusoidal, Balanced, or Unbalanced Conditions*.

Além disso, com base também na prática recomendada IEEE 1459:2010, adotou-se a convenção de sinais para as potências reativas que uma carga indutiva consome potência reativa, ou seja, possui potência reativa positiva. O contrário ocorre para cargas capacitivas.

Com base nos conceitos definidos na IEEE 1459:2010 e para facilitar a análise do fluxo de potência no M-iUPQC, separaram-se as componentes fundamentais, que foram representadas por fasores, das componentes não fundamentais das variáveis de tensão e corrente do sistema mostrado na Figura 9 conforme listado a seguir. Os subscritos X correspondem a fase do sistema.

- V_{1pcX} : valor eficaz da componente fundamental da tensão do PAC.
- V_{HpcX} : somatório dos valores eficazes das componentes não-fundamentais da tensão no PAC.
- I_{pc} : valor eficaz da corrente no PAC.

- θ : ângulo da componente fundamental da corrente do PAC.
- V_{1fsX} : valor eficaz da componente fundamental da tensão do FAS.
- β_{1fsX} : ângulo da componente fundamental da tensão do FAS.
- V_{HfsX} : somatório dos valores eficazes das componentes não-fundamentais da tensão do FAS.
- V_{ud} : valor eficaz da tensão da microrrede.
- δ : ângulo da componente fundamental da tensão da microrrede.
- I_{1fpX} : valor eficaz da componente fundamental da corrente do FAP.
- ϕ_{1fpX} : ângulo da componente fundamental da corrente do FAP.
- I_{HfpX} : somatório dos valores eficazes das componentes não-fundamentais da corrente do FAP.
- I_{1udX} : valor eficaz da componente fundamental da corrente da microrrede.
- ϕ_{1udXR} : ângulo da componente fundamental da corrente da microrrede.
- I_{HudX} : somatório dos valores eficazes das componentes não-fundamentais da corrente da microrrede.

Para facilitar o posterior uso das equações, definiu-se ϕ_{1udX} como sendo o ângulo da componente fundamental da corrente da microrrede em relação ao ângulo δ da tensão da microrrede, conforme mostrado na equação (1).

$$\phi_{1udX} = \phi_{1udXR} - \delta \quad (1)$$

Ainda, nas variáveis I_{pc} e V_{ud} , não carregaram-se o subscrito X pois essas são variáveis controladas e possuem, idealmente, sempre o mesmo valor para as 3 fases do conversor.

Com essas definições e considerações, procedeu-se com a análise qualitativa e quantitativa apresentados nos itens a seguir.

4.1 ANÁLISE QUALITATIVA DO FLUXO DE POTÊNCIA DO CONVERSOR M-IUPQC

Na análise qualitativa, o objetivo é explicar conceitualmente os efeitos da variação dos ângulos θ e δ no fluxo de potência nos conversores de um M-

iUPQC. Também, avaliou-se a eficácia do CATC para fazer o compartilhamento e/ou equalização da potência processada pelo FAS e o FAP em um conversor M-iUPQC.

Para essa análise, utilizaram-se diagramas fasoriais das tensões e correntes do M-iUPQC e dois cenários de operação sendo o primeiro com o fluxo de potência ativa da rede para a microrrede, mostrado no Item 4.1.1, e o segundo com o fluxo de potência da microrrede para a rede, mostrado no Item 4.1.2. Por fim, avaliou-se o efeito da variação dos ângulos θ e δ no fluxo das componentes não fundamentais de potência do FAS e do FAP, mostrado no Item 4.1.3.

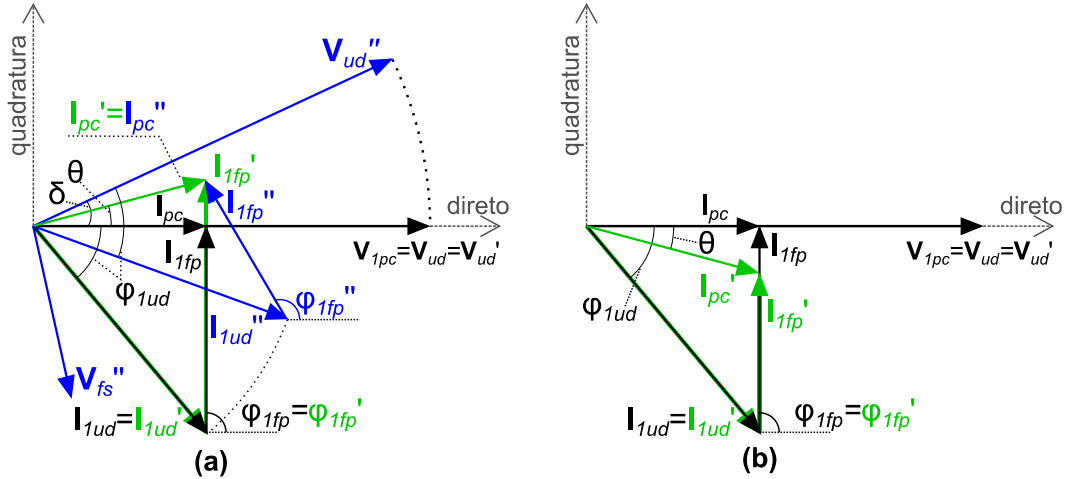
Para todos os cenários avaliados, para facilitar a análise, considerou-se a tensão no PAC com valor de 1,0 pu e as tensões e correntes do sistema equilibradas.

4.1.1 Primeiro cenário: fluxo de potência da rede para a microrrede

Para esse cenário, modelou-se a microrrede como um conjunto de cargas, considerou-se a presença de cargas indutivas na microrrede e com a componente fundamental da tensão no PAC com o valor de 1,0 pu.

Com essas definições, na Figura 10 (a), em preto estão representados os vetores para os ângulos θ e δ iguais a 0° , em verde estão representados os vetores para um ângulo θ positivo, ou seja, com o conversor fornecendo reativo para rede e, em azul, estão representados os vetores considerando θ e δ positivos e diferentes de 0. Na Figura 10 (b), em preto novamente estão representados os vetores para θ e δ igual a 0° e em verde estão representados os vetores para θ negativo, ou seja, com o conversor fornecendo reativo indutivo para a rede.

Figura 10 – Diagrama fasorial de um conversor M-iUPQC para cenário com fluxo de potência ativa da rede para a microrrede. (a) vetores em preto: θ e δ igual a 0° , vetores em verde: θ positivo e δ igual a 0° , vetores em azul: θ e δ positivos. (b) vetores em preto: θ e δ igual a 0° , vetores em verde: vetores em verde θ negativo e δ igual a 0° .



Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

Para a Figura 10 (a), com θ e δ iguais a 0° (vetores em preto), não há tensão no FAS e toda a potência reativa demandada pela microrrede é fornecida pelo FAP. Isso fica evidente ao avaliar o vetor de corrente do FAP que possui a mesma amplitude da componente em quadratura da corrente da microrrede.

Com θ positivo e δ igual a 0° , o conversor passa a fornecer potência reativa para a rede, ou seja, visto pela rede o conversor possui uma característica capacitiva. Como não há tensão no FAS, o FAP precisa fornecer potência reativa para suprir a demanda da microrrede e da rede. Isso explica o aumento na amplitude do vetor do FAP. Além disso, demonstra-se que com a função Q ativada e o conversor fornecendo reativo para rede, o desequilíbrio na potência processada pelo FAS e FAP é ainda mais crítico.

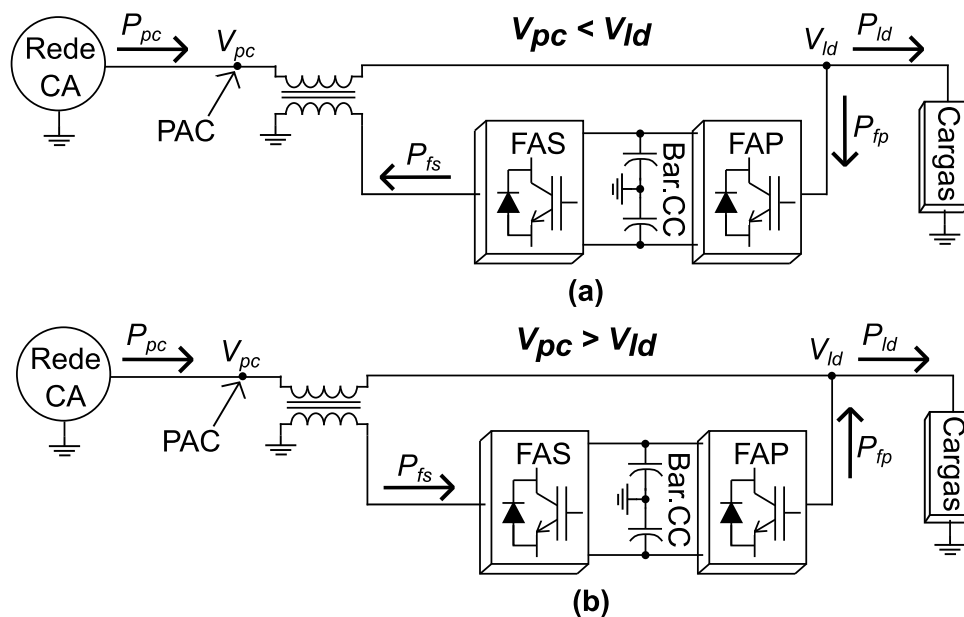
Com θ e δ diferentes e positivos, um vetor de tensão aparece no FAS o qual passa a fornecer potência reativa, reduzindo, assim, a potência processada pelo FAP, o que justifica a diminuição da amplitude da corrente do FAP. Caso o ângulo δ fosse negativo nesse último caso, é fácil notar que o FAS se comportaria como uma carga indutiva, ou seja, consumindo reativo. Dessa

forma, não seria útil para a operação do M-iUPQC nessa condição pois sobrecarregaria ainda mais o FAP.

Diante dessa análise, demonstra-se que a técnica do CATC é eficiente para fazer o compartilhamento e/ou a equalização da potência processada pelo FAS e o FAP em um conversor M-iUPQC.

Salienta-se que, como demonstrado na Figura 10 (a), com δ diferente de 0° , os vetores de tensão e corrente do FAS e do FAP passam a não serem ortogonais, indicando que há circulação de potência ativa nesses conversores. Vale lembrar que no conversor iUPQC clássico, idealmente, não há consumo de potência ativa. Porém em situações de subtensão ou sobretensão da tensão no PAC há uma circulação de potência ativa entre os conversores FAS e FAP de modo a manter o balanço energético do sistema (SANTOS, 2014; FAGUNDES, 2020) conforme mostrado na Figura 11.

Figura 11 – Fluxo de potência ativa entre os conversores do iUPQC para situações de (a) subtensão e (b) sobretensão na tensão do PAC.



Fonte: Adaptado de Fagundes (2020).

Ou seja, em caso de subtensão da tensão no PAC, o fluxo de potência ativa entre os conversores do iUPQC é do FAP para o FAS e para o caso de sobretensão, o inverso ocorre.

Já no M-iUPQC, mesmo com as tensões no PAC equilibradas e com o valor nominal, para ângulos δ diferentes de 0° uma parcela de potência ativa circula pelos conversores, ou seja, a potência ativa consumida pelo FAS é devolvida ao sistema pelo FAP ou vice-versa. Isso também pode ser constatado analisando os vetores de tensão e corrente do FAS e do FAP para δ diferente de 0° . Além disso, o sentido do fluxo de potência ativa circulante entre os conversores do M-iUPQC em função da variação do ângulo δ depende da corrente da microrrede e do valor do ângulo θ , ou seja, não é possível afirmar que para um determinado valor de δ o fluxo de potência ativa entre os conversores é do FAS para o FAP, ou vice-versa.

Muito embora exista uma componente de potência ativa circulante entre os conversores do M-iUPQC em função da variação do ângulo δ , o módulo dessa potência ativa circulante é relativamente pequeno em relação à potência aparente total, especialmente para ângulos δ na faixa de 0° a 40° . Essa avaliação foi devidamente detalhada com os resultados da análise quantitativa e validados via simulação numérica e com os resultados experimentais mostrados nos Capítulos 5 e 6.

Para o caso da Figura 10 (b), com θ negativo (vetores em verde), o M-iUPQC consome reativo da rede, ou seja, se comporta como uma carga indutiva. Como pode-se observar, parte do reativo consumido da rede pelo conversor é consumido pelas cargas da microrrede. Com isso, o FAP precisa processar menos potência, o que justifica a diminuição da amplitude do vetor de corrente do FAP para esse caso. Essa característica pode ser útil para forçar a redução da potência processada pelo FAP, evitando a atuação de proteções contra sobrecorrente nesse conversor, mesmo sem a atuação do CATC.

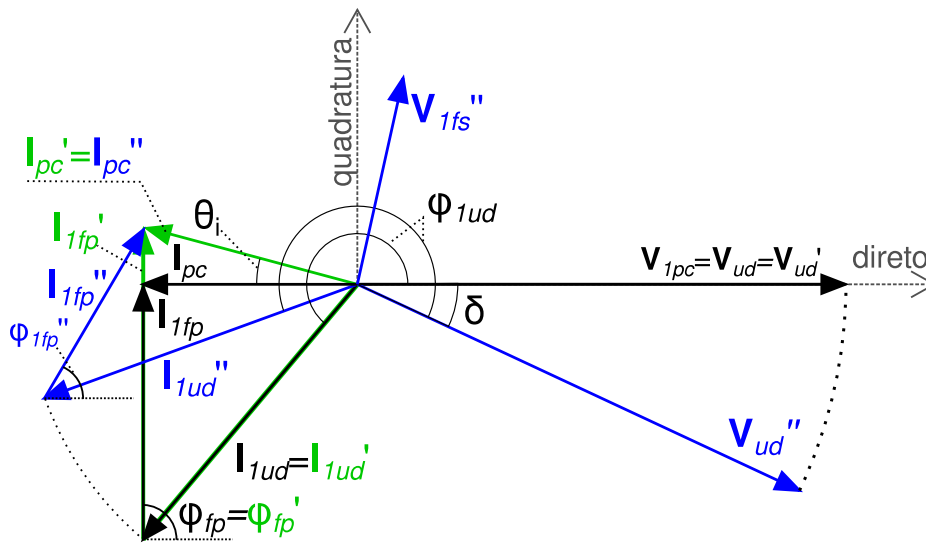
De forma análoga ao caso avaliado na Figura 10 (a), para o caso de θ negativo e δ positivo, o FAS passaria a fornecer reativo reduzindo ainda mais potência processada pelo FAP. Demonstra-se, assim, a eficácia do CATC para essa condição também.

4.1.2 Segundo cenário: fluxo de potência da microrrede para a rede

Nesse cenário, assim como no primeiro cenário, considerou-se que as cargas conectadas na microrrede possuem característica indutiva, ou seja, estão consumindo reativo.

Na Figura 12, em preto estão representados os vetores para os ângulos θ e δ iguais a 0° , em verde estão representados os vetores para um ângulo θ negativo, e em azul, estão representados os vetores considerando θ e δ negativos e diferentes de 0° .

Figura 12 – Diagrama fasorial de um conversor M-iUPQC para cenário com fluxo de potência ativa da microrrede para a rede. (a) vetores em preto: θ e δ igual a 0° , vetores em verde θ negativo e δ igual a 0° , vetores em azul: θ e δ negativos.



Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

Similar ao cenário, com θ e δ iguais a 0° , não há tensão no FAS e toda a potência reativa consumida pelas cargas da microrrede são fornecidas pelo FAP. Ou seja, inverter o fluxo de potência ativa, nesse caso, não afeta o fluxo de potência pois no M-iUPQC, idealmente, não há consumo de potência ativa.

Para o caso de θ negativo e δ igual a 0° , como o conversor possui a componente em quadratura da corrente da carga positiva, o conversor está

fornecendo reativo para rede, ou seja, visto pela rede o conversor possui característica de uma carga capacitiva.

Diferentemente do primeiro cenário, para que o conversor forneça reativo para a rede, o ângulo θ é negativo. Isso ocorre pois nessa condição, o sinal de controle que define a amplitude da corrente do PAC, gerado pelo controlador da tensão total do barramento CC, conforme mostrado na Figura 7, se inverte para permitir que o conversor injete potência ativa na rede. Na estratégia de controle do M-iUPQC utilizada nesse trabalho, controla-se o fluxo de potência reativo da rede para microrrede alterando-se θ que é o ângulo de fase da senoide de referência para o controlador de corrente do FAS. Como essa senoide de referência é multiplicada pelo sinal de saída do controlador de tensão total do barramento CC, consequentemente inverte-se o sentido de rotação do ângulo θ .

Além do exposto no parágrafo anterior, de forma análoga ao cenário 1 com o M-iUPQC fornecendo potência reativa para a rede e com δ igual a 0° , o FAP precisa fornecer toda a potência reativa para a carga e para a rede, o que justifica o aumento do módulo da corrente do FAP.

Com θ e δ negativos, uma tensão no FAS é imposta de modo que esse forneça reativo, reduzindo a potência reativa que o FAP precisa fornecer e demonstrando a eficácia do CATC para fazer o compartilhamento da potência processada pelos conversores do M-iUPQC. Caso δ fosse positivo, pode-se facilmente deduzir que o contrário ocorreria com o FAS consumindo reativo sobrecarregando ainda mais o FAP o que não seria eficiente.

Com isso, ficou evidente que a lógica para se fazer o compartilhamento eficiente e equalização da potência processada pelos conversores do M-iUPQC depende do sentido do fluxo de potência ativa entre a rede e a microrrede.

4.1.3 Fluxo de potência das componentes não-fundamentais

O objetivo dessa análise é avaliar a influência da variação dos ângulos θ e δ no processamento dos harmônicos da tensão do PAC e dos harmônicos da corrente da microrrede.

Para isso, consideraram-se as condições do primeiro cenário apresentado nessa seção e acrescentaram-se harmônicos na corrente da microrrede e na tensão do PAC.

No caso dos harmônicos de corrente da microrrede, como a corrente no PAC e, conseqüentemente, a corrente no FAS não possuem harmônicos, os harmônicos de corrente da microrrede são forçados a circular pelo FAP que processa toda a potência relacionada a esses harmônicos. Alterar o ângulo δ ou θ não irá alterar o caminho dos harmônicos de corrente da microrrede e, portanto, esses permanecerão sendo processados exclusivamente pelo FAP. Isso significa que o CATC não é útil para fazer o compartilhamento da potência relacionado aos harmônicos de corrente da microrrede.

De maneira similar para os harmônicos de tensão do PAC, como a tensão da microrrede é puramente senoidal, as componentes harmônicas da tensão do PAC são processadas exclusivamente pelo FAS e não são afetadas pela variação do ângulo δ . Porém, a variação do ângulo θ influencia no processamento da potência relacionado aos harmônicos de tensão no PAC pelo FAS pois altera-se o módulo da corrente do FAS. Entretanto, na prática essa variação é pouco significativa, como foi demonstrado na análise quantitativa e validada com os resultados de simulação e resultados práticos.

4.2 ANÁLISE QUANTITATIVA DO FLUXO DE POTÊNCIA DO CONVERSOR M-IUPQC

Nessa seção é apresentada a análise quantitativa do fluxo de potência de um conversor M-iUPQC.

O principal objetivo dessa análise é obter equações que descrevem as potências processadas pelo FAP e o FAS de um conversor M-iUPQC em função da variação dos ângulos θ e δ . Além disso, buscou-se desenvolver as equações em função de parâmetros externos ao conversor como variáveis da microrrede e da tensão no PAC. Por fim, desenvolveram-se as equações de modo a que essas fossem válidas para todos os cenários de operação como, por exemplo, com desequilíbrio nas correntes da microrrede ou com desequilíbrio, com afundamentos ou elevações na tensão no PAC, e assim por diante.

A exemplo do que foi feito na análise qualitativa, inicialmente obteve-se equações que descrevem o fluxo das componentes fundamentais de potência do FAS e do FAP, apresentadas no Item 4.2.1. Posteriormente, foi avaliado o fluxo das componentes não-fundamentais de potência dos conversores do M-iUPQC, apresentado no Item 4.2.2. Finalmente, no Item 4.2.3 estão apresentadas as componentes totais de potência.

4.2.1 Componentes fundamentais de potência

Para uma análise mais detalhada e facilitar o entendimento da influência da variação dos ângulos θ e δ no fluxo das componentes fundamentais de potência nos conversores do M-iUPQC, foram obtidas equações para as componentes fundamentais da potência ativa (P_1), reativa (Q) e aparente (S_1). Para isso, utilizaram-se as definições para essas variáveis apresentadas na IEEE 1459:2010 e que estão mostradas nas equações (2) a (4), respectivamente.

$$P_1 = V_1 \cdot I_1 \cdot \cos(\varphi_1) \quad (2)$$

$$Q = V_1 \cdot I_1 \cdot \sin(\varphi_1) \quad (3)$$

$$S_1 = V_1 \cdot I_1 = \sqrt{P_1^2 + Q^2} \quad (4)$$

onde V_1 e I_1 , respectivamente, são os valores eficazes das componentes fundamentais da tensão e corrente e φ_1 é a diferença do ângulo da tensão em relação à corrente.

Inicialmente, sabe-se que a amplitude da componente direta da corrente do FAS é definida pela potência ativa da microrrede. Como as perdas do conversor foram desprezadas, pode-se afirmar que a soma das componentes fundamentais da potência ativa medida nas 3 fases do PAC é igual a soma das componentes fundamentais da potência ativa nas 3 fases da microrrede, conforme mostrado na equação (5).

$$P_{1pcT} = P_{1udT} \quad (5)$$

Como considerou-se que a corrente no PAC e a tensão na microrrede não possuem componentes harmônicas, logo, não há circulação de componentes não-fundamentais de potência ativa. Dito isso, simplificou-se a equação (5) removendo-se o subscrito 1, conforme mostrado na equação (6) que indica que a variável medida é relacionada exclusivamente à componente fundamental.

$$P_{pcT} = P_{udT} \quad (6)$$

Considerando que pode haver desequilíbrio na componente fundamental da tensão no PAC e que a corrente no PAC é equilibrada, calculou-se P_{pcT} conforme mostrado na equação (7).

$$P_{pcT} = I_{pc} \cdot \cos(\theta) \cdot V_{1pcT} \quad (7)$$

onde V_{1pcT} é a soma algébrica das componentes fundamentais das tensões do PAC nas fases A, B e C.

Para a potência ativa da microrrede, optou-se por manter a equação em função de P_{udT} pois, como pode haver desequilíbrio nas correntes da microrrede, seria necessário carregar no equacionamento o módulo e o ângulo de fase das correntes das 3 fases da microrrede.

Foi substituída a equação (7) em (6), foi isolada a variável I_{pc} e resultado na equação (8).

$$I_{pc} = \frac{P_{udT}}{V_{1pcT} \cdot \cos(\theta)} \quad (8)$$

Com a equação (8) foi obtido o módulo da corrente do PAC que nessa análise foi considerada igual à corrente do FAS. Além disso, o ângulo da corrente do PAC ou FAS é o θ que é controlado e conhecido. Dessa forma, foram conhecidos a amplitude e o ângulo de defasagem da corrente do FAS.

Para a tensão do FAS, calculou-se o vetor da componente fundamental da tensão do FAS ($\overrightarrow{V_{1fsX}}$) pela diferença entre o vetor da componente fundamental da tensão no PAC ($\overrightarrow{V_{1pcX}}$) e o vetor da tensão na microrrede ($\overrightarrow{V_{ud}}$), conforme mostrado na equação (9).

$$\overrightarrow{V_{1fsX}} = \overrightarrow{V_{1pcX}} - \overrightarrow{V_{ud}} \quad (9)$$

Seguindo a convenção utilizada no presente trabalho, o ângulo do vetor da componente da tensão do PAC é sempre 0° e o ângulo do vetor da tensão da microrrede é δ , conforme mostrado nas equações (10) e (11) .

$$\overrightarrow{V_{1pcX}} = V_{1pcX} \angle 0^\circ \quad (10)$$

$$\overrightarrow{V_{ud}} = V_{ud} \angle \delta \quad (11)$$

Então, com as equações (9), (10) e (11) foram obtidos o módulo (V_{1fsX}) e o ângulo de fase (β_{1fsX}) da tensão do FAS, conforme mostrado nas equações (12) e (13).

$$V_{1fsX} = \sqrt{V_{1pcX}^2 - 2 \cdot V_{1pcX} \cdot V_{ud} \cdot \cos(\delta) + V_{ud}^2} \quad (12)$$

$$\beta_{1fsX} = \text{atan} \left(\frac{-V_{ud} \cdot \text{sen}(\delta)}{V_{1pcX} - V_{ud} \cdot \cos(\delta)} \right) \quad (13)$$

Conhecendo o módulo e o ângulo de fase da tensão e corrente do FAS, calcularam-se as potências ativa (P_{1fsX}) e reativa (Q_{fsX}) do FAS com as equações (14) e (15).

$$P_{1fsX} = V_{1fsX} \cdot I_{pc} \cdot \cos(\beta_{1fsX} - \theta) \quad (14)$$

$$Q_{fsX} = V_{1fsX} \cdot I_{pc} \cdot \text{sen}(\beta_{1fsX} - \theta) \quad (15)$$

Substituíram-se nas equações (14) e (15), as equações (8), (12) e (13). Após manipulações algébricas e simplificações, foram obtidas as equações (16) e (17) que descrevem as componentes fundamentais de potência ativa e reativa do FAS, respectivamente.

$$P_{1fsX} = \frac{P_{udT}}{V_{1pcT} \cdot \cos(\theta)} \cdot (V_{1pcX} \cdot \cos(\theta) - V_{ud} \cdot \cos(\theta - \delta)) \quad (16)$$

$$Q_{fsX} = \frac{P_{udT}}{V_{1pcT} \cdot \cos(\theta)} \cdot (V_{ud} \cdot \text{sen}(\theta - \delta) - V_{1pcX} \cdot \text{sen}(\theta)) \quad (17)$$

Por fim, foi calculada a componente fundamental da potência aparente do FAS (S_{1fsX}) conforme mostrado na equação (18).

$$S_{1fsX} = \sqrt{P_{1fsX}^2 + Q_{fsX}^2} \quad (18)$$

Para o cálculo da componente fundamental da potência ativa do FAP (P_{1fpX}), foi feito o somatório da potência ativa do sistema rede – conversor M-iUPQC e microrrede, conforme mostrado na equação (19).

$$-P_{pcX} + P_{1fsX} + P_{1fpX} + P_{udX} = 0 \quad (19)$$

onde P_{pcX} é a potência ativa em uma fase do PAC e P_{udX} é a potência ativa em uma das fases da microrrede.

Esse somatório das potências ativas pode ser feito pois, apesar de haver circulação de potência ativa entre as fases do FAP em situações de desequilíbrio da tensão no PAC ou na corrente da microrrede, o balanço energético do sistema é mantido.

A potência P_{pcX} foi calculada conforme mostrado na equação (21) e P_{udX} foi calculada conforme mostrado na equação (21).

$$P_{pcX} = V_{pcX} \cdot I_{pc} \cdot \cos(\theta) \quad (20)$$

$$P_{udX} = V_{ud} \cdot I_{1udX} \cdot \cos(\varphi_{1udX}) \quad (21)$$

onde I_{1udX} é o valor eficaz da componente fundamental da corrente na respectiva fase da microrrede e φ_{1udX} é a diferença angular entre a tensão e a componente fundamental da corrente da microrrede.

Foram substituídos os valores das equações (20) e (21) na equação (19) e isolando a variável P_{1fpX} , após manipulações algébricas e simplificações, foi obtida a equação (22) a qual descreve a componente fundamental da potência ativa do FAP.

$$P_{1fpX} = \frac{P_{udT} \cdot V_{ud} \cdot \cos(\theta - \delta)}{V_{1pcT} \cdot \cos(\theta)} - V_{ud} \cdot I_{1udX} \cdot \cos(\varphi_{1udX}) \quad (22)$$

Para o cálculo da potência reativa, de forma similar ao feito com a potência ativa, foi feito o somatório das potências reativas do sistema rede, conversor M-iUPQC e microrrede, conforme mostrado na equação (23).

$$Q_{pcX} + Q_{fsX} + Q_{fpX} + Q_{udX} = 0 \quad (23)$$

onde Q_{pcX} , Q_{fpX} e Q_{udX} são a potência reativa do PAC, do FAP e da microrrede, respectivamente.

As variáveis Q_{pcX} e Q_{udX} foram calculadas conforme mostrado nas equações (24) e (25), respectivamente.

$$Q_{pcX} = V_{pcX} \cdot I_{pc} \cdot \sin(\theta) \quad (24)$$

$$Q_{udX} = V_{ud} \cdot I_{1udX} \cdot \sin(\varphi_{1udX}) \quad (25)$$

Foram substituídas as equações (24) e (25) na equação (23) e foi isolada a variável Q_{fpX} . Após manipulações matemáticas e simplificações, obteve-se a equação (26) que descreve a potência reativa do FAP.

$$Q_{fpX} = V_{ud} \cdot I_{1udX} \cdot \sin(\varphi_{1udX}) - \frac{P_{udT} \cdot V_{ud} \cdot \sin(\theta - \delta)}{V_{1pcT} \cdot \cos(\theta)} \quad (26)$$

Finalmente, foi calculada a potência aparente da componente fundamental do FAP conforme mostrado na equação (27).

$$S_{1fpX} = \sqrt{P_{1fpX}^2 + Q_{fpX}^2} \quad (27)$$

Com isso, foram obtidas todas as equações que descrevem as componentes fundamentais de potência do FAS e do FAP. Conforme observado, todas as equações obtidas são funções das variáveis θ e δ , demonstrando a influência dessas no fluxo das componentes fundamentais de potência dos conversores do M-iUPQC, conforme previsto na análise qualitativa apresentada nesse trabalho.

4.2.2 Componentes não-fundamentais de potência

As componentes não-fundamentais de potência (S_N), de acordo com a IEEE 1459:2010, podem ser calculadas pela soma quadrática da potência da distorção da corrente (D_I), da distorção da tensão (D_V) e a potência aparente dos harmônicos (S_H), conforme mostrado na equação (28).

$$S_N = \sqrt{D_I^2 + D_V^2 + S_H^2} \quad (28)$$

onde D_I , D_V e S_H são calculadas conforme mostrado nas equações (29), (30) e (31).

$$D_I = V_1 \cdot I_H \quad (29)$$

$$D_V = V_H \cdot I_1 \quad (30)$$

$$S_H = V_H \cdot I_H \quad (31)$$

A componente não-fundamental da potência do FAP (S_{NfpX}) pode ser calculada conforme mostrado na equação (32) visto que não há distorção na tensão da microrrede.

$$S_{NfpX} = V_{ud} \cdot I_{HfpX} \quad (32)$$

onde I_{HfpX} é o somatório das componentes não fundamentais da corrente do FAP.

Como a corrente do FAS não possui harmônicos, todos harmônicos de corrente da microrrede circulam pelo FAP. Com isso, foi calculada a componente

não-fundamental de potência do FAP (S_{NfpX}) conforme mostrado na equação (33).

$$S_{NfpX} = V_{ud} \cdot I_{1udX} \cdot DHT_{iudX} \quad (33)$$

onde DHT_{iudX} é a distorção harmônica total da corrente da microrrede.

A componente não-fundamental da potência do FAS (S_{NfsX}) pode ser calculada conforme mostrado na equação (34) visto que não há distorção na corrente do PAC.

$$S_{NfsX} = V_{HfsX} \cdot I_{pc} \quad (34)$$

Como a tensão da microrrede não possui harmônicos, todos harmônicos de tensão do PAC ficam no FAS. Com isso, substitui-se I_{pc} na equação (34) pela equação (8) e calculou-se S_{NfsX} conforme mostrado na equação (35).

$$S_{NfsX} = V_{1pcX} \cdot DHT_{VpcX} \cdot \frac{P_{udT}}{V_{1pcT} \cdot \cos(\theta)} \quad (35)$$

onde DHT_{VpcX} é a distorção harmônica total da tensão do PAC.

Conforme levantado na análise qualitativa, as componentes de potência S_{NfpX} e S_{NfsX} não sofrem influência da variação do ângulo δ . Além disso, também foi demonstrado que apenas a componente S_{NfsX} sofre influência da variação do ângulo θ .

4.2.3 Componentes totais de potência

De acordo com a IEEE 1459:2010, a potência aparente total (S) pode ser calculada conforme mostrado na equação (36).

$$S = \sqrt{S_1^2 + S_N^2} \quad (36)$$

Como S_1 e S_N do FAS e do FAP são conhecidos, foram calculadas as potências aparentes totais do FAS (S_{fs}) e do FAP (S_{fp}) conforme mostrado nas equações (37) e (38).

$$S_{fsX} = \sqrt{S_{1fsX}^2 + S_{NfsX}^2} \quad (37)$$

$$S_{fpX} = \sqrt{S_{1fpX}^2 + S_{NfpX}^2} \quad (38)$$

Dessa forma, foram obtidas todas as equações que descrevem detalhadamente o fluxo de potência em um conversor M-iUPQC em função da variação dos ângulos θ e δ .

A validação das equações obtidas foi feita por meio de simulações numéricas e resultados experimentais que estão apresentados nos Capítulos 5 e 6 do presente trabalho.

4.2.4 Resumo das equações finais que descrevem o fluxo de potência no M-iUPQC

Para melhorar a organização, as equações que descrevem o fluxo de potência em um conversor M-iUPQC estão agrupadas na Tabela 6.

Tabela 6 – Equações obtidas que descrevem o fluxo de potência de um conversor M-iUPQC

Variável	Equação	Ref.
Comp. fundamental de potência ativa do FAS	$P_{1fsX} = \frac{P_{udT}}{V_{1pcT} \cdot \cos(\theta)} \cdot (V_{1pcX} \cdot \cos(\theta) - V_{ud} \cdot \cos(\theta - \delta))$	(16)
Comp. fundamental de potência reativa do FAS	$Q_{fsX} = \frac{P_{udT}}{V_{1pcT} \cdot \cos(\theta)} \cdot (V_{ud} \cdot \sin(\theta - \delta) - V_{1pcX} \cdot \sin(\theta))$	(17)
Comp. fundamental da potência aparente do FAS	$S_{1fsX} = \sqrt{P_{1fsX}^2 + Q_{fsX}^2}$	(18)
Comp. fundamental de potência ativa do FAP	$P_{1fpX} = \frac{P_{udT} \cdot V_{ud} \cdot \cos(\theta - \delta)}{V_{1pcT} \cdot \cos(\theta)} - V_{ud} \cdot I_{1udX} \cdot \cos(\varphi_{1udX})$	(22)
Comp. fundamental de potência reativa do FAP	$Q_{fpX} = V_{ud} \cdot I_{1udX} \cdot \sin(\varphi_{1udX}) - \frac{P_{udT} \cdot V_{ud} \cdot \sin(\theta - \delta)}{V_{1pcT} \cdot \cos(\theta)}$	(26)
Comp. fundamental da potência aparente do FAP	$S_{1fpX} = \sqrt{P_{1fpX}^2 + Q_{fpX}^2}$	(27)
Comp. não-fundamental da potência do FAS	$S_{NfsX} = V_{1pcX} \cdot DHT_{VpcX} \cdot \frac{P_{udT}}{V_{1pcT} \cdot \cos(\theta)}$	(35)
Comp. não-fundamental da potência do FAP	$S_{NfpX} = V_{ud} \cdot I_{1udX} \cdot DHT_{iudX}$	(33)
Potência aparente total do FAS	$S_{fsX} = \sqrt{S_{1fsX}^2 + S_{NfsX}^2}$	(37)
Potência aparente total do FAP	$S_{fpX} = \sqrt{S_{1fpX}^2 + S_{NfpX}^2}$	(38)

Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

As equações mostradas na Tabela 6 foram utilizadas para geração dos gráficos no decorrer do trabalho.

5 RESULTADOS DE SIMULAÇÕES NUMÉRICAS

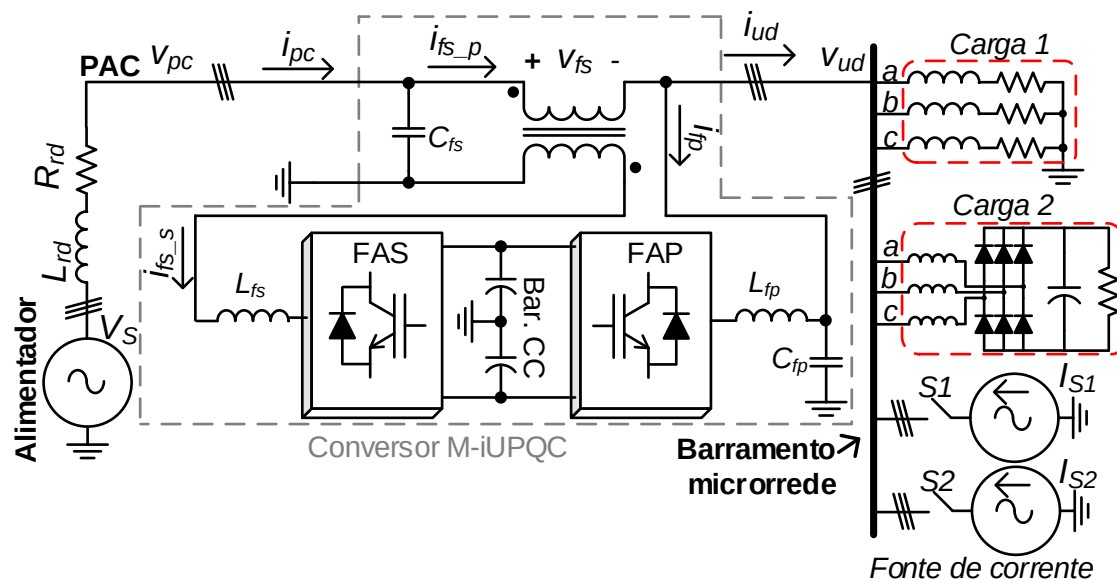
Nesse capítulo estão apresentados os resultados obtidos via simulação numérica. Foram realizadas simulações para validar o funcionamento do conversor M-iUPQC e avaliar o desempenho dinâmico do controle, conforme os resultados mostrados no Item 5.1. Posteriormente foram realizadas simulações para validar o equacionamento desenvolvido no Capítulo 4. Todas as simulações foram feitas utilizando o *software* PSIM 9.0 e foram feitas considerando os componentes ideais, ou seja, desprezaram-se as não-idealidades dos componentes eletrônicos. Isso foi feito para facilitar a validação do equacionamento proposto uma vez que esse foi desenvolvido, também, desprezando-se as não idealidades.

Em todas as simulações realizadas, utilizou-se o conversor M-iUPQC de 2,5 kVA e os seus respectivos elementos de potência projetado Capítulo 2. Além disso, a estratégia de controle foi montada conforme mostrado na Figura 7 e foram utilizados os controladores projetados no Capítulo 2.

5.1 VALIDAÇÃO FUNCIONAL POR SIMULAÇÕES NUMÉRICAS

Para a validação funcional do conversor M-iUPQC, montou-se no *software* PSIM um sistema composto pelo conversor M-iUPQC operando como conversor de interface entre a rede e a microrrede, conforme mostrado na Figura 13.

Figura 13 – Esquema elétrico do sistema simulado para a validação funcional.



Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

Conforme mostrado na Figura 13, a rede elétrica foi modelada com uma fonte de tensão que representa o alimentador do sistema (V_s) e com uma impedância de rede (L_{rd} e R_{rd}). Além disso, para simular harmônicos de tensão no PAC, adicionaram-se componentes harmônicas de tensão de 3°, 7° e 9° ordem que são harmônicos comumente presentes em redes elétricas de distribuição e são consequência da circulação de correntes de cargas como retificadores monofásicos e trifásicos com filtro capacitivo. Do lado da microrrede, modelaram-se a mesma como um conjunto de cargas sendo essa formada por cargas lineares tipo RL (carga 1) e por uma carga não-linear feita com um retificador trifásico com filtro capacitivo (carga 2). Por fim, modelou-se as microfuentes de energia pelo conjunto formado pelas fontes de corrente I_{s1} e I_{s2} e as chaves $S1$ e $S2$, onde as chaves foram adicionadas para representar o momento que as fontes de corrente passam a injetar energia no barramento da microrrede.

Os parâmetros de simulação utilizados estão mostrados na Tabela 7.

Tabela 7 – Parâmetros utilizados na simulação para validação funcional do conversor M-iUPQC

Parâmetro	Valor
Valor eficaz da componente fundamental de tensão de fase no PAC	127 V
Frequência fundamental do sistema	60 Hz
Valor eficaz da componente de 3ª harmônica de tensão no PAC	8,5 V
Valor eficaz da componente de 7ª harmônica de tensão no PAC	6,7 V
Valor eficaz da componente de 9ª harmônica de tensão no PAC	4,6 V
Resistência série da rede	0,3 Ω
Indutância série da rede	2,7 mH
Tensão de fase nominal da microrrede	127 V
Resistência da carga 1 da microrrede	24,1 Ω
Indutância da carga 1 da microrrede	52 mH
Resistência da carga 2 da microrrede	366 Ω
Capacitância da carga 2 da microrrede	705 μ F
Indutância da carga 2 da microrrede	350 μ H
Potência aparente das cargas 1 e 2 da microrrede	1,8 kVA
Potência ativa das cargas 1 e 2 da microrrede	1,47 kW
DHT da corrente das cargas 1 e 2 da microrrede	20,8%
Corrente eficaz de fase da fonte I_{S1}	2,7 A
Corrente eficaz de fase da fonte I_{S2}	8,2 A

Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

O status das chaves S1 e S2 foi informado nos respectivos Itens de cada simulação realizada.

As simulações com o objetivo de avaliar a funcionalidade do conversor M-iUPQC foram divididas em três subitens os quais são os itens 5.1.1, 5.1.2 e 5.1.3.

Nos itens 5.1.1 e 5.1.2, o objetivo foi avaliar em regime permanente a funcionalidade do conversor operando com fluxo de potência ativa da rede para a microrrede e no sentido oposto, respectivamente. Além disso, demonstrou-se a funcionalidade do conversor operando com os ângulos θ e δ para ambos os cenários. Como critério para avaliação do desempenho, mediu-se a DHT da tensão na microrrede e da corrente do PAC e compararam-se os resultados com a norma IEEE 519:2010 a qual define limites de DHT em sinais de tensão e corrente em redes de baixa ou alta tensão. Esse critério foi escolhido pois, além de demonstrar a capacidade do conversor M-iUPQC fazer o condicionamento da tensão da microrrede e da corrente do PAC, que é uma das funcionalidades esperadas para o conversor estudado no presente trabalho conforme mostrado no Capítulo 3, a tensão na microrrede e a corrente do PAC são variáveis

controladas diretamente pelo conversor. Em caso de alguma instabilidade no controle do conversor, essas variáveis seriam afetadas e os efeitos poderiam ser mensurados.

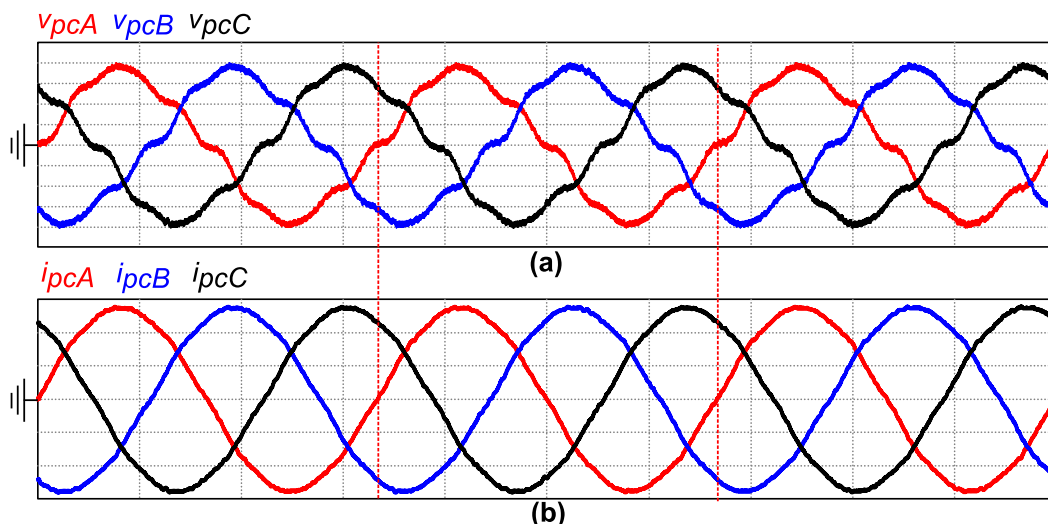
Por fim, no item 5.1.3, foi avaliado o desempenho dinâmico do conversor para variações de carga e do sentido do fluxo de potência que foi simulado fazendo a inserção de potência ativa no lado da microrrede por meio das fontes I_{S1} e I_{S2} .

5.1.1 Validação funcional – fluxo de potência ativa da rede para a microrrede

Inicialmente, simulou-se o circuito com as fontes I_{S1} e I_{S2} desabilitadas e as chaves S1 e S2 abertas. Além disso, os ângulos θ e δ foram configurados para 0° .

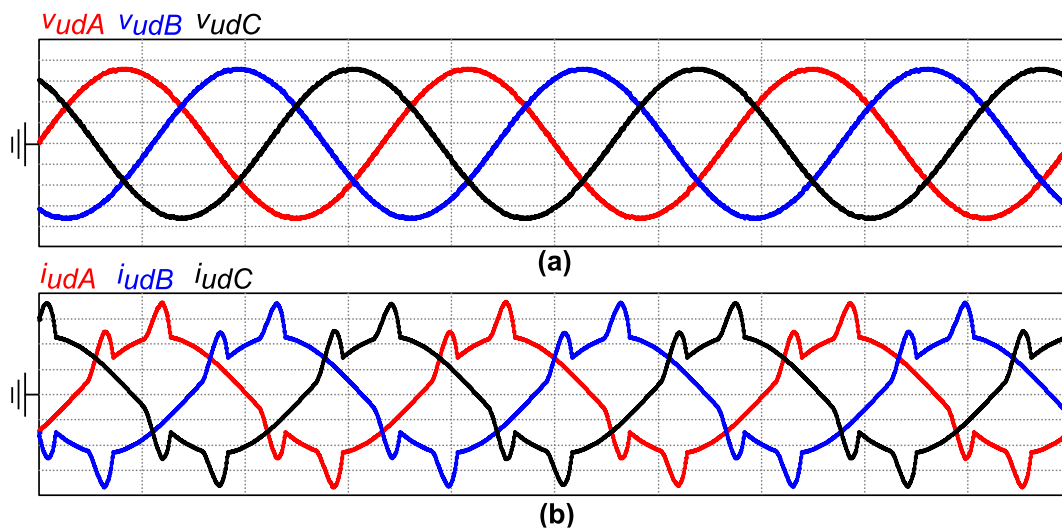
Conforme afirmado no Capítulo 3, uma das funcionalidades avaliadas para o conversor M-iUPQC é a compensação dos distúrbios de tensão do PAC e da corrente da microrrede. Por isso, mediram-se as formas de onda de tensão e corrente no PAC nas três fases do circuito, mostradas na Figura 14, e as formas de onda de tensão e corrente da microrrede nas três fases do circuito, mostradas na Figura 15.

Figura 14 – Formas de onda simuladas da (a) tensão (50 V/div) e (b) corrente (2 A/div) no PAC para S1 e S2 abertas e θ e δ igual a 0° . Escala de tempo de 5 ms/div.



Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

Figura 15 – Formas de onda simuladas da (a) tensão (50 V/div) e (b) corrente (2 A/div) na microrrede para S1 e S2 abertas e θ e δ igual a 0° . Escala de tempo de 5 ms/div.



Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

Também, mediu-se a DHT da tensão e corrente da microrrede e do PAC e comparou-se com os limites especificados pela IEEE 519:2014. Os valores estão mostrados na Tabela 8.

Tabela 8 – DHT da tensão e corrente da microrrede e do PAC medida para a simulação feita com para S1 e S2 abertas e θ e δ igual a 0° .

Parâmetro	Fase A	Fase B	Fase C	Máximo
DHT V_{pc} (%)	10,1	10,1	10,1	8,0
DHT V_{ud} (%)	1,3	1,3	1,3	8,0
DHT I_{ud} (%)	20,4	20,4	20,5	5,0
DHT I_{pc} (%)	1,9	1,8	1,8	5,0

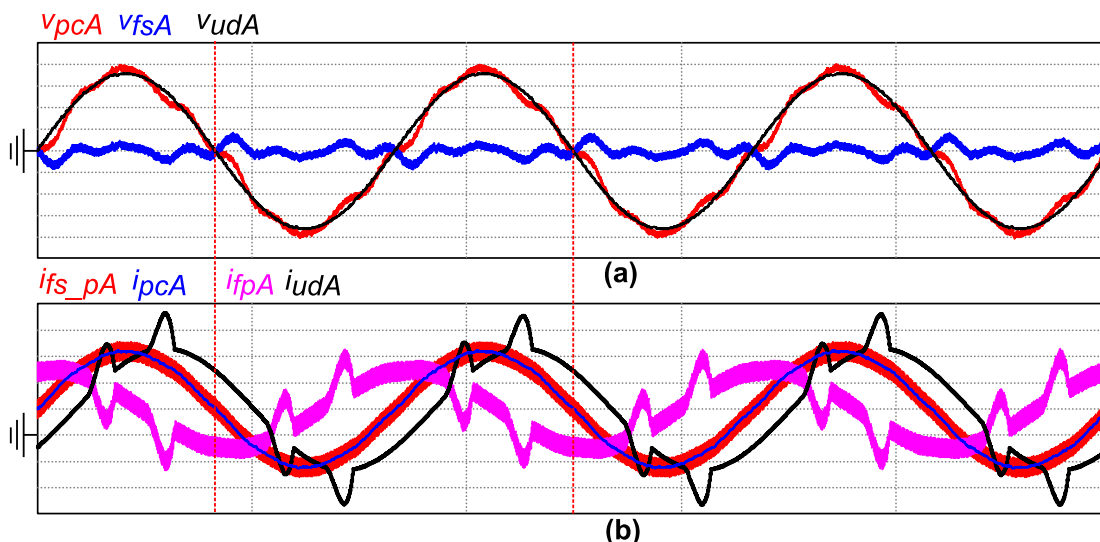
Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

Conforme demonstrado, a tensão no PAC e a corrente da microrrede, variáveis não controladas pelo M-iUPQC, estão com valores de DHT acima do limite especificado pela norma IEEE 519:2010, especialmente para a corrente da microrrede. Porém, as variáveis controladas pelo conversor M-iUPQC que são a tensão na microrrede e a corrente no PAC, ficaram com uma margem significativa dentro dos limites especificados pela norma IEEE 519:2010 o que significa que o conversor foi capaz de compensar os distúrbios da tensão do PAC e da corrente da microrrede. Dessa forma, utilizando o conversor M-iUPQC como conversor de interface em uma microrrede, garante-se uma tensão na microrrede e uma corrente no PAC equilibradas e sem distorções harmônicas, melhorando não apenas a qualidade da energia no lado da microrrede, mas também no lado da rede.

Por fim, como o ângulo θ foi configurado para 0° , demonstrou-se que a corrente do PAC está em fase com a tensão no PAC, fato que foi evidenciado pelas linhas tracejadas vermelhas que foram posicionadas na passagem por 0 V dos sinais de tensão e corrente da fase A do PAC.

Para demonstrar como ocorre a compensação dos distúrbios de tensão e corrente, mediram-se as formas de onda da tensão do PAC, do FAS e da microrrede, mostradas na Figura 16 (a). Também, mediram-se a corrente do FAS, do FAP e da microrrede, mostradas na Figura 16 (b). Para facilitar a visualização dos resultados, optou-se por medir apenas os sinais da fase A do sistema.

Figura 16 – Formas de onda simuladas da (a) tensão no PAC, no FAS e na microrrede (50 V/div.). (b) forma de onda da corrente no lado primário do transformador do FAS, FAP e microrrede (2,5 A/div) para S1 e S2 abertas e θ e δ igual a 0° . Escala de tempo de 10 ms/div.



Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

Em relação aos distúrbios da tensão no PAC, pela Figura 16 (a) fica evidente que os harmônicos de tensão no PAC são processados no FAS. Dessa forma, muito embora o FAS seja controlado em corrente e controla a corrente do PAC, como a tensão da microrrede é imposta pelo FAP, consequentemente os distúrbios de tensão no PAC são impostos e processados pelo FAS.

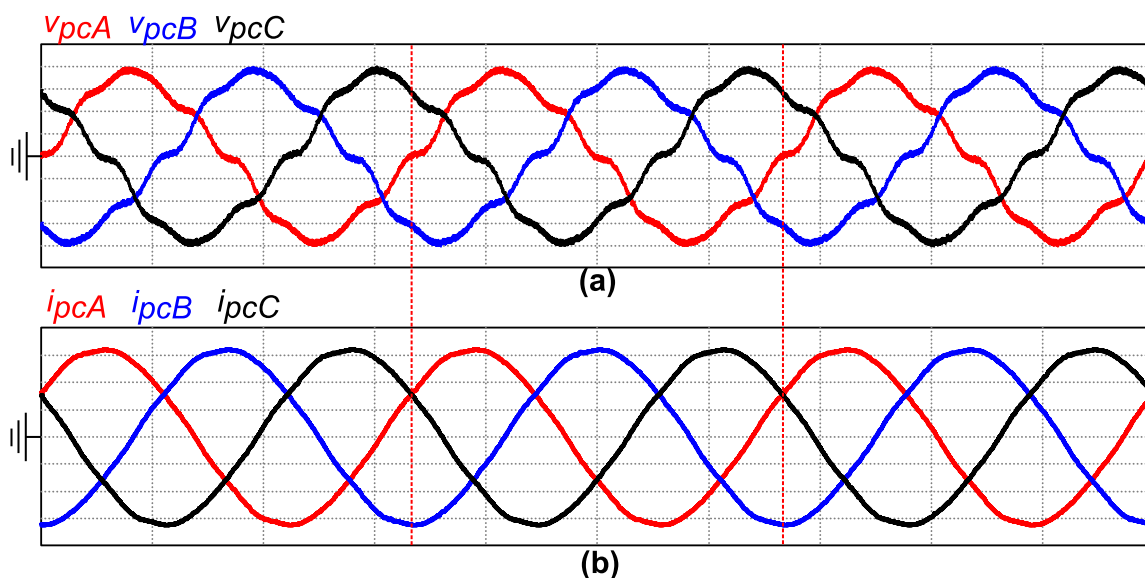
Em relação aos distúrbios de corrente da microrrede, na Figura 16 (b) foi demonstrado que o FAP se comporta como um caminho de baixa impedância para os harmônicos da corrente da microrrede. Também, no FAP é processada a potência reativa das cargas da microrrede o que resulta na parcela de corrente na frequência da rede. Por fim, observou-se uma componente de corrente de alta frequência circulando pelo FAP. Essa componente de alta frequência é gerada pelo FAS e como o capacitor de alta frequência do FAS fica em paralelo com o do FAP, ocorre a divisão dessa componente entre o capacitor C_{fs} e o C_{fp} . Porém, como pode ser observado nas formas de onda, não há circulação dessa componente de alta frequência para a rede ou para a microrrede.

Por fim, avaliou-se o funcionamento do conversor para uma condição em que a função Q e a função CATC estivessem habilitadas, ou seja, com os

ângulos θ e δ diferentes de 0° . Para isso, configuraram-se os ângulos θ e δ em 30° e 20° , respectivamente, e mantiveram-se os demais parâmetros inalterados.

Para avaliar a funcionalidade do conversor, mediram-se as formas de onda de tensão e corrente no PAC, que estão mostradas na Figura 17.

Figura 17 – Formas de onda simuladas da (a) tensão (50 V/div) e (b) corrente (2 A/div) no PAC para S1 e S2 abertas. θ igual a 30° e δ igual a 20° . Escala de tempo de 5 ms/div.



Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

Ficou demonstrado que a corrente no PAC está adiantada em relação à componente fundamental da tensão do PAC o que indicou que o conversor está fornecendo potência reativa capacitiva para a rede.

Para complementar a avaliação do desempenho do conversor M-iUPQC na compensação dos distúrbios de tensão no PAC e da corrente da microrrede para a condição de θ e δ diferentes de 0° , mediu-se a DHT da tensão da microrrede e da corrente do PAC. Os valores medidos estão mostrados na Tabela 9.

Tabela 9 – DHT da tensão e corrente da microrrede e do PAC medida para a simulação feita com para S1 e S2 abertas, θ igual a 30° e δ igual a 20° .

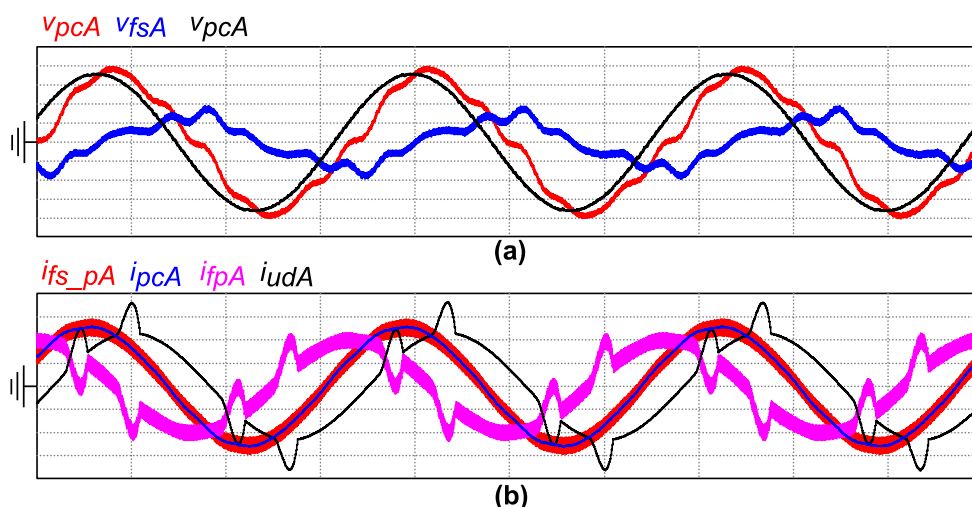
Parâmetro	Fase A	Fase B	Fase C	Máximo
DHT V_{pc} (%)	10,0	10,0	10,0	8,0
DHT V_{ud} (%)	1,3	1,3	1,3	8,0
DHT I_{ud} (%)	20,5	20,4	20,6	5,0
DHT I_{pc} (%)	1,4	1,4	1,4	5,0

Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

Constata-se que a DHT da tensão na microrrede e da corrente no PAC está dentro dos limites especificados na norma e que não houve variação significativa do desempenho comparado com as demais simulações. Demonstrou-se, assim, que a variação no ângulo θ e δ não afeta o desempenho do conversor em relação ao condicionamento da energia.

Por fim, com o objetivo de demonstrar o efeito da variação do ângulo δ nas tensões e correntes do M-iUPQC bem como avaliar a influência da variação do ângulo θ no fluxo de potência entre os conversores do M-iUPQC, mediram-se as formas de onda da tensão do PAC, do FAS e da microrrede, mostradas na Figura 18 (a). Também, mediram-se a corrente do FAS, do FAP e da microrrede, mostrada na Figura 18 (b).

Figura 18 – Formas de onda simuladas da (a) tensão no PAC, no FAS e na microrrede (50 V/div.) e (b) forma de onda da corrente no lado primário do transformador do FAS, FAP e microrrede (2,5 A/div) para S1 e S2 abertas. θ igual a 30° e δ igual a 20° . Escala de tempo de 5 ms/div.



Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

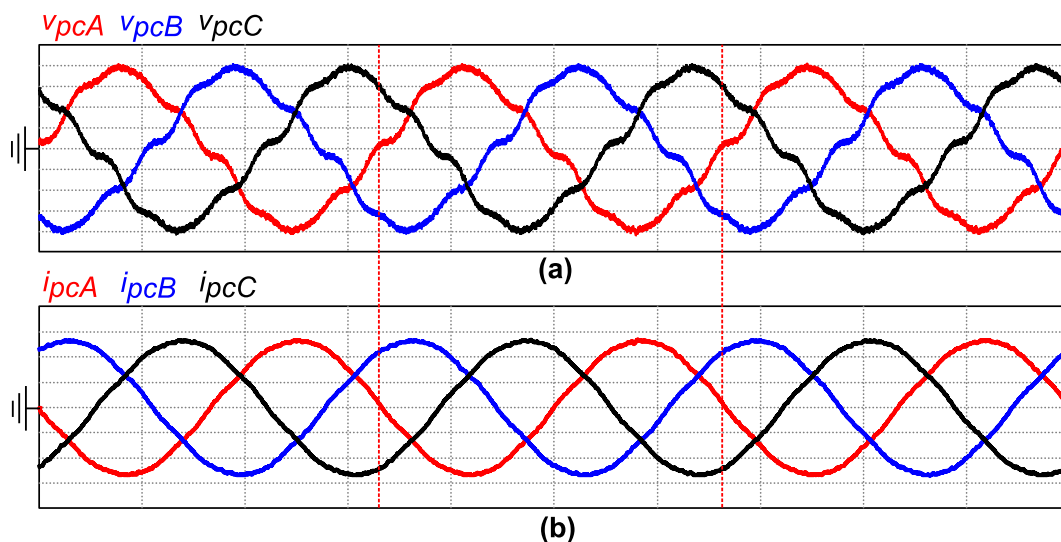
Com o ângulo δ diferente de 0° , além dos harmônicos da tensão no PAC, foi imposta no FAS uma componente de tensão na frequência da rede, como pode ser visto na Figura 18 (a). Dessa forma, o FAS passa a processar potência reativa reduzindo a potência que o FAP precisa processar, de acordo com a forma de onda mostrada na Figura 18 (b). Porém, salienta-se que com o δ diferente de 0° , uma parcela de potência ativa passa a circular entre os conversores. No entanto, esse fenômeno é difícil de ser visualizado apenas pela forma de onda. No Item 5.2 do presente trabalho, essa circulação de potência foi devidamente quantificada e avaliada. Por isso, não foram realizadas outras medidas nessa seção com o intuito de avaliar esse fenômeno.

5.1.2 Validação funcional – fluxo de potência da microrrede para a rede

Para avaliar a funcionalidade do conversor M-iUPQC em uma condição em que a microrrede está fornecendo potência ativa para a rede, realizou-se a simulação com as chaves S1 e S2 fechadas resultando em uma injeção de potência ativa de 4,1 kW no lado da microrrede, maior que a potência ativa consumida pelas cargas da microrrede.

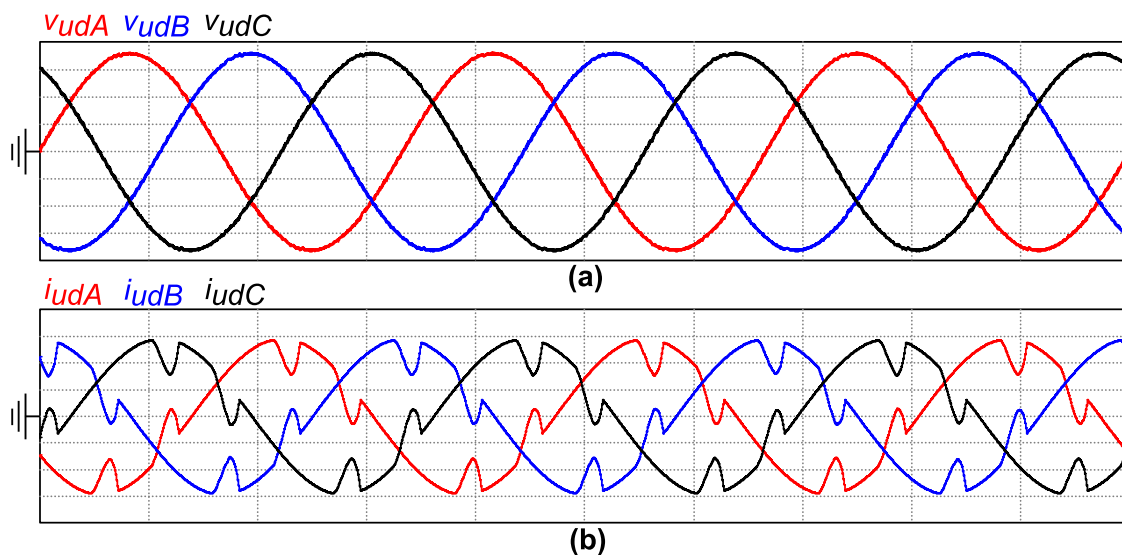
Inicialmente, foram configurados os ângulos θ e δ para 0° e mediram-se as formas de onda de tensão e corrente no PAC, que estão mostradas na Figura 19, e as formas de onda de tensão e corrente na microrrede, mostradas na Figura 20.

Figura 19 – Formas de onda simuladas da (a) tensão (50 V/div) e (b) corrente (2 A/div) no PAC para S1 e S2 fechadas. θ e δ igual a 0° . Escala de tempo de 5 ms/div.



Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

Figura 20 – Formas de onda simuladas da (a) tensão (50 V/div) e (b) corrente (2,5 A/div) da microrrede para S1 e S2 fechadas. θ e δ igual a 0° . Escala de tempo de 5 ms/div.



Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

Como a geração de potência ativa na microrrede é maior que o consumo das cargas, o excedente de potência foi injetado na rede, invertendo o fluxo de potência para o sentido da microrrede para a rede. Na Figura 19, foi demonstrada a inversão no ângulo da corrente em relação a tensão no PAC, ficando próximo de 180° , o que indicou que o conversor estava fornecendo potência ativa para a

rede. Essa inversão do fluxo de potência também foi demonstrada na Figura 20 uma vez que é nítida a inversão da polaridade da corrente em relação à tensão da microrrede.

A exemplo das demais simulações, avaliou-se o desempenho do conversor M-iUPQC na compensação dos distúrbios de tensão no PAC e da corrente da microrrede para as condições de operação do conversor dessa seção. Os valores medidos estão mostrados na Tabela 10.

Tabela 10 – DHT da tensão e corrente da microrrede e do PAC medida para a simulação feita com para S1 e S2 fechadas, θ e δ igual a 0° .

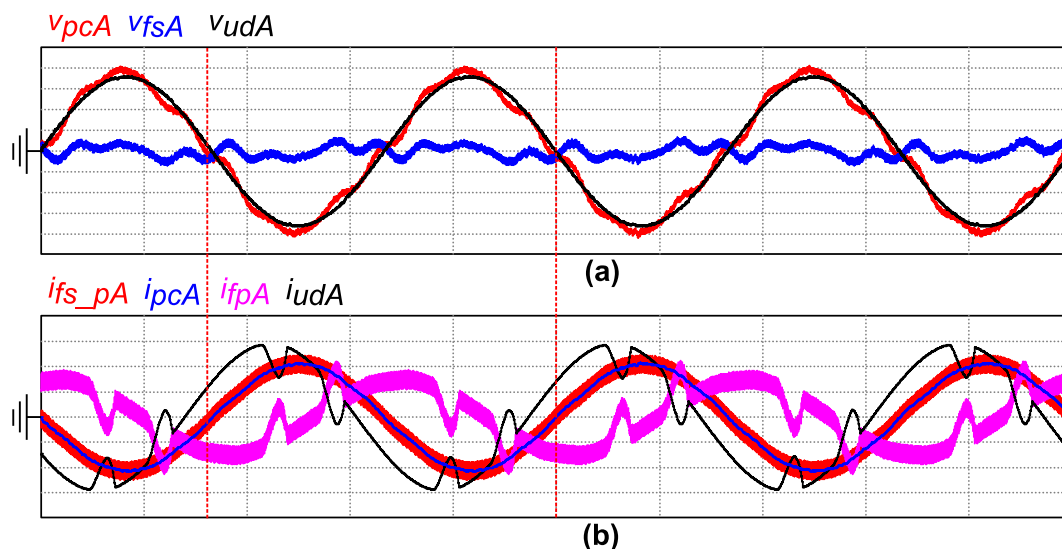
Parâmetro	Fase A	Fase B	Fase C	Máximo
DHT V_{pc} (%)	9,9	9,9	9,9	8,0
DHT V_{ud} (%)	1,3	1,3	1,3	8,0
DHT I_{ud} (%)	20,8	20,8	20,8	5,0
DHT I_{pc} (%)	1,9	1,8	1,8	5,0

Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

Da mesma forma, foi demonstrado que o conversor compensou os distúrbios de tensão no PAC e da corrente da carga e, também, demonstrou-se que o conversor pode operar de maneira estável para um cenário de operação com fluxo de potência no sentido da microrrede para a rede.

Também, mediram-se as formas de onda da tensão do PAC, do FAS e da microrrede, mostradas na Figura 21 (a) e da corrente do FAS, do FAP e da microrrede, mostradas na Figura 21 (b).

Figura 21 – Formas de onda simuladas da (a) tensão no PAC, no FAS e na microrrede (50 V/div.). (b) forma de onda da corrente no lado primário do transformador do FAS, FAP e microrrede (2,5 A/div) para S1 e S2 fechadas. θ e δ iguais a 0° . Escala de tempo de 5 ms/div.



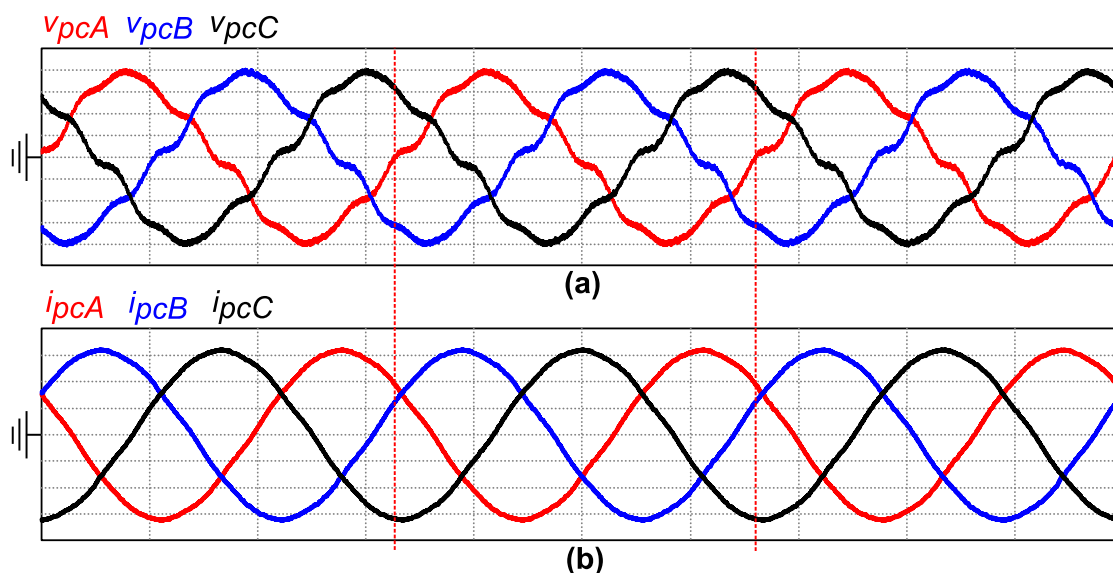
Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

A exemplo da simulação equivalente feita com o fluxo de potência da rede para a microrrede, com o ângulo δ igual a 0° e com a componente fundamental da tensão no PAC no valor nominal, a tensão no FAS é formada apenas pelas componentes harmônicas da tensão no PAC, o que significa que o FAS não está processando potência reativa das cargas da microrrede. Além disso, embora o fluxo de potência fosse da microrrede para a rede, a forma de onda de corrente do FAP é a mesma se comparado a forma de onda mostrada na Figura 16 (b) o que demonstrou que o FAP, nessa condição, processa apenas os distúrbios da corrente da microrrede, independente do sentido do fluxo de potência.

Finalmente, para avaliar a funcionalidade do conversor em um cenário com o fluxo de potência ativa da microrrede para a rede e com as funções Q e CATC ativadas, configuraram-se os ângulos θ e δ para -30° e -20° , respectivamente. Os ângulos θ e δ foram configurados para valores negativos pois com o fluxo de potência ativa da microrrede para a rede, a lógica dos ângulos se inverte, conforme demonstrado na análise qualitativa que foi apresentada no Item 4.1.2 do presente trabalho. Na Figura 22 estão mostradas

as formas de onda de tensão e corrente do PAC simuladas para essa condição de teste.

Figura 22 – Formas de onda simuladas da (a) tensão (50 V/div) e (b) corrente (2 A/div) no PAC para S1 e S2 fechadas. θ igual a -30° e δ igual a -20° . Escala de tempo de 5 ms/div.



Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

Pode-se observar na Figura 22 que a fase do sinal de corrente do PAC em relação a tensão do PAC não é igual a 180° , diferentemente do observado na simulação com θ igual a 0° , demonstrando que o conversor está fornecendo reativo para a rede.

Também, seguindo a metodologia adotada para essa seção do trabalho, mediu-se a DHT da tensão e corrente do PAC e da microrrede. Os valores medidos estão mostrados na Tabela 11.

Tabela 11 – DHT da tensão na microrrede e da corrente do PAC medida para a simulação feita com para S1 e S2 fechadas, θ igual a -30° e δ igual a -20° .

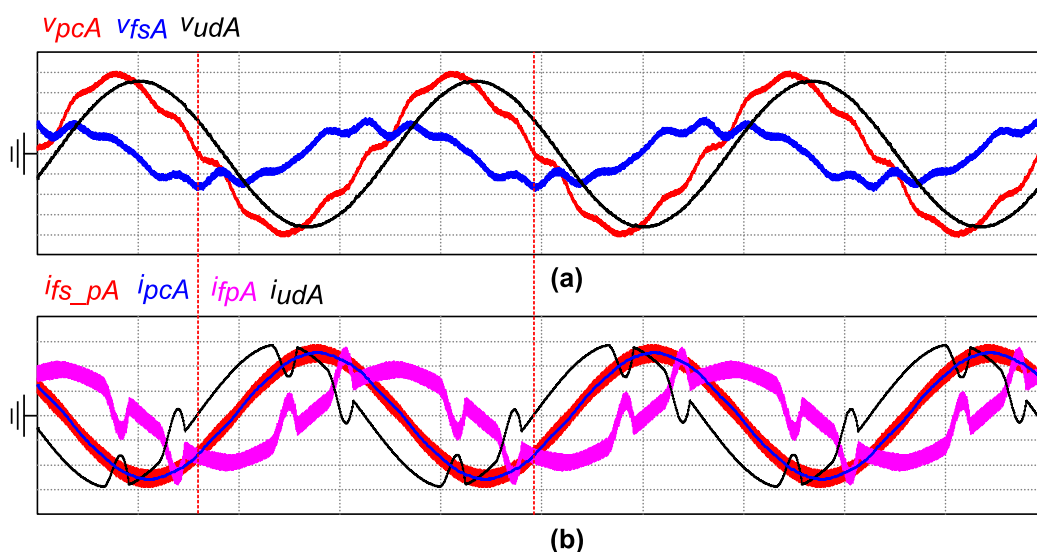
Parâmetro	Fase A	Fase B	Fase C	Máximo
DHT V_{pc} (%)	9,8	9,8	9,8	8,0
DHT V_{ud} (%)	1,2	1,2	1,2	8,0
DHT I_{ud} (%)	20,8	20,8	20,7	5,0
DHT I_{pc} (%)	1,3	1,3	1,3	5,0

Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

Da mesma forma, demonstrou-se que o conversor compensou os distúrbios de tensão no PAC e da corrente da carga e, também, demonstrou-se que o conversor pode operar de maneira estável para um cenário de operação com fluxo de potência no sentido da microrrede para a rede.

Por fim, com o objetivo de demonstrar o efeito da variação do ângulo δ nas tensões e correntes do M-iUPQC bem como avaliar a influência da variação do ângulo θ no fluxo de potência entre os conversores do M-iUPQC, mediram-se as formas de onda da tensão do PAC, do FAS e da microrrede, mostradas na Figura 23 (a). Também, foram medidas as formas de onda de corrente do FAS, do FAP e da microrrede, mostradas na Figura 23 (b).

Figura 23 – Formas de onda simuladas da (a) tensão no PAC, no FAS e na microrrede (50 V/div.). (b) forma de onda da corrente no lado primário do transformador do FAS, FAP e microrrede (2,5 A/div) para S1 e S2 fechadas. θ igual a -30° e δ igual a -20° . Escala de tempo de 5 ms/div.



Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

Na Figura 23 (a), fica evidente o efeito da defasagem entre a tensão na microrrede e a tensão do PAC impondo no FAS uma componente de tensão na frequência da rede, mesmo com as amplitudes das tensões no PAC e na microrrede equilibradas. Além disso, como o ângulo δ foi configurado para -20° , a tensão da microrrede está adiantada em relação à tensão no PAC que é o oposto ao observado na Figura 18 (b) com δ igual a 20° .

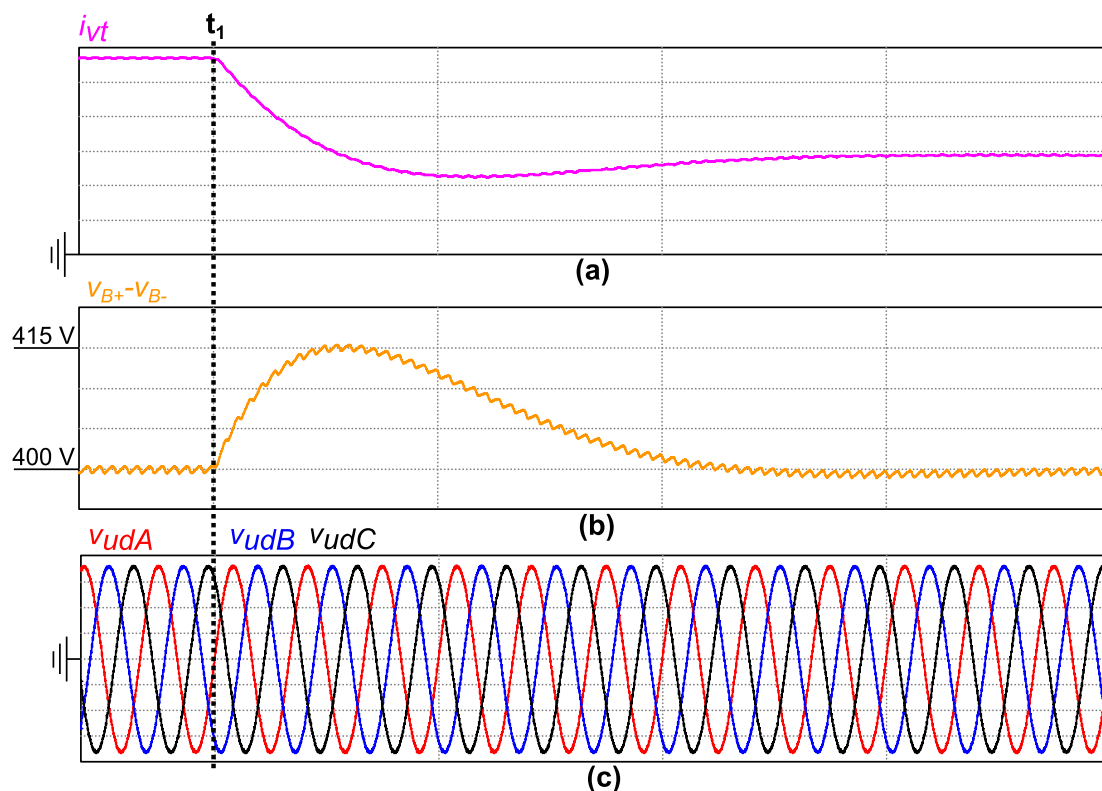
5.1.3 Resultados de simulações para avaliar a dinâmica do controle no gerenciamento do fluxo de potência ativa entre a rede e a microrrede

Nessa seção, foi avaliada a dinâmica do controle do conversor M-iUPQC no controle do fluxo de potência ativa entre a rede e a microrrede. Fazer esse gerenciamento do fluxo de potência foi listada como uma das funções a serem avaliadas no conversor M-iUPQC na operação como conversor de interface.

Para isso, foram simuladas variações na inserção de potência ativa no lado da microrrede por meio da comutação das chaves S1 e S2 do circuito mostrado na Figura 13. Além disso, todas as simulações que foram apresentadas nessa seção foram feitas com os ângulos θ e δ iguais a 0° .

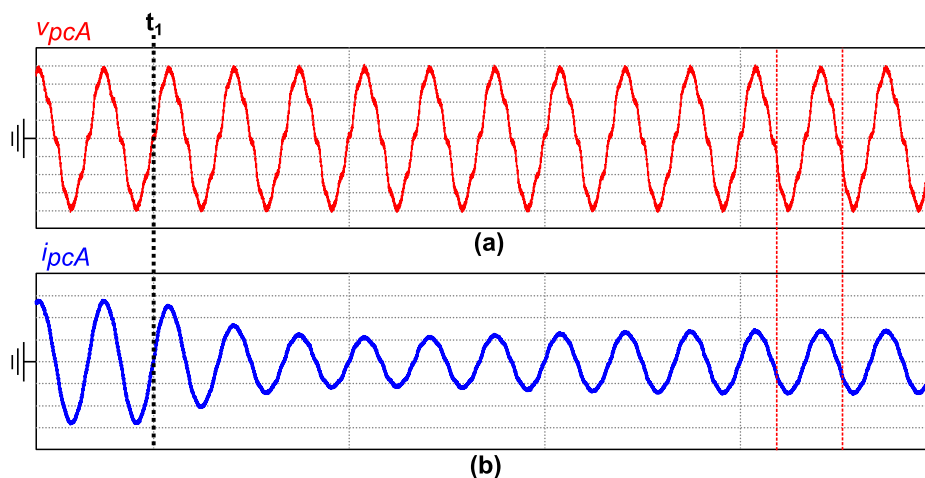
Inicialmente, com ambas as chaves abertas e com o circuito em regime permanente, fechou-se a chave S1 no instante t_1 . Mediram-se as formas de onda da tensão total do barramento CC, o sinal de saída do controlador da tensão total do barramento CC (i_{vt} mostrado na Figura 7) e da tensão da microrrede, mostrados na Figura 24. Adicionalmente, foram medidas as formas de onda da tensão e da corrente no PAC, mostrados na Figura 25 onde apenas os sinais da fase A do sistema foram apresentados para facilitar a visualização das formas de onda.

Figura 24 – Formas de onda simuladas da (a) sinal do controlador da tensão total do barramento CC (0,5 V/div.), (b) tensão total do barramento CC (5 V/div) e (c) tensão da microrrede (50 V/div) na simulação do transitório após o chaveamento de S1. Escala de tempo de 50 ms/div.



Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

Figura 25 – Formas de onda simuladas da (a) tensão no PAC (50 V/div.), (b) corrente no PAC (2 A/div) na simulação do transitório após o chaveamento de S1. Escala de tempo de 50 ms/div.



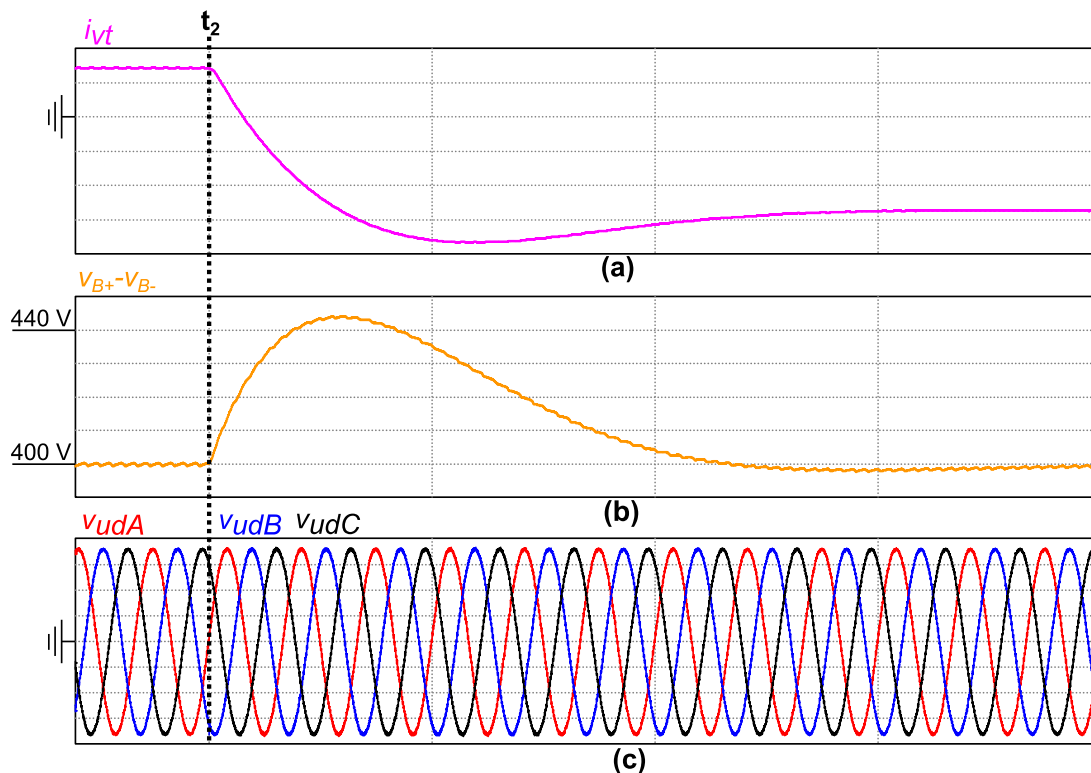
Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

Ao fechar-se a chave S1, a fonte I_{S1} passa a injetar 734 W de potência ativa no lado da microrrede. Com isso, a potência que a microrrede demanda da rede é reduzida, fazendo a tensão total do barramento CC aumentar em função do desbalanço entre a potência ativa consumida pela microrrede e absorvida pelo conversor da rede, conforme mostrado na Figura 24 (b). O controlador da tensão total do barramento CC atua reduzindo a amplitude do sinal de saída e, conseqüentemente, reduzindo a amplitude da corrente do PAC, como demonstrado na Figura 24 (a) e Figura 25 (b), respectivamente. Porém, como a potência ativa injetada pela fonte I_{S1} é inferior à potência ativa consumida pelas cargas, a corrente do PAC manteve-se em fase com a tensão do PAC, fato esse destacado pelas linhas tracejadas vermelhas mostradas na Figura 25 (b).

Destaca-se, também, que o aumento da tensão do barramento CC não afetou a tensão da microrrede, conforme mostrado na Figura 24 (c). Isso justifica-se pelo fato de a malha de controle da tensão da microrrede possuir uma dinâmica muito mais rápida que a malha de controle da tensão total do barramento CC e as conseqüentes variações da tensão total do barramento CC em função de variações de carga. Isso significa que variações das cargas ou da injeção de potência ativa no lado da microrrede não afetam a qualidade da tensão da microrrede.

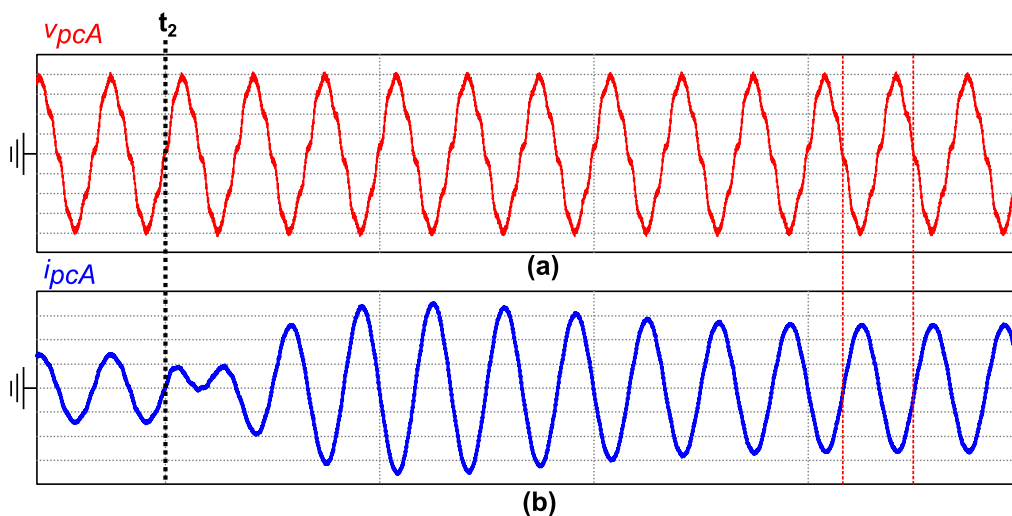
Por fim, com a chave S1 fechada e com o circuito operando em regime permanente, a chave S2 foi fechada no instante t_2 . Mediram-se as formas de onda da tensão total do barramento CC, o sinal de saída do controlador da tensão total do barramento CC e da tensão da microrrede, mostrados na Figura 26. Também, foram medidas as formas de onda da tensão e da corrente no PAC, mostradas na Figura 27.

Figura 26 – Formas de onda simuladas da (a) sinal do controlador da tensão total do barramento CC (0,5 V/div.), (b) tensão total do barramento CC (10 V/div) e (c) tensão da microrrede (50 V/div) na simulação do transitório após o chaveamento de S2. Escala de tempo de 50 ms/div.



Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

Figura 27 – Formas de onda simuladas da (a) tensão no PAC (50 V/div.), (b) corrente no PAC (2 A/div) na simulação do transitório após o chaveamento de S2. Escala de tempo de 50 ms/div.



Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

Quando a chave S2 foi fechada, a fonte I_{S2} passa a injetar 2,2 kW de potência ativa no lado da microrrede que é somada à potência ativa injetada pela fonte I_{S1} . Com isso, a potência que as cargas da microrrede consomem é menor que a potência injetada pelas fontes. Isso também resultou no aumento da tensão total do barramento CC, conforme demonstrado na Figura 26 (b). Porém, nesse caso, como houve superávit de potência gerada no lado da microrrede, o controlador da tensão total do barramento CC atuou de modo que o seu sinal de saída fosse negativo, o que resultou na inversão da fase da corrente em relação a tensão do PAC, como demonstrado na Figura 26 (a) e Figura 27. Ainda, destacou-se pelas linhas tracejadas vermelhas mostradas na Figura 27 a inversão de polaridade da corrente do PAC.

Por fim, a exemplo da simulação anterior, demonstrou-se que essa variação da injeção de potência ativa da microrrede não afetou a tensão da mesma, conforme mostrado na Figura 26 (c) o que demonstrou, novamente, a vantagem de se utilizar o M-IUPQC como conversor de interface no controle da tensão da microrrede independentemente da variação da injeção ou absorção de potência ativa na microrrede.

5.2 SIMULAÇÕES NÚMERICAS PARA AVALIAÇÃO DO FLUXO DE POTÊNCIA DO CONVERSOR M-IUPQC

Para validar o equacionamento proposto no Capítulo 4, foram realizadas simulações numéricas e compararam-se as medições de potência obtidas via simulação com os valores calculados utilizando as equações propostas.

Nas simulações, utilizaram-se o mesmo software e o sistema montado nas simulações para validação funcional o qual está mostrado na Figura 13. Além disso, foram utilizadas as especificações da tensão no PAC, da impedância da microrrede, da resistência, indutância e capacitância da carga 2 que estão listadas na Tabela 7. Os parâmetros da carga 1 da microrrede, corrente das fontes I_{S1} e I_{S2} e o status das chaves S1 e S2 estão listadas nos respectivos itens de cada cenário avaliado.

O objetivo das simulações realizadas foi validar o equacionamento proposto no Capítulo 4 o qual descreve o fluxo de potência entre os conversores

do M-iUPQC. Para isso, simulou-se o sistema montado e com o conversor operando em regime permanente mediram-se as variáveis de potência mostradas na Tabela 12 e foram comparadas com os resultados obtidos utilizando as equações obtidas no Capítulo 4. As equações desenvolvidas e que foram utilizadas para comparar com os resultados obtidos via simulação estão listadas na Tabela 12.

Tabela 12 – Variáveis de potência medida e o índice da respectiva equação

Parâmetro	Equação
Componente fundamental da potência ativa do FAS (P_{1fs})	(17)
Componente fundamental da potência reativa do FAS (Q_{fs})	(18)
Componente fundamental da potência aparente do FAS (S_{1fs})	(35)
Componente não-fundamental da potência do FAS (S_{Nfs})	(37)
Potência aparente do FAS (S_{fs})	(22)
Componente fundamental da potência ativa do FAP (P_{1fp})	(26)
Componente fundamental da potência reativa do FAP (Q_{fp})	(27)
Componente fundamental da potência aparente do FAP (S_{1fp})	(33)
Componente não-fundamental da potência do FAP (S_{Nfp})	(38)
Potência aparente do FAP (S_{fp})	

Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

Para a medição das variáveis de potência listadas na Tabela 12, seguiu-se a metodologia mostrada na IEEE 519, que foi o padrão adotado no presente trabalho.

Para demonstrar que a validade das equações para qualquer condição de operação, simularam-se 4 diferentes cenários, denominados cenários 1, 2, 3 e 4. Nos três primeiros, o fluxo de potência ativa foi da rede para a microrrede onde, nos cenários 1 e 2 variou-se o fator de deslocamento da Carga 1. No cenário 3, simulou-se o circuito com desequilíbrio na fase C da Carga 1. Por fim, no cenário 4, simulou-se o sistema com o fluxo de potência da microrrede para a rede. As especificações das cargas estão mostradas nos respectivos itens de cada cenário.

Em cada cenário avaliado, simulou-se o sistema com os ângulos θ e δ em -20° , 0° , 20° e 40° nos cenários 1, 2 e 3. No cenário 4, simulou-se o sistema com os ângulos θ e δ em -20° , 0° , 20° e 40° . Totalizando 16 simulações para cada cenário.

Para comparação dos resultados simulados com os calculados, plotou-se as curvas obtidas com as equações em função da variação dos ângulos θ e δ e, nos mesmos gráficos, plotou-se os pontos simulados.

Além da validação das equações, avaliou-se a influência da variação dos ângulos θ e δ no fluxo de potência dos conversores do M-iUPQC bem como a eficácia do CATC para fazer o compartilhamento e equalização da potência processada pelos conversores do FAS e do FAP para todos os cenários avaliados.

5.2.1 Cenário 1 – Fluxo de potência ativa da rede para a microrrede e cargas da microrrede equilibradas e fator de deslocamento de 0,82

No primeiro cenário, no sistema simulado o fluxo de potência ativa foi da rede para a microrrede. Também, consideraram-se todas as cargas da microrrede equilibradas e com as chaves $S1$ e $S2$ abertas. As especificações utilizadas nessa simulação estão mostradas na Tabela 13.

Tabela 13 – Parâmetros utilizados na simulação do cenário 1 para validação das equações

Parâmetro	Valor
Resistência da carga 1 da microrrede	24,1 Ω
Indutância da carga 1 da microrrede	52 mH
Corrente eficaz de fase da fonte I_{S1}	0,0 A
Corrente eficaz de fase da fonte I_{S2}	0,0 A

Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

Com o conversor operando em regime permanente, mediram-se as variáveis mostradas na Tabela 14 que foram utilizadas para calcular as potências do FAS e do FAP utilizando as equações desenvolvidas.

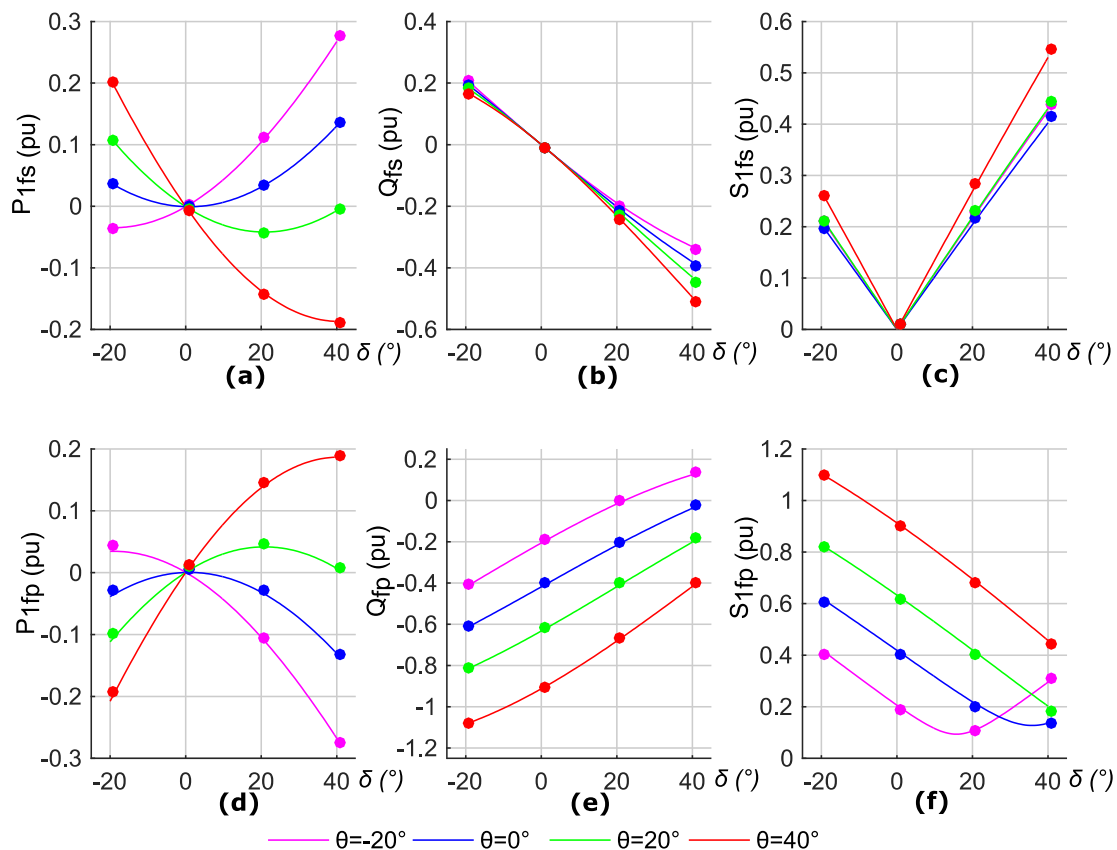
Tabela 14 – Variáveis de entrada para as equações medidas nas simulações do cenário 1.

Parâmetro	Total	Fase A	Fase B	Fase C
Potência ativa da microrrede (kW)	1,47	0,49	0,49	0,49
Valor eficaz da componente fundamental da tensão de fase do PAC (V)	-	127	127	127
DHT da tensão do PAC (%)	-	10	10	10
Tensão eficaz da microrrede (V)	-	127	127	127
Valor eficaz da componente fundamental da corrente da microrrede (A)	-	4,69	4,69	4,69
Ângulo da componente fundamental da corrente em relação a tensão da microrrede	-	34,8	34,8	34,8
DHT da corrente da microrrede	-	20,3	20,4	20,3

Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

Realizaram-se as simulações e foram medidas as variáveis de potência do FAS e do FAP mostradas na Tabela 12. Seguindo a metodologia adotada para essa seção, traçaram-se as curvas utilizando as equações obtidas e, também, os pontos simulados. Na Figura 28 estão mostrados os resultados obtidos para as componentes fundamentais de potência. Como o sistema do cenário 1 é equilibrado, os gráficos apresentam os resultados apenas da fase A, para facilitar a visualização.

Figura 28 - Resultados calculados (linhas contínuas) e simulados (pontos) das componentes fundamentais de potência ativa, reativa e aparente do FAS, (a), (b) e (c), e do FAP, (d), (e) e (f) respectivamente, para o cenário 1.



Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

Conforme demonstrado, os resultados calculados, que estão representados pelas linhas contínuas, e os resultados simulados, que são os pontos marcados, convergiram com precisão para o mesmo valor, validando o equacionamento desenvolvido.

Além disso, avaliando-se os resultados em relação à variação do fluxo de potência das componentes fundamentais em função dos ângulos θ e δ demonstrou-se que foi previsto na análise qualitativa, mostrada no Item 4.1 do presente trabalho, conforme comentado a seguir.

Inicialmente observou-se que com θ e δ iguais a 0° , a potência reativa do FAS (Figura 28 (b)) é próxima de 0 VAR ao passo de que a potência reativa do FAP (Figura 28 (d)) é igual à potência reativa consumida pelas cargas da microrrede. Isso ocorreu em função da componente fundamental da tensão do PAC ser aproximadamente igual à tensão da microrrede o que resultou em uma

tensão de 0 V da componente fundamental de tensão do FAS e, consequentemente, não houve processamento de potência pelo FAS.

Mantendo o ângulo δ igual a 0° e com θ positivo, o conversor M-iUPQC passou a fornecer potência reativa capacitiva para a rede. Porém, como a tensão no FAS ainda permaneceu igual a 0 V, o FAP precisou fornecer toda a potência reativa para as cargas da microrrede e para a rede, sobrecarregando ainda mais o FAP.

Para ângulos θ e δ positivos, uma componente de tensão na frequência da rede é imposta no FAS que passa a fornecer potência reativa, reduzindo a potência reativa que o FAP precisa compensar. Muito embora tenha ficado demonstrado que com δ diferente de 0° , ocorre uma circulação de potência ativa entre o FAS e o FAP, conforme demonstrado na Figura 28 (a) e Figura 28 (d), ficou demonstrado que a potência aparente que o FAP precisou processar é consideravelmente menor para ângulos δ maiores que 0° , conforme mostrado na Figura 28 (c) e Figura 28 (f), o que demonstrou que utilizando o CATC é possível equilibrar a potência processada pelos conversores do M-iUPQC de forma eficiente.

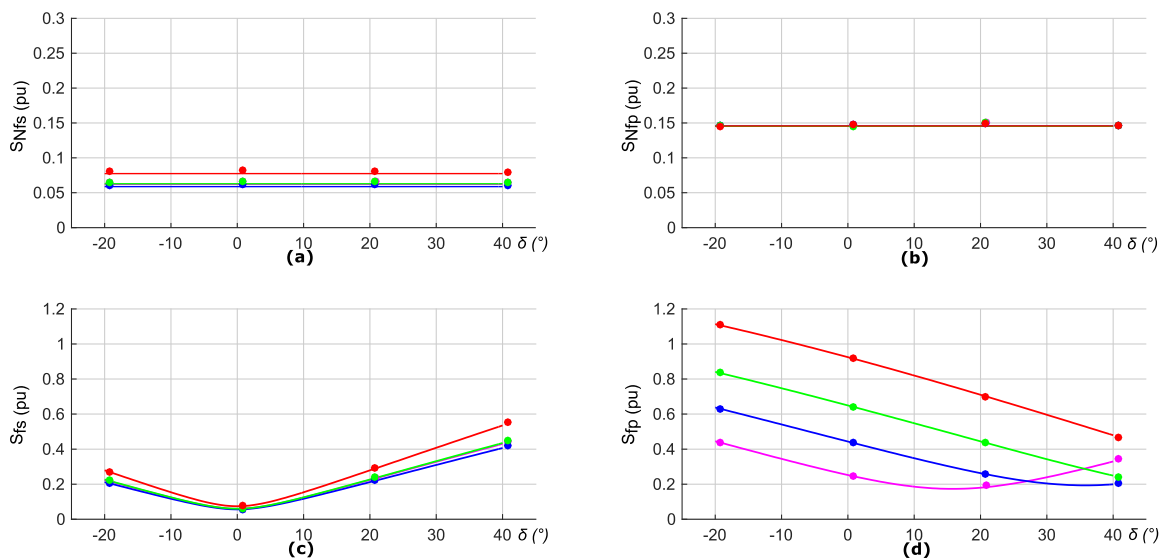
Para o ângulo θ menor que 0° e com δ igual a 0° , a potência processada pelo FAP é menor comparado a condição com θ igual ou maior que 0° , o que é uma consequência de o conversor passar a consumir potência reativa da rede. Nesse caso, a potência reativa é consumida pelas cargas da microrrede e, por consequência, não precisa ser processado pelo FAP. Essa característica, além das finalidades listadas para a função Q, pode ser útil em uma condição de operação com sobrecarga pois é possível reduzir a potência que o conversor M-iUPQC como um todo precisa processar, reduzindo a chance de atuação de uma proteção de sobrecorrente do circuito o que resultaria em uma falha na microrrede. Ao variar-se o ângulo δ para valores positivos, as mesmas conclusões feitas para o ângulo θ positivo são válidas.

Por fim, demonstrou-se que para a condição de operação do cenário 1, ângulos δ negativos não são eficientes para fazer compartilhamento e equalização da potência processada pelo FAS e o FAP pois ocorre uma circulação de reativo entre os conversores do M-iUPQC. Além disso, caso o ângulo δ seja tal que a potência reativa que o FAS fornecer for maior que o

consumido pelas cargas e pela rede, o excedente de potência é processado pelo FAP, conforme mostrado nos resultados para $\theta = -20^\circ$, o que também não é uma forma eficiente de se utilizar o CATC visto que é imposta uma circulação de reativos entre os conversores do M-iUPQC.

Na Figura 29 estão mostrados os resultados obtidos para as componentes não-fundamentais de potência a e a potência aparente total do FAS e do FAP. Da mesma forma, como o sistema do cenário 1 é equilibrado, os gráficos apresentam apenas da fase A, para facilitar a visualização.

Figura 29 - Resultados calculados (linhas contínuas) e simulados (pontos) das componentes não-fundamentais de potência do (a) FAS e (b) FAP e potência aparente do (c) FAS e (d) FAP, para o cenário 1.



Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

Para os gráficos da componente não-fundamental de potência, Figura 29 (a) e Figura 29 (b), observou-se uma pequena diferença entre o valor medido e o valor calculado. Essa diferença é justificada pelo fato de as componentes na frequência de chaveamento serem desconsideradas no equacionamento. Porém, essa diferença é pouco significativa, especialmente quando se analisam os resultados para a potência aparente total do FAS e do FAP, conforme mostrado na Figura 29 (c) e Figura 29 (d).

Além disso, ainda em relação à componente não-fundamental de potência, pode-se observar que a variação do ângulo δ não afeta o

processamento dessas componentes de potência. Isso significa que a técnica do CATC não é útil para fazer o compartilhamento e/ou equalização do processamento dos harmônicos de tensão do PAC ou corrente da microrrede. Isso pode ser uma limitação importante para aplicações com elevado conteúdo harmônico, especialmente harmônicos de corrente da microrrede que, geralmente, possuem maior amplitude comparado aos harmônicos de tensão do PAC.

De qualquer forma, demonstrou-se que a potência aparente total processada pelo FAS e o FAP pode ser equilibrada em todas as condições de operação no cenário avaliado, o que demonstrou que a técnica do CATC poderia ser utilizada de forma eficaz para fazer o compartilhamento e equalização da potência processada pelos conversores do M-iUPQC na condição de operação com a função Q habilitada ou não.

5.2.2 Cenário 2 – Fluxo de potência ativa da rede para a microrrede e cargas da microrrede equilibrada e fator de deslocamento de 0,91

No cenário 2, o fluxo de potência ativa também foi da rede para a microrrede. Considerou-se, ainda, todas as cargas da microrrede equilibradas e com as chaves S1 e S2 abertas. As especificações utilizadas nessa simulação estão mostradas na Tabela 15. Como todas as fases estão equilibradas, apresentaram-se apenas os valores referentes a uma fase.

Tabela 15 – Parâmetros utilizados na simulação do cenário 2 para validação das equações

Parâmetro	Valor
Resistência da carga 1 da microrrede	30 Ω
Indutância da carga 1 da microrrede	40,9 mH
Corrente eficaz de fase da fonte I_{S1}	0,0
Corrente eficaz de fase da fonte I_{S2}	0,0

Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

Com o conversor operando em regime permanente, mediram-se as variáveis mostradas na Tabela 16 e que foram utilizadas para gerar os gráficos utilizando as equações desenvolvidas.

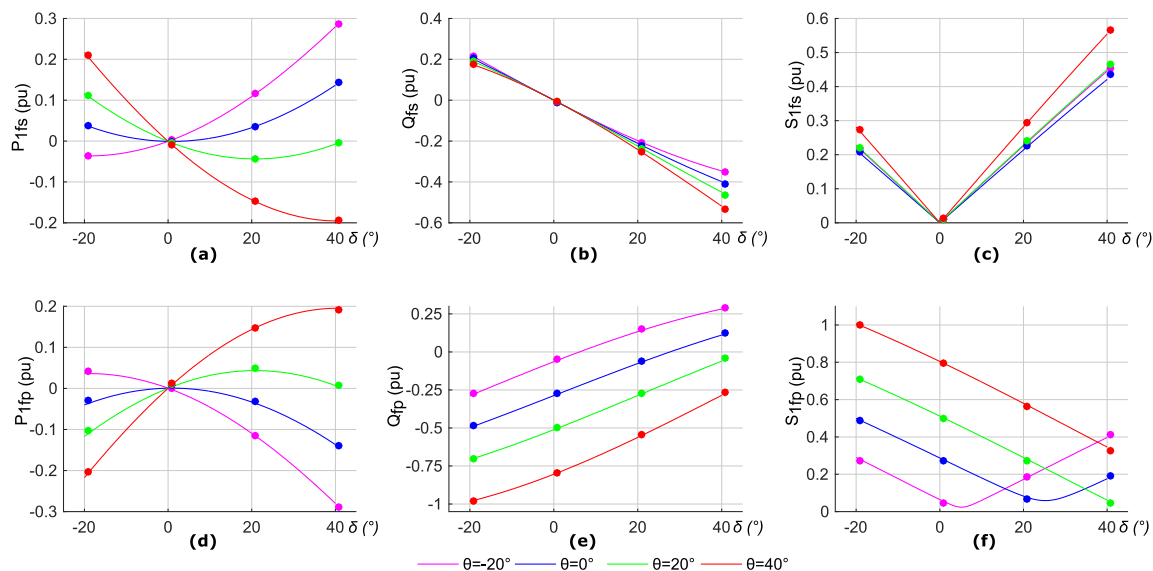
Tabela 16 – Variáveis de entrada para as equações medidas nas simulações do cenário 2.

Parâmetro	Total	Fase A	Fase B	Fase C
Potência ativa da microrrede (kW)	1,54	0,513	0,513	0,513
Valor eficaz da componente fundamental da tensão de fase do PAC (V)	-	127	127	127
DHT da tensão do PAC (%)	-	10,0	10,0	10,0
Tensão eficaz da microrrede (V)	-	127	127	127
Valor eficaz da componente fundamental da corrente da microrrede (A)	-	4,42	4,42	4,42
Ângulo da componente fundamental da corrente em relação a tensão da microrrede	-	24,2	24,2	24,2
DHT da corrente da microrrede	-	21,5	21,5	21,5

Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

Foram realizadas as simulações e mediram-se as variáveis de potência do FAS e do FAP mostradas na Tabela 12. Na Figura 30 estão mostrados os resultados obtidos para as componentes fundamentais de potência. Como o sistema do cenário 2 também é equilibrado, os gráficos foram traçados com os resultados apenas da fase A, para facilitar a visualização.

Figura 30 - Resultados calculados (linhas contínuas) e simulados (pontos) das componentes fundamentais de potência ativa, reativa e aparente do FAS, (a), (b) e (c), e do FAP, (d), (e) e (f) respectivamente, para o cenário 2.



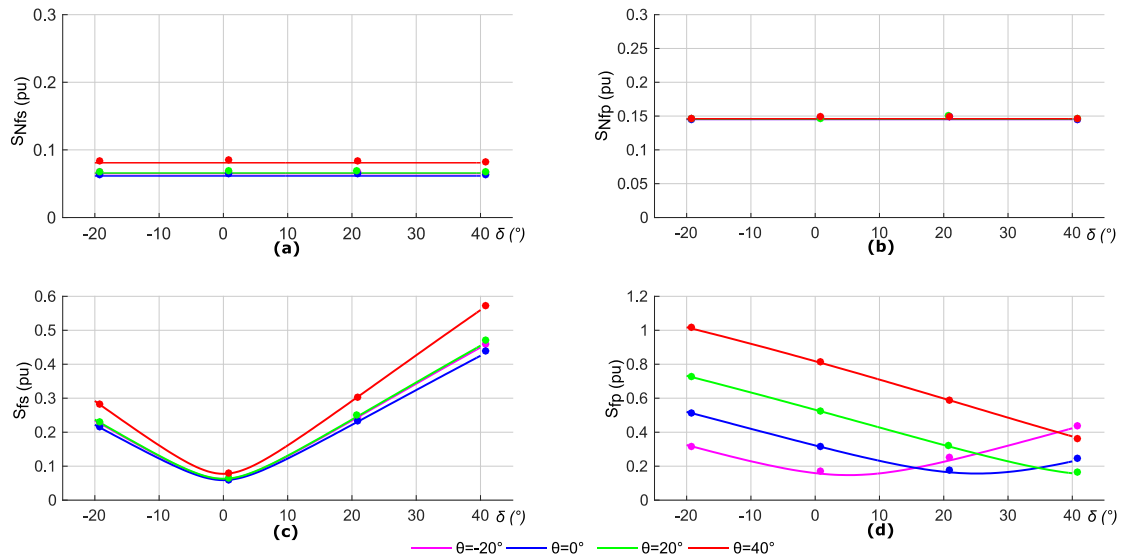
Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

Da mesma forma que foi observado no cenário 1, conforme demonstrado na Figura 30, os resultados calculados e os resultados simulados convergiram para o mesmo valor, validando o equacionamento desenvolvido também para o cenário 2.

A principal diferença do cenário 1 para o cenário 2 está no fator de deslocamento da corrente das cargas da microrrede que no cenário 2 é menor que no cenário 1. Com isso, menos potência reativa precisa ser processada pelo conversor M-iUPQC como um todo. Isso muda os valores das curvas de potência das componentes fundamentais. Porém, como as cargas possuem característica semelhante nos cenários 1 e 2, a mesma tendência de variação dessas variáveis em função dos ângulos θ e δ foi observada. Portanto, as mesmas conclusões feitas para o cenário 1 em relação ao fluxo das componentes fundamentais de potência em função da variação dos ângulos θ e δ são válidas para esse cenário.

Na Figura 31 estão mostrados os resultados obtidos para as componentes não-fundamentais de potência a e a potência aparente total do FAS e do FAP.

Figura 31 - Resultados calculados (linhas contínuas) e simulados (pontos) das componentes não-fundamentais de potência do (a) FAS e (b) FAP e potência aparente do (c) FAS e (d) FAP, para o cenário 2.



Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

Todos os resultados simulados e calculados convergiram para o mesmo valor, validando o equacionamento desenvolvido também para o cenário 2. Assim como no cenário 1, observou-se uma pequena diferença entre o valor simulado e o calculado para a componente não-fundamental de potência, como mostrado nas Figura 31 (a) e (b). Essa diferença é justificada pela presença das componentes na frequência de chaveamento, mesma justificativa levantada para o cenário 1.

Por fim, como as cargas da microrrede no cenário 2 possuem característica similar às cargas do cenário 1, observou-se a mesma tendência das curvas também para as componentes não-fundamentais de potência e para a potência aparente total. Dessa forma, as mesmas conclusões em relação à eficácia do CATC para o cenário 1 são válidas para o cenário 2.

5.2.3 Cenário 3 – Fluxo de potência ativa da rede para a microrrede e cargas da microrrede desequilibradas

No cenário 3, foram consideradas cargas iguais nas fases A e B e a potência aparente da carga na fase C 54% menor que nas demais fases. Para

isso, simulou-se o sistema onde os valores de resistência e indutância da carga 1 da fase C foram diferentes dos valores das fases A e B. As especificações utilizadas nessa simulação estão mostradas na Tabela 17. Como há desequilíbrio nas cargas da microrrede, foram apresentados os resultados das 3 fases. Além disso, simulou-se o sistema com as chaves $S1$ e $S2$ abertas.

Tabela 17 – Parâmetros utilizados na simulação do cenário 3 para validação das equações

Parâmetro	Valor		
	Fase A	Fase B	Fase C
Resistência da carga 1 da microrrede (Ω)	24,1	24,1	61,0
Indutância da carga 1 da microrrede (mH)	52,0	52,0	111
Corrente eficaz de fase da fonte I_{S1}	0,0	0,0	0,0
Corrente eficaz de fase da fonte I_{S2}	0,0	0,0	0,0

Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

Com o conversor operando em regime permanente, mediram-se as variáveis mostradas na Tabela 18 e que foram utilizadas para gerar os gráficos utilizando as equações desenvolvidas.

Tabela 18 – Variáveis de entrada para as equações medidas nas simulações do cenário 3.

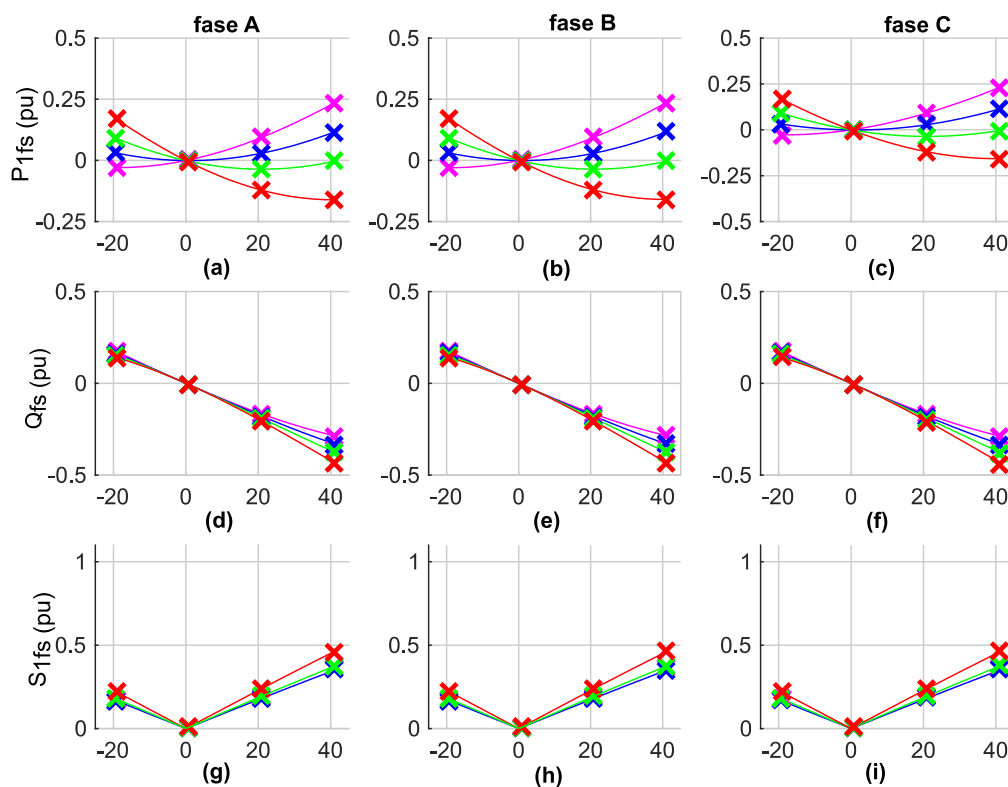
Parâmetro	Total	Fase A	Fase B	Fase C
Potência ativa da microrrede (kW)	1,25	0,490	0,490	0,268
Valor eficaz da componente fundamental da tensão de fase do PAC (V)	381	127	127	127
DHT da tensão do PAC (%)	-	10,0	10,0	10,0
Tensão eficaz da microrrede (V)	-	127	127	127
Valor eficaz da componente fundamental da corrente da microrrede (A)	-	4,69	4,69	2,35
Ângulo da componente fundamental da corrente em relação a tensão da microrrede	-	34,9	34,9	26,7
DHT da corrente da microrrede	-	20,2	20,2	40,4

Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

Na Figura 32 e Figura 33 estão mostrados os resultados obtidos para as componentes fundamentais de potência. Como o sistema do cenário 3 é

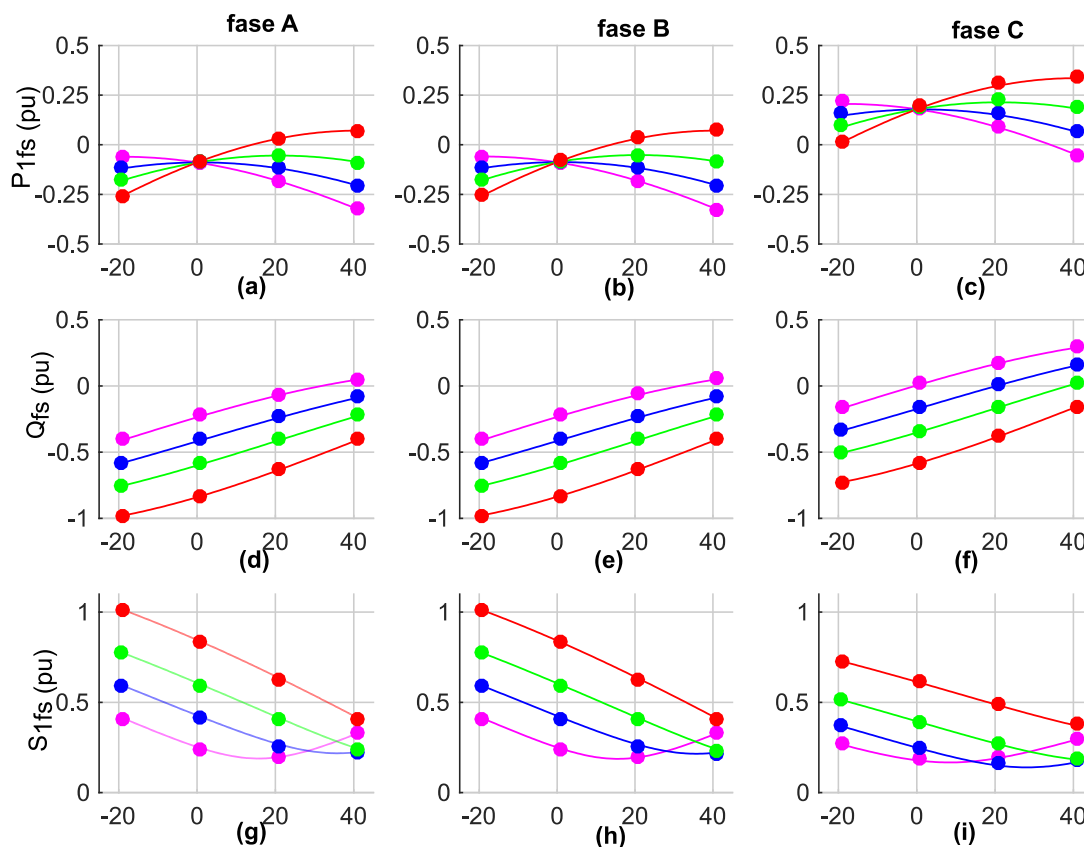
desequilibrado, foram traçados os gráficos com os resultados simulados e calculados de cada fase.

Figura 32 - Resultados simulados (linhas contínuas) e calculados (marcadores em cruz) das componentes fundamentais de potência ativa, (a), (b) e (c), reativa, (d), (e) e (f) e aparente, (g), (h) e (i), do FAS no cenário 3.



Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

Figura 33 - Resultados simulados (linhas contínuas) e calculados (pontos) das componentes fundamentais de potência ativa, (a), (b) e (c), reativa, (d), (e) e (f) e aparente, (g), (h) e (i), do FAP no cenário 3.



Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

Conforme demonstrado, todos os resultados convergiram para o mesmo valor, validando o equacionamento proposto no presente trabalho também para a condição de desequilíbrio de cargas da microrrede.

A principal diferença entre o cenário 3, desbalanceado, e os cenários 1 e 2, balanceados, é que em função do desequilíbrio de carga na microrrede resulta em uma circulação de potência ativa entre as fases do FAP. Isso pode ser mais facilmente observado nos resultados mostrados na Figura 32 (a), (b) e (c) e Figura 33 (a), (b) e (c). Nesses, com δ igual a 0° , observou-se que não há potência ativa no FAS. Já no FAP, há uma circulação de potência ativa entre as fases, onde a potência consumida na fase C, com menor carga, é igual a soma das potências ativas injetadas nas fases A e B. Isso é justificado pelo fato de que, sendo as correntes do PAC sempre equilibradas e, nesse caso, com a tensão nas 3 fases do PAC equilibradas, consequentemente, a potência

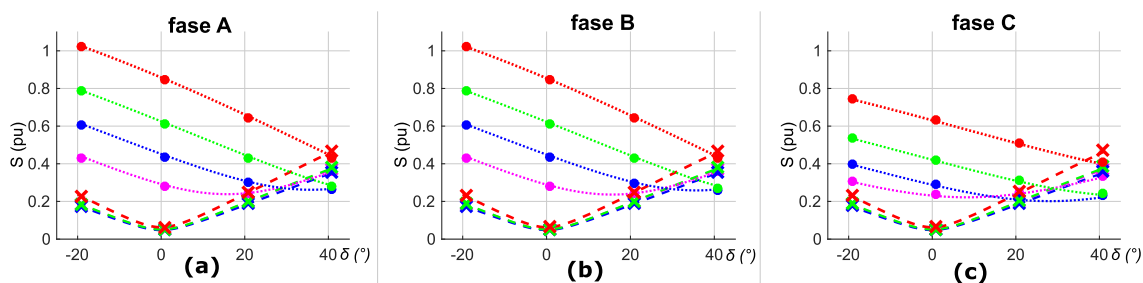
absorvida da rede nas 3 fases é igual. Como há desequilíbrio de potência ativa nas cargas da microrrede, ocorre essa circulação de potência ativa entre as fases do FAP de modo distribuir a potência ativa para as cargas da microrrede de acordo com a demanda.

Já em relação à potência reativa, essa circulação de potência conforme comentado anteriormente não ocorre. Ou seja, a potência reativa de cada fase da microrrede é processada pela sua respectiva fase no M-iUPQC e não é possível dividir essa potência entre as fases do conversor, conforme demonstrado na Figura 32 (d), (e) e (f) e Figura 33 (d), (e) e (f). Pode-se verificar que a potência reativa processada na fase C, que é a fase com menor potência, é menor que as componentes de potência reativa nas fases A e B. Por consequência, a componente fundamental da potência aparente nos conversores da fase C do M-iUPQC é menor que nas fases A e B, conforme mostrado nas Figura 32 (g), (h) e (i) e Figura 33 (g), (h) e (i).

Em relação à variação do fluxo de potência em função dos ângulos θ e δ , a mesma tendência observada nos cenários 1 e 2 se repetiram no cenário 3.

Na Figura 34 estão mostrados os resultados obtidos no cenário 3 para as componentes não-fundamentais de potência e a potência aparente total do FAS e do FAP.

Figura 34 - Resultados simulados e calculados da potência aparente nas fases (a) A, (b) B e (c) C. Linhas tracejadas e pontilhadas são os resultados calculados do FAS e do FAP, respectivamente. Marcadores em cruz e circulares são respectivamente os resultados simulados do FAS e do FAP.



Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

Novamente, os resultados simulados e calculados convergiram para o mesmo valor, demonstrando que as equações são válidas, também, para as condições de operação do cenário 3.

Por fim, salienta-se que com a variação do ângulo δ para valores positivos, foi possível fazer o compartilhamento e equalização da potência processada pelos conversores do M-iUPQC em todas as condições de operação do cenário 3, o que demonstra que o CATC é eficiente para essa condição de operação. Entretanto, salienta-se que, como havia desequilíbrio nas cargas da microrrede, o ângulo δ no qual a potência aparente processada pelo FAP equaliza-se com a do FAS é um pouco diferente na fase C, comparado às fases A e B.

5.2.4 Cenário 4 - Fluxo de potência ativa da microrrede para a rede e cargas da microrrede equilibradas

No cenário 4, inverteu-se o sentido do fluxo de potência ativa sendo da microrrede para a rede. Para isso, simulou-se o sistema com as chaves S1 e S2 fechadas e as fontes I_{S1} e I_{S2} injetando corrente na microrrede de modo que potência ativa injetada por essas fontes seja maior que a potência ativa consumida pelas cargas da microrrede.

Para facilitar a interpretação dos resultados, novamente consideraram-se as cargas da microrrede equilibradas. Os valores de resistência e indutância da carga 1 bem como o valor eficaz das fontes I_{S1} e I_{S2} utilizadas nessa simulação estão mostradas na Tabela 19. Como não há desequilíbrio nas cargas da microrrede, estão apresentados os valores de uma fase da microrrede.

Tabela 19 – Parâmetros utilizados na simulação do cenário 4 para validação das equações

Parâmetro	Valor
Resistência da carga 1 da microrrede	61 Ω
Indutância da carga 1 da microrrede	111 mH
Corrente eficaz de fase da fonte I_{S1}	2,36 A
Corrente eficaz de fase da fonte I_{S2}	2,36 A

Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

Com o conversor operando em regime permanente, mediram-se as variáveis mostradas na Tabela 20 e que foram utilizadas para gerar os gráficos utilizando as equações desenvolvidas.

Tabela 20 – Variáveis de entrada para as equações medidas nas simulações do cenário 4.

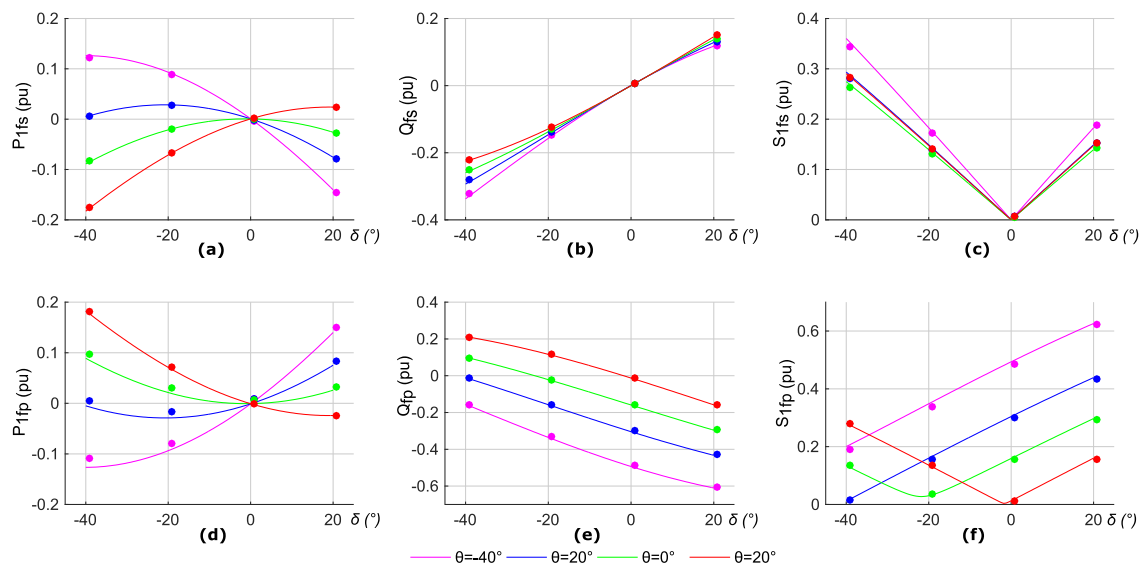
Parâmetro	Total	Fase A	Fase B	Fase C
Potência ativa da microrrede (kW)	-1,0	-0,333	-0,333	-0,333
Valor eficaz da componente fundamental da tensão de fase do PAC (V)	381	127	127	127
DHT da tensão do PAC (%)	-	10,0	10,0	10,0
Tensão eficaz da microrrede (V)	-	127	127	127
Valor eficaz da componente fundamental da corrente da microrrede (A)	-	2,81	2,81	2,81
Ângulo da componente fundamental da corrente em relação a tensão da microrrede	-	-160	-160	-160
DHT da corrente da microrrede	-	34,1	34,1	34,1

Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

O sinal negativo da potência ativa da microrrede indica que o fluxo de potência é da microrrede para a rede.

Na Figura 35 estão mostrados os resultados obtidos para as componentes fundamentais de potência. Como o sistema do cenário 4 é equilibrado, estão apresentados apenas os resultados simulados e calculados da fase A.

Figura 35 - Resultados calculados (linhas contínuas) e simulados (pontos) das componentes fundamentais de potência ativa, reativa e aparente do FAS, (a), (b) e (c), e do FAP, (d), (e) e (f) respectivamente, para o cenário 4.



Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

Conforme demonstrado, todos os resultados convergiram para o mesmo valor, validando o equacionamento proposto no presente trabalho também para a condição do fluxo de potência ativa ser da microrrede para a rede.

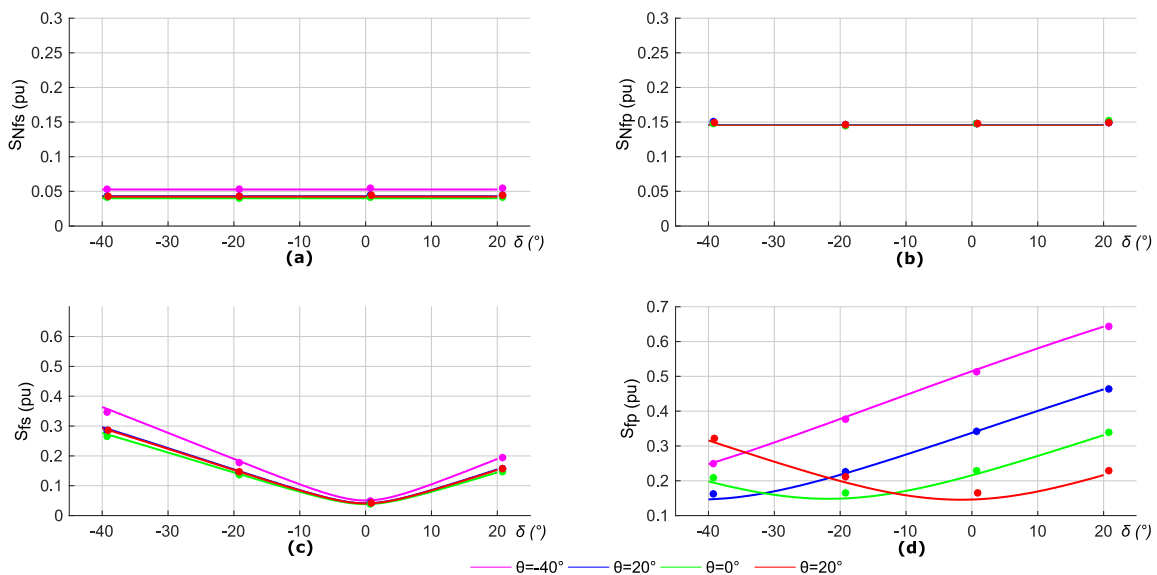
A principal diferença em relação às componentes fundamentais de potência no cenário 4 é o fato de que o ângulo θ para que o conversor M-iUPQC forneça reativo capacitivo para a rede possui sinal oposto ao observado nos cenários 1 a 3. De forma análoga, o ângulo δ para que ocorra o compartilhamento e equalização da potência processada pelos conversores do M-iUPQC possui sinal oposto ao observado nos cenários 1 a 3. Isso pode ser observado nos resultados da potência reativa na Figura 35 (b) e (e) e nos consequentes resultados da componente fundamental da potência aparente mostrados na Figura 35 (c) e (f), onde a tendência para o compartilhamento e equalização da potência processada pelos conversores do M-iUPQC ocorre para ângulos δ negativos. Essa característica é justificada pela inversão da fase da corrente FAS em relação à tensão do PAC, conforme previsto e explicado na análise qualitativa apresentada no Item 4.1.

Ainda, conforme mostrado na Figura 35 (a) e (d), para ângulos δ diferentes de 0° , ocorre uma circulação de potência ativa entre os conversores FAS e FAP,

de forma similar ao observados nos cenários 1 a 3. Porém, assim como nos demais cenários avaliados, essa parcela é pequena comparada à potência reativa que é compartilhada entre os conversores.

Na Figura 36 estão mostrados os resultados obtidos nas simulações do cenário 4 das componentes não-fundamentais de potência e a potência aparente total do FAS e do FAP.

Figura 36 - Resultados calculados (linhas contínuas) e simulados (pontos) das componentes não-fundamentais de potência do (a) FAS e (b) FAP e potência aparente do (c) FAS e (d) FAP, para o cenário 4.



Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

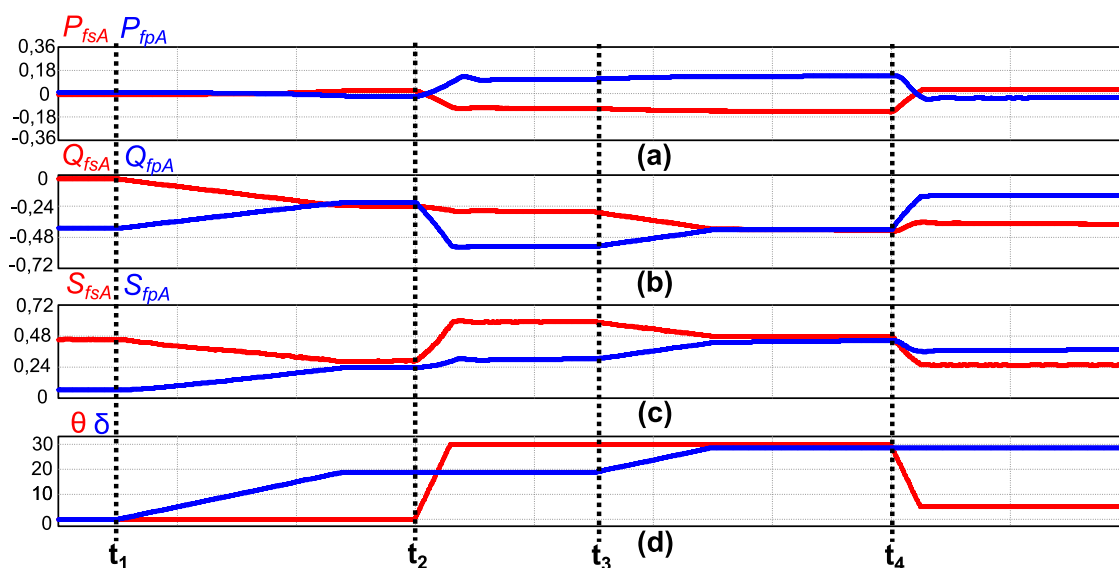
Demonstrou-se que os resultados simulados e calculados convergiram para o mesmo valor, validando as equações propostas.

Além disso, assim como nos demais cenários e como demonstrado na Figura 36 (a) e (b), a variação do ângulo δ não resulta no compartilhamento das componentes não-fundamentais de potência do FAS e do FAP o que significa que o FAP irá sempre processar todos os harmônicos de corrente das cargas da microrrede e o FAS irá processar todos os harmônicos de tensão do PAC. Entretanto, mesmo com essa limitação pode-se equilibrar a potência aparente processada pelos conversores do FAS e do FAP, conforme mostrado na Figura 36 (c) e (d).

5.3 SIMULAÇÕES COM O TRANSITÓRIO DA VARIAÇÃO DOS ÂNGULOS θ E δ

Com a finalidade de demonstrar a resposta transitória da variação do fluxo de potência em função dos ângulos θ e δ , simulou-se o sistema mostrado na Figura 13 com as mesmas especificações do cenário 1, mostrado no Item 5.2.1. Nessa simulação, inicialmente o conversor está operando em regime permanente e com os ângulos θ e δ configurados em 0° . No instante t_1 o ângulo inicia-se a variação do ângulo δ em rampa a uma taxa de $10^\circ/\text{s}$. Escolheu-se essa taxa de variação para minimizar os efeitos da variação do ângulo δ na tensão da microrrede. No instante t_2 , inicia-se a variação do θ a uma taxa de $100^\circ/\text{s}$. Escolheu-se essa taxa de variação maior para o ângulo θ para reduzir o tempo de simulação. Repetiu-se essa sequência nos instantes t_3 e t_4 . Mediram-se as formas de onda da potência ativa, reativa e aparente do FAS e do FAP. Os resultados dessa simulação estão mostrados na Figura 37. Como o sistema é equilibrado, estão apresentados apenas as formas de onda da fase A do conversor.

Figura 37 – Formas de onda da potência ativa (a), reativa (b) e aparente (c) do FAS e do FAP durante o transitório de variação dos ângulos θ e δ (d). Escala de tempo de 1 s/div. Escala das variáveis de potência em valores por unidade.



Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

Após o instante t_1 , o ângulo δ é incrementado para valores positivos e, nesse cenário de operação, o FAS passa a fornecer reativo para as cargas da microrrede, reduzindo a potência que o FAP precisa processar. No instante t_2 , como o ângulo θ passa a variar para valores positivos, o conversor M-iUPQC passa a fornecer reativos para as cargas da microrrede e para a rede. Por isso, a potência reativa e, conseqüentemente, a potência aparente do FAP aumentaram. Além disso, como δ ficou constante, a potência reativa do FAS ficou constante. Porém, em t_3 , o ângulo δ volta a ser incrementado de modo que a potência aparente do FAS e o FAP fiquem aproximadamente iguais. Por fim, em t_4 , como o ângulo θ foi decrementado e δ foi mantido constante, o FAS passou a processar mais potência que o FAP.

Além das observações listadas anteriormente, pode-se observar a circulação de potência ativa entre o FAP e o FAS em função da variação dos ângulos θ e δ . Na Figura 37 (a) ficou evidente que quanto maior o ângulo θ ou δ maior será a circulação de potência ativa entre os conversores do M-iUPQC, conforme previsto nas análises qualitativa e quantitativas.

6 RESULTADOS EXPERIMENTAIS

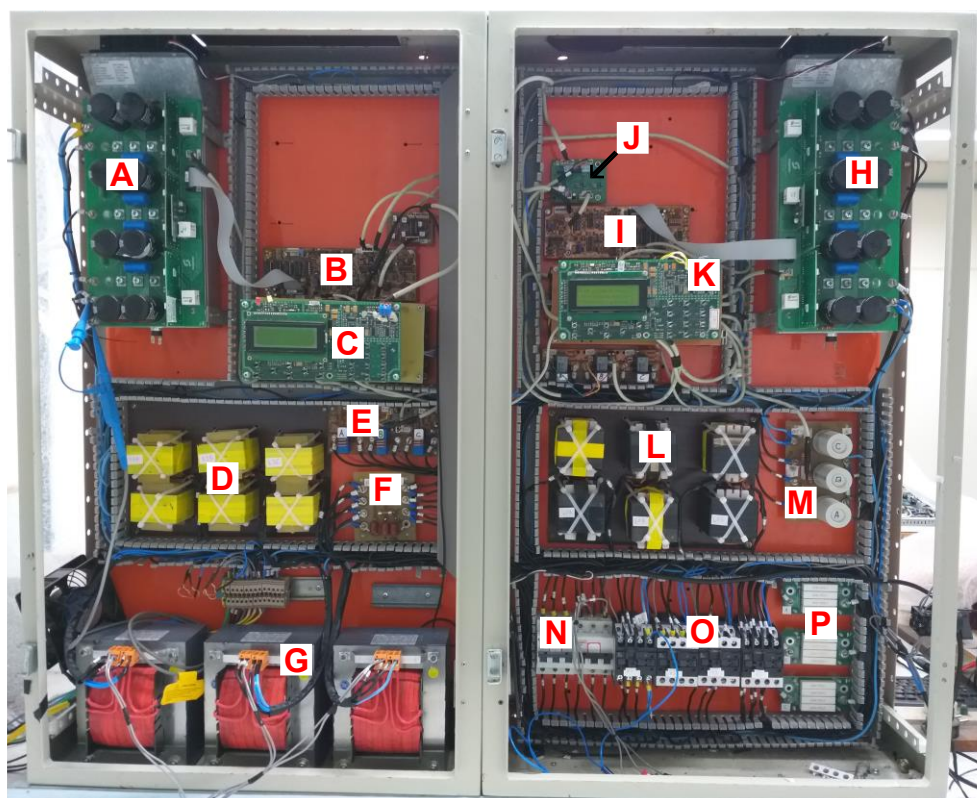
Nesse capítulo estão apresentados os resultados experimentais que foram obtidos para fazer a validação funcional do conversor M-iUPQC operando como conversor de interface de uma microrrede de energia e para validar o equacionamento proposto que descreve o fluxo de potência de um conversor M-iUPQC em função da variação dos ângulos θ e δ .

Inicialmente é apresentada a montagem do protótipo e do setup de testes utilizado na obtenção dos resultados, mostrado no Item 6.1. Posteriormente, no Item 6.2 estão apresentados os resultados para validação funcional do conversor M-iUPQC. Finalmente, no Item 6.3 estão apresentados os resultados experimentais para validação do equacionamento proposto.

6.1 MONTAGEM DO PROTÓTIPO

Montou-se um protótipo de um conversor M-iUPQC com base no esquema de potência e controle mostrado na Figura 7 e adicionaram-se disjuntores e contadores para comando e proteção do conversor. O protótipo montado está mostrado na Figura 38.

Figura 38 – Protótipo de conversor M-iUPQC montado.



Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

Os componentes identificados na Figura 38 estão listados na Tabela 21.

Tabela 21 – Identificação dos componentes do protótipo do M-iUPQC montado

Identificação	Descrição
A	Módulo de potência do FAS
B	Placa de controle analógico do FAS
C	IHM e gerador de referências do FAS
D	Indutores do filtro passivo de alta frequência do FAS
E	Sensores de corrente do FAS
F	Capacitores do filtro passivo de alta frequência do FAS
G	Transformadores de acoplamento do FAS
H	Módulo de potência do FAP
I	Placa de controle analógico do FAP
J	Placa de controle analógico do nível da tensão CC da tensão da microrrede
K	IHM e gerador de referências do FAP
L	Indutores do filtro passivo de alta frequência do FAP
M	Capacitores do filtro passivo de alta frequência do FAP
N	Disjuntores de proteção
O	Contatores de comando e de pré-carga
P	Resistores para pré-carga

Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

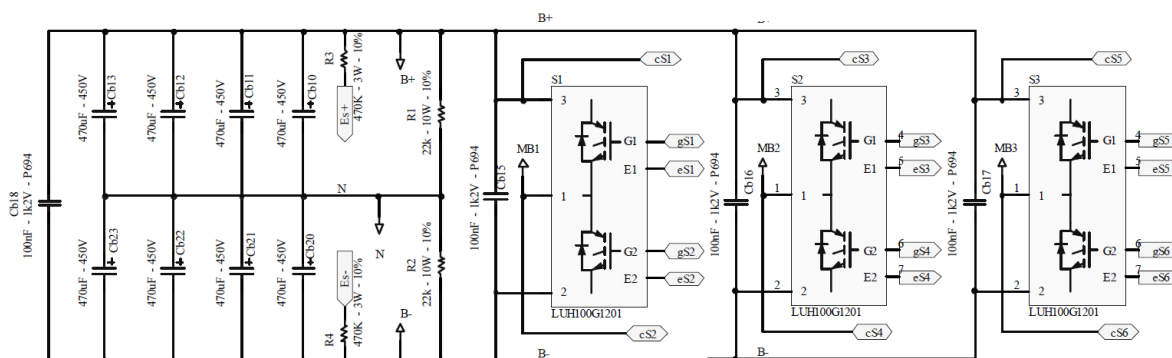
Nos itens a seguir estão detalhados os principais componentes e suas funções.

6.1.1 Componentes do circuito de potência do FAS e do FAP

Os elementos do circuito de potência do protótipo montado são compostos de dois módulos inversores trifásicos da fabricante Supplier modelo SPCIT 1000-60-20 mais os indutores e capacitores do filtro passivo de alta frequência.

Os módulos inversores são compostos por um conjunto de IGBTs conectados em uma topologia meia-ponte. Além disso, esses módulos inversores possuem capacitores o barramento CC. Na Figura 39 é mostrado o esquema de potência dos módulos inversores utilizados.

Figura 39 – Esquema de potência dos conversores SPCIT 1000-60-20.



Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

Também, nos módulos inversores estão montadas as placas de *gate-driver* modelo DRO100D25A, da fabricante Supplier que fazem a função de comando dos IGBTs e de intertravamento para garantir que não ocorram curto-circuito nos braços do inversor em função de pulsos de comandos inadequados.

6.1.2 Placas de controle analógico e comando do FAS e do FAP

As placas de controle analógico do FAS e do FAP são compostas pelos circuitos de condicionamento dos sinais de entrada para os controladores, por

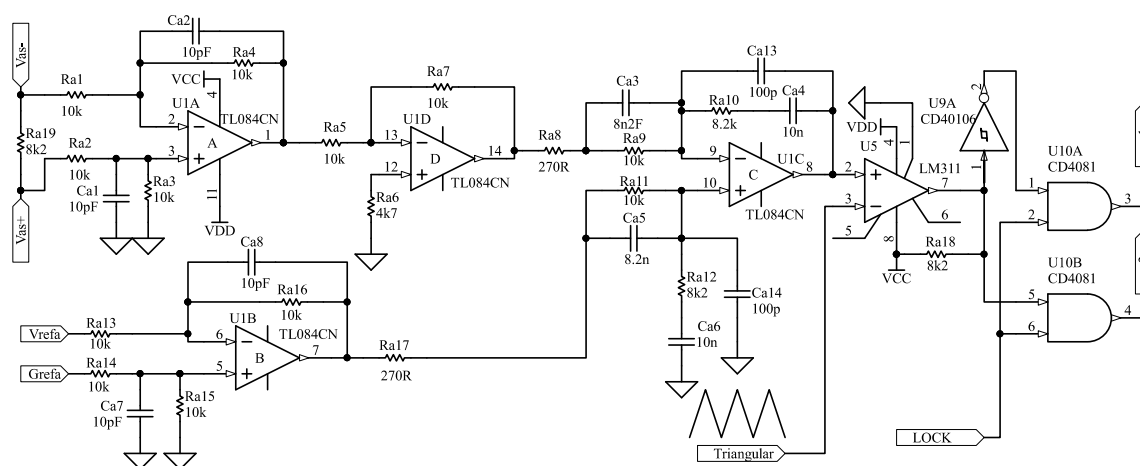
Figura 41 – Placa de controle do FAS utilizada no protótipo.



Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

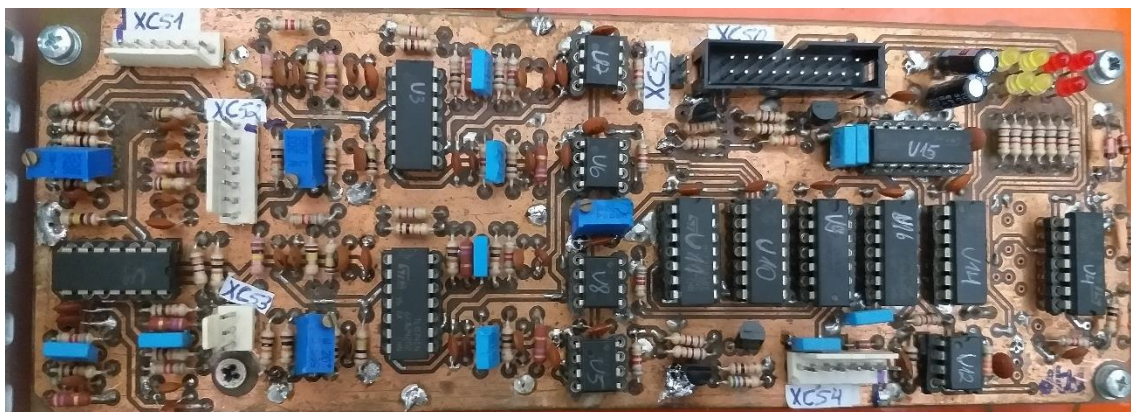
Na placa de controle do FAP, foram montados os circuitos de condicionamento do sinal de tensão da microrrede e os circuitos dos controladores de tensão das 3 fases do FAP. O esquema eletrônico parcial de uma fase da placa de controle e comando do FAP está mostrado na Figura 42. Na Figura 43 é mostrada a placa de controle do FAP que foi utilizada no protótipo.

Figura 42 – Esquema eletrônico parcial da placa de controle do FAP.



Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

Figura 43 – Placa de controle do FAP utilizada no protótipo.

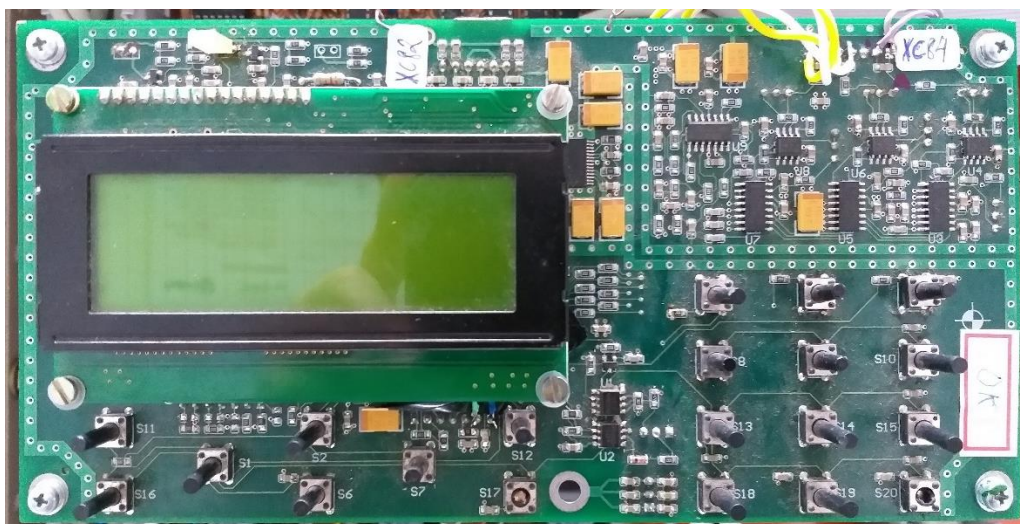


Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

6.1.3 IHM e gerador de referências do FAS e do FAP

As IHMs do FAP e do FAS foram fornecidas pela fabricante Supplier. Essas IHMs possuem circuitos geradores de referências senoidais trifásicas configuráveis onde se pode configurar a amplitude, frequência e fase dos sinais sincronizados em relação a uma tensão de referência. Na Figura 44 é mostrada a IHM em detalhes.

Figura 44 – IHM e gerador de referências utilizado no protótipo.



Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

Sendo assim, no protótipo montado, as IHM tiveram a função de geração das referências senoidais para os controladores do FAS e do FAP e, também,

de interface para configuração das defasagens dos ângulos θ e δ , de acordo com a necessidade de cada teste.

Para desempenhar essas funções, sincronizaram-se os sinais de saída em relação à tensão no PAC para ambas as IHMs do FAS e do FAP. Também foram configuradas a amplitude do sinal e a frequência, as quais foram mantidas fixas em todos os testes. A fase dos sinais em relação à tensão de referência foi configurada em função da necessidade de cada teste.

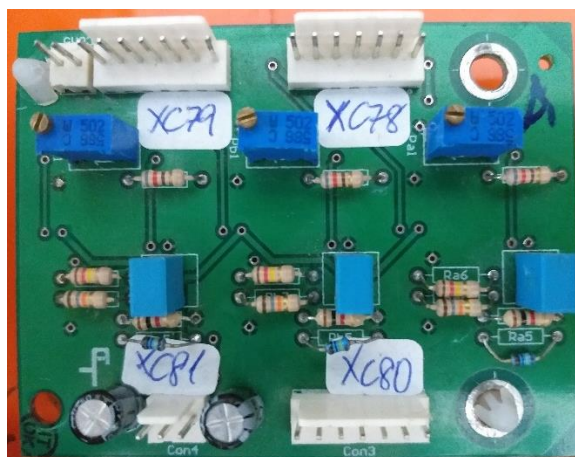
6.1.4 Placas de compensação do nível de tensão CC da microrrede

Em conversores que geram sinais de tensão para alimentação de cargas genéricas, como é o caso do FAP que controla a tensão da microrrede, o controle do nível CC da tensão controlada é necessário para evitar problemas no funcionamento dos equipamentos, especialmente para aplicações que possuem transformadores conectados pois, níveis de tensão CC de dezenas de milivolts podem resultar em correntes na ordem de amperes, a depender da resistência série do transformador utilizado.

No caso do protótipo montado, mesmo que as referências senoidais possuam níveis CC desprezíveis, diversos fatores podem contribuir para o aparecimento de níveis de tensão CC microrrede como *offset* dos amplificadores operacionais, variações no tempo de subida e/ou descida dos IGBTs, dentre outros. Além de difíceis de serem estimados, esses parâmetros que influenciam no aparecimento de um nível de tensão CC na tensão da microrrede variam em função da temperatura ambiente, da corrente circulante pelas chaves, no caso do IGBT, entre outros. Por isso, para garantir um controle efetivo do nível CC da tensão da microrrede, optou-se por adicionar uma malha de controle em malha fechada dedicada ao controle e eliminação do nível CC da tensão da microrrede.

A placa dedicada para fazer o controle do nível CC da tensão da microrrede está mostrada na Figura 45.

Figura 45 – Placa com os circuitos de controle do nível de tensão CC na tensão da microrrede.



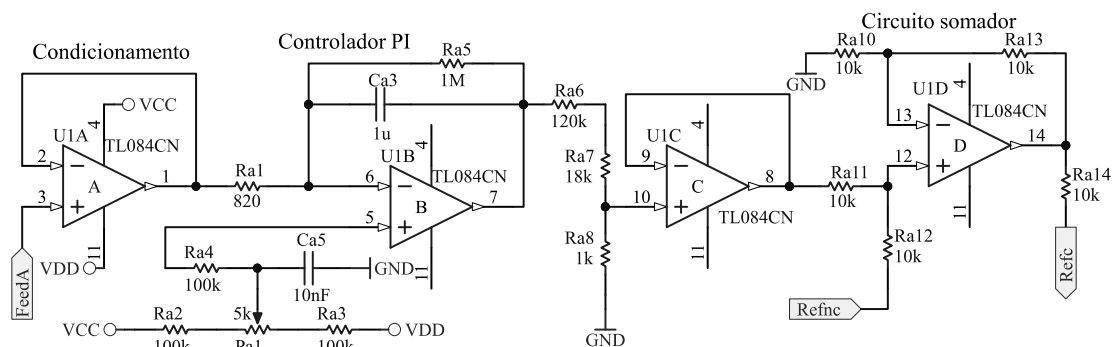
Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

Na lógica desenvolvida, utilizou-se um filtro ativo passa-baixa. O sinal de saída do filtro é adicionado aos sinais de referência para os controladores de tensão no FAP somando uma parcela CC de modo a eliminar esse da tensão da microrrede. O sinal na entrada do filtro ativo passa-baixa é o sinal de corrente do FAP. Isso é justificado pelo fato de que é difícil fazer uma medição precisa de um nível CC de dezenas de milivolt em sinal que varia de -180 V a 180 V. Conforme afirmado anteriormente, em aplicações com transformadores ou cargas altamente indutivas, pequenos níveis de tensão CC podem resultar em elevados níveis de corrente CC e, por isso, é mais fácil de detectar a presença de nível CC monitorando-se a corrente. Como não há nível CC no FAS, que é controlado em corrente, se houver nível CC na corrente esse sinal irá circular pelo FAP e, assim, ser detectado pelo filtro ativo e, com isso, fazer a compensação desse nível CC.

Sendo assim, projetou-se um filtro ativo passa-baixa com banda passante de 0,15 Hz. Escolheu-se a frequência de corte bem baixa em função de as variações nos parâmetros do circuito que influenciam no aparecimento de nível CC na tensão da microrrede são bem lentas.

Utilizou-se um filtro passa-baixa para cada fase. Na Figura 46 está mostrado o esquemático parcial da placa de controle do nível CC.

Figura 46 – Esquemático parcial da placa de controle do nível CC da tensão da microrrede.



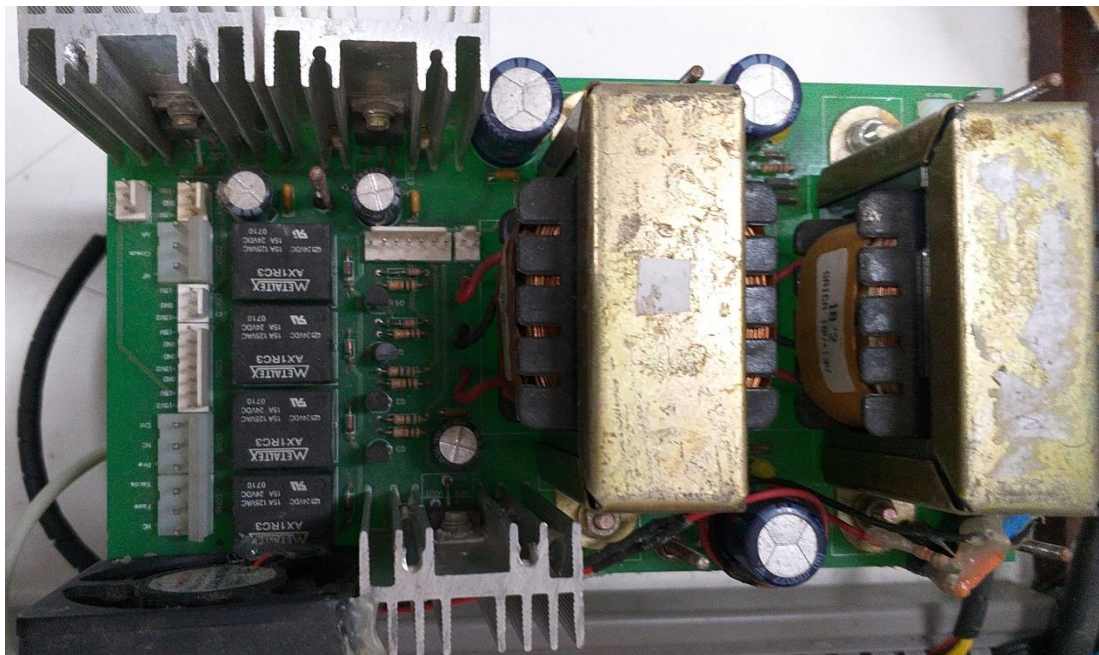
Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

Esse circuito é replicado nas demais fases. Conforme demonstrado, o circuito é composto pelo filtro ativo e por um circuito de condicionamento que condiciona o sinal recebido do sensor de corrente do FAP (*feedA*). A saída do filtro PI é somada ao sinal vindo do gerador de referências da IHM (*Refnc*). O sinal resultante dessa soma (*Refc*) vai para os conectores de saída da placa e são aplicados nos controladores de tensão do FAP.

6.1.5 Fontes auxiliares

Para alimentação dos circuitos de controle e de comando, utilizou-se a fonte mostrada na Figura 47

Figura 47 – Fonte auxiliar utilizada no protótipo.



Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

A tensão de alimentação da fonte é 220 V CA e possui dois transformadores. O primeiro é um transformador com saída com ponto central e rebaixa a tensão de alimentação para ± 18 V. O segundo transformador possui uma saída simples e rebaixa a tensão de alimentação para 9 V. A saída dos transformadores é retificada e filtrada e, utilizando reguladores lineares, regula-se as tensões CC de saída para ± 15 V e 5 V.

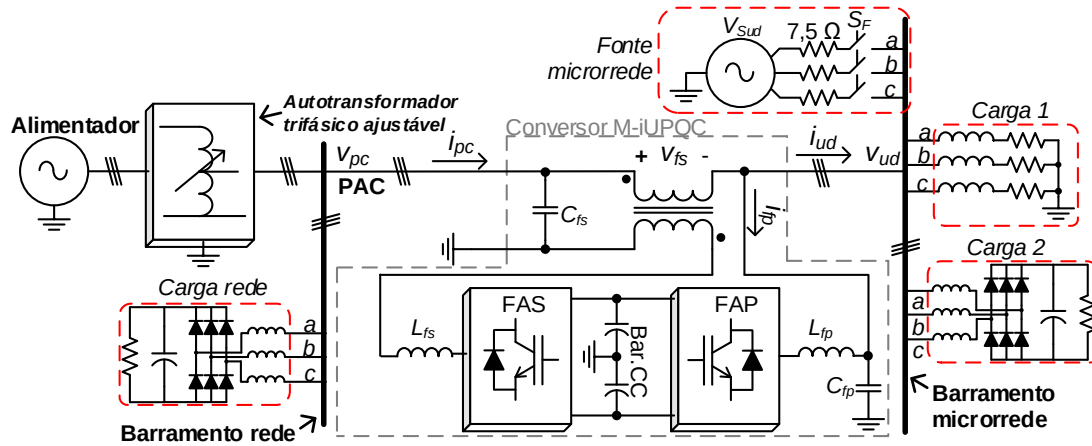
As fontes auxiliares foram utilizadas para alimentação das placas de controle, IHMs e as placas de *gate-driver*. Conforme mostrado na Figura 38, foram utilizadas duas fontes, uma para alimentação dos circuitos de controle do FAS e outra para o FAP.

6.1.6 Setup montado

Para a realização dos testes, além da montagem do protótipo do conversor M-iUPQC mostrado anteriormente em detalhes, realizou-se a montagem de um setup de testes com o objetivo de simular a operação do conversor M-iUPQC como conversor de interface em uma aplicação de

microrredes. Para isso, montou-se um setup de testes conforme mostrado na Figura 48.

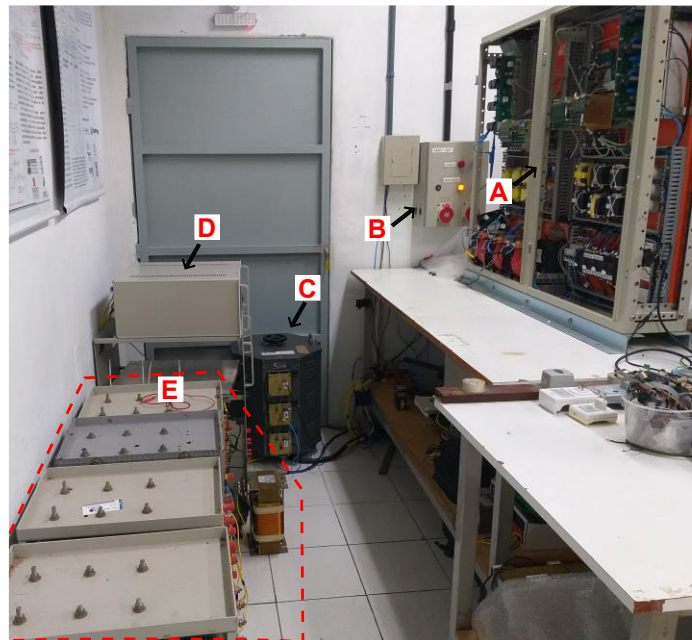
Figura 48 – Diagrama do setup de testes montado para a realização dos testes.



Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

Na Figura 49 está mostrada uma imagem do setup montado.

Figura 49 – Setup de testes montado.



Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

Os elementos identificados na Figura 49 estão descritos na Tabela 22.

Tabela 22 – Identificação dos componentes setup de teste montado.

Identificação	Descrição
A	Protótipo do M-iUPQC
B	Painel de conexão com a rede elétrica
C	Autotransformador variável trifásico
D	Fonte de tensão CA ajustável trifásica
E	Cargas passivas da microrrede

Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

Conforme mostrado nas Figura 48 e Figura 49, alimentou-se o sistema pela rede do Núcleo de Processamento de Energia Elétrica (NPÉE) pertencente à instituição de ensino UDESC no campus de Joinville-SC, onde o protótipo foi montado e testado. A tensão de alimentação da rede do laboratório passou por um autotransformador trifásico variável que foi utilizado para regular a tensão no PAC no valor desejado e para fazer a pré-carga do conversor M-iUPQC uma vez que um sistema de pré-carga automático não foi implementado. Destaca-se, também, que foi conectada uma carga não-linear, formada pelo retificador trifásico de onda completa com filtro capacitivo e carga resistiva, com o objetivo de forçar a existência de harmônicos de tensão no PAC. O valor da resistência de carga do retificador conectado no lado da rede foi de 168Ω totalizando uma potência de 576 W para uma tensão eficaz de 127 V no PAC. Por fim, manteve-se esse retificador conectado no lado da rede em todos os testes realizados.

Como exposto na Figura 48 e Figura 49, no lado da microrrede foram conectadas cargas passivas lineares e não-lineares. As cargas da microrrede são a Carga 1, do tipo RL e ligada em estrela, e a Carga 2, formada por um retificador trifásico de onda completa com filtro capacitivo e com carga resistiva. Adicionalmente, para fazer a injeção de potência ativa no lado da microrrede, utilizou-se uma fonte de tensão CA trifásica, representada por V_{Sud} na Figura 48, modelo FCATH 450-38-50 da fabricante Supplier em série com resistores de $7,5 \Omega$ para simular uma fonte de corrente. Também, a chave S_F foi utilizada para fazer o comando de conexão e desconexão da fonte na microrrede. Na fonte V_{Sud} utilizada pode-se configurar a amplitude da tensão, frequência e fase em relação à tensão no PAC. Com isso, pode-se controlar a quantidade de potência ativa injetada na microrrede.

A corrente injetada na microrrede pela fonte V_{Sud} bem como os valores de resistência e indutância das cargas 1 e 2 foram especificados nos respectivos itens com os resultados de cada teste.

6.2 VALIDAÇÃO FUNCIONAL EXPERIMENTAL

Para fazer a validação funcional do conversor M-iUPQC, conforme comentado anteriormente, utilizou-se o setup de teste mostrado na Figura 48. Os valores utilizados para a Carga 1 e Carga 2 da microrrede bem como o status da chave S_F e da corrente injetada pela fonte V_{Usd} estão especificados nos respectivos itens de cada teste realizado. Além disso, salienta-se que os ensaios realizados para validação funcional foram realizados com as cargas da microrrede equilibradas.

Seguiu-se a mesma metodologia adotada no Capítulo 5 para a validação funcional do conversor. Dessa forma, para validação funcional experimental os ensaios foram divididos em 3 etapas, sendo apresentados nos Itens 6.2.1 e 6.2.2 os resultados para o conversor operando em regime permanente e com o fluxo de potência da rede para a microrrede e da microrrede para a rede, respectivamente. Já no Item 6.2.3 estão apresentados os resultados para avaliação do desempenho dinâmico do conversor para controlar o fluxo de potência entre a rede e a microrrede em função da variação de carga ou de geração de energia do lado da microrrede.

Por fim, todos os ensaios foram realizados com tensão eficaz no PAC e na microrrede no valor nominal de 127 V.

6.2.1 Validação funcional experimental – fluxo de potência da rede para a microrrede

Nesse ensaio, como o fluxo de potência é da rede para a microrrede, manteve-se a fonte V_{Sud} desligada e a chave S_F aberta. Os valores de resistência e indutância das Cargas 1 e 2 estão mostrados na Tabela 23. Também, mediram-se a potência ativa e a potência aparente das cargas da microrrede com o conversor operando com tensão nominal de 127 V.

Tabela 23 – Parâmetros utilizados para validação funcional do conversor M-iUPQC para ensaio com o fluxo de potência ativa da rede para a microrrede.

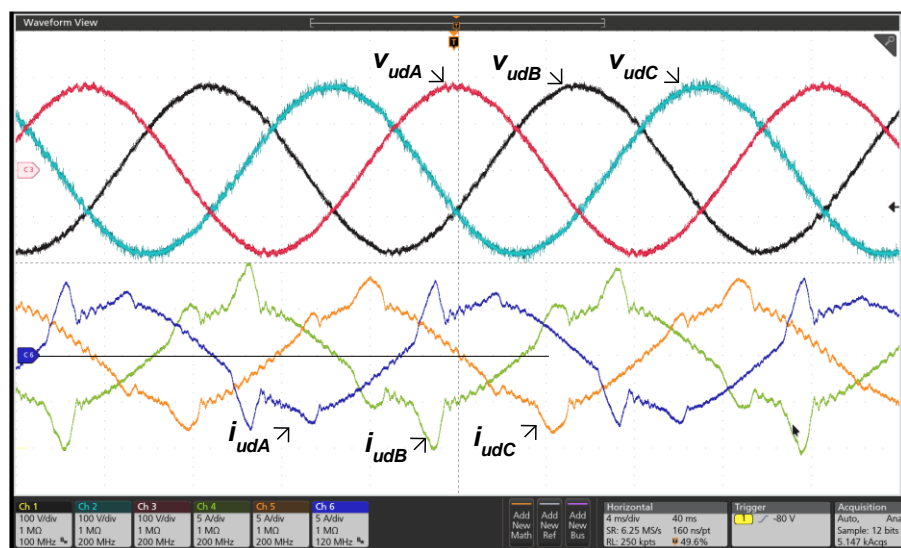
Parâmetro	Valor
Resistência da carga 1 (Ω)	24
Indutância da carga 1 (mH)	52
Resistência da carga 2 (Ω)	366
Potência ativa na fase A (W)	504
Potência ativa na fase B (W)	500
Potência ativa na fase C (W)	495
Potência aparente na fase A (VA)	588
Potência aparente na fase B (VA)	589
Potência aparente na fase C (VA)	583

Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

A diferença de potência ativa e aparente observada ocorreu em função das tolerâncias das cargas utilizadas.

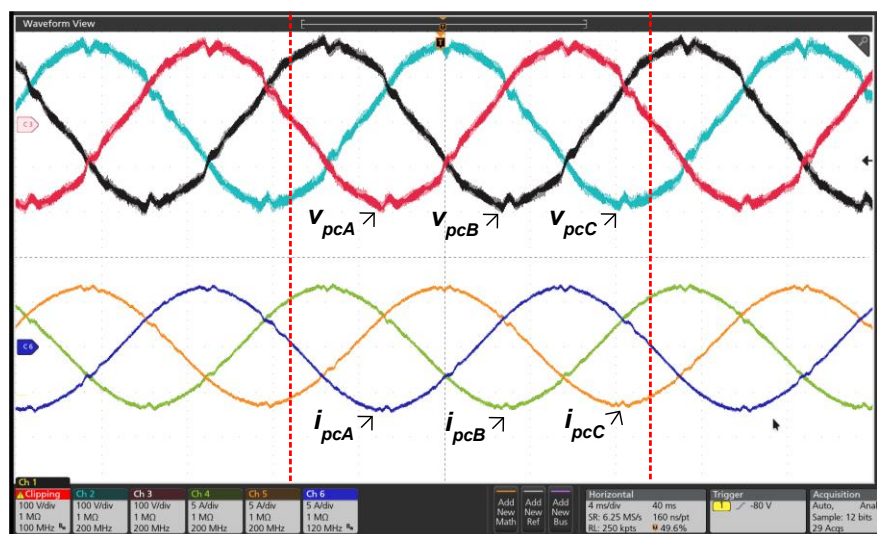
Inicialmente, configuraram-se os ângulos θ e δ em 0° . Com o conversor operando em regime permanente, com um osciloscópio as formas de onda de tensão e corrente nas três fases da microrrede foram medidas e estão mostradas na Figura 50. As formas de onda de tensão e corrente no PAC, mostradas na Figura 51.

Figura 50 – Formas de onda medidas da tensão (100 V/div.) e corrente (5 A/div.) na microrrede com S_H aberta, θ e δ igual a 0° . Escala de tempo de 4 ms/div.



Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

Figura 51 – Formas de onda medidas da tensão (100 V/div) e corrente (5 A/div) no PAC para S_H aberta e θ e δ igual a 0° . Escala de tempo de 4 ms/div.



Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

Como o ângulo θ foi configurado em 0° e como não havia injeção de potência ativa no lado da microrrede, a corrente do PAC ficou em fase com a tensão do PAC, demonstrando que o fluxo de potência ativa é no sentido da rede para a microrrede e que a circulação de potência reativa entre a rede o conversor era próximo de 0 VAR. Esse fato foi evidenciado pelas linhas tracejadas vermelhas mostradas na Figura 51 que foram posicionadas no cruzamento por 0 V da tensão no PAC o qual coincide com o cruzamento por 0 A da corrente do PAC.

A exemplo da metodologia utilizada no Capítulo 5, como forma de avaliar o desempenho do M-iUPQC na compensação dos distúrbios da tensão do PAC e da corrente da microrrede, mediu-se a DHT da corrente do PAC e da tensão na microrrede, variáveis controladas pelo M-iUPQC, além da DHT da tensão do PAC e da corrente da microrrede. Compararam-se os valores medidos com os limites especificados pela IEEE 519:2010. Os valores de DHT medidos nesse ensaio estão mostrados na Tabela 24.

Tabela 24 – DHT medida da tensão e corrente da microrrede e do PAC para o ensaio feito com S_H aberta e θ e δ igual a 0° .

Parâmetro	Fase A	Fase B	Fase C	Máximo
DHT V_{pc} (%)	6,3	5,8	6,0	8,0
DHT V_{ud} (%)	3,3	3,3	3,3	8,0
DHT I_{ud} (%)	23,4	19,4	20,3	5,0
DHT I_{pc} (%)	1,3	0,9	1,4	5,0

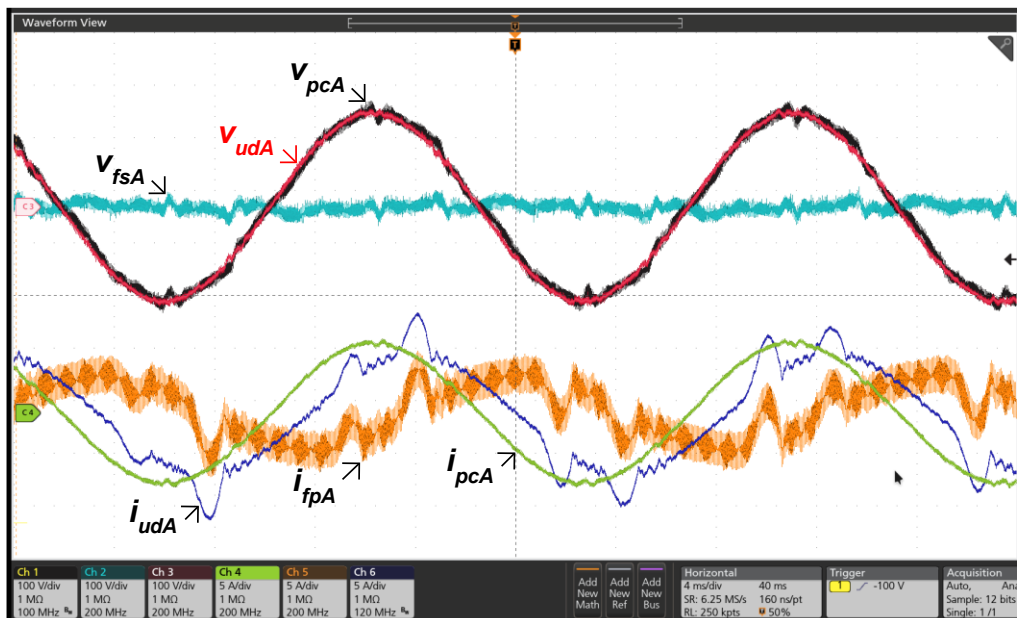
Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

A exemplo do que foi observado nas simulações, a DHT da tensão na microrrede e a corrente do PAC ficaram dentro dos limites especificados demonstrando a capacidade do conversor na compensação dos distúrbios da tensão do PAC e da corrente das cargas da microrrede mesmo em um cenário com sinais com alto conteúdo harmônico, especialmente a corrente da microrrede.

Destaca-se que a DHT medida da tensão do PAC ficou inferior ao limite especificado, diferentemente do cenário de simulação avaliado. Isso ocorreu em função de uma limitação do setup utilizado no qual não foi possível forçar uma DHT maior visto que para isso seria necessário o aumento da carga do retificador trifásico conectado do lado da rede, o que excederia a corrente nominal do autotransformador utilizado. Essa limitação aconteceu para todos os ensaios realizados. De qualquer forma, pode-se verificar a eficácia do M-iUPQC na compensação dos harmônicos de tensão no PAC visto que a DHT medida da tensão da microrrede ficou significativamente inferior à DHT de tensão do PAC.

Ainda sobre o ensaio com os ângulos θ e δ igual a 0° , mediram-se as formas de onda da fase A da tensão do PAC, do FAS e da microrrede, e as formas de onda da corrente do PAC, do FAP e da microrrede, as quais estão mostradas na Figura 52.

Figura 52 – Formas de onda medidas da tensão (100 V/div) no PAC, no FAS e na microrrede, e das correntes (5 A/div) no PAC, no FAP e na microrrede com S_H aberta e θ e δ igual a 0° . Escala de tempo de 4 ms/div.

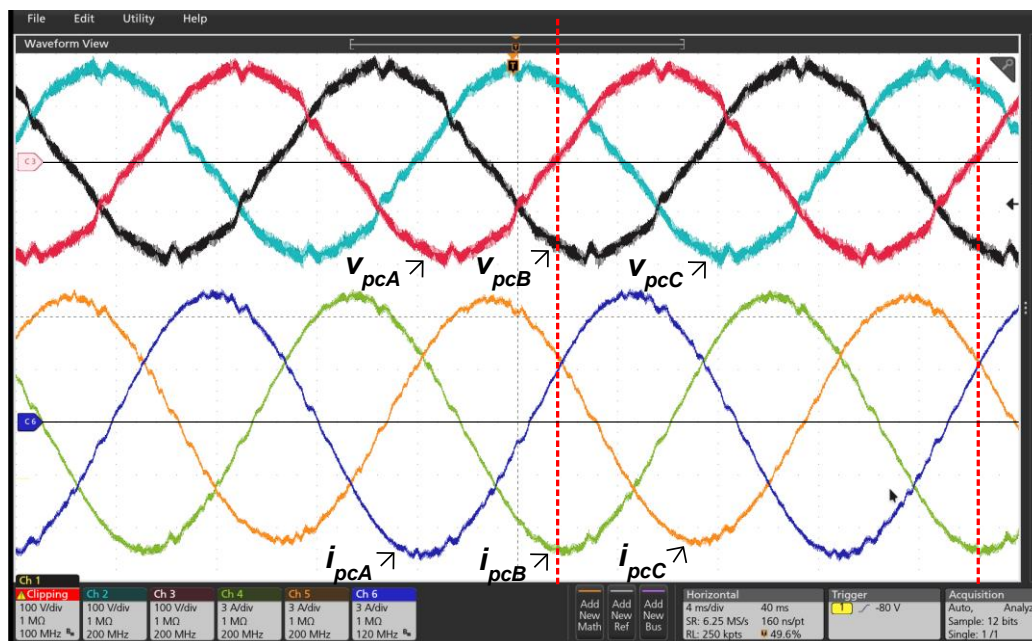


Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

Demonstrou-se que no FAS são processados os harmônicos de tensão do PAC e no FAP são processados os distúrbios da corrente das cargas da microrrede, assim como observado nos resultados de simulação.

Posteriormente, foram configurados os ângulos θ e δ iguais a 20° e mantiveram-se os demais parâmetros desse ensaio inalterados. Novamente, mediram-se as formas de onda das 3 fases da tensão e corrente do PAC, mostradas na Figura 53, e mediram-se a DHT da tensão da microrrede e da corrente do PAC nas quais os resultados estão mostrados na Tabela 25.

Figura 53 – Formas de onda medidas da tensão (100 V/div) e corrente (3 A/div) no PAC para S_H aberta e θ e δ iguais a 20° . Escala de tempo de 4 ms/div.



Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

Tabela 25 – DHT medida da tensão da microrrede e da corrente do PAC para o ensaio feito com S_H aberta e θ e δ igual a 20° .

Parâmetro	Fase A	Fase B	Fase C	Máximo
DHT V_{ud} (%)	2,8	2,8	2,5	8,0
DHT I_{pc} (%)	2,3	2,6	3,4	5,0

Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

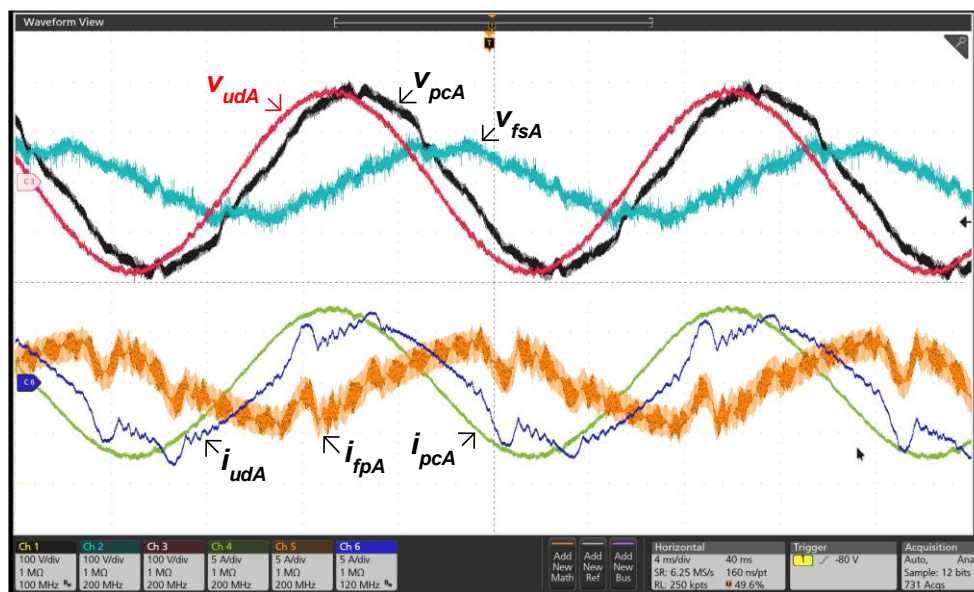
Na Tabela 25 ficou demonstrado que o conversor pode fazer a compensação dos harmônicos da tensão do PAC e da corrente da microrrede, validando o seu funcionamento nessa condição de operação com os ângulos θ e δ diferentes de 0° .

Além disso, ficou destacado na Figura 53 que a corrente no PAC ficou adiantada em relação à tensão no PAC, indicando que o conversor estava fornecendo potência reativa para a rede, conforme esperado visto que o fluxo de potência ativa era da rede para a microrrede e o ângulo θ estava configurado para um valor positivo de 20° .

Para demonstrar o efeito da variação do ângulo δ , mediram-se as formas de onda da fase A da tensão do PAC, do FAS e da microrrede, e as formas de

onda da corrente do PAC, do FAP e da microrrede, as quais estão mostradas na Figura 54.

Figura 54 – Formas de onda medidas da tensão (100 V/div) no PAC, no FAS e na microrrede, e das correntes (5 A/div) no PAC, no FAP e na microrrede com S_H aberta e θ e δ igual a 20° . Escala de tempo de 4 ms/div.



Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

Demonstrou-se que com a alteração do ângulo δ , uma componente de tensão na frequência da rede foi imposta no FAS mesmo com a tensão no PAC no valor nominal. Como a corrente do PAC ficou adiantada em relação à tensão, isso indica que o FAS passou a fornecer potência reativa, assim como observado nas simulações realizadas.

6.2.2 Validação funcional experimental – fluxo de potência da microrrede para a rede

Nesse ensaio, realizaram-se os testes com o sentido do fluxo de potência ativa da microrrede para a rede. Para isso, sincronizou-se a tensão de saída da fonte V_{Sud} para ficar em fase com a tensão da microrrede e ajustou-se a tensão de saída da fonte de modo que a corrente injetada na microrrede fosse de 5,3 A. Após isso, fechou-se a chave S_F .

Também, reduziu-se a potência das cargas 1 e 2 da microrrede para simular uma condição de redução de consumo das cargas resultando em uma geração de energia maior que o consumo da microrrede. As indutâncias e resistências nominais das Cargas 1 e 2 estão mostrados na Tabela 26. Também, mediram-se a potência ativa e a potência aparente das cargas da microrrede com o conversor operando com tensão nominal de 127 V e os resultados também estão mostrados na Tabela 26.

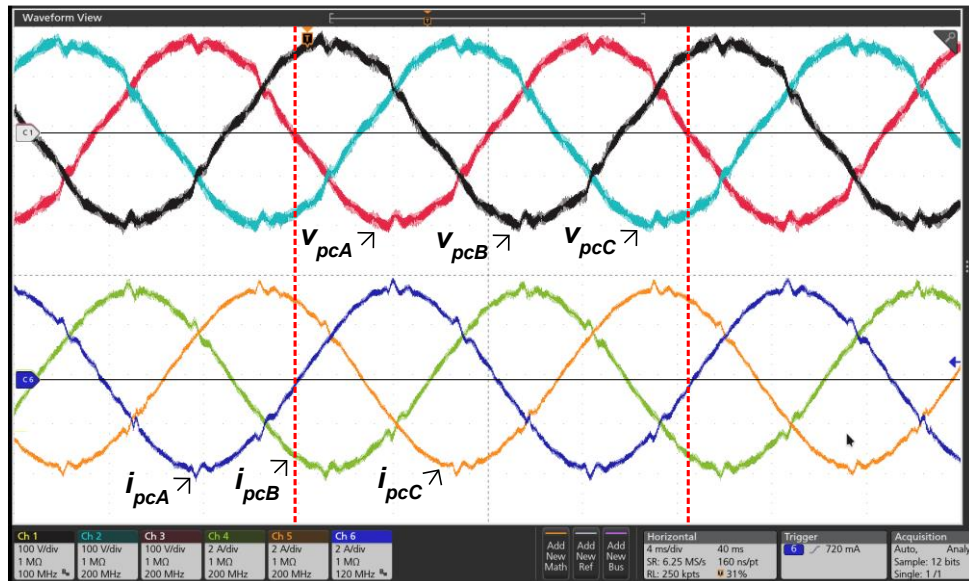
Tabela 26 – Parâmetros utilizados para validação funcional do conversor M-iUPQC para setup com o fluxo de potência ativa da microrrede para a rede

Parâmetro	Valor
Resistência nominal de uma fase da carga 1 (Ω)	61
Indutância nominal de uma fase da carga 1 (mH)	111
Resistência da carga 2 (Ω)	366
Potência ativa das cargas da fase A (W)	264
Potência ativa das cargas da fase B (W)	250
Potência ativa das cargas da fase C (W)	266
Potência aparente das cargas da fase A (VA)	303
Potência aparente das cargas da fase B (VA)	294
Potência aparente das cargas da fase C (VA)	321

Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

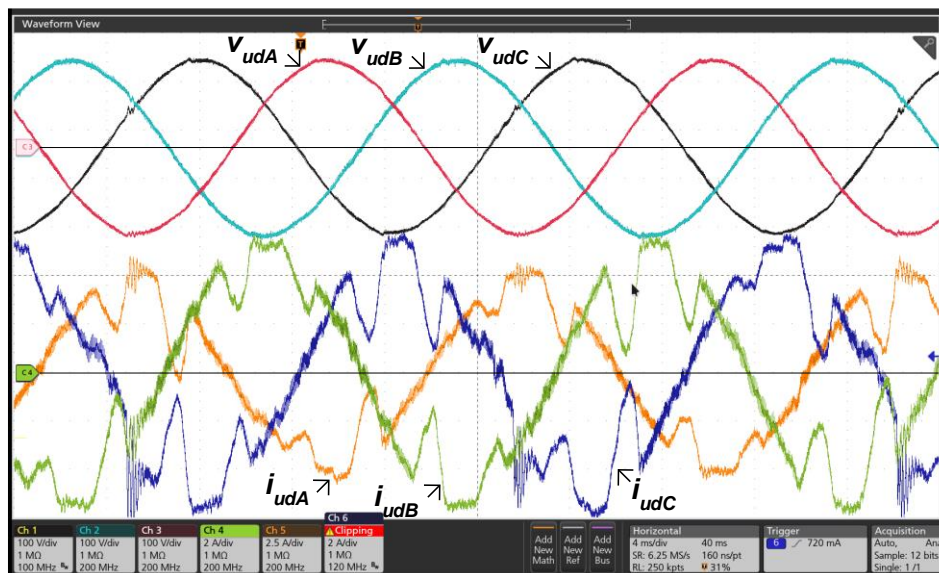
Inicialmente, configuraram-se os ângulos θ e δ em 0° . Com o conversor operando em regime permanente, com um osciloscópio mediram-se as formas de onda de tensão e corrente no PAC, mostradas na Figura 55, e as formas de onda de tensão e corrente na microrrede, mostradas na Figura 56.

Figura 55 – Formas de onda medidas da tensão (100 V/div) e corrente (2 A/div) no PAC para S_H fechada e θ e δ igual a 0° . Escala de tempo de 4 ms/div.



Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

Figura 56 – Formas de onda medidas da tensão (100 V/div) e corrente (2 A/div nas fases A e C e 2,5 A/div na fase B) na microrrede com S_H fechada e θ e δ igual a 0° . Escala de tempo de 4 ms/div.



Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

Como os ângulos θ e δ foram configurados em 0° e como havia injeção de potência ativa superior à consumida pelas cargas da microrrede, a corrente do PAC ficou defasada em 180° em relação à tensão do PAC, demonstrando

que o fluxo de potência ativa é no sentido da microrrede para a rede. Esse fato foi evidenciado pelas linhas tracejadas vermelhas mostradas na Figura 55 que foram posicionadas no cruzamento por 0 V da tensão no PAC o qual coincide com o cruzamento por 0 A da corrente do PAC. Porém, nesse caso a derivada da tensão do PAC na passagem por 0 V é inversa a derivada da corrente do PAC nesse mesmo instante, demonstrando que os sinais estão defasados em 180°.

Seguindo a metodologia adotada para a validação funcional, mediu-se a DHT das tensões e correntes do PAC e da microrrede. Os valores medidos nesse ensaio estão mostrados na Tabela 27.

Tabela 27 – DHT medida da tensão e corrente da microrrede e do PAC para o ensaio feito com S_H fechada e θ e δ igual a 0°.

Parâmetro	Fase A	Fase B	Fase C	Máximo
DHT V_{pc} (%)	7,2	6,8	6,5	8,0
DHT V_{ud} (%)	1,7	1,8	1,5	8,0
DHT I_{ud} (%)	37,6	27,7	28,0	5,0
DHT I_{pc} (%)	4,1	3,6	3,9	5,0

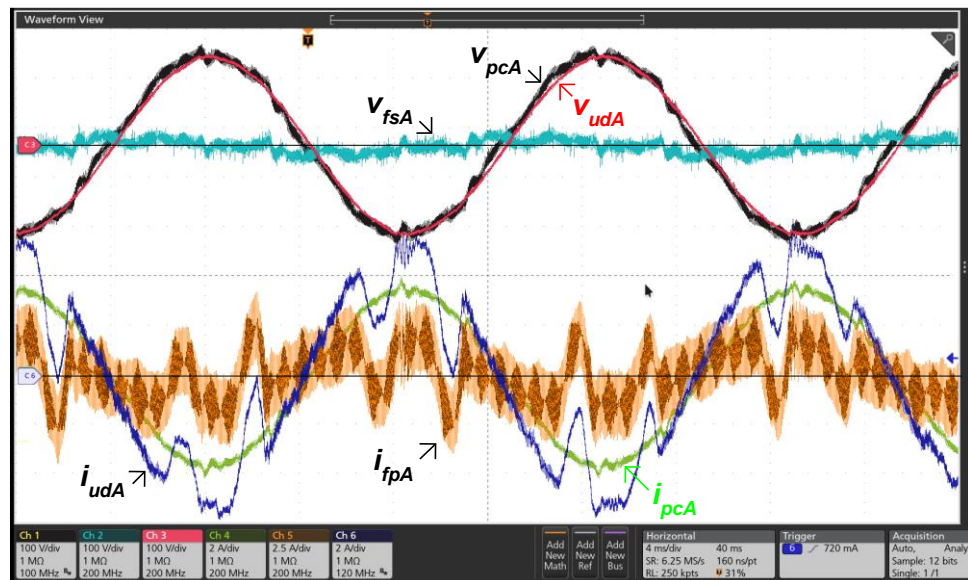
Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

Observou-se que a DHT da corrente do PAC é maior que a DHT medida no cenário anterior. Idealmente, os controladores de corrente do FAS possuem ganho infinito em baixas frequências. Porém, na prática esse ganho é finito o que resulta em pequenas componentes harmônicas na corrente do PAC. Como a amplitude da corrente é menor nesse cenário, as componentes harmônicas ficam proporcionalmente mais evidentes, o que justifica tal resultado. De qualquer forma, a DHT medida ainda é inferior a máximo especificado pela IEEE 519:2010, demonstrando a eficácia do conversor na compensação dos harmônicos de corrente das cargas da microrrede.

Já em relação a DHT da tensão da microrrede, não foram observadas alterações significativas no resultado, conforme esperado.

Ainda sobre o ensaio com os ângulos θ e δ igual a 0°, mediram-se as formas de onda da fase A da tensão do PAC, do FAS e da microrrede, e as formas de onda da corrente do PAC, do FAP e da microrrede, as quais estão mostradas na Figura 57.

Figura 57 – Formas de onda medidas da tensão (100 V/div) e corrente no PAC (2 A/div), no FAP (2,5 A/div) e na microrrede (2 A/div) com S_H fechada e θ e δ igual a 0° . Escala de tempo de 4 ms/div.

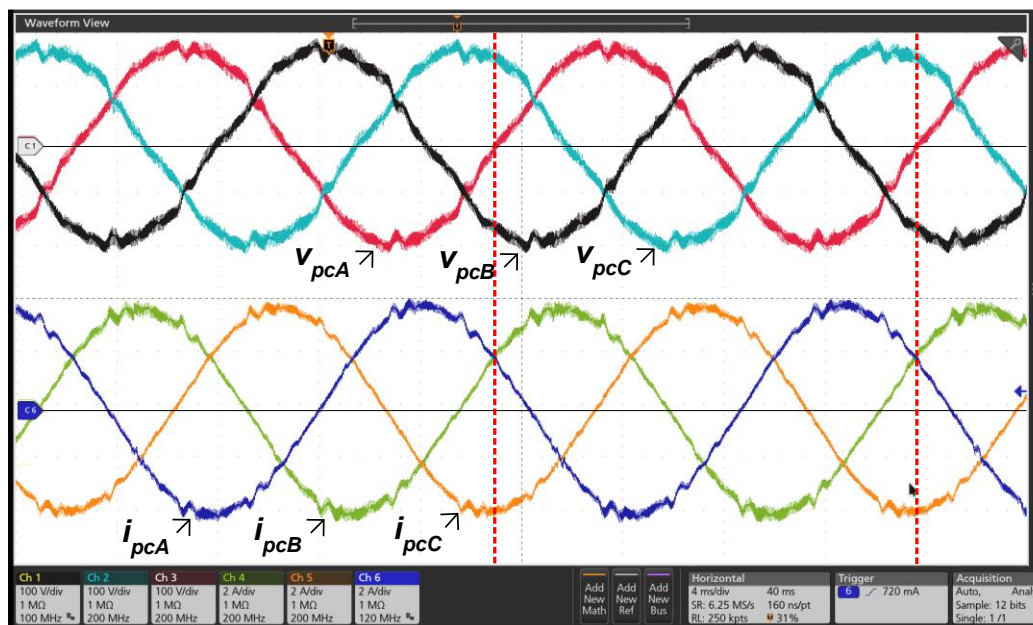


Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

Demonstrou-se que mesmo que a potência ativa é fornecida pela fonte V_{Sud} da microrrede, os distúrbios de corrente das cargas da microrrede são processados pelo FAP.

Depois disso, configuraram-se os ângulos θ e δ iguais a -20° e mantiveram-se os demais parâmetros desse ensaio inalterados. Mediram-se as formas de onda da tensão e corrente do PAC nas 3 fases, mostradas na Figura 58, e mediram-se a DHT da tensão da microrrede e da corrente do PAC nas quais os resultados estão mostrados na Tabela 28.

Figura 58 – Formas de onda medidas da tensão (100 V/div) e corrente (2 A/div) no PAC para S_H fechada e θ e δ igual a -20° . Escala de tempo de 4 ms/div.



Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

Tabela 28 – DHT medida da tensão da microrrede e da corrente do PAC para o ensaio feito com S_H fechada e θ e δ igual a -20° .

Parâmetro	Fase A	Fase B	Fase C	Máximo
DHT V_{ud} (%)	1,7	1,7	1,5	8,0
DHT I_{pc} (%)	3,9	3,5	3,8	5,0

Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

Na Tabela 28 ficou demonstrado que o conversor pode fazer a compensação dos harmônicos da tensão do PAC e da corrente da microrrede, validando o seu funcionamento nessa condição de operação com os ângulos θ e δ diferentes de 0° .

Destaca-se, também, que na Figura 53 a corrente no PAC ficou com ângulo diferente de 180° , indicando que o conversor estava fornecendo potência reativa para a rede, conforme esperado e validando o que foi observado nas simulações.

6.2.3 Resultados experimentais para avaliar a dinâmica do controle no gerenciamento do fluxo de potência ativa entre a rede e a microrrede

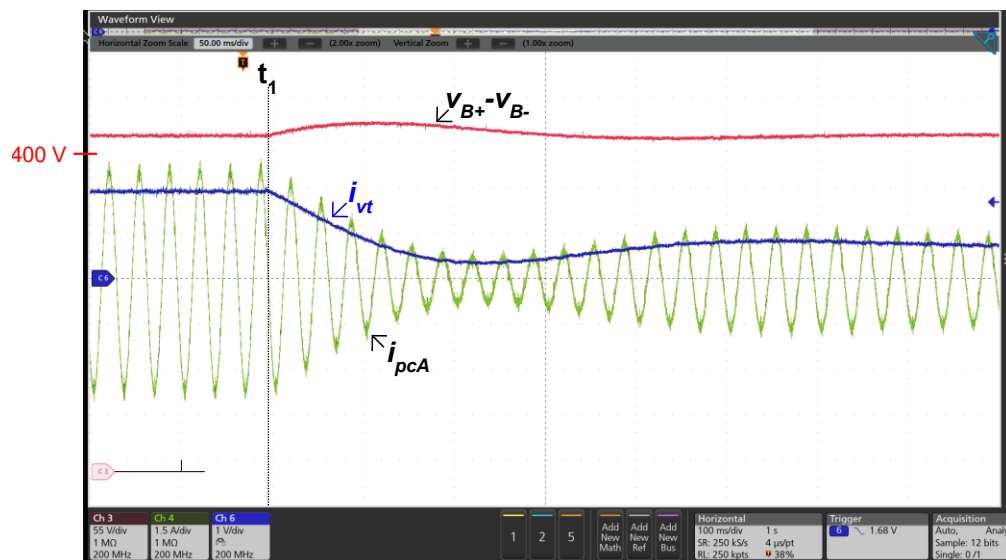
Nessa seção, avaliou-se experimentalmente a dinâmica do controle do conversor M-iUPQC no controle do fluxo de potência ativa entre a rede e a microrrede, função prevista para o conversor M-iUPQC em uma aplicação como conversor de interface em microrredes de energia.

Nesses testes, utilizou-se o setup de testes mostrado na Figura 48. Além disso, realizaram-se os testes com as cargas 1 e 2 da microrrede equilibradas e com os mesmos parâmetros mostrados na Tabela 26 e que foram utilizados na validação funcional do Item 6.2.2. Por fim, em todos os testes realizados, os ângulos θ e δ foram configurados para 0° .

Para simular variações na injeção de potência ativa no lado da microrrede, foram utilizadas a fonte V_{Sud} e a chave S_F . No caso, com a chave S_F aberta, configurou-se previamente a amplitude da tensão da fonte V_{Sud} e sincronizou-se a mesma para ficar em fase com a tensão da microrrede. Então, comutou-se a chave S_F e capturaram-se as formas de onda da tensão no PAC, na microrrede, no barramento CC e do controle da tensão total do barramento CC (i_{vt} mostrado na Figura 7), e a forma de onda da corrente do PAC. Como as cargas da microrrede e demais variáveis do sistema estavam equilibradas, para facilitar a visualização, estão apresentadas apenas as formas de onda da fase A.

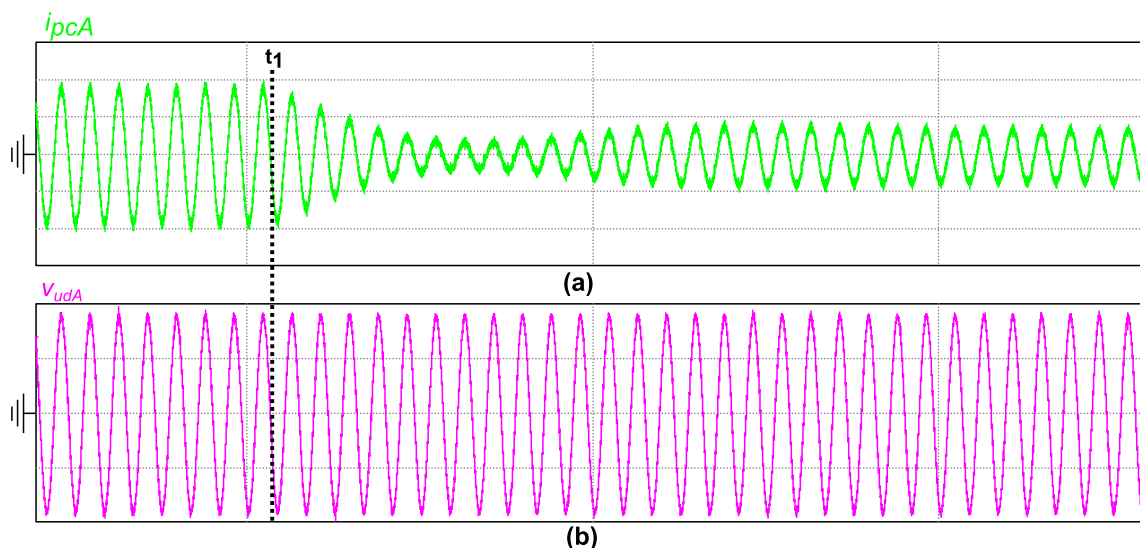
Inicialmente, configurou-se a tensão eficaz da fonte V_{Sud} em 135 V, e no instante t_1 fechou-se a chave S_F . Com isso, a fonte V_{Sud} passou a injetar uma corrente de aproximadamente 1,0 A em cada fase da microrrede, o que resultou na injeção de aproximadamente 380 W de potência ativa no lado da microrrede. Na Figura 59 estão mostradas as formas de onda medidas das tensões total do barramento CC e do controle da tensão total do barramento CC, e a forma de onda da corrente do PAC. Na Figura 60 estão mostradas as formas medidas da corrente e tensão do PAC. As formas de onda da Figura 60 foram geradas a partir dos pontos medidos. Isso foi necessário pois as formas de onda do próprio osciloscópio não foram salvas no dia em que os ensaios foram realizados.

Figura 59 – Formas de onda medidas da tensão do controlador da tensão total do barramento CC (1 V/div.), tensão total do barramento CC (55 V/div) e corrente no PAC (1,5 A/div). Teste de degrau de inserção de 380 W de potência ativa. Escala de tempo de 100 ms/div.



Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

Figura 60 – Formas de onda medidas da tensão na microrrede (100 V/div) e corrente no PAC (2 A/div) no teste de degrau de inserção de 380 W de potência ativa. Escala de tempo de 200 ms/div.



Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

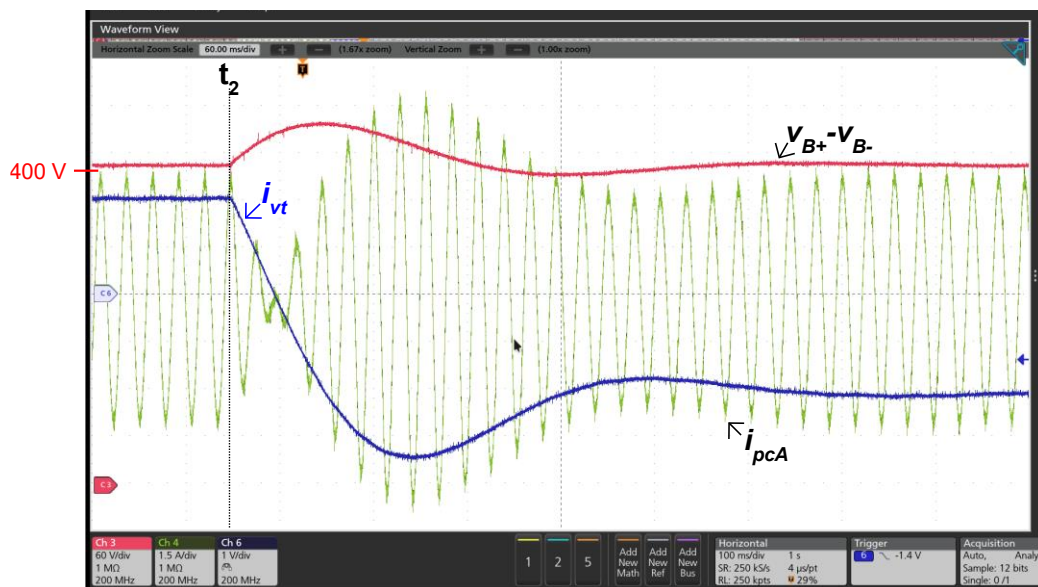
Nesse primeiro teste, assim como observado nas simulações após o fechamento da chave S_F a fonte V_{Sud} passou a injetar 380 W de potência ativa

na microrrede. Do ponto de vista do conversor M-iUPQC ocorreu uma redução de carga da microrrede e, por consequência, a tensão total no barramento CC aumentou, conforme mostrado na Figura 59. Com isso, o controle da tensão total do barramento CC atuou diminuindo a amplitude da referência do controlador de corrente do FAS reduzindo, assim, a amplitude da corrente do PAC e a potência absorvida pela rede. Porém, como a potência ativa injetada pela fonte V_{Sud} após o fechamento da chave S_F ainda foi menor que a potência ativa consumida pelas cargas microrrede, que era de 780 W, não houve a inversão de fase da corrente do PAC.

Outro ponto a ser destacado é que a tensão da microrrede não sofreu nenhuma alteração significativa durante o transitório e em regime após o chaveamento de S_F , conforme mostrado na Figura 60 o que demonstrou que o conversor mantém a tensão na microrrede regulada mesmo em situações de variações da corrente da microrrede.

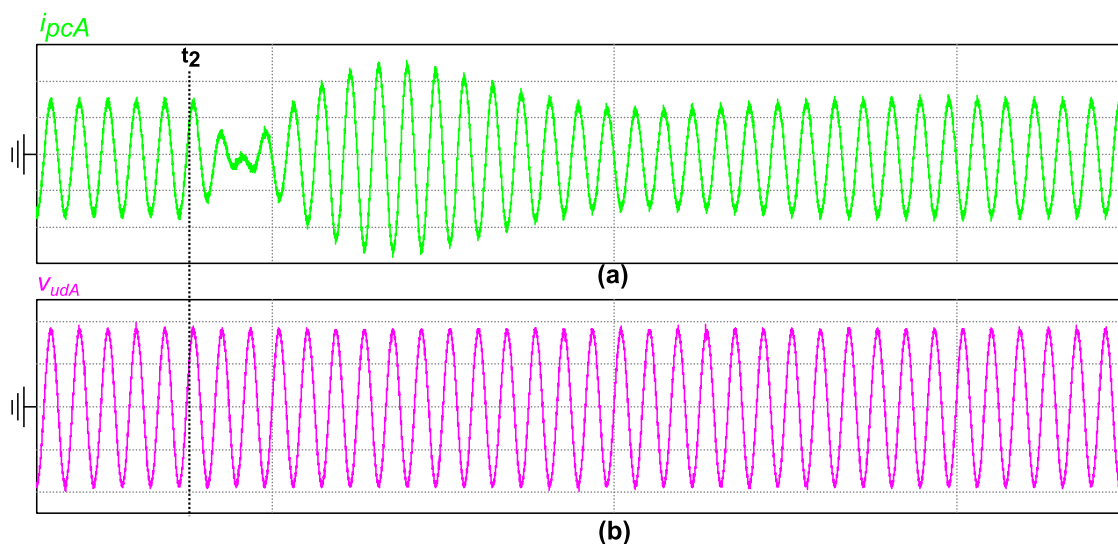
Por fim, com a chave S_F aberta, configurou-se a tensão da fonte V_{Sud} em 165 V e, com o circuito operando em regime permanente, fechou-se a chave S_F no instante t_2 . As formas de onda medidas nesse teste estão mostradas na Figura 61 e na Figura 62.

Figura 61 – Formas de onda medidas da tensão do controlador da tensão total do barramento CC (1 V/div.), tensão total do barramento CC (60 V/div) e corrente no PAC (1,5 A/div). Teste de degrau de inserção de 1,93 kW de potência ativa. Escala de tempo de 100 ms/div.



Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

Figura 62 – Formas de onda medidas da tensão na microrrede (100 V/div) e corrente no PAC (2,5 A/div) no teste de degrau de inserção de 1,93 kW de potência ativa. Escala de tempo de 200 ms/div.



Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

Similar ao teste anterior e conforme já havia sido demonstrado nas simulações numéricas, após o fechamento da chave SF, a fonte V_{Sud} passa a

injetar 1,93 kW de potência ativa na microrrede. Porém, nesse caso como a potência injetada pela fonte V_{Sud} é maior que potência ativa consumida pelas cargas da microrrede, o controlador da tensão total do barramento CC inverte a referência do sinal para o controlador da corrente do FAS, conforme mostrado na Figura 61. Com isso, o conversor passou a fornecer potência ativa para a rede, como pode ser visto na Figura 61 e na Figura 62 (a).

Por fim, destaca-se que, assim como nos testes anteriores, a tensão na microrrede não sofreu distúrbios durante o transitório e permaneceu regulada após a inversão do fluxo de potência ativa para o sentido da microrrede para a rede, conforme mostrado na Figura 62 (b), validando essa funcionalidade do conversor M-iUPQC.

6.3 VALIDAÇÃO VIA RESULTADOS EXPERIMENTAIS DO EQUACIONAMENTO DESENVOLVIDO

Para validar o equacionamento proposto no Capítulo 4, ensaios experimentais foram realizados e compararam-se as medições de potência obtidas nesses ensaios com os valores calculados utilizando as equações propostas.

Nesses ensaios, utilizou-se o mesmo setup de testes mostrado nas Figura 48 e na Figura 49 e conforme está descrito no Item 6.1.6. Além disso, em todos os testes realizados, ajustou-se a tensão de saída do autotransformador trifásico de modo que a tensão eficaz no PAC fosse de 127 V. Os parâmetros das cargas da microrrede, o status da chave S_H e a tensão e a corrente injetada pela fonte V_{Sud} estão listados nos respectivos itens de cada cenário avaliado.

Assim como mostrado na validação via simulação numérica, o objetivo dos ensaios realizadas foi avaliar o fluxo de potência entre os conversores do M-iUPQC em função da variação dos ângulos θ e δ e validar o equacionamento proposto no Capítulo 4 para diferentes cenários de operação. Para isso, com o conversor operando em regime permanente, mediram-se as variáveis de potência mostradas na Tabela 12 e foram comparados os resultados obtidos utilizando as equações obtidas no Capítulo 4.

Para demonstrar a validade das equações para qualquer condição de operação e, também, fazer um paralelo com os resultados obtidos via simulação numérica e que estão apresentados no Item 5.2, realizaram-se ensaios nos mesmos 4 diferentes cenários simulados. Ou seja, nos três primeiros, o fluxo de potência ativa era da rede para a microrrede e nos cenários 1 e 2 variou-se o fator de deslocamento da Carga 1. No cenário 3, testou-se o circuito com desequilíbrio na fase C da Carga 1. Por fim, no cenário 4, ensaiou-se o sistema com o fluxo de potência da microrrede para a rede. Utilizaram-se nos ensaios experimentais as mesmas especificações utilizadas nas simulações.

Em cada cenário avaliado, ensaiou-se o sistema com os ângulos θ e δ em um range de -40° a 40° nos cenários 1, 2 e 3. De modo geral, realizaram-se em média 9 ensaios em cada cenário avaliado.

Para comparação dos resultados medidos experimentalmente com os calculados, foram traçadas as curvas obtidas com as equações em função da variação dos ângulos θ e δ e, nos mesmos gráficos, foram marcados os pontos simulados.

Por fim, avaliou-se a influência da variação dos ângulos θ e δ no fluxo de potência dos conversores do M-iUPQC e a eficácia do CATC para fazer o compartilhamento e equalização da potência processada pelos conversores do FAS e do FAP para todos os cenários avaliados.

6.3.1 Cenário 1 – Fluxo de potência ativa da rede para a microrrede e cargas da microrrede equilibradas e fator de deslocamento de 0,82

No primeiro cenário, o fluxo de potência ativa foi da rede para a microrrede. Também, todas as cargas da microrrede foram montadas com valores nominais equilibrados. Além disso, desabilitou-se a fonte V_{Sud} e manteve-se a chave S_F aberta. Os valores nominais utilizados nesse ensaio estão mostrados na Tabela 29.

Tabela 29 – Parâmetros utilizados no ensaio do cenário 1 para validação das equações

Parâmetro	Valor
Resistência da carga 1 da microrrede	24,1 Ω
Indutância da carga 1 da microrrede	52 mH
Status da chave S_F	aberta
Corrente de fase injetada pela fonte V_{Sud}	0,0 A

Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

Com o conversor operando em regime permanente, mediram-se as variáveis mostradas na Tabela 30 que foram utilizadas para calcular as potências do FAS e do FAP utilizando as equações desenvolvidas.

Tabela 30 – Variáveis de entrada para as equações que foram medidas nos ensaios do cenário 1.

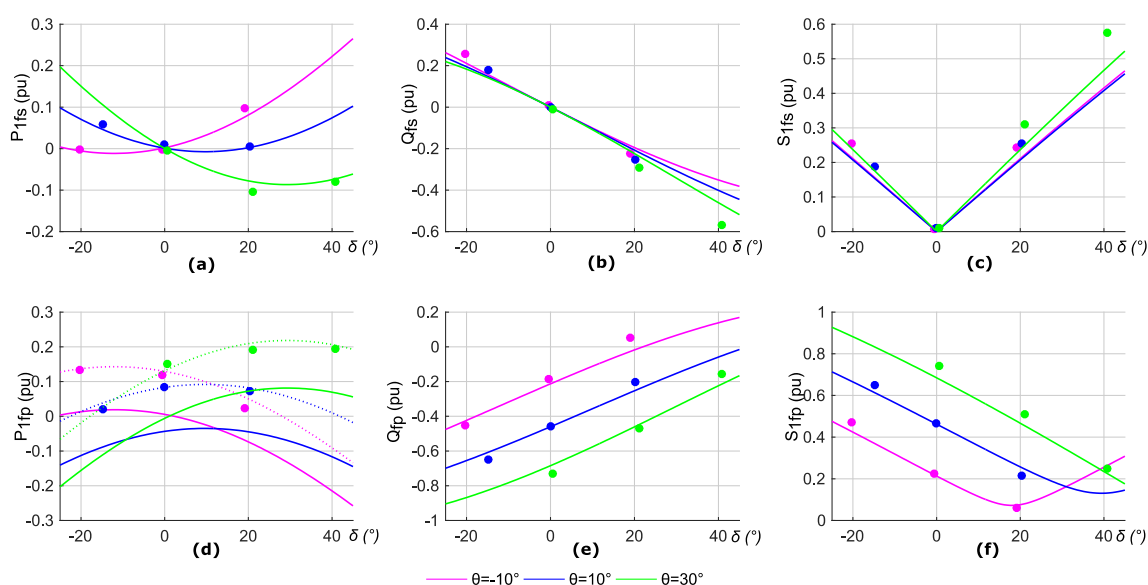
Parâmetro	Total	Fase A	Fase B	Fase C
Potência ativa da microrrede (kW)	1,48	502	479	503
Valor eficaz da componente fundamental da tensão de fase do PAC (V)	-	127	127	128
DHT da tensão do PAC (%)	-	5,5	4,9	5,1
Tensão eficaz da microrrede (V)	-	127	127	127
Valor eficaz da componente fundamental da corrente da microrrede (A)	-	4,59	4,41	4,57
Ângulo da componente fundamental da corrente em relação a tensão da microrrede	-	-29,8	-31,1	-29,8
DHT da corrente da microrrede	-	24,3	20,9	22,0

Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

Como utilizou-se nos ensaios cargas passivas, variações de resistência e indutância em torno dos valores nominais são esperados. Isso explica os desequilíbrios na corrente medida na microrrede.

Realizaram-se os ensaios e as variáveis de potência do FAS e do FAP mostradas na Tabela 12 foram medidas. Os resultados das componentes fundamentais de potência obtidos nos ensaios do cenário 1 estão mostrados na Figura 63. Embora a corrente da microrrede não estava perfeitamente balanceada, para facilitar a visualização dos resultados, optou-se por apresentar apenas os resultados referentes a fase A do sistema.

Figura 63 - Resultados calculados (linhas contínuas e pontilhadas) e medidos experimentalmente (pontos) das componentes fundamentais de potência ativa, reativa e aparente do FAS, (a), (b) e (c), e do FAP, (d), (e) e (f) respectivamente, para o cenário 1.



Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

Conforme demonstrado na Figura 63, os resultados calculados, que estão representados pelas linhas contínuas, e os resultados medidos experimentalmente, que são os pontos marcados, convergiram para valores próximos.

Destaca-se que, diferentemente dos resultados obtidos via simulação, observaram-se erros entre os resultados calculados e medidos experimentalmente. Isso ocorreu em função das simplificações feitas durante o desenvolvimento das equações e que também são válidas nas simulações. Para as componentes fundamentais de potência, o principal fator que resultou nos erros observados foram as perdas do conversor M-iUPQC, as quais foram desconsideradas no desenvolvimento das equações. Explica-se essa afirmação

pelo fato de que ao somar-se as perdas do conversor aumenta-se a potência ativa absorvida da rede e, conseqüentemente, aumenta-se o módulo da corrente do PAC. Isso resulta em alterações do fluxo das componentes fundamentais de potência do FAS e do FAP, conforme mostrado na Figura 63. Para quantificar a influência das perdas do conversor, o rendimento do conversor M-iUPQC medido nos testes ficou entre 80% e 84% a depender da condição de operação, o que implica em um acréscimo de 19% a 25% na corrente do PAC.

O erro relativo entre o valor calculado e o valor medido para a componente fundamental de potência ativa do FAP foi o mais significativo, conforme mostrado na Figura 63 (d). No caso dessa variável, a tendência é que a potência ativa decorrente das perdas do conversor seja processada pelo FAP, por isso que o erro observado foi mais significativo. Para demonstrar isso, as perdas do conversor foram medidas e somadas aos resultados calculados para a componente fundamental de potência ativa do FAP, conforme mostrado na equação (39)

$$P_{fpX_C} = P_{fpX} + \frac{P_{loss}}{3} \quad (39)$$

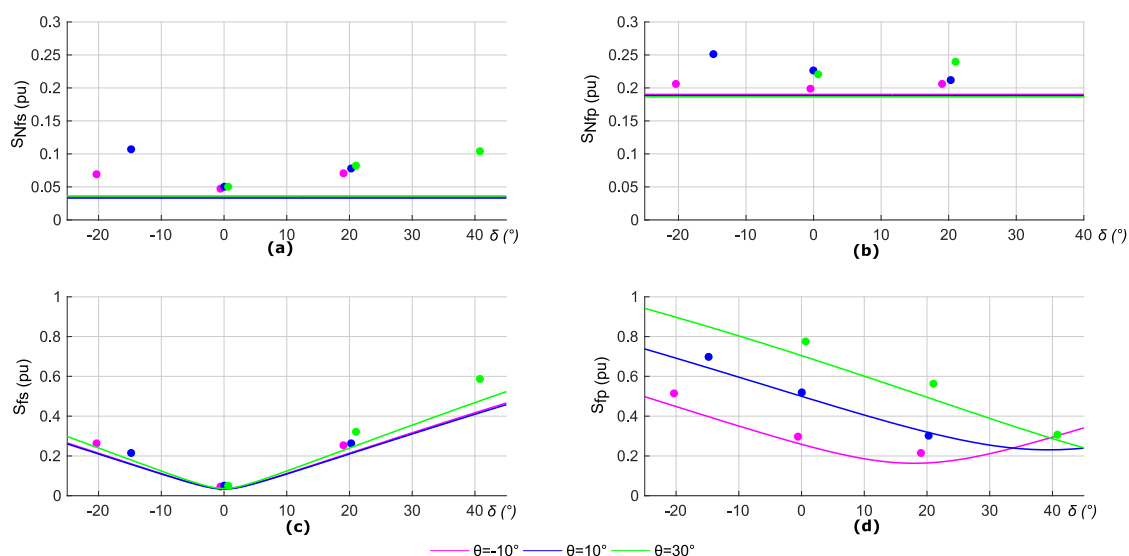
onde P_{fpX_C} é a potência ativa do FAP calculada e compensada pelo rendimento e P_{loss} é o valor das perdas totais do conversor.

As curvas corrigidas utilizando a equação (39) foram traçadas as quais estão mostradas pelas linhas pontilhadas da Figura 63 (d). Aplicando essa correção, observa-se que os resultados calculados e medidos convergiram com maior precisão, o que valida a hipótese levantada. Por fim, salienta-se que, apesar dos erros observados, a tendência demonstrada nas curvas calculadas foi demonstrada experimentalmente com os valores medidos, o que valida as equações desenvolvidas.

Em relação à variação do fluxo das componentes fundamentais de potência em função da variação dos ângulos θ e δ , observou-se a mesma tendência que foi demonstrada nas simulações. Portanto, as mesmas conclusões feitas para as simulações são válidas para os resultados experimentais.

Na Figura 64 estão mostrados os resultados obtidos para as componentes não-fundamentais de potência e a potência aparente total do FAS e do FAP. Da mesma forma, estão apresentados os resultados apenas da fase A, para facilitar a visualização.

Figura 64 - Resultados calculados (linhas contínuas) e medidos (pontos) das componentes não-fundamentais de potência do (a) FAS e (b) FAP e potência aparente do (c) FAS e (d) FAP, para o cenário 1.



Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

Novamente demonstrou-se que os resultados possuem uma tendência de convergência de valores, especialmente a potência ativa total do FAS, mostrado na Figura 64 (c). O erro entre o valor calculado e o valor medido da componente não-fundamental de potência do FAS e do FAP, mostrado na Figura 64 (a) e (b), é principalmente explicado pelo fato de que as componentes de tensão e corrente na frequência de chaveamento foram desconsideradas no equacionamento desenvolvido. Além disso, outros efeitos como ondulação da tensão do barramento CC e as não idealidades dos componentes de potência, especialmente os IGBTs, influenciam nesse erro. Destaca-se que no FAP esse erro foi mais significativo o que é consequência da circulação das componentes de alta frequência do FAS pelo FAP. Considerando todos os erros decorrentes das simplificações e idealizações feitas, a potência aparente total do FAP tende a apresentar um erro maior, comparado ao FAS. De qualquer forma, ficou

demonstrado que claramente os resultados medidos seguem a tendência apontada pelas curvas calculadas, o que valida o equacionamento proposto.

Além disso, como os resultados experimentais seguiram a mesma tendência observada nas simulações, as mesmas conclusões em relação a variação do fluxo de potência entre os conversores do M-iUPQC em função da variação dos ângulos θ e δ que foram detalhadamente apresentadas no Item 5.2.1 são válidas para os resultados apresentados nessa seção. Em resumo, demonstrou-se que na condição do fluxo de potência ativa ser da rede para a microrrede, para ângulos θ maiores do que 0° a potência do FAP tende a aumentar. Além disso, para ângulos δ maiores que 0° ocorre o compartilhamento e equalização da potência processada pelos conversores do M-iUPQC, o que demonstra que a técnica do CATC pode ser empregada de forma eficaz nesse conversor, mesmo para a condição de operação com o ângulo θ diferente de 0° .

6.3.2 Cenário 2 – Fluxo de potência ativa da rede para a microrrede e cargas da microrrede equilibradas

No cenário 2, manteve-se o fluxo de potência da rede para a microrrede. Também, todas as cargas da microrrede foram montadas com valores nominais equilibrados e manteve-se a chave S_F aberta. Os valores nominais utilizados nesse ensaio estão mostrados na Tabela 31. Salienta-se que os parâmetros utilizados nos ensaios apresentados nessa seção são equivalentes às simulações apresentadas no Item 5.2.2.

Tabela 31 – Parâmetros utilizados no ensaio do cenário 2 para validação das equações

Parâmetro	Valor
Resistência da carga 1 da microrrede	30 Ω
Indutância da carga 1 da microrrede	41 mH
Status da chave S_F	aberta
Corrente de fase injetada pela fonte V_{Sud}	0,0 A

Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

As variáveis mostradas na Tabela 32 foram medidas com o conversor operando em regime permanente e foram utilizadas para calcular as potências do FAS e do FAP utilizando as equações desenvolvidas.

Tabela 32 – Variáveis de entrada para as equações que foram medidas nos ensaios do cenário 2.

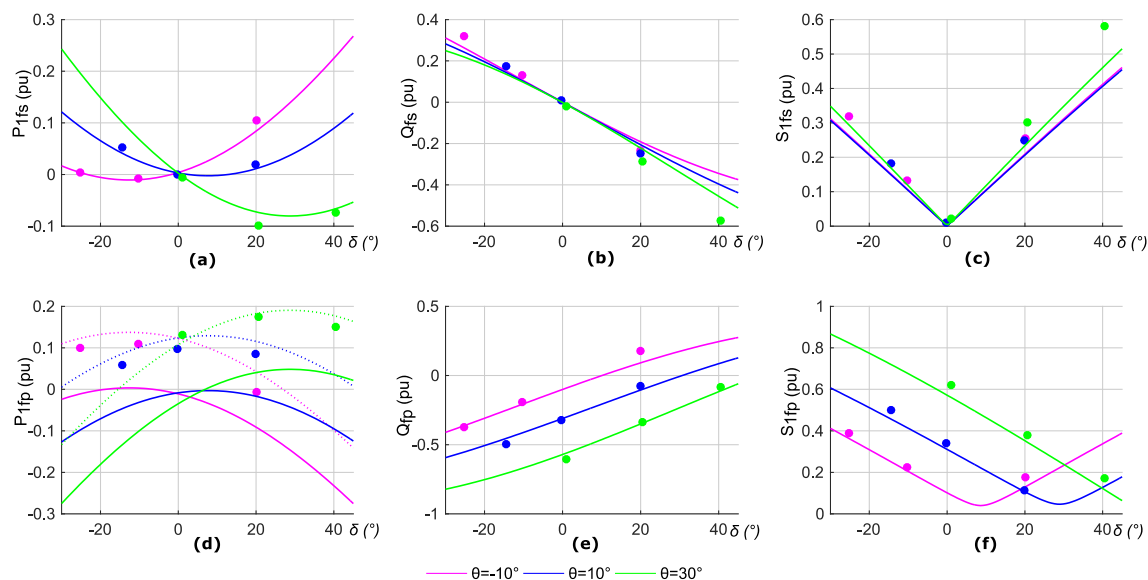
Parâmetro	Total	Fase A	Fase B	Fase C
Potência ativa da microrrede (kW)	1,48	504	474	503
Valor eficaz da componente fundamental da tensão de fase do PAC (V)	-	128	128	129
DHT da tensão do PAC (%)	-	5,2	4,7	4,7
Tensão eficaz da microrrede (V)	-	127	127	127
Valor eficaz da componente fundamental da corrente da microrrede (A)	-	4,3	4,1	4,3
Ângulo da componente fundamental da corrente em relação a tensão da microrrede	-	-21,1	-23,0	-21,5
DHT da corrente da microrrede	-	23,1	21,2	22,1

Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

Novamente, observaram-se pequenos desequilíbrios na corrente da microrrede que são consequência das tolerâncias das cargas passivas utilizadas.

Os resultados obtidos nesse ensaio seguindo a metodologia adotada estão mostrados na Figura 65.

Figura 65 - Resultados calculados (linhas contínuas e pontilhadas) e medidos experimentalmente (pontos) das componentes fundamentais de potência ativa, reativa e aparente do FAS, (a), (b) e (c), e do FAP, (d), (e) e (f) respectivamente, para o cenário 2.

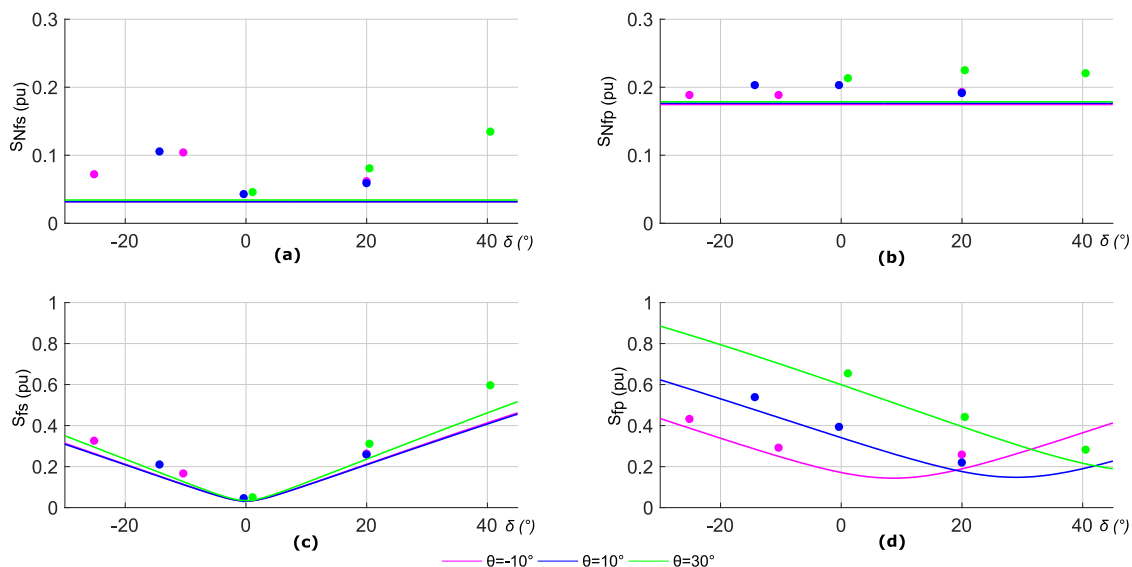


Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

Conforme demonstrado, os resultados calculados e medidos seguiram a mesma tendência validando as equações desenvolvidas. Em relação aos erros observados, os mesmos comentários feitos para o cenário 1 experimental são válidos para o presente cenário.

Na Figura 66 estão mostrados os resultados obtidos para as componentes não-fundamentais de potência a e a potência aparente total do FAS e do FAP.

Figura 66 - Resultados calculados (linhas contínuas) e medidos (pontos) das componentes não-fundamentais de potência do (a) FAS e (b) FAP e potência aparente do (c) FAS e (d) FAP, para o cenário 2.



Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

A mesma tendência de convergência de resultados e os erros associados às não-idealidades do circuito que foram mostrados no cenário 1 foram observados no presente cenário. Portanto, as mesmas justificativas e conclusões são válidas, também, para o presente cenário.

Além disso, demonstrou-se que para ângulos δ positivos, é possível fazer o compartilhamento e equalização da potência processada pelos conversores do M-iUPQC, conforme havia sido previsto na análise qualitativa e na simulação equivalente do presente cenário.

6.3.3 Cenário 3 - Fluxo de potência ativa da rede para a microrrede e cargas da microrrede desequilibradas

No cenário 3, foram consideradas cargas iguais nas fases A e B e a potência aparente da carga na fase C 45% menor que nas demais fases. Dessa forma, ensaiou-se o setup experimental montado com os valores de resistência e indutância da carga 1 da fase C diferentes dos valores das fases A e B. As especificações utilizadas nessa simulação estão mostradas na Tabela 33. Como há desequilíbrio nas cargas da microrrede, apresentou-se os valores das 3 fases.

Salienta-se que os parâmetros utilizados nos ensaios apresentados nessa seção são equivalentes as simulações apresentadas no Item 5.2.3.

Tabela 33 – Valores nominais dos parâmetros utilizados nos ensaios do cenário 3 para validação das equações

Parâmetro	Valor		
	Fase A	Fase B	Fase C
Resistência da carga 1 da microrrede (Ω)	24,1	24,1	61,0
Indutância da carga 1 da microrrede (mH)	52,0	52,0	111
Status da chave S_F	aberta		
Corrente de fase injetada pela fonte V_{Sud}	0,0	0,0	0,0

Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

Com o conversor operando em regime permanente, mediram-se as variáveis mostradas na Tabela 34 e que foram utilizadas para gerar os gráficos utilizando às equações desenvolvidas.

Tabela 34 – Variáveis de entrada para as equações que foram experimentalmente medidas nos ensaios do cenário 3.

Parâmetro	Total	Fase A	Fase B	Fase C
Potência ativa da microrrede (kW)	1,24	0,484	0,489	0,265
Valor eficaz da componente fundamental da tensão de fase do PAC (V)	383	128	127	128
DHT da tensão do PAC (%)	-	5,6	5,3	5,3
Tensão eficaz da microrrede (V)	-	127	127	127
Valor eficaz da componente fundamental da corrente da microrrede (A)	-	4,47	4,46	2,25
Ângulo da componente fundamental da corrente em relação a tensão da microrrede	-	-30,5	-29,8	-21,2
DHT da corrente da microrrede	-	21,7	21,2	45,1

Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

Na Figura 67 e na Figura 68 estão mostrados os resultados medidos e calculados para as componentes fundamentais de potência do FAS e do FAP, respectivamente, nas 3 fases do conversor.

Figura 67 - Resultados calculados (linhas contínuas) e medidos (pontos) das componentes fundamentais de potência ativa, (a), (b) e (c), reativa, (d), (e) e (f) e aparente, (g), (h) e (i) do FAS no cenário 3.

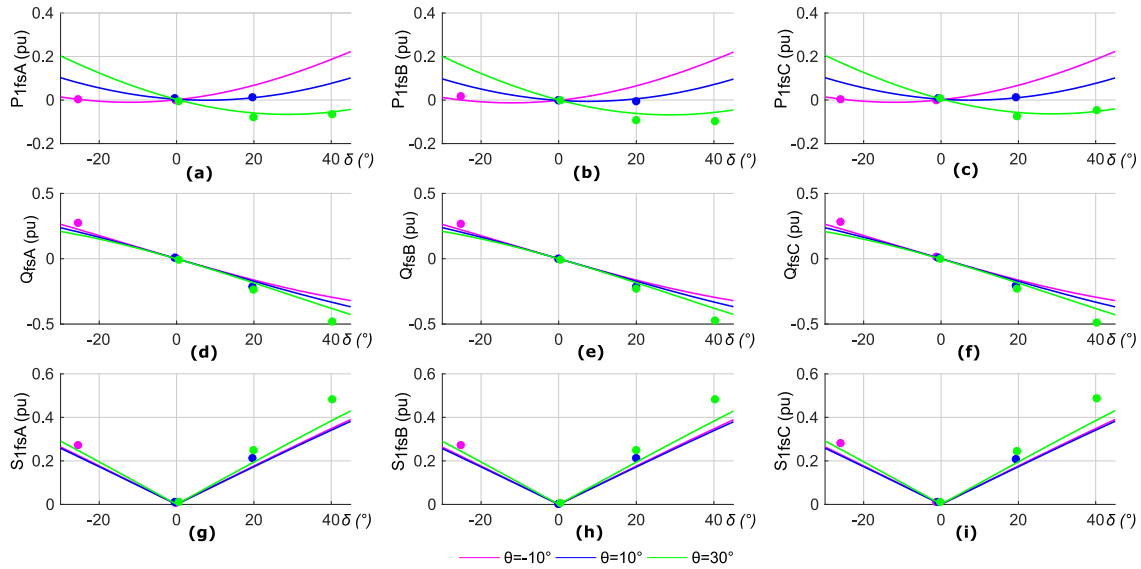
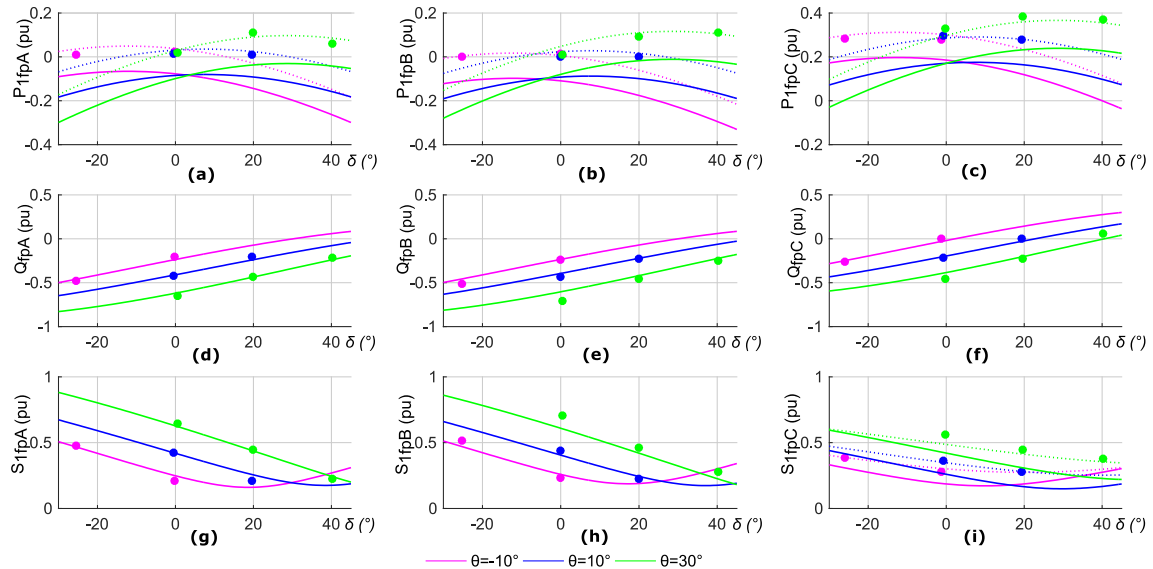


Figura 68 - Resultados calculados (linhas contínuas) e medidos (pontos) das componentes fundamentais de potência ativa, (a), (b) e (c), reativa, (d), (e) e (f) e aparente, (g), (h) e (i) do FAP no cenário 3.



Conforme demonstrado na Figura 67 e na Figura 68, os resultados medidos convergiram para valores próximos aos calculados, o que valida o equacionamento proposto. Além disso, pode-se observar que o erro da

componente fundamental da potência aparente da fase C do FAP, mostrado na Figura 68 (i), foi mais significativo que nas demais fases. Como a potência processada pelo FAP na fase C é menor que nas demais fases, o que é consequência da carga da microrrede na fase C ser menor que nas fases A e B, os erros associados as perdas do conversor são relativamente mais expressivos. Por isso, foi traçada a curva da componente fundamental de potência aparente do FAP compensando às perdas do conversor M-iUPQC, as quais estão representadas pelas linhas pontilhadas na Figura 68 (i). No caso da curva compensada, nota-se que o erro é bastante atenuado o que valida a hipótese levantada.

Em relação à variação do fluxo das componentes fundamentais de potência em função da variação dos ângulos θ e δ , observou-se a mesma tendência que foi demonstrada nas simulações equivalentes ao presente cenário e que estão detalhadamente explicadas no Item 5.2.3. Portanto, as mesmas conclusões feitas para as simulações são válidas para os resultados experimentais e, por isso, não serão repetidas nessa seção.

Na Figura 69 e Figura 70 estão mostrados os resultados obtidos para as componentes não-fundamentais de potência e a potência aparente total do FAS e do FAP, respectivamente, para as 3 fases do conversor.

Figura 69 - Resultados calculados (linhas contínuas) e medidos (pontos) das componentes não-fundamentais de potência, (a), (b) e (c), e potência aparente total, (d), (e) e (f), do FAS no cenário 3.

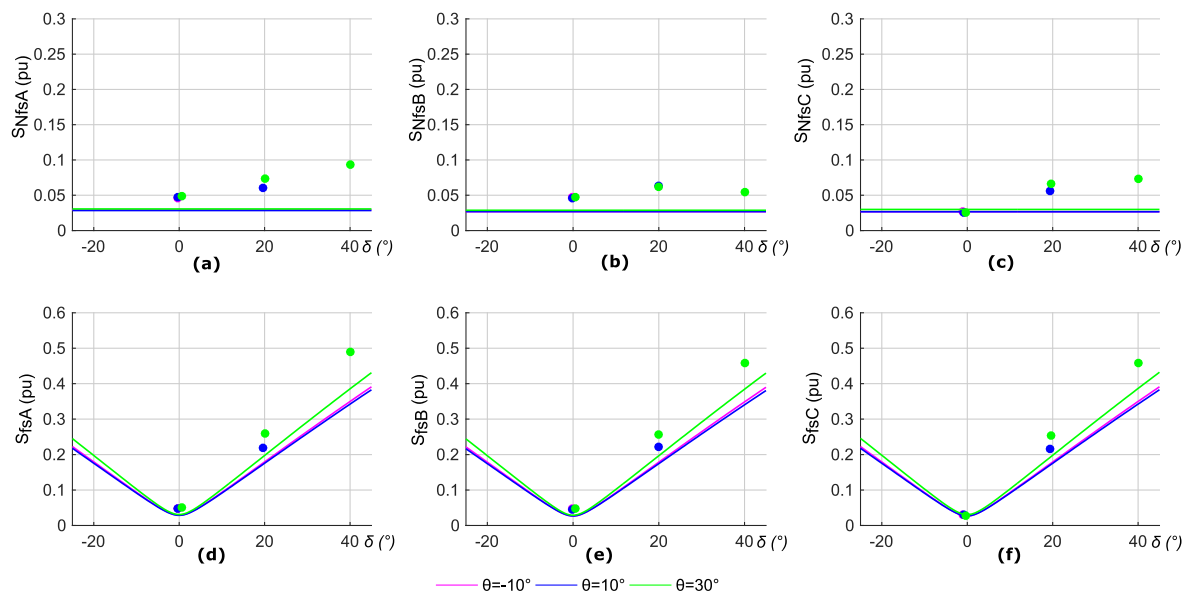
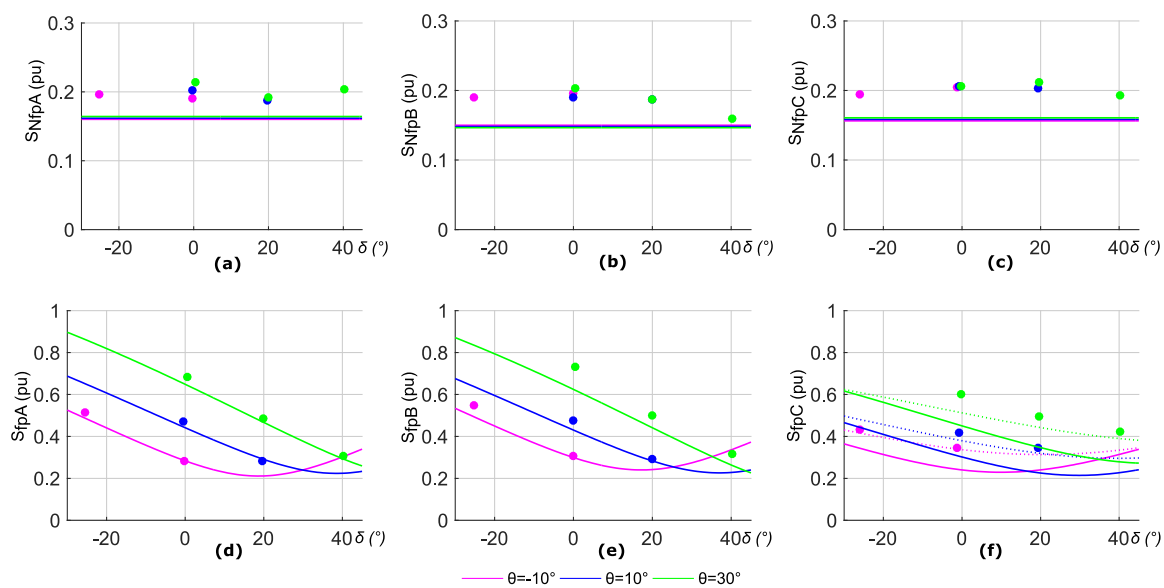


Figura 70 - Resultados calculados (linhas contínuas e pontilhadas) e medidos (pontos) das componentes não-fundamentais de potência, (a), (b) e (c), e potência aparente total, (d), (e) e (f), do FAP no cenário 3.



Demonstrou-se que os resultados simulados e calculados seguem a mesma tendência e os resultados convergiram para valores próximos, seguindo a tendência observada nos demais ensaios. Também, conforme demonstrado, adicionando-se as perdas do conversor M-iUPQC, o erro entre o valor medido e o calculado da potência aparente do FAP na fase C reduz consideravelmente.

No que tange a eficácia do CATC, foi demonstrado que essa técnica pode ser empregada de forma eficaz para fazer o compartilhamento e equalização da potência processada pelos conversores do M-iUPQC, confirmando o que foi mostrado nas simulações do cenário 3 (item 5.2.3), que é equivalente ao presente cenário. Portanto, as mesmas conclusões que foram apresentadas detalhadamente no Item 5.2.3 são válidas para o presente cenário.

6.3.4 Cenário 4 - Fluxo de potência ativa da microrrede para a rede

No cenário 4, inverteu-se o sentido do fluxo de potência ativa sendo esse da microrrede para a rede. Para isso, ensaiou-se o sistema com a chave S_H fechada e a fonte V_{Sud} injetando corrente na microrrede de modo que potência ativa injetada por essa fonte seja maior que a potência ativa consumida pelas cargas da microrrede. Esse setup é o mesmo que foi descrito em detalhes no Item 6.2.2 que foi utilizado para a validação funcional do conversor operando com o fluxo de potência no sentido contrário. Além disso, os parâmetros utilizados nos ensaios apresentados nessa seção são equivalentes as simulações apresentadas no Item 5.2.4.

Para facilitar a interpretação dos resultados, novamente consideraram-se as cargas da microrrede equilibradas. Os valores de resistência e indutância da carga 1 bem como o valor eficaz da corrente injetada pela fonte V_{Sud} utilizadas nessa simulação estão mostradas na Tabela 35. Como não há desequilíbrio nas cargas da microrrede, apresentou-se apenas os valores de uma fase da microrrede.

Tabela 35 – Parâmetros utilizados no ensaio do cenário 4 para validação das equações

Parâmetro	Valor
Resistência da carga 1 da microrrede (Ω)	61
Indutância da carga 1 da microrrede (mH)	111
Corrente eficaz de fase da fonte V_{Sud} (A)	5,3

Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

Com o conversor operando em regime permanente, mediram-se as variáveis mostradas na Tabela 36 e que foram utilizadas para gerar os gráficos utilizando as equações desenvolvidas.

Tabela 36 – Variáveis de entrada para as equações que foram experimentalmente medidas nos ensaios do cenário 4.

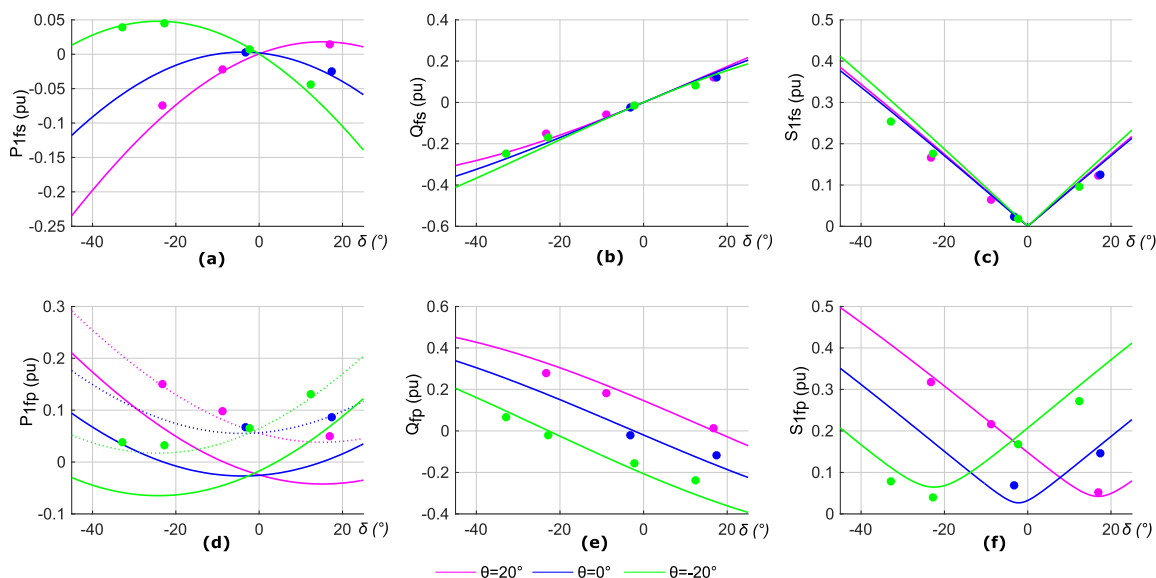
Parâmetro	Total	Fase A	Fase B	Fase C
Potência ativa da microrrede (kW)	-1,22	-0,389	-0,410	-0,425
Valor eficaz da componente fundamental da tensão de fase do PAC (V)	-	127	126	128
DHT da tensão do PAC (%)	-	6,1	5,8	5,5
Tensão eficaz da microrrede (V)	-	127	127	127
Valor eficaz da componente fundamental da corrente da microrrede (A)	-	3,07	3,22	3,34
Ângulo da componente fundamental da corrente em relação a tensão da microrrede	-	178	179	177
DHT da corrente da microrrede	-	30,4	28,8	30,5

Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

O sinal negativo da potência ativa da microrrede indica que o fluxo de potência é da microrrede para a rede.

Seguindo a metodologia adotada, na Figura 71 estão mostrados os resultados obtidos para as componentes fundamentais de potência do FAS e do FAP da fase A do conversor.

Figura 71 - Resultados calculados (linhas contínuas) e medidos (pontos) das componentes fundamentais de potência ativa, reativa e aparente do FAS, (a), (b) e (c), e do FAP, (d), (e) e (f) respectivamente, para o cenário 4.



Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

Para o ângulo θ de 0° , estão apresentados os resultados medidos de apenas 2 ângulos δ em função da necessidade de se ter que descartar os demais resultados. Isso aconteceu em decorrência de configurações incorretas dos sinais de referência o que resultou em dados incoerentes.

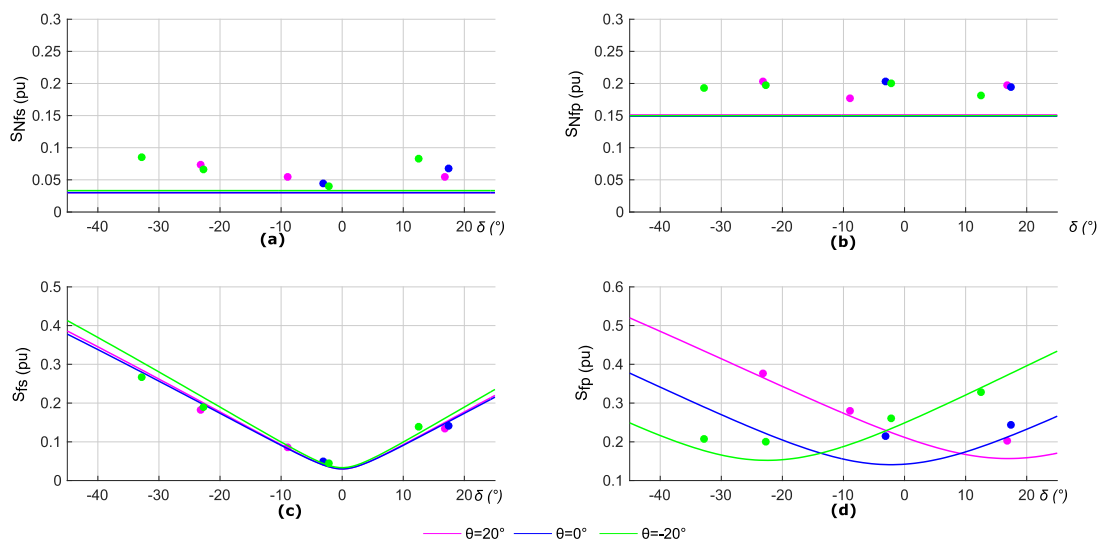
Conforme demonstrado na Figura 71, os resultados medidos e calculados seguiram a mesma tendência e convergiram para valores próximos. Assim como nos demais cenários que foram avaliados experimentalmente, os erros observados são consequência das perdas do conversor e das não idealidades do circuito que foram desprezados nas equações. Com isso, validou-se o equacionamento proposto no presente trabalho também para a condição do fluxo de potência ativa ser da microrrede para a rede.

Sobre as variações do fluxo das componentes fundamentais de potência em função dos ângulos θ e δ , a mesma tendência observada no cenário 4 das simulações foram observadas e, portanto, os comentários feitos com base nos resultados de simulação são, também, válidos para os resultados experimentais. Assim, em resumo, destaca-se que, como o fluxo de potência é da microrrede

para a rede, a lógica para os ângulos θ e δ se invertem, conforme previsto em simulação.

No Figura 72 estão mostrados os resultados obtidos para as componentes não-fundamentais de potência a e a potência aparente total do FAS e do FAP da fase A do conversor.

Figura 72 - Resultados calculados (linhas contínuas) e medidos (pontos) das componentes não-fundamentais de potência do (a) FAS e (b) FAP e potência aparente do (c) FAS e (d) FAP, para o cenário 4.



Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

Demonstrou-se, também, que os resultados convergiram para valores próximos, validando as equações.

7 CONCLUSÕES

Conforme exposto no Capítulo de Introdução, o principal objetivo do presente trabalho é fazer uma análise qualitativa e quantitativa do fluxo de potência do conversor M-iUPQC com foco na avaliação influência das funções Q , associada ao ângulo θ , e CATC, associada ao ângulo δ , no fluxo de potência do conversor.

Com base na análise qualitativa do M-iUPQC, desenvolveram-se equações que descrevem o fluxo de potência nesse conversor. As equações foram validadas por simulações numéricas e pelos resultados experimentais. Os resultados calculados pelas equações obtidas via simulação e os resultados experimentais convergiram para os mesmos resultados, especialmente para o caso das simulações numéricas que foram feitas em condições ideais, muito parecidas com as condições adotadas no desenvolvimento. No caso dos resultados experimentais, observaram-se erros maiores entre os resultados medidos e calculados, o que era esperado visto que desprezaram-se as perdas e as demais não idealidades do circuito. De qualquer forma, os pontos medidos experimentalmente seguiram a tendência apontada pelas curvas teóricas, validando o equacionamento desenvolvido.

Em relação à influência da função Q no fluxo de potência, confirmou-se a tendência de aumento do desequilíbrio da potência processada pelos conversores do M-iUPQC para o caso do conversor fornecendo potência reativa à rede. Porém, demonstrou-se que utilizando a técnica do CATC é possível fazer o compartilhamento e equalização da potência processada pelos conversores FAS e FAP, mesmo para a operação com a função Q habilitada, demonstrando a viabilidade do emprego dessa técnica no M-iUPQC para todos os cenários avaliados. Vale salientar que foi possível fazer o compartilhamento apenas das componentes de potência da frequência fundamental, o que pode limitar a efetividade do emprego dessa técnica para condições de operação com elevado conteúdo harmônico, principalmente, na corrente da microrrede.

Outro ponto a ser destacado em relação à técnica do CATC é que a lógica se inverte para o caso de o conversor estar injetando potência ativa na rede.

Essa característica precisa ser considerada para, por exemplo, se desenvolver uma técnica de controle em malha fechada para o CATC no conversor M-iUPQC.

Também foram realizadas simulações e ensaios experimentais para validar a funcionalidade do conversor M-iUPQC na operação como conversor de interface. Em todos os ensaios, o desempenho do conversor foi satisfatório para fazer o gerenciamento do fluxo de potência entre a rede e a microrrede e para fazer a compensação dos distúrbios da tensão no PAC e da corrente das cargas da microrrede. Com isso, muito embora esses testes tenham sido realizados com um conjunto de cargas e fonte para simular uma microrrede, demonstrou-se que o conversor M-iUPQC tem bom potencial para operar como conversor de interface para microrredes de energia.

7.1 SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS

Como sugestão de trabalhos futuros, sugere-se a implementação de um sistema de controle em malha fechada para determinação do ângulo δ . Conforme demonstrado, o ângulo δ para o qual a potência pelos conversores é equilibrada varia em função das características da corrente da carga e, principalmente, do sentido do fluxo de potência ativa entre a rede e a microrrede. Por isso, é necessário um sistema de controle em malha fechada para a correta e eficiente aplicação da técnica do CATC.

Ainda, sugere-se a realização de uma análise qualitativa e quantitativa, nos moldes do que foi apresentado nesse trabalho, das equações considerando o conversor M-iUPQC operando em conjunto com sistemas de armazenamento conectados diretamente ao barramento CC do conversor e, dessa forma, fazer a injeção ou absorção de potência ativa no barramento CC. Esse modo de operação traz para o sistema uma maior capacidade de gerenciamento da intermitência das fontes renováveis. Dito isso, considera-se importante avaliar a eficácia o fluxo de potência do conversor M-iUPQC operando em conjunto com sistemas de armazenamento principalmente para avaliar a eficácia do CATC para fazer o compartilhamento e equalização da potência processada pelos conversores FAS e FAP.

7.2 PUBLICAÇÕES RESULTANTES DO PRESENTE TRABALHO

Como resultado da pesquisa apresentada no presente trabalho, foram publicados três artigos apresentando os resultados parciais obtidos.

O primeiro foi submetido e aprovado no Congresso *IEEE 21st Mediterranean Electrotechnical Conference (MELECON)* que aconteceu no ano de 2022. O título do artigo é *Power Flow Numerical Assessment of an iUPQC Utility Interface for Microgrids with STATCOM and PAC Functions* no qual foram apresentadas as equações que descrevem o fluxo de potência em um conversor M-iUPQC e a validação dessas equações via simulações numéricas.

O segundo foi submetido e aprovado para o congresso *21th International Conference on Renewable Energy and Power Quality* que foi realizado no ano de 2022. O título do artigo apresentado foi *Power Flow Numerical Assessment of a STATCOM iUPQC Utility Interface for Microgrids*. Nesse, foram apresentadas as equações que descrevem o fluxo de potência em um conversor M-iUPQC e foi proposto um algoritmo para determinação do ângulo δ em malha fechada com o objetivo de equalizar a potência aparente total processada pelos conversores FAS e FAP. Esse algoritmo foi validado via simulações numéricas.

O terceiro foi submetido e aprovado para o Congresso Brasileiro de Automática, realizado no ano de 2022. O título do artigo foi *Analysis of an iUPQC Operating as Interface for Microgrids with Power Angle Control* e apresenta uma análise parcial do fluxo de potência do conversor M-iUPQC. Também foi proposto um setup de teste para permitir a validação das equações que descrevem o fluxo de potência do M-iUPQC. Também estão apresentados resultados que validam o funcionamento do setup proposto.

Pretende-se no futuro submeter uma versão final do presente trabalho com os resultados experimentais que validam a análise do fluxo de potência proposto.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 14149**. Sistemas fotovoltaicos (FV) - Características da interface de conexão com a rede elétrica de distribuição. 2014.

ALTAF, Muhammad Waseem, et al. Microgrid Protection Challenges and Mitigation Approaches—A Comprehensive Review. **IEEE Access**, v. 10, p. 38895-38922, abril 2022. DOI 10.1109/ACCESS.2022.3165011.

AREDES, Mauricio; FERNANDES, Rodrigo Martins. A dual topology of Unified Power Quality Conditioner: The iUPQC. *In*: 2009 13th European Conference on Power Electronics and Applications, 2009, Barcelona, Espanha. **Proceedings**. p.1-10.

BARBI, Ivo. **Projeto de fontes chaveadas**. 2ª edição. Florianópolis: Edição do Autor, 2007.

CALDOGNETTO, Tomasso; BUSO, Simone; TENTI, Paolo. Architecture and control of fully-dispatchable microgrids. *In*: IECON 2014 - 40th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, 2014, Dallas, Texas. **Proceedings**. p.5482-5488. DOI 10.1109/IECON.2014.7049338.

CUNHA, Jean Carlo da. **Projeto e implementação de um DSTATCOM multifuncional controlado em corrente e com mitigação de harmônicas por detecção de tensão**. 2015. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Centro de Ciências Tecnológicas, Universidade do Estado de Santa Catarina. Joinville, 2015.

DEVASSY, Sachin; SINGH, Bhim. Modified pq-Theory-Based Control of Solar-PV-Integrated UPQC-S. **IEEE Transactions on Industrial Applications**, v. 53, n. 5, p. 5031-5040, out. 2017. DOI 10.1109/TIA.2017.2714138.

DIAS, Josué. **Condicionador unificado de qualidade de energia com controle digital**. 2010. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Centro de Ciências Tecnológicas, Universidade do Estado de Santa Catarina. Joinville, 2009.

ESPINA, Enrique, et al. Distributed Control Strategies for Microgrids: An Overview. **IEEE Access**, v. 8, p. 193412-193448, out. 2020. DOI 10.1109/ACCESS.2020.3032378.

FAGUNDES, Saimon Miranda; MEZARROBA, Marcello. Reactive power flow control of a Dual Unified Power Quality Conditioner. *In*: IECON 2016 - 42nd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, 2016, Florencia, Itália. **Anais**. p.1156-1161. DOI 10.1109/IECON.2016.7793770.

FAGUNDES, Saimon Miranda. **Estudo de um condicionador dual de qualidade de energia (iUPQC) com controle do fluxo das potências entres os conversores série e paralelo**. 2020. Tese (Doutorado em Engenharia

Elétrica) – Centro de Ciências Tecnológicas, Universidade do Estado de Santa Catarina. Joinville. 2020.

FAGUNDES, S. M, et al. A detailed power flow analysis of the dual unified power quality conditioner (iUPQC) using power angle control (PAC). **Electric Power Systems Research**, v. 192, mar. 2021. DOI 10.1016/j.epsr.2020.106933.

FRANÇA, Bruno W., et al. An Improved iUPQC Controller to Provide Additional Grid-Voltage Regulation as a STATCOM. **IEEE Transactions on Industrial Electronics**, v. 62, n. 3, p. 1345-1352, mar. 2015. DOI 10.1109/TIE.2014.2345328.

IEEE Standard Definitions for the Measurement of Electric Power Quantities Under Sinusoidal, Nonsinusoidal, Balanced, or Unbalanced Conditions. in **IEEE Std 1459-2010**, 2010. DOI: 10.1109/IEEESTD.2010.5439063.

IEEE Recommended Practice and Requirements for Harmonic Control in Electric Power Systems. in **IEEE Std 519-2014**, 2014.

KHADKIKAR, Vinod; CHANDRA, Ambrish. A New Control Philosophy for a Unified Power Quality Conditioner (UPQC) to Coordinate Load-Reactive Power Demand Between Shunt and Series Inverters. **IEEE Transactions on Industrial Electronics**, v. 23, n. 4, p. 2522-2534, out. 2008. DOI 10.1109/TPWRD.2008.921146.

KHADKIKAR, Vinod; CHANDRA, Ambrish. UPQC-S: A Novel Concept of Simultaneous Voltage Sag/Swell and Load Reactive Power Compensations Utilizing Series Inverter of UPQC. **IEEE Transactions on Industrial Electronics**, v. 26, n. 9, p. 2414-2425, set. 2011. DOI 10.1109/TPEL.2011.2106222.

KHADKIKAR, Vinod. Enhancing Electric Power Quality Using UPQC: A Comprehensive Overview. **IEEE Transactions on Industrial Electronics**, v. 27, n. 5, p. 2284-2297, maio 2012. DOI 10.1109/TPEL.2011.2172001.

KHAN, Imran; VIJAY, A.S.; DOOLLA, Suryanarayana. Nonlinear Load Harmonic Mitigation Strategies in Microgrids: State of the Art. **IEEE Systems Journal**, v. 16, n. 3, p. 4243-4255, dez. 2021. DOI 10.1109/JSYST.2021.3130612.

MACHADO, Alysson A. P., et al. Fault-Tolerant Utility Interface Power Converter for Low-Voltage Microgrids. In: 2017 IEEE 8th International Symposium on Power Electronics for Distributed Generation Systems (PEDG), 2017, Florianópolis, Brasil. **Proceedings**. p.1-5. DOI 10.1109/PEDG.2017.7972469.

MAFFEZZOLLI, Allan Diego. **Técnica de Limitação De Corrente Por Meio De Resistência Virtual Não Linear Aplicada a um DSTATCOM Controlado em Tensão**. 2019. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Centro de Ciências Tecnológicas, Universidade do Estado de Santa Catarina. Joinville. 2019.

PAREDES, Luis A.; MOLINA, Marcelo G.; SERRANO, Benjamín R. Improvements in the Voltage Stability of a Microgrid due to Smart FACTS: an Approach from Resilience. *In*: 2020 IEEE ANDESCON, 2020, Quito, Equador. **Proceedings**. p.1-6. DOI 10.1109/ANDESCON50619.2020.9272006.

REZAEI, Nima; UDDIN, Mohammad Nasir. An Analytical Review on State-of-the-Art Microgrid Protective Relaying and Coordination Techniques. **IEEE Transactions on Industry Applications**, v. 57, n. 3, p. 2558-2273, fev. 2021. 10.1109/TIA.2021.3057308.

SANTOS, Raphael Jorge Millnitz dos. **Condicionador Unificado de Qualidade de Energia Dual com controle simplificado**. 2012. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Centro de Ciências Tecnológicas, Universidade do Estado de Santa Catarina. Joinville. 2012.

SANTOS, Raphael Jorge Millnitz dos; CUNHA, Jean Carlo da; MEZARROBA, Marcello. A Simplified Control Technique for a Dual Unified Power Quality Conditioner. **IEEE Transactions on Industrial Electronics**, v. 61, n. 11, p. 5851-5860, nov. 2014. DOI 10.1109/TIE.2014.2314055.

SILVA, Sérgio Augusto Oliveira da. **Sistemas de energia ininterrupta *line interactive* trifásicos com compensação ativa de potência série e paralela**. 2001. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte. 2001.

SHAHGHOLIAN, Ghazanfar. A brief review on microgrids: Operation applications modeling and control. **International Transactions on Electrical Energy Systems**, v. 31, mar. 2021. DOI 10.1002/2050-7038.12885.

STANGLER, Eduardo Vasconcelos. **Melhorias no condicionador universal de qualidade de energia com estratégia de controle invertida**. 2019. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Pernambuco. Recife. 2019.

TENTI, Paolo, et al. Control of utility interfaces in low voltage microgrids. *In*: 2014 IEEE 5th International Symposium on Power Electronics for Distributed Generation Systems (PEDG), 2014, Galway, Irlanda. **Proceedings**. p.1-8. DOI 10.1109/PEDG.2014.6878674.

WU, Ying, et al. AC Microgrid Small-Signal Modeling: Hierarchical Control Structure Challenges and Solutions. **IEEE Electrification Magazine**, v. 7, n. 4, p. 81-88, dez. 2019. DOI 10.1109/MELE.2019.2943980.

YAZDANINEJADI, Amin, et al. Impact of inverter-based DERs integration on protection, control, operation, and planning of electrical distribution grids. **The Electricity Journal**, v. 32, n. 7, p. 43-56, jun. 2019. DOI 10.1016/j.tej.2019.05.016.