

**UNIVERSIDADE DO ESTADO DE SANTA CATARINA – UDESC**  
**CENTRO DE CIÊNCIAS TECNOLÓGICAS – CCT**  
**GRADUAÇÃO – ENGENHARIA ELÉTRICA**

**EDUARDO BRIETZIG DOS PRAZERES**

**ANÁLISE DE FLUXO DE POTÊNCIA EM UM CONVERSOR IUPQC**  
**MULTIFUNCIONAL COM ARMAZENAMENTO DE ENERGIA PARA OPERAÇÃO**  
**EM MICRORREDES**

**JOINVILLE**

**2022**

**EDUARDO BRIETZIG DOS PRAZERES**

**ANÁLISE DE FLUXO DE POTÊNCIA EM UM CONVERSOR IUPQC  
MULTIFUNCIONAL COM ARMAZENAMENTO DE ENERGIA PARA OPERAÇÃO  
EM MICRORREDES**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado a  
Universidade do Estado de Santa Catarina como  
requisito parcial para a obtenção do grau de Ba-  
charel em Engenharia Elétrica.

Orientador: Marcello Mezaroba

Coorientador: Matheus Montagner

**JOINVILLE**

**2022**

Para gerar a ficha catalográfica de teses e  
dissertações acessar o link:  
<https://www.udesc.br/bu/manuais/ficha>

Brietzsig dos Prazeres, Eduardo

Análise de Fluxo de Potência em um Conversor iUPQC  
Multifuncional com Armazenamento de Energia para  
Operação em Microrredes / Eduardo Brietzsig dos Prazeres.  
- Joinville, 2022.  
85 p. : il. ; 30 cm.

Orientador: Marcello Mezaroba.

Coorientador: Matheus Montagner.

Trabalho de Conclusão de Curso - Universidade  
do Estado de Santa Catarina, Centro de Ciências  
Tecnológicas, Graduação em Engenharia Elétrica,  
Joinville, 2022.

1. Microrrede. 2. Conversores multifuncionais.  
3. iUPQC. 4. Armazenamento de energia. I. Mezaroba,  
Marcello . II. Montagner, Matheus . III. Universidade  
do Estado de Santa Catarina, Centro de Ciências  
Tecnológicas, Graduação em Engenharia Elétrica. IV.  
Análise de Fluxo de Potência em um Conversor iUPQC  
Multifuncional com Armazenamento de Energia para  
Operação em Microrredes.

**EDUARDO BRIETZIG DOS PRAZERES**

**ANÁLISE DE FLUXO DE POTÊNCIA EM UM CONVERSOR IUPQC  
MULTIFUNCIONAL COM ARMAZENAMENTO DE ENERGIA PARA OPERAÇÃO  
EM MICRORREDES**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado a  
Universidade do Estado de Santa Catarina como  
requisito parcial para a obtenção do grau de Ba-  
charel em Engenharia Elétrica.

Orientador: Marcello Mezaroba

Coorientador: Matheus Montagner

**BANCA EXAMINADORA:**

Marcello Mezaroba

Membros:

Alessandro Luiz Batschauer

Vinícius Guilherme Hoffmann

Matheus Montagner

Joinville, 20 de julho 2022

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço à minha mãe Patricia Brietzig, por não medir esforços durante toda a minha vida para garantir minha educação. Minha inspiração, minha heroína.

A todos os meus professores que me conduziram durante toda essa jornada de conhecimento, em especial ao meu professor e orientador Marcello Mezaroba por me dar a oportunidade de trabalhar nesse projeto que contribuiu muito com minha formação.

A todos os meus amigos, que fizeram com que meu tempo na faculdade não parecesse tão exaustivo.

Ao Matheus Montagner, pelos conhecimentos transmitidos durante o trabalho nesse projeto.

“Be who you are, don’t be nothing less”  
(Scott "Kid Cudi" Mescudi)

## RESUMO

Com a quantidade de energia elétrica sendo consumida aumentando significativamente com o passar dos anos, são necessários novos métodos de geração e distribuição de energia. As microrredes de geração a partir de fontes renováveis de energia têm ganhado mais espaço e com isso, a topologia de conversores multifuncionais de interface vem sendo analisada devido as vantagens que ela apresenta, como melhora na qualidade da energia na rede e regulação de diversos fatores na energia da microrrede. Neste trabalho são apresentadas as características de controle que o conversor iUPQC projetado possui quando implementado com a função de armazenamento de energia, podendo injetar ou absorver potência dos armazenadores de energia através de um barramento CC. Também é feito um estudo do fluxo de potência sobre os filtros ativos do conversor iUPQC para melhor entender como fazer o dimensionamento destes.

**Palavras-chave:** Microrrede. Conversores multifuncionais. iUPQC. Armazenamento de energia. Fluxo de potência.

## **ABSTRACT**

With the amount of electrical energy being consumed increasing significantly over the years, new methods of power generation and distribution are needed. Generation microgrids based on renewable energy sources have gained more space, so the topology of multifunctional interface converters are being analyzed due to its benefits, like improving the energy quality of the grid. This work presents the characteristics that the iUPQC converter has when implemented with the energy storage function, being able to inject or absorb power from the energy storages. Also, an analysis on the power flow through the active filters of the iUPQC is made to better understand the filter sizing for further projects.

**Keywords:** Microgrid. Multifunctional converters. iUPQC. Energy storage. Power flow.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

|                                                                                                                                                                                                                                                                                           |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 1 – Topologia do UPQC . . . . .                                                                                                                                                                                                                                                    | 22 |
| Figura 2 – Topologia do iUPQC . . . . .                                                                                                                                                                                                                                                   | 24 |
| Figura 3 – Conversor iUPQC de forma simplificada . . . . .                                                                                                                                                                                                                                | 24 |
| Figura 4 – Conversor iUPQC operando conectado à rede . . . . .                                                                                                                                                                                                                            | 28 |
| Figura 5 – Conversor iUPQC operando ilhado . . . . .                                                                                                                                                                                                                                      | 29 |
| Figura 6 – Fluxograma sobre o funcionamento do iUPQC e seu gerenciamento de energia                                                                                                                                                                                                       | 31 |
| Figura 7 – Inversores trifásicos compondo a estrutura do iUPQC . . . . .                                                                                                                                                                                                                  | 33 |
| Figura 8 – Esquema de controle utilizado . . . . .                                                                                                                                                                                                                                        | 35 |
| Figura 9 – Valores teóricos da relação entre potência sobre uma fase do FAS e potência total da microrrede para diferentes valores de distorções harmônicas de corrente na carga de uma fase da microrrede, variando a potência do sistema de armazenamento e a tensão da rede . . . . .  | 41 |
| Figura 10 – Valores teóricos da relação entre potência sobre uma fase do FAP e potência total da microrrede para diferentes valores de distorções harmônicas de corrente na carga de uma fase da microrrede, variando a potência do sistema de armazenamento e a tensão da rede . . . . . | 42 |
| Figura 11 – Estrutura utilizada para as simulações numéricas . . . . .                                                                                                                                                                                                                    | 48 |
| Figura 12 – Transição entre os modos de operação 1.3 e 1.5 . . . . .                                                                                                                                                                                                                      | 49 |
| Figura 13 – Transição entre os modos de operação 1.3 e 1.1 . . . . .                                                                                                                                                                                                                      | 50 |
| Figura 14 – Comparação entre o $\frac{S_{fsX}}{S_{\mu rdT}}$ teórico e o simulado . . . . .                                                                                                                                                                                               | 52 |
| Figura 15 – Comparação entre o $\frac{S_{fpX}}{S_{\mu rdT}}$ teórico e o simulado . . . . .                                                                                                                                                                                               | 54 |
| Figura 16 – Protótipo do iUPQC implementado . . . . .                                                                                                                                                                                                                                     | 56 |
| Figura 17 – Esquemático do módulo inversor SPCIT 1000-60-20 . . . . .                                                                                                                                                                                                                     | 57 |
| Figura 18 – SPCIT 1000-60-20 . . . . .                                                                                                                                                                                                                                                    | 57 |
| Figura 19 – Esquema da placa de comando do FAS . . . . .                                                                                                                                                                                                                                  | 58 |
| Figura 20 – Placa de comando do FAS . . . . .                                                                                                                                                                                                                                             | 59 |
| Figura 21 – Esquema da placa de comando do FAP . . . . .                                                                                                                                                                                                                                  | 59 |
| Figura 22 – Placa de comando do FAP . . . . .                                                                                                                                                                                                                                             | 60 |
| Figura 23 – Placa das IHMs . . . . .                                                                                                                                                                                                                                                      | 61 |
| Figura 24 – Fonte Auxiliar de Alimentação . . . . .                                                                                                                                                                                                                                       | 62 |
| Figura 25 – Resistores de Pré-Carga implementados . . . . .                                                                                                                                                                                                                               | 63 |
| Figura 26 – Sensores para medição de parâmetros utilizados pela placa de comando do FAS                                                                                                                                                                                                   | 63 |
| Figura 27 – Sensores para medição de parâmetros utilizados pela placa de comando do FAP                                                                                                                                                                                                   | 64 |
| Figura 28 – Disjuntores e contadores implementados para segurança e acionamentos . .                                                                                                                                                                                                      | 64 |
| Figura 29 – Transição entre os pontos de operação 2.3 e 2.2 ( $I_{SA}$ , $V_{CC}$ e $control\_barCC$ )                                                                                                                                                                                    | 67 |
| Figura 30 – Transição entre os pontos de operação 2.3 e 2.1 ( $I_{SA}$ , $V_{CC}$ e $control\_barCC$ )                                                                                                                                                                                    | 67 |
| Figura 31 – Tensão nas fases da rede $V_{rdA}$ , $V_{rdB}$ e $V_{rdC}$ . . . . .                                                                                                                                                                                                          | 68 |

|                                                                                                      |    |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 32 – Corrente nas fases da rede $I_{rdA}$ , $I_{rdB}$ e $I_{rdC}$ . . . . .                   | 69 |
| Figura 33 – Tensão nas fases da microrrede $V_{\mu rdA}$ , $V_{\mu rdB}$ e $V_{\mu rdC}$ . . . . .   | 70 |
| Figura 34 – Corrente nas fases da microrrede $I_{\mu rdA}$ , $I_{\mu rdB}$ e $I_{\mu rdC}$ . . . . . | 70 |
| Figura 35 – Tensão e corrente na fase A da microrrede $V_{\mu rdA}$ e $I_{\mu rdA}$ . . . . .        | 71 |
| Figura 36 – Tensão e corrente na fase B da microrrede $V_{\mu rdB}$ e $I_{\mu rdB}$ . . . . .        | 71 |
| Figura 37 – Tensão e corrente na fase C da microrrede $V_{\mu rdC}$ e $I_{\mu rdC}$ . . . . .        | 72 |
| Figura 38 – Tensão no barramento CC $V_{CC}$ . . . . .                                               | 73 |
| Figura 39 – Fluxo de potência sobre o Filtro Ativo Série . . . . .                                   | 76 |
| Figura 40 – Fluxo de potência sobre o Filtro Ativo Paralelo . . . . .                                | 80 |

## LISTA DE TABELAS

|                                                                                                           |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tabela 1 – Características dos Condicionadores de Energia . . . . .                                       | 25 |
| Tabela 2 – Parâmetros de Projeto do iUPQC . . . . .                                                       | 34 |
| Tabela 3 – Componentes utilizados na estrutura do iUPQC . . . . .                                         | 34 |
| Tabela 4 – Malhas de controle do conversor iUPQC . . . . .                                                | 38 |
| Tabela 5 – Situações a serem abordadas usando $\cos(\varphi_{\mu rdX}) = 0,7$ . . . . .                   | 45 |
| Tabela 6 – Parâmetros utilizados para obter resultados do iUPQC . . . . .                                 | 45 |
| Tabela 7 – Valores teóricos esperados usando $\cos(\varphi_{\mu rdX}) = 0,7$ . . . . .                    | 46 |
| Tabela 8 – Valores numéricos de fluxo de potência sob o filtro ativo série . . . . .                      | 51 |
| Tabela 9 – Valores numéricos de fluxo de potência sob o filtro ativo série em pu . . . . .                | 52 |
| Tabela 10 – Valores numéricos de fluxo de potência sob o filtro ativo paralelo . . . . .                  | 53 |
| Tabela 11 – Valores numéricos de fluxo de potência sob o filtro ativo paralelo em pu . . . . .            | 54 |
| Tabela 12 – Cargas conectadas ao barramento da microrrede experimentais . . . . .                         | 65 |
| Tabela 13 – Cargas conectadas ao barramento CC experimentais . . . . .                                    | 66 |
| Tabela 14 – Potências consumidas em cada fase da microrrede . . . . .                                     | 73 |
| Tabela 15 – Resultados experimentais de fluxo de potência sob o Filtro Ativo Série na fase A . . . . .    | 74 |
| Tabela 16 – Resultados experimentais de fluxo de potência sob o Filtro Ativo Série na fase B . . . . .    | 74 |
| Tabela 17 – Resultados experimentais de fluxo de potência sob o Filtro Ativo Série na fase C . . . . .    | 75 |
| Tabela 18 – Resultados experimentais de fluxo de potência sob o Filtro Ativo Série em pu . . . . .        | 75 |
| Tabela 19 – Resultados experimentais de fluxo de potência sob o Filtro Ativo Paralelo na fase A . . . . . | 77 |
| Tabela 20 – Resultados experimentais de fluxo de potência sob o Filtro Ativo Paralelo na fase B . . . . . | 78 |
| Tabela 21 – Resultados experimentais de fluxo de potência sob o Filtro Ativo Paralelo na fase C . . . . . | 78 |
| Tabela 22 – Resultados experimentais de fluxo de potência sob o Filtro Ativo Paralelo em pu . . . . .     | 79 |

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

|                   |                                                                             |
|-------------------|-----------------------------------------------------------------------------|
| $\phi_{\mu rdX}$  | Ângulo de carga da fase X da microrrede                                     |
| A                 | Índice utilizado para se referir à fase A do sistema                        |
| B                 | Índice utilizado para se referir à fase B do sistema                        |
| C                 | Índice utilizado para se referir à fase C do sistema                        |
| $\Delta i_{L\%}$  | Ondulação máxima de corrente do Filtro Ativo Série                          |
| $\Delta V_{CC\%}$ | Ondulação máxima de tensão no barramento CC                                 |
| ANEEL             | Agência Nacional de Energia Elétrica                                        |
| BESS              | <i>Battery Energy Storage System</i>                                        |
| CA                | Corrente Alternada                                                          |
| CC                | Corrente Contínua                                                           |
| $C_{fp}$          | Capacitor do Filtro Paralelo                                                |
| $C_{fs}$          | Capacitor do Filtro Série                                                   |
| control_BarCC     | Amplitude do Sinal de Saída do Controlador de Tensão Total do Barramento CC |
| $C_{CC}$          | Capacitância Total do Barramento CC                                         |
| $C_{fs}$          | Capacitores do filtro de alta frequência do Filtro Ativo Série              |
| $C_{fp}$          | Capacitores do filtro de alta frequência do Filtro Ativo Paralelo           |
| $C_{CCn}$         | Capacitância do Capacitor n, conectado ao Barramento CC                     |
| $C_{ifs}$         | Controlador de Corrente do Filtro Série                                     |
| $C_{Vcc}$         | Controlador de Tensão Total do Barramento CC                                |
| $C_{Vdcc}$        | Controlador de Tensão do Filtro Paralelo                                    |
| $C_{vfp}$         | Controlador de Tensão do Filtro Paralelo                                    |
| DVR               | <i>Dynamic Voltage Restorer</i>                                             |
| FACTS             | <i>Flexible Alternating Current Transmission Systems</i>                    |
| FAP               | Filtro Ativo Paralelo                                                       |
| FAS               | Filtro Ativo Série                                                          |
| FP                | Fator de Potência                                                           |
| $f_{rd}$          | Frequência da Rede                                                          |
| $f_s$             | Frequência de Comutação do Conversor                                        |
| FTMA              | Função de Transferência de Malha Aberta                                     |

|               |                                                                                         |
|---------------|-----------------------------------------------------------------------------------------|
| $I_{fp}$      | Corrente do Filtro Ativo Paralelo                                                       |
| $I_{fs}$      | Corrente do Filtro Ativo Série                                                          |
| $I_{fs'}$     | Corrente do Filtro Ativo Série multiplicada pelo Ganho do Sensor de Corrente da Entrada |
| $I_{rdX}$     | Corrente eficaz da Rede na fase X                                                       |
| $I_{\mu rdX}$ | Corrente eficaz da Microrrede na fase X                                                 |
| $I_{SA}$      | Corrente do Sistema de Armazenamento                                                    |
| iUPQC         | <i>Interchanging topology of the Unified Power Quality Conditioner</i>                  |
| $j$           | Número complexo $\sqrt{-1}$                                                             |
| $K_{ifs}$     | Ganho do Sensor de Corrente de Entrada                                                  |
| $K_{pwmfp}$   | Atenuação do modulador PWM no controlador de tensão da microrrede                       |
| $K_{pwmfs}$   | Atenuação do modulador PWM no controlador de corrente na entrada                        |
| $K_{vfp}$     | Ganho do Sensor da Tensão na Microrrede                                                 |
| $K_{Vcc}$     | Ganho do Sensor de Tensão do Barramento CC                                              |
| LAPEI         | Laboratório de Pesquisa em Eletrônica Industrial                                        |
| $L_{dt}$      | Indutância de Dispersão do Transformador de Acoplamento                                 |
| $L_{fs}$      | Indutância do Filtro Série                                                              |
| $L_{fp}$      | Indutância do Filtro Paralelo                                                           |
| $L_{\mu rdX}$ | Indutância da fase X da Microrrede                                                      |
| ma            | Índice de Modulação                                                                     |
| $n$           | Relação de Transformação do Transformador de Acoplamento                                |
| $N_1$         | Número de Espiras no Enrolamento Primário do Transformador de Acoplamento               |
| $N_2$         | Número de Espiras no Enrolamento Secundário do Transformador de Acoplamento             |
| nPEE          | Núcleo de Processamento de Energia                                                      |
| $P_{1fpX}$    | Fluxo de Potência Ativa sobre o Filtro Ativo Paralelo                                   |
| $P_{1fsX}$    | Fluxo de Potência Ativa sobre o Filtro Ativo Série                                      |
| PAC           | Ponto de Acoplamento Comum                                                              |
| PRODIST       | Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional          |
| $P_{saT}$     | Potência injetada ou absorvida pelo sistema de armazenamento                            |

|               |                                                                                         |
|---------------|-----------------------------------------------------------------------------------------|
| pu            | Por Unidade                                                                             |
| PWM           | <i>Pulse Width Modulator</i>                                                            |
| $Q_{1fpX}$    | Componente fundamental do Fluxo de Potência Reativa sobre o Filtro Ativo Paralelo       |
| $Q_{1fsX}$    | Componente fundamental do Fluxo de Potência Reativa sobre o Filtro Ativo Série          |
| QEE           | Qualidade da Energia Elétrica                                                           |
| $R_{\mu rdX}$ | Resistência da fase X da Microrrede                                                     |
| $S_{1fpX}$    | Componente fundamental do Fluxo de Potência Aparente na fase X do Filtro Ativo Paralelo |
| $S_{1fsX}$    | Componente fundamental do Fluxo de Potência Aparente na fase X do Filtro Ativo Série    |
| $S_{fpX}$     | Fluxo de Potência Aparente na fase X do Filtro Ativo Paralelo                           |
| $S_{fsX}$     | Fluxo de Potência Aparente na fase X do Filtro Ativo Série                              |
| STATCOM       | <i>Static Synchronous Compensator</i>                                                   |
| $S_{\mu rdT}$ | Potência Aparente Total da Microrrede                                                   |
| $S_{\mu rdX}$ | Potência Aparente na fase X da Microrrede                                               |
| $SW_m$        | Chave responsável por fazer a transição entre os modos <i>on-grid</i> e <i>off-grid</i> |
| THD           | <i>Total Harmonic Distortion</i>                                                        |
| $THD_I$       | Taxa de Distorções Harmônicas na Corrente da Microrrede                                 |
| $T_{print}$   | Intervalo de tempo em que as simulações são exibidas                                    |
| $T_{step}$    | Intervalo entre dois pontos de tempo nas simulações                                     |
| $T_{total}$   | Tempo de Simulação Total                                                                |
| UDESC         | Universidade do Estado de Santa Catarina                                                |
| UPQC          | <i>Unified Power Quality Conditioner</i>                                                |
| UPS           | <i>Uninterruptible Power Supply</i>                                                     |
| $V_{CC}$      | Tensão no Barramento CC                                                                 |
| $V_{CC+}$     | Tensão Positiva do Barramento CC                                                        |
| $V_{CC-}$     | Tensão Negativa do Barramento CC                                                        |
| $V_{rdT}$     | Soma algébrica das tensões das três fases da rede                                       |
| $V_{rdX}^+$   | Componente Fundamental da Tensão da Rede na fase X                                      |
| $V_{rdX}^h$   | Componentes Harmônicos da Tensão da Rede na fase X                                      |

|                |                                                                                                 |
|----------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------|
| $V_{rdX}$      | Tensão Eficaz da Rede na fase X                                                                 |
| $V_{\mu rdX}$  | Tensão Eficaz na fase X da Microrrede                                                           |
| $V_{\mu rdX'}$ | Tensão Eficaz na fase X da Microrrede multiplicada pelo ganho do Sensor de Tensão da Microrrede |
| $V_{fpX}$      | Tensão na fase X do Filtro Ativo Paralelo                                                       |
| $V_{fsX}$      | Tensão no Transformador de Acoplamento do Filtro Ativo Série na fase X                          |
| $Z_{rd}$       | Impedância da Rede                                                                              |
| $Z_{\mu rdX}$  | Impedância da Microrrede na fase X                                                              |

## SUMÁRIO

|              |                                                                                    |           |
|--------------|------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>1</b>     | <b>INTRODUÇÃO . . . . .</b>                                                        | <b>17</b> |
| 1.1          | OBJETIVO DO TRABALHO . . . . .                                                     | 19        |
| 1.2          | ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO . . . . .                                                  | 19        |
| <b>2</b>     | <b>CONDICIONADOR UNIFICADO DE QUALIDADE DE ENERGIA . .</b>                         | <b>21</b> |
| 2.1          | CONDICIONADOR UNIFICADO DE QUALIDADE DE ENERGIA CON-<br>VENCIONAL (UPQC) . . . . . | 21        |
| 2.2          | CONDICIONADOR UNIFICADO DE QUALIDADE DE ENERGIA DUAL<br>(IUPQC) . . . . .          | 23        |
| 2.3          | COMPARAÇÃO ENTRE AS DUAS TOPOLOGIAS . . . . .                                      | 25        |
| 2.4          | ARMAZENADORES DE ENERGIA . . . . .                                                 | 26        |
| 2.5          | CONVERSOR IUPQC COM ARMAZENAMENTO DE ENERGIA . . . .                               | 26        |
| <b>2.5.1</b> | <b>Modos de Operação . . . . .</b>                                                 | <b>27</b> |
| 2.5.1.1      | <i>Modo conectado à rede ou Grid-Tie . . . . .</i>                                 | 27        |
| 2.5.1.2      | <i>Modo autônomo, ilhado ou off-grid . . . . .</i>                                 | 29        |
| 2.6          | DESLOCAMENTO DE CONSUMO NO TEMPO . . . . .                                         | 30        |
| 2.7          | CONCLUSÕES DO CAPÍTULO . . . . .                                                   | 31        |
| <b>3</b>     | <b>ESTRUTURA E MODELOS MATEMÁTICOS . . . . .</b>                                   | <b>33</b> |
| 3.1          | ESTRUTURA DE POTÊNCIA . . . . .                                                    | 33        |
| 3.2          | CONTROLE DO CONVERSOR IUPQC . . . . .                                              | 34        |
| <b>3.2.1</b> | <b>Controlador de Tensão na Microrrede . . . . .</b>                               | <b>35</b> |
| <b>3.2.2</b> | <b>Controlador de Corrente do Filtro Ativo Série . . . . .</b>                     | <b>36</b> |
| <b>3.2.3</b> | <b>Controlador de Tensão do Barramento CC . . . . .</b>                            | <b>37</b> |
| <b>3.2.4</b> | <b>Controlador do Desequilíbrio de Tensão no Barramento CC . . . . .</b>           | <b>37</b> |
| 3.3          | CONTROLADORES E SISTEMA DE ARMAZENAMENTO . . . . .                                 | 38        |
| 3.4          | FLUXO DE POTÊNCIA . . . . .                                                        | 39        |
| 3.5          | MODO ILHADO . . . . .                                                              | 43        |
| 3.6          | OPERAÇÕES PREVISTAS . . . . .                                                      | 44        |
| 3.7          | CONCLUSÕES DO CAPÍTULO . . . . .                                                   | 46        |
| <b>4</b>     | <b>SIMULAÇÕES NUMÉRICAS . . . . .</b>                                              | <b>47</b> |
| 4.1          | ANÁLISE TRANSITÓRIA . . . . .                                                      | 47        |
| 4.2          | ANÁLISE EM REGIME PERMANENTE . . . . .                                             | 50        |
| <b>4.2.1</b> | <b>Filtro Ativo Série . . . . .</b>                                                | <b>50</b> |
| <b>4.2.2</b> | <b>Filtro Ativo Paralelo . . . . .</b>                                             | <b>53</b> |
| 4.3          | CONCLUSÕES DO CAPÍTULO . . . . .                                                   | 55        |
| <b>5</b>     | <b>IMPLEMENTAÇÃO E RESULTADOS EXPERIMENTAIS . . . . .</b>                          | <b>56</b> |

|           |                                                      |    |
|-----------|------------------------------------------------------|----|
| 5.1       | ESTRUTURA . . . . .                                  | 56 |
| 5.1.1     | Unidade de potência . . . . .                        | 56 |
| 5.1.2     | Comando do FAS e FAP . . . . .                       | 58 |
| 5.1.3     | Geradores de Referência . . . . .                    | 60 |
| 5.1.4     | Fontes Auxiliares de Alimentação . . . . .           | 61 |
| 5.1.5     | Circuito de pré-carga . . . . .                      | 62 |
| 5.1.6     | Sensores . . . . .                                   | 63 |
| 5.1.7     | Sistemas de proteção e acionamentos . . . . .        | 64 |
| 5.1.8     | Cargas . . . . .                                     | 64 |
| 5.2       | RESULTADOS PRÁTICOS . . . . .                        | 66 |
| 5.2.1     | Análise transitória . . . . .                        | 66 |
| 5.2.2     | Análise em regime permanente . . . . .               | 68 |
| 5.2.2.1   | <i>Coleta de dados</i> . . . . .                     | 68 |
| 5.2.2.1.1 | Fluxo de Potência no Filtro Ativo Série . . . . .    | 73 |
| 5.2.2.1.2 | Fluxo de Potência no Filtro Ativo Paralelo . . . . . | 77 |
| 6         | CONCLUSÃO GERAL E CONTRIBUIÇÕES . . . . .            | 81 |
|           | REFERÊNCIAS . . . . .                                | 84 |

## 1 INTRODUÇÃO

Com o decorrer dos anos, a quantidade de equipamentos eletrônicos presentes nas residências vem aumentando gradualmente. Esses equipamentos são exemplos de cargas elétricas que o sistema elétrico brasileiro precisa alimentar e que não eram previstas antes, isso significa que o sistema brasileiro precisa de mais energia para atender a população nos dias de hoje do que há algumas décadas atrás, por exemplo. Esse aumento no consumo é ainda mais evidente em países mais desenvolvidos. Segundo SIOSHANSI (2013), em países de baixa renda *per capita*, o consumo individual de energia é menor do que em países de alta renda. Enquanto na Índia, por exemplo, o consumo médio anual é de 1.000 kWh por habitante, no Japão é próximo de 8.000 kWh por habitante.

Devido a esse aumento no consumo de energia elétrica, são necessários novos métodos de geração, distribuição e controle de energia que supram as novas demandas energéticas. A geração de energia a partir de fontes sustentáveis vem sendo um grande tópico para a melhoria na qualidade de vida sem consumir os recursos naturais do planeta. Com esse cenário, as microrredes de geração de energia com fontes renováveis vem se tornando cada vez mais populares e rentáveis ao consumidor.

Segundo LASSETER (2002), uma microrrede é composta por um conjunto de microfuentes de geração de energia, cargas elétricas e elementos armazenadores de energia controlados por uma unidade central. As microfuentes de geração de energia geralmente utilizam fontes renováveis de energia como energia solar, eólica ou biomassa. (HATZIARGYRIOU et al., 2007).

O aumento na produção de energia através de microrredes não só aumenta a quantidade de energia elétrica disponível para o consumo, como descentraliza a geração, ou seja, o sistema elétrico brasileiro fica menos dependente de grandes centros de geração, como as usinas hidrelétricas. Com um sistema descentralizado, as redes de transmissão entre o ponto de geração e o consumidor seriam menores, o que impacta diretamente na qualidade da energia elétrica (QEE) que o consumidor recebe. Com as redes de transmissão sendo menores, é necessário menos investimento para serem implementadas, o que impacta também no preço da energia, deixando-a mais barata.

O acréscimo de fontes de energia, no entanto, demanda um melhor controle sobre a qualidade da energia que está sendo gerada, tendo em vista que a soma da energia proveniente de tantas pequenas fontes pode acarretar em uma energia de baixa qualidade devido à intermitência na geração. Sendo assim, para otimizar os recursos naturais, é necessário realizar o gerenciamento do que está sendo gerado nas diversas microrredes é necessária a utilização de condicionadores de energia.

As normas que especificam os parâmetros aceitáveis de QEE para a rede elétrica são publicadas pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL). Essas normas são empregadas com o intuito de fazer com que a energia que chegue até o consumidor seja de alta qualidade, podendo assim, aumentar a vida útil dos equipamentos conectados à rede. A ANEEL não

só define as normas para a qualidade da energia a ser distribuída, define também as normas relacionadas à qualidade do serviço prestado pelas distribuidoras aos consumidores, centrais geradoras e distribuidoras acessantes. Isso faz com que o produto final entregue ao consumidor seja de alta qualidade e, entregue de forma não intermitente. (ANEEL, 2021)

Para que a QEE entregue pelas microrredes para a rede esteja de acordo com as normas definidas pela ANEEL podem ser utilizados sistemas flexíveis de transmissão de corrente alternada ou FACTS (*Flexible Alternating Current Transmission Systems*). A regulamentação dos parâmetros de QEE a serem seguidos em uma microrrede ainda não estão totalmente definidos, podendo então variar de microrrede para microrrede. Dentre os dispositivos pertencentes a esses sistemas flexíveis, os mais populares são o STATCOM (*Static Synchronous Compensator*), que pode assegurar o controle da tensão e da potência reativa, o DVR (*Dynamic Voltage Restorer*), que minimiza as oscilações de tensão na rede e os filtros ativos, que podem corrigir o excesso de harmônicas na rede, assim como corrigir o fator de potência (FP) das cargas.

Esses equipamentos são classificados como condicionadores de energia. Atualmente, a maioria dos condicionadores de energia são implementados utilizando conversores estáticos e técnicas de modulação por largura de pulso (PWM - *Pulse Width Modulation*). Os conversores são aplicados em microrredes de geração de energia elétrica, como por exemplo geradores fotovoltaicos, já que a rede e a microrrede costumam ter tensões de funcionamento diferentes e é necessário o gerenciamento da energia vinda do sistema da geração da microrrede e da rede.

Com o intuito de se controlar diversas variáveis que afetam a QEE com apenas um dispositivo, foi introduzido o UPQC (*Unified Power Quality Conditioner*), que é um condicionador de energia baseado em dois filtros ativos de potência, um em série e outro em paralelo (KHADKIKAR, 2011). O UPQC possui diversos condicionadores de energia baseados em sua topologia, como por exemplo o UPQC-P (compensação de potência ativa), UPQC-Q (compensação de potência reativa), iUPQC (*interchanging topology of the Unified Power Quality Conditioner*), entre outros.

Apesar do UPQC convencional ser muitas das vezes, suficientemente bom para a resolução de problemas de QEE na rede, o iUPQC, que é um dispositivo derivado do UPQC, possui vantagens relevantes e fáceis de serem implementadas, como por exemplo a simplificação do sistema de controle, já que esse utiliza como referência apenas variáveis senoidais que não possuem conteúdo harmônico (PAITHANKAR; ZENDE, 2017).

Os conversores implementados com a topologia dos condicionadores de energia UPQC podem operar de diferentes maneiras quando operando em microrredes, de acordo com a geração da microrrede, carga dos armazenadores de energia, entre outros fatores.

Como já citado, as microrredes possuem como característica a sua geração intermitente, ou seja, não é contínua. Em uma microrrede baseada em geradores fotovoltaicos, por exemplo, a quantidade de energia gerada durante o período da noite é nula. Se a microrrede não está gerando energia, a carga conectada à microrrede fica totalmente dependente da potência da rede. Isso faz com que a carga fique suscetível à problemas de distribuição, como as quedas de energia. Para

resolver esse problema, é proposto o acoplamento de um elemento armazenador de energia ao condicionador UPQC.

Com o elemento armazenador de energia, é possível armazenar a energia gerada pela microrrede durante um período em que a geração é maior do que as cargas conectadas demandam, ou até mesmo absorver energia fornecida pela rede. Essa energia armazenada, pode então ser reutilizada em um momento em que seja necessária mais potência na carga, ou para suprir temporariamente as necessidades de potência da carga em caso de interrompimento da conexão com a rede. Os elementos armazenadores de energia convencionais possuem uma alta dinâmica para efetuar o fornecimento de energia para um sistema, o que faz com que para rápidas variações de carga acopladas na microrrede, a melhor fonte de energia é a própria geração da microrrede.

## 1.1 OBJETIVO DO TRABALHO

O objetivo desse trabalho é assegurar o controle do fluxo de potência entre o barramento CC e às cargas conectadas ao conversor iUPQC a ser apresentado, de forma que o conversor funcione de acordo com as necessidades de potência das cargas. Dessa forma, garante-se uma compensação na intermitência da geração das microrredes, onde os elementos armazenadores de energia conseguem suprir a demanda de potência das cargas durante o período em que a microrrede não está produzindo energia. Também se garante uma geração distribuída de energia com alta qualidade a partir de fontes de energia renováveis, o que melhora a qualidade dos serviços auxiliares. Através do desenvolvimento de equações, simulações numéricas e resultados experimentais, pretende-se analisar a variação no fluxo de potência sobre os filtros ativos do iUPQC para se conhecer a influência do sistema de armazenamento do conversor no comportamento em regime permanente do sistema.

Também é objetivo desse trabalho analisar a possibilidade de deslocamento de energia com o tempo a fim de reduzir a ponta de carga e deslocar o consumo para fora dos horários de ponta, onde o valor da energia é mais alto.

## 1.2 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

Este trabalho é dividido em 6 capítulos, da seguinte forma:

O primeiro capítulo apresenta uma breve introdução sobre os problemas de qualidade de energia e condicionadores de energia, que são uma das soluções viáveis para a correção destes problemas.

No capítulo 2 são apresentadas as topologias dos condicionadores de energia UPQC e iUPQC e algumas das equações que descrevem seus funcionamentos. Também é apresentada a funcionalidade dos conversores UPQC e iUPQC quando conectados a um armazenador de energia através de um barramento CC.

No capítulo 3 são demonstrados quais são os parâmetros de projeto a serem cumpridos, assim como são mostrados quais os componentes implementados no conversor para que seja

possível cumpri-los. São apresentados também as funções de transferência que representam a topologia implementada e os controladores utilizados para cada uma das variáveis que se deseja controlar no condicionador. Após a validação de que os controladores atuam da maneira esperada, são deduzidos os modelos matemáticos que explicam o fluxo de potência no conversor.

No capítulo 4 são feitas simulações numéricas para avaliar o controle do conversor iUPQC atuando de acordo com a variação de potência sendo absorvida ou injetada através do barramento CC, assim como são analisados os fluxos de potência nos filtros ativos do conversor em diversas situações a fim de comparar com os valores obtidos através dos modelos matemáticos obtidos no capítulo 3.

No capítulo 5 são apresentados os resultados experimentais obtidos através de um protótipo do conversor iUPQC apresentado construído no LAPEI (Laboratório de Pesquisa em Eletrônica Industrial) que fica localizado no nPEE (Núcleo de Processamento de Energia) da Universidade do Estado de Santa Catarina e estes resultados são comparados aos resultados esperados através da teoria desenvolvida.

No capítulo 6 é feita uma conclusão em relação ao que foi apresentado, se os resultados teóricos, numéricos e experimentais são condizentes com o esperado e as possíveis mudanças e trabalhos a serem feitos para melhorar o projeto do conversor no futuro.

## 2 CONDICIONADOR UNIFICADO DE QUALIDADE DE ENERGIA

Neste capítulo é apresentada a topologia dos condicionadores unificados de qualidade de energia (o UPQC) e de seu dual (o iUPQC) e algumas das equações que descrevem seu funcionamento.

### 2.1 CONDICIONADOR UNIFICADO DE QUALIDADE DE ENERGIA CONVENCIONAL (UPQC)

O UPQC é um condicionador de energia formado pela junção de dois filtros ativos de potência, o Filtro Ativo Série (FAS) e o Filtro Ativo Paralelo (FAP). Os filtros são responsáveis por processar e fazer as compensações necessárias para ajustar a tensão e corrente do sistema. O FAS é controlado em tensão e é responsável por compensar as distorções da tensão de rede e o FAP é controlado em corrente, sendo usado então para compensar as distorções harmônicas da corrente da carga da microrrede. Os dois filtros também compartilham de um barramento CC. Usualmente, o controle de tensão do barramento CC é feito através do filtro controlado em corrente, nesse caso, o FAP.

O controle aplicado nos filtros do UPQC, com a finalidade de controlar variáveis com componentes harmônicas, necessitam de referências que também possuam componentes harmônicas. Isto é, para compensar as componentes harmônicas indesejadas na tensão da rede, o FAS deve gerar contra-harmônicas. Contra-harmônicos são o complemento das harmônicas que se deseja compensar no sistema, com exceção da harmônica da frequência fundamental. O FAP impede que as componentes harmônicas de corrente circulem pela rede de alimentação, fazendo assim o controle da THD (*Total Harmonic Distortion*), que é uma medida controlada pela ANEEL e pode ser calculada de acordo com as equações (1) e (2).

$$THD_V\% = \frac{\sqrt{V_{cc}^2 + \sum_{h=2}^{\infty} V_h^2}}{V_1} \times 100 \quad (1)$$

$$THD_I\% = \frac{\sqrt{I_{cc}^2 + \sum_{h=2}^{\infty} I_h^2}}{I_1} \times 100 \quad (2)$$

Sendo:

$h$  = todas as ordens harmônicas de 2 até o infinito;

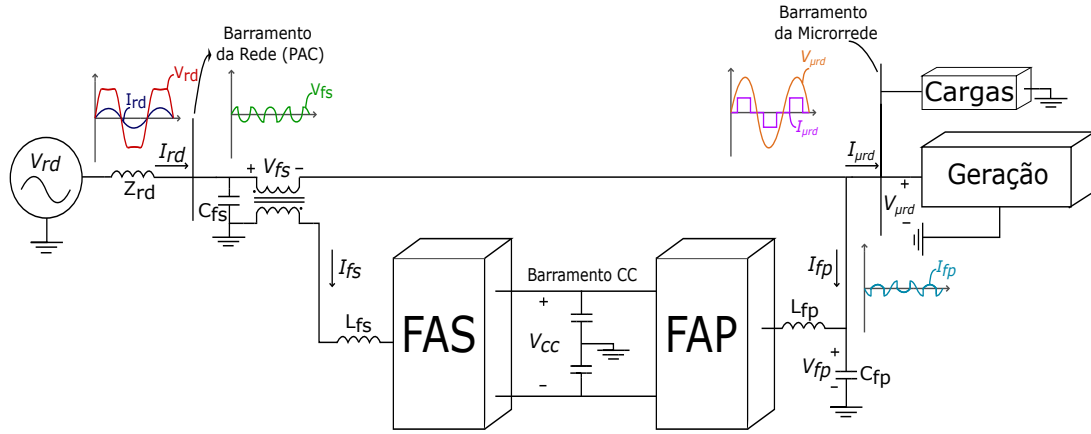
$V_1$  e  $I_1$  = amplitudes de tensão e corrente da componente fundamental.

$V_{cc}$  e  $I_{cc}$  = amplitudes contínuas de tensão e corrente. (HOLMES; LIPO, 2003)

O UPQC consegue então controlar a corrente através do FAP de forma a garantir uma corrente de forma muito próxima a uma senoide com a frequência da componente fundamental e

em fase com a tensão da rede. A tensão controlada pelo FAS também é entregue à microrrede com forma senoidal equilibrada e com baixas distorções harmônicas. A topologia do UPQC e exemplos de formas de onda na rede, filtros e carga podem ser analisados através da Figura 1.

Figura 1 – Topologia do UPQC



Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

Os filtros série e paralelo, na estrutura do UPQC, não possuem uma posição fixa, podendo ser conectados em outra sequência, onde primeiro é conectado o filtro paralelo e em seguida o filtro série. Essa abordagem foi estudada por Fujita e Akagi (1998) (FUJITA; AKAGI, 1998), onde é primeiro feito o controle de corrente através do FAP e depois feito o controle de tensão através do FAS. Na prática, no caso em que é utilizado o FAP antes do FAS, a corrente que percorre o transformador do FAS possui distorções harmônicas, o que prejudica o desempenho do conversor e aumenta as perdas.

A tensão proveniente da rede  $V_{rd}$  é dada pela Equação (3).

$$V_{rd} = V_{rd}^+ - V_{rd}^h \quad (3)$$

Onde  $V_{rd}^+$  é o sinal senoidal com a frequência fundamental e  $V_{rd}^h$  é um sinal equivalente a todos os harmônicos da rede. A tensão  $V_{fs}$  nos transformadores é a tensão utilizada pelo FAS para realizar o controle da tensão na carga. A tensão  $V_{fs}$  pode ser descrita pela equação (4).

$$V_{fs} = V_{rd} - V_{\mu rd} \quad (4)$$

Onde  $V_{\mu rd}$  é a tensão da microrrede. O sinal  $V_{fs}$ , que é composto pelos sinais harmônicos de tensão da rede, é utilizado pelo FAS, para que o controle atue de forma a inverter sua polaridade, equilibrando assim a tensão na microrrede. É possível analisar que, como o sinal utilizado para fazer o controle em tensão é o equivalente aos componentes harmônicos que compõem o sinal de tensão no ponto de acoplamento comum (PAC), o método de controle é baseado em variáveis não lineares.

De maneira semelhante, a corrente na carga  $I_{\mu rd}$  pode ser descrita pela equação (5).

$$I_{\mu rd} = I_{\mu rd,p}^+ + I_{\mu rd,q}^+ + I_{\mu rd}^h \quad (5)$$

Onde  $I_{\mu rd,p}^+$  e  $I_{\mu rd,q}^+$  são as parcela ativa e reativa da componente fundamental e  $I_{\mu rd}^h$  é o equivalente a todos os componentes harmônicos e distúrbios. A corrente  $I_{rd}$  deve ser próxima à  $I_{\mu rd,p}^+$ , logo, o restante é proveniente do FAP. Isso faz com que a forma de onda do  $I_{fp}$  apresentada na Figura (1), pode ser descrita pela equação (6).

$$I_{fp} = I_{\mu rd,q}^+ + I_{\mu rd}^h \quad (6)$$

De forma análoga à análise feita ao controle de tensão, o sinal de corrente  $I_{fp}$  utilizado pelo FAP para executar o controle da corrente da carga não é linear.

## 2.2 CONDICIONADOR UNIFICADO DE QUALIDADE DE ENERGIA DUAL (IUPQC)

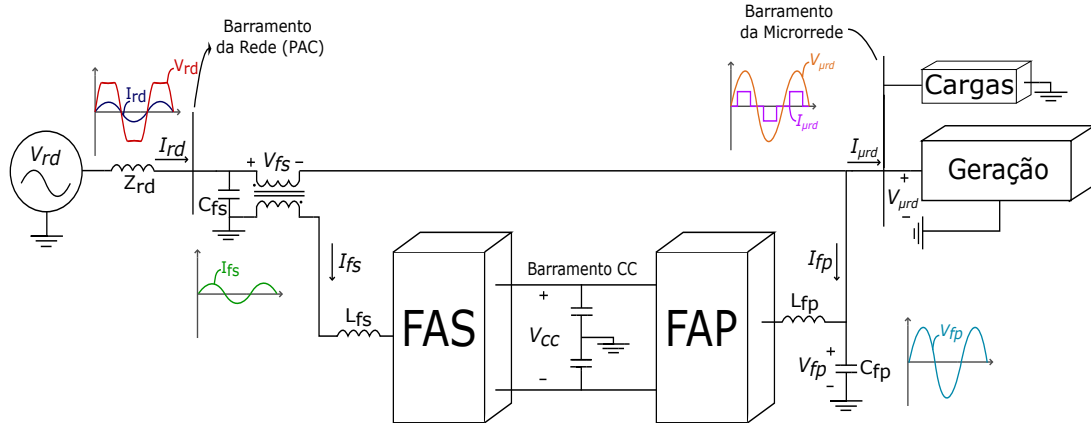
Assim como o UPQC convencional, o iUPQC é formado pelo FAS e pelo FAP, onde a diferença entre os dois está no modo em que é feito o controle dos filtros. O iUPQC, se tratando da topologia dual do UPQC, consiste no uso do FAS controlado em corrente e o FAP controlado em tensão. Sendo assim, o FAS é responsável por garantir que a corrente que atravessa o circuito seja senoidal e esteja em fase com a corrente da rede. Já o FAP é responsável por fornecer uma tensão senoidal, regulada, equilibrada e livre de harmônicos para a carga. (MONTEIRO; AREDES; NETO, 2003)

O modelo de controle do iUPQC, em que o FAS é controlado em corrente e o FAP é controlado em tensão foi proposto inicialmente em 1989 por Moran (MORAN, 1989) e, desde então sua maior aplicação é em sistemas de UPS (*Uninterruptible Power Supply*), popularmente conhecidos no Brasil como *no-breaks*.

Quando é implementado um conversor iUPQC, a corrente que circula pelo FAS é senoidal e em fase com a tensão da fonte  $V_{rd}$  dessa forma, tanto os harmônicos da corrente da carga quanto a parcela reativa da corrente na frequência da fundamental são obrigados a circular através do FAP, pois é um caminho de baixa impedância para qualquer forma de onda diferente da senoide imposta pelo controle de corrente do conversor. Por sua vez, qualquer distúrbio de tensão na rede, sobretensão, subtensão, interrupção, desequilíbrio, falta de fase e harmônicos não irão chegar até a carga. Isso é possível já que o FAP impõe uma tensão senoidal e sincronizada com a rede, logo, a diferença entre a tensão da rede e a tensão da carga é imposta sobre o transformador de acoplamento do FAS.

Isso faz com que as variáveis utilizadas como referência para o controle sejam senoidais, o que simplifica o esquema de controle. A topologia do condicionador dual e suas principais formas de onda podem ser analisadas na Figura 2.

Figura 2 – Topologia do iUPQC



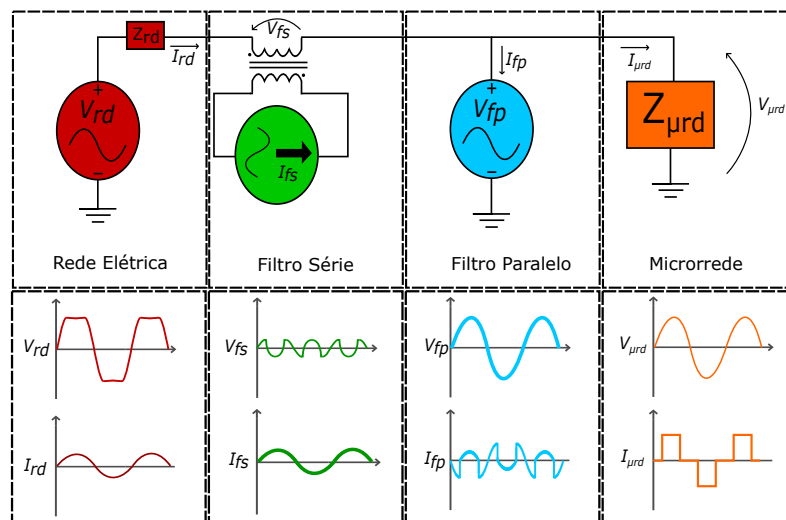
Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

No iUPQC os sinais utilizados pelos filtros são  $I_{fs}$  e  $V_{fp}$  que, em regime permanente são sinais senoidais com a frequência fundamental. É importante notar que os sinais  $V_{fs}$  e  $I_{fs}$  possuem as mesmas formas de onda apresentadas na Figura (1) na topologia do iUPQC, portanto todas as equações apresentadas para o UPQC são também válidas para o iUPQC. No iUPQC, o FAS é quem fica responsável pelo controle da tensão no barramento CC.

Diferente do UPQC convencional, a localização dos filtros ativos no iUPQC é fixa, sendo o FAS localizado entre a rede de alimentação e o FAP, e o FAP localizado entre o FAS e a carga. (FAGUNDES, 2020)

É possível representar a topologia do iUPQC de forma simplificada utilizando o circuito equivalente mostrado na Figura 3.

Figura 3 – Conversor iUPQC de forma simplificada



Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

Onde as formas de onda utilizadas como referência para os controladores estão levemente

destacadas na imagem.

### 2.3 COMPARAÇÃO ENTRE AS DUAS TOPOLOGIAS

A partir das características apresentadas sobre as topologias dos Condicionadores Unificados de Qualidade de Energia Convencional e de seu modelo dual, foram observados exemplos de formas de onda utilizadas no controle de cada um dos condicionadores, de forma a elucidar seu funcionamento básico e a diferença no controle das duas topologias.

Como no iUPQC a forma da onda da corrente das fases da rede é diretamente controlada pelo condicionador, é adicionada uma dinâmica na capacidade de variação dessa corrente, ou seja, se houver uma alteração rápida nas cargas conectadas à microrrede, a rede não conseguirá atender à demanda instantaneamente. Essa demanda só consegue ser atendida de imediato a partir da geração da microrrede quando é utilizada a topologia do iUPQC. Também, quando são conectadas à microrrede cargas maiores do que a suportada pelos filtros ativos do condicionador iUPQC, a topologia não possui proteção para casos de sobrecarga. Existem soluções para esse tipo de situação de sobrecarga, como a proposta por Maffezzolli (2019), mas estas não são abordadas neste trabalho.

Pode-se fazer comparações entre as duas topologias apresentadas, para observar melhor as limitações de cada uma delas. Essa comparação é apresentada na Tabela 1.

Tabela 1 – Características dos Condicionadores de Energia

| <b>Característica</b>                                       | <b>UPQC</b> | <b>iUPQC</b> |
|-------------------------------------------------------------|-------------|--------------|
| <b>Composto por dois filtros ativos</b>                     | ✓           | ✓            |
| <b>Compensa a Corrente na Rede</b>                          | ✓           | ✓            |
| <b>Compensa a Tensão na Carga</b>                           | ✓           | ✓            |
| <b>Opera com Referências Senoidais</b>                      | X           | ✓            |
| <b>Flexível no posicionamento dos filtros ativos</b>        | ✓           | X            |
| <b>Adiciona dinâmica no fornecimento de energia da rede</b> | X           | ✓            |
| <b>Protegido contra sobrecargas no FAP</b>                  | X           | ✓            |

Fonte: Adaptado de (SANTOS, 2012)

A vantagem estrutural do UPQC, onde é possível trocar o posicionamento dos filtros ativos, apesar de possível, não é recomendada na prática, pois ela prejudica o desempenho do conversor, então, a ordem mais recomendada para implementação é o FAS localizado entre a rede de alimentação e o FAP, e o FAP localizado entre o FAS e a carga. Nessa configuração, o iUPQC oferece a vantagem de operar com referência senoidais sem conteúdos harmônicos. Neste trabalho, todas as cargas acopladas à microrrede são consideravelmente menores do que

as utilizadas para dimensionamento dos filtros ativos e não são necessárias respostas rápidas à variação de carga na microrrede, portanto, a topologia do iUPQC é mais atrativa para a aplicação desejada.

## 2.4 ARMAZENADORES DE ENERGIA

Existem diversos elementos armazenadores de energia como capacitores, indutores, baterias, pilhas, entre outros. Os elementos armazenadores de energia servem para que, quando conectados a um sistema, possam suprir uma necessidade de energia repentina que o sistema possa vir a necessitar, assim como absorver energia, caso esteja sobrando no sistema.

Como a quantidade de energia necessária em sistemas de potência é elevada, são necessários elementos armazenadores com alta capacidade de armazenamento, como um banco de baterias.

Um banco de baterias ou BESS (Battery Energy Storage System) consiste em diversas baterias associadas que tem como função um armazenamento maior de energia, e consequentemente, um maior fornecimento de energia. Bancos de baterias podem ser aplicados na geração e distribuição de energia com o objetivo de aumentar a confiabilidade e estabilidade da rede elétrica, atuando como fontes secundárias ou como armazenadores de energia de acordo com as condições de geração ou do estado de operação da rede. (SILVA, 2018)

Elementos armazenadores de energia são muito empregados em microrredes para cobrir o período de intermitência na geração de energia da microrrede, ou seja, servem como fonte secundária para a carga quando a microrrede não está gerando energia.

## 2.5 CONVERSOR IUPQC COM ARMAZENAMENTO DE ENERGIA

A adição do elemento armazenador de energia à topologia do conversor iUPQC traz novas funcionalidades ao conversor. O elemento armazenador de energia é conectado ao barramento CC do conversor iUPQC.

O FAS, que é responsável pelo controle da tensão do barramento CC quando não há sistema de armazenamento de energia, pode ser influenciado pela injeção ou absorção de potência no barramento, quando o armazenador está conectado. Isso se deve ao fato de que, o controle da tensão do barramento CC está diretamente relacionado com a amplitude da parcela de corrente do FAS em fase com a tensão do PAC, ou seja, com o fluxo de potência ativa entre o conversor e a rede. Quando é injetada potência através do armazenador de energia no barramento CC, a tensão no barramento tende a subir. Isso faz com que o controle do FAS atue e a sua parcela de corrente ativa diminua até que a tensão no barramento seja reestabelecida. Analogamente, quando é feita a absorção de potência no barramento CC, o controle do FAS atua e a amplitude da parcela de corrente do FAS aumenta até que a tensão seja reestabelecida.

O controle da tensão total do barramento CC, consequentemente, controla a amplitude da parcela de corrente do FAS em fase com a tensão no PAC, ou seja, controla o fluxo de potência

ativa entre o conversor e a rede.

É importante notar que, caso seja feita absorção de potência e a microrrede não estiver gerando energia suficiente para suprir as cargas e a necessidade no barramento, a potência para o sistema de armazenamento virá da rede. Da mesma forma, se estiver sendo injetada potência no barramento CC e as necessidades da carga já estiverem sendo supridas, a potência será direcionada para a rede. Isso permite que o conversor opere em conjunto com sistemas de armazenamento de energia, ampliando as funcionalidades que conversor iUPQC pode executar operando como conversor multifuncional de interface para microrredes.

Dessa forma, o conversor opera de diferentes modos baseados nas condições de geração da microrrede, das cargas, do sistema de armazenamento e da conexão com a rede.

### 2.5.1 Modos de Operação

Uma microrrede pode operar de diferentes maneiras, de acordo com sua geração de energia, das condições do sistema de armazenamento conectado e do estado de fornecimento de energia da rede. Os dois principais modos de operação do conversor multifuncional em operação em uma microrrede são:

1. Modo conectado à rede ou *grid-tie*: Nesse modo, o conversor funciona conectado à rede (*on grid*) e à microrrede. A rede elétrica, o sistema de armazenamento e a microrrede podem absorver ou fornecer potência uns aos outros, dependendo das condições de operação.
2. Modo ilhado, autônomo ou *off-grid*: Conversor está desconectado da rede elétrica e o fornecimento de potência às cargas é feito diretamente através da energia gerada pela microrrede e pelo sistema de armazenamento. O fluxo de potência ainda é bidirecional, podendo a microrrede fornecer ou absorver potência do barramento CC, dependendo das condições de operação. (SILVA, 2014)

#### 2.5.1.1 Modo conectado à rede ou Grid-Tie

Para que o conversor esteja operando nesse modo, é necessário que ele esteja conectado a rede elétrica. Dentro dessa condição, existem diversas situações que podem ser analisadas e controladas pelo conversor, como:

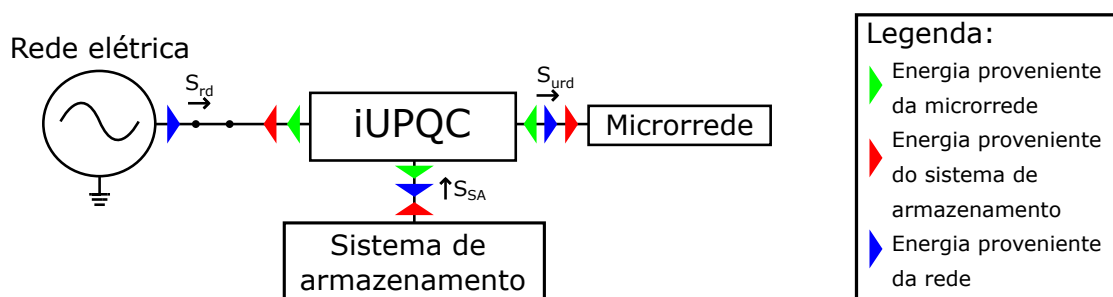
1. Complemento da potência da carga através da rede: assumindo que a geração da microrrede não é o suficiente para atender às necessidades da carga, o restante da potência exigida pela carga é fornecida pela rede elétrica.
2. Complemento da potência da carga através do sistema de armazenamento: de forma semelhante, assumindo que o sistema de armazenamento conectado ao barramento CC possua energia armazenada e a geração da microrrede não seja o suficiente para atender às necessidades da carga, o restante da potência necessária para alimentar a carga é absorvida do sistema de armazenamento através do barramento CC.

3. Recarga do sistema de armazenamento de energia através da rede: a rede elétrica fornece energia para o sistema de armazenamento conectado ao barramento CC.
4. Fornecimento de energia à rede através do sistema de armazenamento: o sistema de armazenamento conectado ao barramento CC fornece energia para a rede elétrica.
5. Fornecimento de energia à rede através da microrrede: assumindo que a geração da microrrede é capaz de suprir a potência consumida pela carga, o excedente de energia gerada pela microrrede é fornecida à rede elétrica.
6. Recarga do sistema de armazenamento de energia através da microrrede: de forma semelhante, assumindo que a geração da microrrede é capaz de suprir a potência consumida pela carga, o excedente de energia gerada pela microrrede é fornecida ao sistema de armazenamento conectado ao barramento CC.

Pode-se notar que é possível que o sistema se enquadre em mais do que uma dessas situações simultaneamente, como por exemplo, o complemento da potência da carga através da rede (situação 1) e o carregamento do sistema de armazenamento de energia através da rede (situação 3) podem ocorrer simultaneamente, se o conversor tiver a capacidade de processar a potência necessária para fazer as duas operações. Também é importante notar que não tem sentido prático em algumas das possibilidades apresentadas acontecerem simultaneamente, como por exemplo, drenar energia da rede para a carga (situação 1) e fornecer energia à rede através do barramento CC (situação 4), onde o ideal e equivalente é deixar de drenar a energia da rede e apenas fornecer potência à carga através do barramento CC (situação 2).

A Figura 4 mostra as possíveis direções das energias provenientes da rede, microrrede e do sistema de armazenamento quando o condicionador está operando no modo conectado à rede.

Figura 4 – Conversor iUPQC operando conectado à rede



Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

Na prática, a energia gerada pela microrrede tem sempre como preferência a sua destinação à carga. O fornecimento de energia através da microrrede para o sistema de armazenamento e para a rede elétrica só é feito quando a energia gerada excede a energia necessária para suprir a carga.

### 2.5.1.2 Modo autônomo, ilhado ou off-grid

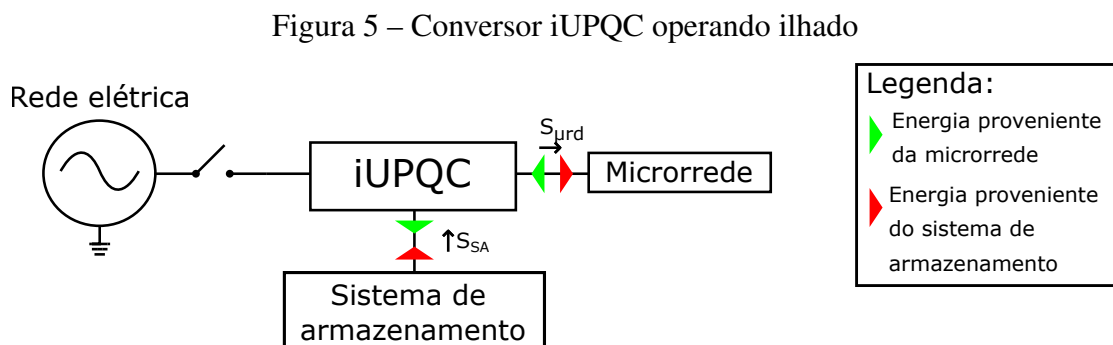
As microrredes normalmente só entram em seu modo ilhado quando há algum problema de fornecimento de energia por parte da rede elétrica, seja ele uma queda de energia, manutenção na rede ou a baixa qualidade da energia fornecida pela rede. Também é possível operar com o modo ilhado de forma intencional, apesar de ser menos vantajoso devido à diminuição dos graus de liberdade do conversor. Sabendo disso, as situações que podem ser encontradas quando operando nesse modo são:

1. Complemento da potência da carga através do barramento CC: assumindo que o sistema de armazenamento conectado ao barramento CC possua energia armazenada e a geração da microrrede não seja o suficiente para atender às necessidades da carga, o restante da potência necessária para alimentar a carga é absorvida do sistema de armazenamento através do barramento CC.
2. Recarga do sistema de armazenamento de energia através da microrrede: assumindo que a geração da microrrede é capaz de suprir a potência consumida pela carga, o excedente de energia gerada pela microrrede é armazenada no sistema de armazenamento conectado ao barramento CC, caso as baterias não estejam totalmente carregadas.

Nota-se que duas das possíveis situações encontradas no modo de operação ilhado também acontecem no modo de operação conectado à rede.

No modo de operação ilhado não é possível que as duas das situações listadas aconteçam simultaneamente. Também não é possível fazer o deslocamento da energia no tempo (arbitragem, redução de ponta de carga e deslocamento de consumo). Esse modo de operação é apenas utilizado então, como último recurso em caso de problema de fornecimento de energia da rede.

A Figura 5 mostra as possíveis direções das energias microrrede e do sistema de armazenamento quando o condicionador está operando no modo ilhado.



Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

## 2.6 DESLOCAMENTO DE CONSUMO NO TEMPO

O consumo de energia elétrica não é constante com o tempo, ou seja, a quantidade de energia gerada e consumida varia de acordo com o dia. No quesito de consumo, os horários de maior demanda sobre o sistema elétrico são chamados de horários de ponta. Os horários de ponta são definidos pelas distribuidoras de energia e durante esses períodos, para algumas categorias de consumidores, a distribuidora cobra mais caro pela energia que é consumida. Os consumidores sujeitos as cobranças diferentes de acordo com o horário do consumo, baseado na fornecedora CELESC, são os consumidores que aderiram à Tarifa Branca e os consumidores com fornecimento em igual ou superior a 2,3kV, ou atendidas a partir de sistema subterrâneo de distribuição em tensão secundária. Todas as Unidades Consumidoras atendidas em Baixa Tensão (127, 220, 380 ou 440 Volts), denominadas de Grupo B, podem optar pela Tarifa Branca, pagando valores diferentes em função da hora e do dia de consumo (CELESC, 2022).

Com o conversor iUPQC multifuncional operando como interface para microrredes com armazenamento de energia, existem graus de liberdade para a carga e descarga do armazenamento no sistema, onde é possível controlar se a energia vai ser fornecida ou absorvida da rede ou vai ser fornecida ou absorvida pela microrrede (BELLINASSO, 2017). Esses graus de liberdade fazem com que seja possível evitar grandes consumos de potência da rede em horários de ponta, onde, dependendo do contrato, a energia vendida pela empresa distribuidora de energia possui preço mais elevado. Durante o período de horário de ponta, é priorizado o consumo da energia armazenada. A energia utilizada para recarregar o sistema de armazenamento novamente deve vir preferencialmente da microrrede. Se a microrrede não conseguir gerar energia suficiente para recarregar o sistema de armazenamento, o sistema de armazenamento é recarregado através da rede durante um horário em que a energia vendida pela empresa distribuidora possui menor custo, usualmente, durante a madrugada. No caso de uma microrrede com geração de fonte fotovoltaica, se o sistema de armazenamento for carregado durante a madrugada, isso impede que a recarga seja feita através da microrrede durante o dia, dependendo das condições climáticas, então as condições de recarga do sistema de armazenamento podem variar de caso para caso, ou até mesmo levarem em condições climáticas previstas para adequar o seu funcionamento.

Assumindo que a carga não necessite da energia do armazenamento para ser atendida, ou seja, a microrrede consegue fornecer energia suficiente para a carga, também é possível injetar energia do armazenamento no barramento CC com a finalidade de essa energia ser injetada na rede.

O sistema de armazenamento de energia acoplado ao conversor, portanto, permite que seja possível a diminuição no consumo de energia proveniente da rede elétrica durante os horários de ponta, diminuindo assim a demanda do sistema elétrico nesses períodos e, consequentemente, diminuindo os gastos com energia elétrica. A figura 6 mostra o funcionamento do condicionador iUPQC através de um fluxograma para melhor compreensão do gerenciamento de energia feito pelo condicionador.



do acoplamento de um sistema de armazenamento de energia ao barramento CC do conversor iUPQC, que possibilita que o conversor exerça novas funções para melhor atender à carga, diminuindo a intermitência na geração de energia, melhorando então a QEE fornecida às cargas elétricas conectadas ao barramento da microrrede.

Também com a inserção do sistema de armazenamento ao sistema, é analisada a possibilidade de deslocamento do consumo no tempo (conhecida como arbitragem no setor elétrico), a fim de fazer com que exista vantagem financeira com a implementação do conversor, assim como diminuir a demanda do sistema elétrico durante o horário de ponta.

### 3 ESTRUTURA E MODELOS MATEMÁTICOS

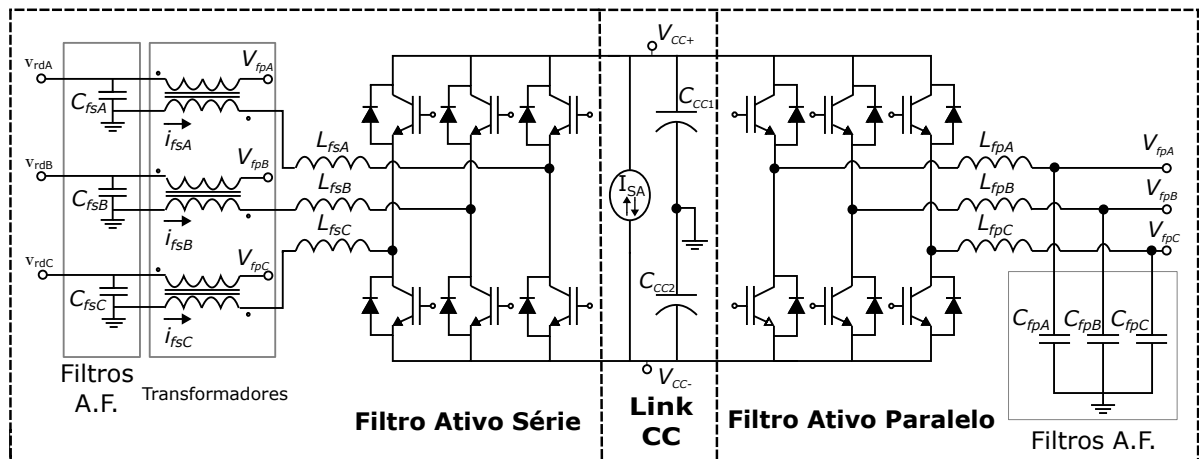
Este capítulo apresenta de forma detalhada a estrutura do conversor iUPQC e os parâmetros utilizados para o projeto do mesmo. Também é apresentado o esquema de controle responsável pela injeção e absorção de energia ao sistema através do barramento CC. Com o controlador validado, é possível modelar matematicamente a operação do conversor junto com o sistema de armazenamento.

#### 3.1 ESTRUTURA DE POTÊNCIA

A estrutura de potência do conversor iUPQC utilizado foi projetada por SANTOS (2012), com a adição do sistema de armazenamento conectado ao barramento CC (também referenciado como *link* CC). Essa estrutura consiste em dois inversores trifásicos a quatro fios com um barramento capacitivo com ponto médio. Essa estrutura, apresentada na Figura 7, possibilita a compensação dos harmônicos e a compensação do desequilíbrio entre as fases, fazendo com que o condicionador opere tanto com cargas monofásicas como com cargas trifásicas. (FAGUNDES, 2020)

A estrutura completa do condicionador unificado de qualidade de energia dual apresentado consiste em dois conversores, cada um possuindo um filtro de alta frequência, um barramento CC compartilhado pelos dois filtros ativos (série e paralelo), um transformador de acoplamento para cada uma das fases e um sistema de armazenamento acoplado ao barramento CC.

Figura 7 – Inversores trifásicos compoendo a estrutura do iUPQC



Fonte: Adaptado de (SANTOS, 2012)

Onde o sistema de armazenamento de energia está representado por uma fonte de corrente conectada ao barramento CC, capaz de fornecer ou absorver energia do sistema através da corrente  $I_{SA}$ .

Os parâmetros utilizados para o projeto dos indutores e capacitores dos filtros de alta frequência são apresentados na Tabela 2.

Tabela 2 – Parâmetros de Projeto do iUPQC

| Parâmetro                                   | Valor                           |
|---------------------------------------------|---------------------------------|
| Potência de Saída Trifásica                 | $S_{\mu rdT} = 2500 \text{ VA}$ |
| Tensão do Barramento CC                     | $V_{CC} = 400 \text{ V}$        |
| Tensão eficaz de fase da rede               | $V_{rdef} = 127 \text{ V}$      |
| Ondulação de corrente máxima do FAS         | $\Delta i_{L\%} = 20\%$         |
| Ondulação máxima de tensão no barramento CC | $\Delta V_{CC\%} = 3\%$         |
| Frequência de comutação                     | $f_s = 20 \text{ kHz}$          |
| Frequência da rede                          | $f_{rd} = 60 \text{ HZ}$        |

Fonte: Adaptado de (SANTOS, 2012)

A partir desses parâmetros, foram calculados os valores mínimos de capacitância para os capacitores dos filtros de alta frequência e os valores mínimos de indutância para os indutores dos filtros de alta de frequência. Os componentes escolhidos são apresentados na Tabela 3 para serem utilizados no condicionador unificado de qualidade de energia dual.

Tabela 3 – Componentes utilizados na estrutura do iUPQC

| Componente                                              | Valor                              |
|---------------------------------------------------------|------------------------------------|
| Capacitores do filtro de alta frequência do FAS         | $C_{fs} = 1 \mu\text{F} \pm 10\%$  |
| Capacitores do filtro de alta frequência do FAP         | $C_{fp} = 10 \mu\text{F} \pm 5\%$  |
| Capacitores do barramento CC                            | $C_{CC1} = C_{CC2} = 3 \text{ mF}$ |
| Capacitância total do barramento CC                     | $C_{CC} = 1,5 \text{ mF}$          |
| Indutância do filtro de alta frequência do FAS          | $L_{fs} = 650 \mu\text{H}$         |
| Indutância do filtro de alta frequência do FAP          | $L_{fp} = 650 \mu\text{H}$         |
| Indutância de dispersão do transformador de acoplamento | $L_{dt} = 2,33 \mu\text{H}$        |
| Relação de espiras do transformador de acoplamento      | $n = \frac{N_1}{N_2} = 1$          |

Fonte: Adaptado de (SANTOS, 2012)

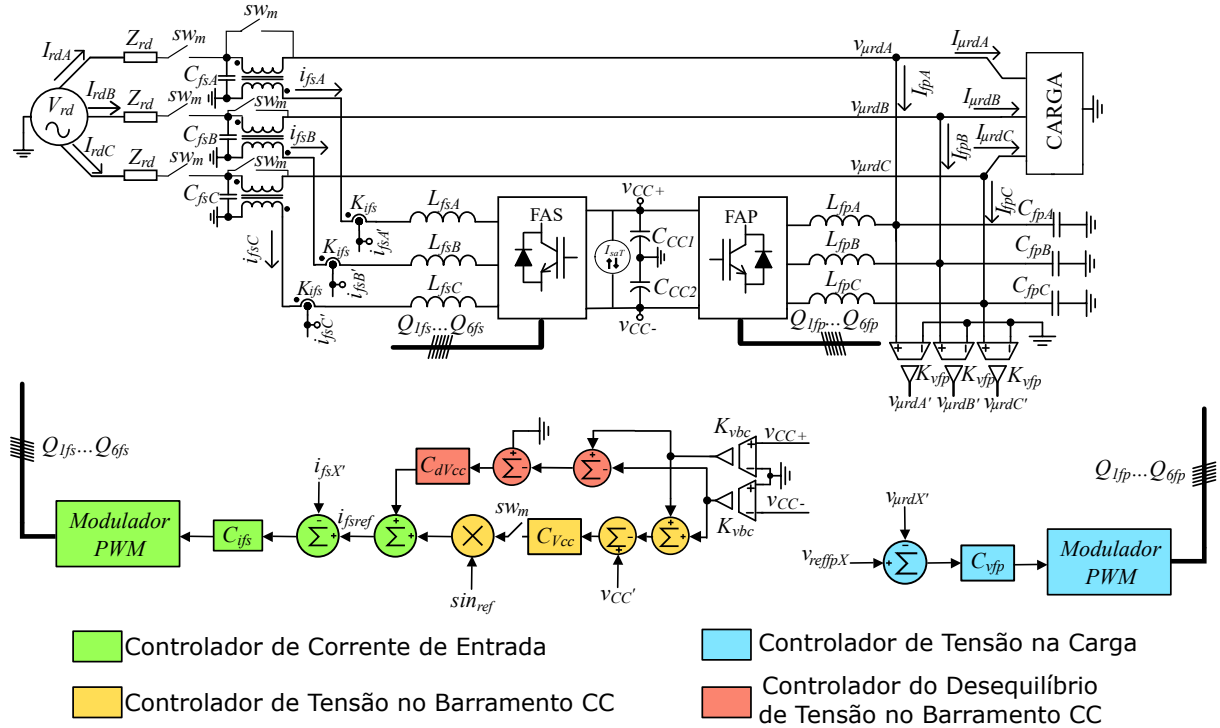
### 3.2 CONTROLE DO CONVERSOR IUPQC

A estratégia de controle utilizada para o conversor iUPQC é a proposta por SANTOS (2012), que são as malhas de controle de corrente do FAS, malha de controle de tensão do FAP, malha de tensão total do barramento CC e a malha da tensão de desequilíbrio de tensão nos capacitores do barramento CC.

O controle proposto utiliza dois esquemas independentes, um no FAS e outro no FAP. No FAS é feito o controle da corrente drenada da rede, da tensão total do barramento CC e da tensão de desequilíbrio do barramento CC, enquanto no FAP é feito o controle da tensão da microrrede.

O esquema de controle é apresentado na figura 8.

Figura 8 – Esquema de controle utilizado



Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

A chave  $sw_m$  apresentada na figura 8 é responsável por fazer a transição entre os modos *on-grid* e *off-grid*.

### 3.2.1 Controlador de Tensão na Microrrede

Para o FAP executar o controle da tensão da microrrede, é utilizado um controlador em cada uma das fases do sistema. Esse controlador atua baseado na tensão da microrrede, que é monitorada por um sensor. Logo, são implementados três sensores (um em cada fase), e esses sensores influenciam na malha de controle através de um ganho  $K_{vfp}$ , que representa o ganho dos sensores de tensão na carga da microrrede utilizado pelo controlador do FAP.

O controlador de tensão da microrrede  $C_{vfp}(s)$  garante que a tensão na microrrede siga uma referência senoidal em fase com a rede da concessionária. A banda passante do controlador de tensão do FAP é na ordem de kHz, fazendo com que o controlador consiga agir de forma rápida sobre o sinal a ser controlado, eliminando os distúrbios.

O controlador escolhido para compor a malha de controle de tensão na carga da microrrede foi um controlador Proporcional Integral Derivativo (PID), contendo dois pólos e dois

zeros. A função de transferência do sistema em malha aberta, o ganho do sensor e a função de transferência do controlador proposto são apresentados nas equações (7), (8) e (9).

$$K_{vfp} = 0,06 \quad (7)$$

$$FTMA_{vfp} = \frac{\frac{V_{CC} \cdot K_{vfp} \cdot K_{pwmfp}}{L_{fp} \cdot C_{fp}}}{s^2 + \frac{s}{L_{fp} \cdot C_{fp}} + \frac{1}{L_{fp} \cdot C_{fp}}} \cdot C_{vfp}(s) \quad (8)$$

$$C_{vfp}(s) = 31,9 \cdot \frac{(s + 2\pi \cdot 1970)^2}{s \cdot (s + 2\pi \cdot 79 \cdot 10^3)} \quad (9)$$

Onde  $K_{pwmfp}$  é a atenuação do modulador PWM no sistema.

$$K_{pwmfp} = 0,072V^{-1} \quad (10)$$

### 3.2.2 Controlador de Corrente do Filtro Ativo Série

De forma análoga ao controlador de tensão da microrrede, o controlador de corrente do FAS  $C_{ifs}(s)$  também utiliza um sensor de corrente em cada uma das fases, que contribui ao sistema com um ganho  $K_{ifs}$ . Esse controlador também possui alta banda passante (na ordem de kHz) para garantir que o controlador siga de forma rápida uma referência senoidal com a mesma frequência da rede e sem defasamento.

A metodologia utilizada para efetuar o projeto do controlador foi baseada na teoria apresentada por BARBI (2001). O controlador escolhido para compor a malha de controle da corrente de entrada foi um Proporcional-Integral (PI) com um polo adicional, que é capaz de reduzir o erro em regime permanente e também melhora a rejeição de distúrbios. A função de transferência do sistema em malha aberta, o ganho do sensor e a função de transferência do controlador propostos são apresentados nas equações (11), (12) e (13).

$$K_{ifs} = 0,44 \quad (11)$$

$$FTMA_{ifs} = \frac{V_{CC} \cdot K_{ifs} \cdot K_{pwmfs}}{s \cdot n^2 \cdot (L_{dt} + L_{rd} + L_{fs})} \cdot C_{ifs}(s) \quad (12)$$

$$C_{ifs}(s) = 4,3 \cdot 10^5 \frac{s + 2\pi \cdot 1250}{s \cdot (s + 2\pi \cdot 10 \cdot 10^3)} \quad (13)$$

Onde  $K_{pwmfs}$  é a atenuação do modulador PWM no sistema.

$$K_{pwmfs} = 0,091V^{-1} \quad (14)$$

### 3.2.3 Controlador de Tensão do Barramento CC

A amplitude da corrente do FAS é definida pelo controlador da tensão total do barramento CC  $C_{V_{cc}}(s)$  que controla a tensão total do barramento CC e, consequentemente, define a amplitude da parcela ativa de corrente a ser drenada da rede para alimentar as cargas da microrrede. Para garantir um desacoplamento com o controlador de corrente do FAS e para que o controle não atue na ondulação da tensão do barramento CC na frequência da rede, o controlador da tensão do barramento CC possui uma banda passante na ordem de Hz, ou seja, o controlador leva mais tempo para alcançar seu sinal de referência.

Para o controlador de tensão do barramento CC, também foi utilizado um modelo PI com um polo adicional, pelas mesmas razões apresentadas anteriormente. Para esse controle são relevantes os sensores de tensão no barramento CC, que introduzem o ganho  $K_{V_{cc}}$  e o índice de modulação  $ma$  definido pela equação (15).

$$ma = \frac{\sqrt{2} \cdot V_{rdef}}{V_{CC}} = 0,45 \quad (15)$$

A função de transferência do sistema em malha aberta, o ganho do sensor e a função de transferência do controlador propostos são apresentados nas equações (16), (17) e (18).

$$K_{V_{cc}} = 0,021 \quad (16)$$

$$FTMA_{V_{cc}}(s) = 1,5 \cdot \frac{n \cdot ma \cdot K_{V_{cc}}}{s \cdot C_{CC1} \cdot K_{ifs}} \cdot C_{V_{cc}}(s) \quad (17)$$

$$C_{V_{cc}}(s) = 1836 \cdot \frac{s + 2\pi \cdot 4}{s \cdot (s + 2\pi \cdot 160)} \quad (18)$$

### 3.2.4 Controlador do Desequilíbrio de Tensão no Barramento CC

O controle do desequilíbrio de tensão no barramento CC  $C_{dV_{cc}}(s)$ , feito pelo FAS, é responsável por garantir que a diferença entre a tensão sobre os dois capacitores do barramento CC ( $C_{CC1}$  e  $C_{CC2}$ ) seja sempre igual à zero, fazendo com que o valor de tensão sob cada capacitor seja metade da tensão  $V_{CC}$ . Esse controlador adiciona uma componente CC à referência de corrente do FAS de modo que o FAS forneça energia aos capacitores de maneira a deixar ambas iguais. Essa é a malha de controle mais lenta entre todas já apresentadas, devido à sua operação que só utiliza tensões contínuas. Sua banda passante projetada é de 1 Hz.

Essa malha utiliza os sensores já apresentados anteriormente e o controlador proposto é, novamente, um PI com um polo adicional. A função de transferência do sistema em malha aberta e a função de transferência do controlador propostos são apresentados nas equações (19) e (20).

$$FTMA_{dV_{cc}} = 1,5 \cdot \frac{n \cdot ma \cdot K_{V_{cc}}}{s \cdot C_{CC1} \cdot K_{ifs}} \cdot C_{dV_{cc}}(s) \quad (19)$$

$$C_{dV_{cc}} = 141,5 \cdot \frac{s + 2\pi}{s(s + 2\pi \cdot 120)} \quad (20)$$

As equações das funções de transferência de cada um dos sistemas e seus respectivos controladores são apresentadas na Tabela (4), de forma objetiva.

Tabela 4 – Malhas de controle do conversor iUPQC

| Controlador      | Descrição                                               | FTMA do sistema                                                                                                                                                 | FT do controlador                                                                     |
|------------------|---------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|
| $C_{vfp}(s)$     | Controlador de Tensão na Microrrede                     | $\frac{\frac{V_{CC} \cdot K_{vfp} \cdot K_{pwmfp}}{L_{fp} \cdot C_{fp}}}{s^2 + \frac{s}{L_{fp} \cdot C_{fp}} + \frac{1}{L_{fp} \cdot C_{fp}}} \cdot C_{vfp}(s)$ | $31,9 \cdot \frac{(s+2\pi \cdot 1970)^2}{s \cdot (s+2\pi \cdot 79 \cdot 10^3)}$       |
| $C_{ifs}(s)$     | Controlador de Corrente do Filtro Ativo Série           | $\frac{V_{CC} \cdot K_{ifs} \cdot K_{pwmfs}}{s \cdot n^2 \cdot (L_{dt} + L_{rd} + L_{fs})} \cdot C_{ifs}(s)$                                                    | $4,3 \cdot 10^5 \cdot \frac{s+2\pi \cdot 1250}{s \cdot (s+2\pi \cdot 10 \cdot 10^3)}$ |
| $C_{V_{cc}}(s)$  | Controlador de Tensão no Barramento CC                  | $1,5 \cdot \frac{n \cdot ma \cdot K_{V_{cc}}}{s \cdot C_{CC1} \cdot K_{ifs}} \cdot C_{V_{cc}}(s)$                                                               | $1836 \cdot \frac{s+2\pi \cdot 4}{s \cdot (s+2\pi \cdot 160)}$                        |
| $C_{dV_{cc}}(s)$ | Controlador do Desequilíbrio de Tensão no Barramento CC | $1,5 \cdot \frac{n \cdot ma \cdot K_{V_{cc}}}{s \cdot C_{CC1} \cdot K_{ifs}} \cdot C_{dV_{cc}}(s)$                                                              | $141,5 \cdot \frac{s+2\pi}{s(s+2\pi \cdot 120)}$                                      |

Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

### 3.3 CONTROLADORES E SISTEMA DE ARMAZENAMENTO

Os controladores do conversor são responsáveis por manter os parâmetros do sistema em valores desejados a partir do projeto do conversor. A adição do sistema de armazenamento conectado ao barramento CC e a injeção/absorção de potência através dele influencia diretamente em um dos parâmetros utilizados durante o projeto do conversor, que é a tensão sob o barramento CC. Quando é injetada energia no barramento CC, a sua tensão tende a subir e o controlador de tensão total no barramento CC precisam atuar, diminuindo o sinal de controle, para regular a tensão ao valor desejado. De forma análoga, quando é absorvida energia no barramento CC, a tensão do barramento tende a cair, sendo necessário um aumento no sinal de controle do controlador de tensão total no barramento CC para regular a tensão.

### 3.4 FLUXO DE POTÊNCIA

Os cálculos utilizados para as definições e medições de potência para sistemas com harmônicos utilizados nesse projeto foram baseados na norma IEEE 1459-2010 (IEEE, 2010). Esse padrão apresenta definições de potência e métodos de medição para sistemas trifásicos com harmônicos, balanceados ou não. Neste trabalho, o principal foco é a análise do fluxo de potência em cada um dos filtros ativos. Para isso, foram feitas análises simplificadas para cada uma das fases, onde os ângulos das fases são medidos referencialmente à tensão da rede nas três fases, ou seja, a tensão com ângulo igual a zero graus é a tensão da rede em uma das fases.

A análise do fluxo de potência é feita para o regime permanente do sistema, após todos os controladores estabilizarem. Para o desenvolvimento das equações foram estabelecidos que a referência senoidal para a tensão da microrrede está sincronizada com a tensão de fase da rede. Sendo assim, o termo fundamental de potência em cada um dos filtros ativos pode ser definido através das equações (21), (22), (23), (24), (25) e (26).

X é o sufixo para identificar a fase do sistema (A, B ou C).  $P_{1fsX}$ ,  $Q_{1fsX}$  e  $S_{1fsX}$  são os valores de potência ativa, reativa e aparente, respectivamente, do filtro série.  $P_{1fpX}$ ,  $Q_{1fpX}$  e  $S_{1fpX}$  são os fluxos de potência ativa, reativa e aparente, respectivamente, do filtro paralelo.  $V_{rdX}$  é a tensão eficaz da rede em uma fase,  $V_{rdT}$  é a soma algébrica das tensões eficazes de todas as fases da rede e  $V_{\mu rdX}$  é a tensão eficaz da microrrede.  $S_{\mu rdT}$  é a potência aparente total da microrrede,  $P_{saT}$  é a potência ativa total do sistema de armazenamento conectado ao barramento CC.  $I_{\mu rdX}$  é a corrente eficaz da microrrede em uma fase e o ângulo  $\phi_{\mu rdX}$  é referente ao defasamento da corrente e da tensão da microrrede em uma fase.

$$P_{1fsX}(V_{rdX}, P_{saT}) = \frac{[S_{\mu rdT} \cdot \cos(\phi_{\mu rdX}) - P_{saT}]}{V_{rdT}} (V_{rdX} - V_{\mu rdX}) \quad (21)$$

$$Q_{1fsX} = 0 \quad (22)$$

$$S_{1fsX}(V_{rdX}, P_{saT}) = \sqrt{P_{fsX}(V_{rdX}, P_{saT})^2 + Q_{fsX}^2} \quad (23)$$

$$P_{1fpX}(V_{rdX}, P_{saT}) = [S_{\mu rdT} \cdot \cos(\phi_{\mu rdX}) - P_{saT}] \frac{V_{\mu rdT}}{V_{rdT}} - V_{\mu rdX} \cdot I_{\mu rdX} \cdot \cos(\phi_{\mu rdX}) \quad (24)$$

$$Q_{1fpX} = V_{\mu rdX} \cdot I_{\mu rdX} \cdot \sin(\phi_{\mu rdX}) \quad (25)$$

$$S_{1fpX}(V_{rdX}, P_{saT}) = \sqrt{P_{fpX}(V_{rdX}, P_{saT})^2 + Q_{fpX}^2} \quad (26)$$

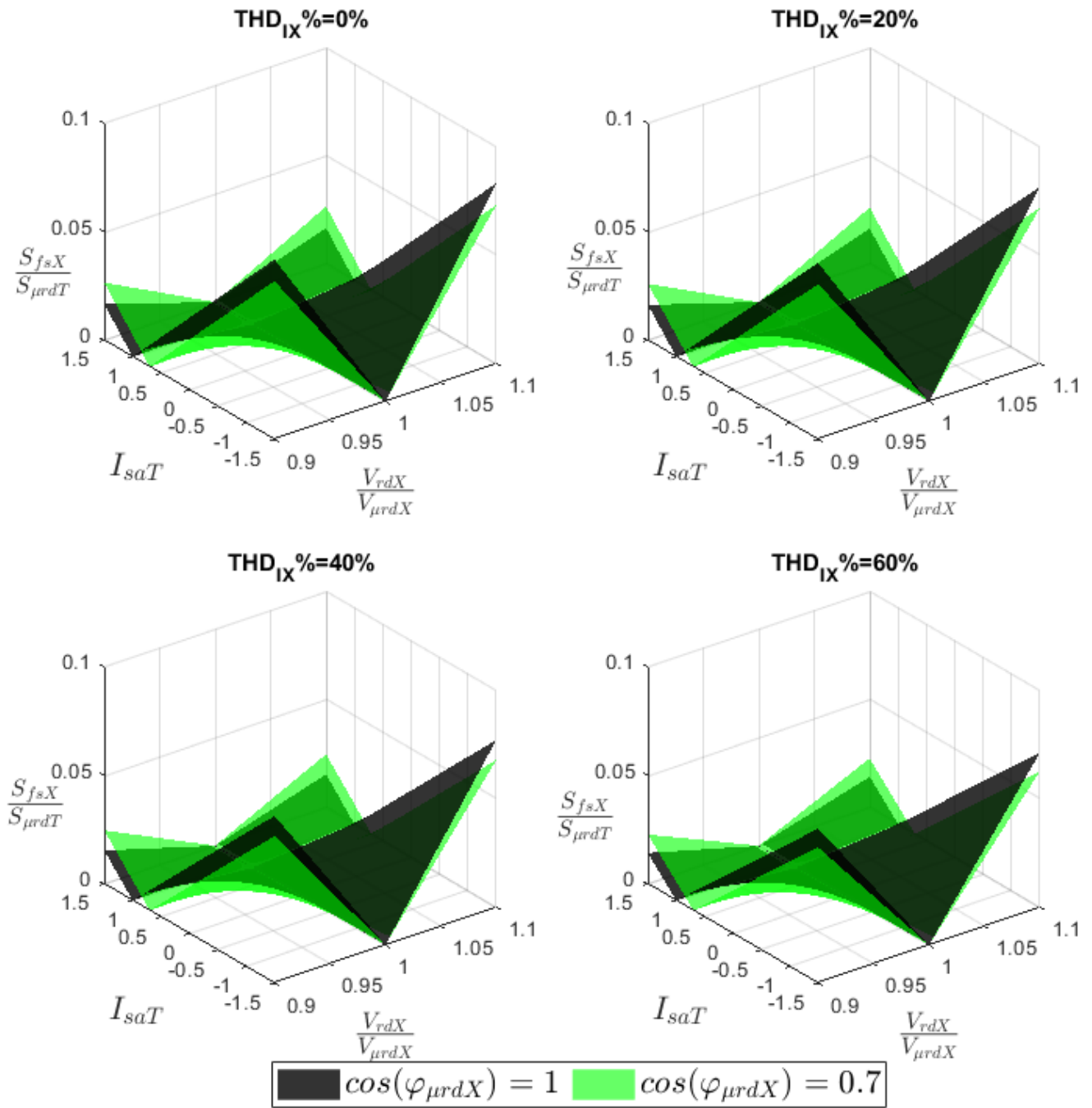
Essas deduções são válidas para cargas lineares e sem distorções harmônicas conectadas à microrrede, que pode não ser condizente com as situações reais. Para isso, baseado nas análises de (SILVA, Dezembro, 2001), foram incorporadas as taxas de distorções harmônicas nas correntes das cargas de cada fase para descrever o fluxo de potência nos filtros ativos do sistema de maneira mais abrangente. As equações que melhor descrevem o fluxo de potência nos filtros ativos do conversor são as (27) e (28).

$$S_{fsX}(V_{rdX}, P_{saT}) = \frac{S_{1fsX}(V_{rdX}, P_{saT})}{\sqrt{1 + THD_{IX}^2}} \quad (27)$$

$$S_{fpX}(V_{rdX}, P_{saT}) = \frac{S_{1fpX}(V_{rdX}, P_{saT})}{\sqrt{1 + THD_{IX}^2}} \quad (28)$$

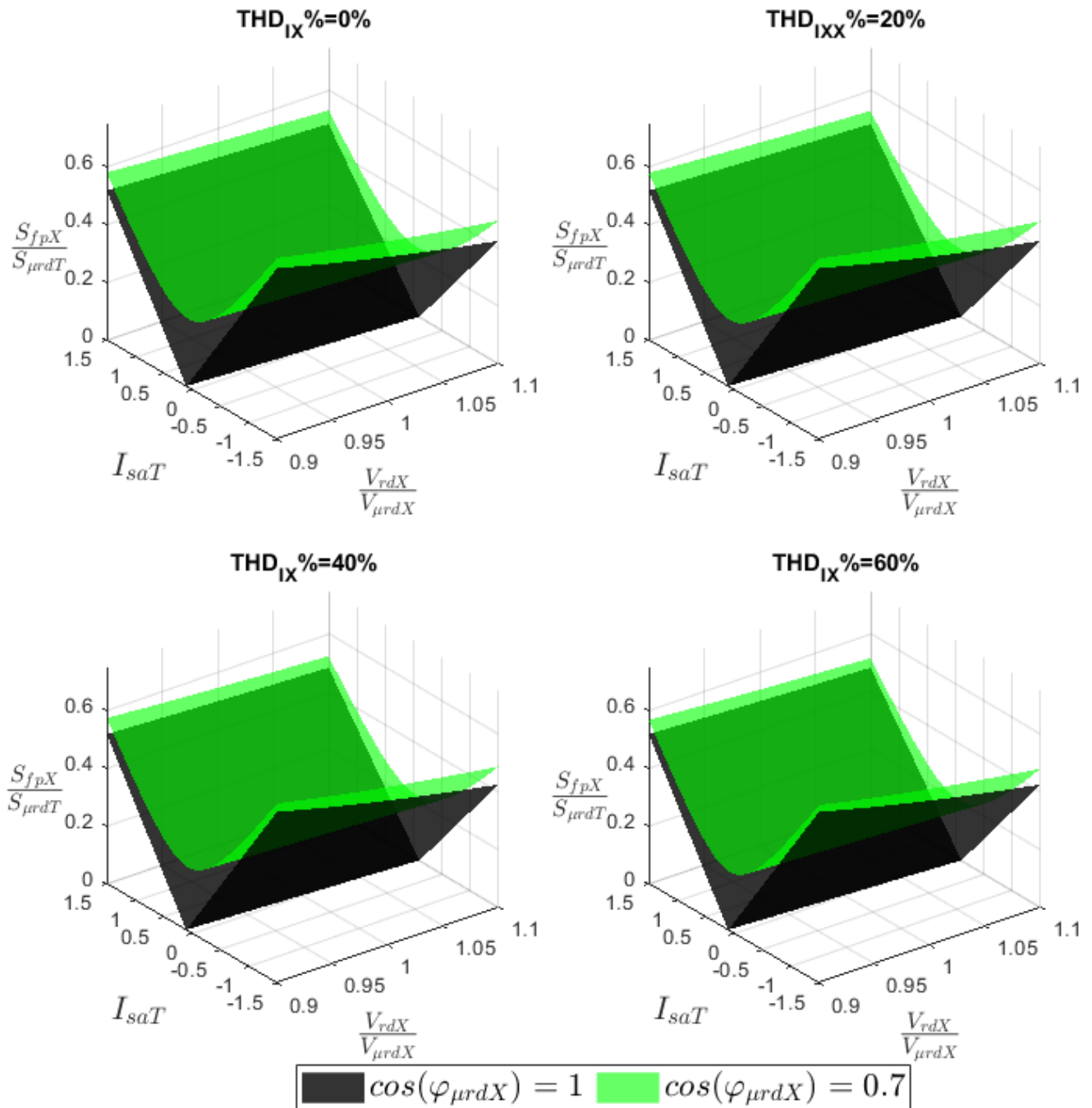
Fazendo uma variação de  $V_{rdX}$  e  $P_{saT}$ , é possível encontrar a superfície que descreve o fluxo de potência sobre os filtros para diferentes valores da taxa de distorção harmônica na corrente da carga da microrrede. Essas superfícies foram feitas para os valores de  $THD_I$  de 0%, 20%, 40% e 60% e são apresentadas nas figuras 9 e 10. Os valores de  $P_{saT}$  estão em p.u., onde 1 p.u. é a potência aparente total da microrrede.

Figura 9 – Valores teóricos da relação entre potência sobre uma fase do FAS e potência total da microrrede para diferentes valores de distorções harmônicas de corrente na carga de uma fase da microrrede, variando a potência do sistema de armazenamento e a tensão da rede



Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

Figura 10 – Valores teóricos da relação entre potência sobre uma fase do FAP e potência total da microrrede para diferentes valores de distorções harmônicas de corrente na carga de uma fase da microrrede, variando a potência do sistema de armazenamento e a tensão da rede



Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

Percebe-se que os fluxos de potência são muito maiores sobre o FAP, ou seja, para o condicionador iUPQC funcionando nas situações apresentadas, devem ser utilizados os valores de fluxo de potência sobre o FAP para fazer o dimensionamento dos componentes utilizados para implementação experimental.

O fluxo de potência sobre o FAS é pequeno e a direção desse fluxo varia tanto com a variação da tensão da rede como com a potência injetada através do sistema de armazenamento. Quando a tensão da rede é menor do que a tensão da microrrede, o fluxo de potência está em um sentido (do barramento CC para o transformador de acoplamento) e quando a tensão da rede é maior do que tensão da microrrede o fluxo de potência está no sentido oposto. O ponto de inversão do sentido do fluxo, de acordo com a variação da potência do sistema de armazenamento varia de acordo com o ângulo de carga conectada à fase em que se está sendo analisado o fluxo de potência. O ponto de inversão é exatamente onde a potência fornecida pelo sistema de armazenamento é igual ao cosseno do ângulo da carga daquela fase da microrrede ( $I_{saT} = \cos(\varphi_{\mu rdX})$ ).

Como toda a potência reativa do condicionador é processada pelo FAP nas situações apresentadas, a amplitude mínima do fluxo de potência em cada fase do FAP depende diretamente do ângulo de carga de cada fase da microrrede, onde quanto maior for o ângulo, maior será o fluxo de potência mínimo processado pelo FAP.

### 3.5 MODO ILHADO

As equações e figuras apresentadas para o fluxo de potência sobre os filtros ativos são válidas para todas as operações feitas pelo conversor no modo conectado à rede, mas não são válidas para o conversor operando no modo ilhado. Para que o conversor continue funcionando de forma desejada no modo ilhado, é preciso garantir que o filtro ativo série continue controlando o desequilíbrio de tensão dos capacitores do barramento CC e, para isso, é feito um curto circuito entre os dois terminais do enrolamento primário do transformador de acoplamento do iUPQC (ou pode ser feito nos dois terminais do enrolamento secundário). Com isso, é conectado o neutro entre os capacitores do barramento CC diretamente à malha de controle do FAS. No entanto, ao ser feito o curto circuito entre os terminais de um dos enrolamentos do transformador de acoplamento do FAS, a tensão sob o filtro ativo série é sempre nula e consequentemente, o fluxo de potência sobre o filtro ativo série também é sempre nulo. Logo, todo o fluxo de potência no modo ilhado é processado pelo filtro ativo paralelo. Essa situação pode ser analisada através da Figura 8 com a chave  $sw_m$  no estado oposto aos que se encontram na figura, ou seja, com um curto entre os enrolamentos primário e secundário do transformador de acoplamento, tensão da rede desconectada do sistema e malha de controle de tensão total no barramento CC desabilitada.

O conversor perde capacidade de processamento de potência devido à toda a potência ser processada por apenas um de seus filtros ativos, o que limita as aplicações em mais altas potências, porém continua funcionando de forma adequada para uma situação de queda de

energia, podendo alimentar a microrrede apenas através do sistema de armazenamento conectado ao barramento CC.

### 3.6 OPERAÇÕES PREVISTAS

O modelo de controle apresentado foi validado para as situações apresentadas por SANTOS (2012) e a proposta a ser analisada por este trabalho é a influência do sistema de armazenamento conectado ao barramento CC do conversor operando como interface para uma microrrede.

Dentre as possíveis situações em que o conversor iUPQC operando como interface para microrredes com armazenamento de energia pode se encontrar, apresentadas no capítulo anterior, são previstas e estudadas todas as que envolvem o sistema de armazenamento e que fazem sentido de serem implementadas.

Sendo assim, observando as equações que descrevem o comportamento dos fluxos de potência nos filtros ativos do conversor, pode-se notar que, no caso adotado em que as tensões da rede e da microrrede são iguais em fase e amplitude, o filtro ativo série não processará nenhuma potência ativa e nem reativa. Para fazer uma análise do fluxo de potência no filtro ativo série, são estudados casos em que há sobretensão ou subtensão na rede e analisar como a diferença de tensão entre a rede e a microrrede afetam o fluxo de potência dos dois filtros ativos.

A Tabela 5 mostra as situações que são abordadas e avaliadas através de simulações numéricas e aplicações práticas, a fim de comparar com as figuras 9 e 10 a fim de validar as superfícies obtidas.

As situações com índice  $N1 = 1$  são referentes aos pontos de operação onde a amplitude da tensão da rede da concessionária está abaixo da tensão da microrrede (subtensão), as situações com  $N1 = 2$  são referentes aos pontos de operação onde a amplitude da tensão da rede é igual à amplitude da tensão da microrrede e os pontos de operação com  $N1 = 3$  são referentes aos casos onde a amplitude da tensão da rede é maior do que a amplitude da tensão da microrrede (sobretensão).

O índice  $N2$  refere-se à potência fornecida ou absorvida pelo sistema de armazenamento em cada ponto de operação, onde  $N2 = 1$  é feita uma grande absorção de potência no sistema de armazenamento, simulando um caso em que ele esteja sendo carregado através da rede, por exemplo. Nos pontos de operação com  $N2 = 2$  é também é feita uma absorção de energia através do barramento CC, mas de menor amplitude, simulando uma situação onde a microrrede possui uma geração suficiente para alimentar as suas cargas e gerar energia excedente para carregar o sistema de armazenamento. Para  $N2 = 3$ , não é feita nem absorção e nem injeção de potência através do barramento CC. Para os pontos de operação com  $N2 = 4$ , é feita uma pequena injeção de potência através do sistema de armazenamento, simulando um caso em que a microrrede seja parcialmente alimentada pelo sistema de armazenamento e parcialmente alimentada pela rede ou geração da microrrede. E por fim, para  $N2 = 5$ , é feita uma grande injeção de potência no

Tabela 5 – Situações a serem abordadas usando  $\cos(\varphi_{\mu rdX}) = 0,7$ 

| N1 | N2 | $\frac{V_{rdef}}{V_{\mu rdef}}$ | $P_{saT}$ | $\frac{S_{fsX}}{S_{\mu rdX}}$ | $\frac{S_{fpX}}{S_{\mu rdX}}$ |
|----|----|---------------------------------|-----------|-------------------------------|-------------------------------|
| 1. | 1  | 0,9                             | -1.5      | -0,088                        | 0,628                         |
|    | 2  |                                 | -0.5      | -0,051                        | 0,318                         |
|    | 3  |                                 | 0         | -0,032                        | 0,239                         |
|    | 4  |                                 | 0.5       | -0,014                        | 0,286                         |
|    | 5  |                                 | 1.5       | 0,023                         | 0,581                         |
| 2. | 1  | 1                               | -1.5      | 0                             | 0,554                         |
|    | 2  |                                 | -0.5      | 0                             | 0,291                         |
|    | 3  |                                 | 0         | 0                             | 0,238                         |
|    | 4  |                                 | 0.5       | 0                             | 0,291                         |
|    | 5  |                                 | 1.5       | 0                             | 0,554                         |
| 3. | 1  | 1.1                             | -1.5      | 0,072                         | 0,494                         |
|    | 2  |                                 | -0.5      | 0,041                         | 0,271                         |
|    | 3  |                                 | 0         | 0,026                         | 0,239                         |
|    | 4  |                                 | 0.5       | 0,011                         | 0,294                         |
|    | 5  |                                 | 1.5       | -0,019                        | 0,532                         |

Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

sistema, suficiente para alimentar a microrrede e ainda fornecer energia para a rede através do sistema de armazenamento conectado ao barramento CC.

O parâmetro de potência utilizado para as simulações e para as medições práticas é consideravelmente menor do que o valor nominal projetado para o conversor pois os resultados são exibidos em p.u. e não mudam de acordo com o nível de potência utilizado. Os parâmetros utilizados são apresentados na Tabela 6.

Tabela 6 – Parâmetros utilizados para obter resultados do iUPQC

| Parâmetro                           | Valor                           |
|-------------------------------------|---------------------------------|
| Potência de Saída Trifásica         | $S_{\mu rdT} = 1200 \text{ VA}$ |
| Tensão do Barramento CC             | $V_{CC} = 400 \text{ V}$        |
| Tensão eficaz de fase da microrrede | $V_{\mu rdef} = 127 \text{ V}$  |
| Frequência de comutação             | $f_s = 20 \text{ kHz}$          |
| Frequência da rede                  | $f_{rd} = 60 \text{ Hz}$        |

Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

Com esses valores é possível montar uma tabela completa de valores a serem obtidos e a serem obtidos ao unir as tabelas 5 e 6 a fim de encontrar os valores práticos a serem medidos fora da unidade p.u.. O resultado é apresentado na Tabela 7.

Tabela 7 – Valores teóricos esperados usando  $\cos(\varphi_{\mu rdX}) = 0,7$ 

| $N_1$     | $N_2$    | $V_{\mu rdef}$ | $V_{rdef}$ | $P_{saT}$ [W] | $S_{fsX}$ [VA] | $S_{fpX}$ [VA] |
|-----------|----------|----------------|------------|---------------|----------------|----------------|
| <b>1.</b> | <b>1</b> | 127 V          | 114,3 V    | -1800         | -105,16        | 753,985        |
|           | <b>2</b> |                |            | -600          | -60,71         | 381,809        |
|           | <b>3</b> |                |            | 0             | -38,49         | 287,346        |
|           | <b>4</b> |                |            | 600           | -16,27         | 343,691        |
|           | <b>5</b> |                |            | 1800          | 28,18          | 696,800        |
| <b>2.</b> | <b>1</b> | 127 V          | 127 V      | -1800         | 0              | 664,530        |
|           | <b>2</b> |                |            | -600          | 0              | 348,712        |
|           | <b>3</b> |                |            | 0             | 0              | 285,657        |
|           | <b>4</b> |                |            | 600           | 0              | 348,712        |
|           | <b>5</b> |                |            | 1800          | 0              | 664,530        |
| <b>3.</b> | <b>1</b> | 127 V          | 139,7 V    | -1800         | 86,04          | 593,296        |
|           | <b>2</b> |                |            | -600          | 49,67          | 325,653        |
|           | <b>3</b> |                |            | 0             | 31,49          | 286,789        |
|           | <b>4</b> |                |            | 600           | 13,31          | 352,933        |
|           | <b>5</b> |                |            | 1800          | -23,05         | 638,386        |

Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

### 3.7 CONCLUSÕES DO CAPÍTULO

Durante esse capítulo foi apresentada a estrutura de potência utilizada para o iUPQC e as especificações que o conversor deve atender. Depois de projetada a estrutura de potência do conversor, foi apresentado o modelo de controle aplicado.

Cada uma das funções de transferência dos sistemas foi mostrada junto com seus respectivos sensores e controladores, de forma a atender os requisitos apresentados, como foi validado por SANTOS (2012).

Também foram desenvolvidos modelos matemáticos capazes de descrever o fluxo de potência nos filtros ativos do conversor em seus modos de operação conectado à rede e ilhado, quando há envolvimento do sistema de armazenamento no sistema, possibilitando então a comparação entre os modelos matemáticos, simulações numéricas e resultados práticos, que são apresentados na sequência deste trabalho.

## 4 SIMULAÇÕES NUMÉRICAS

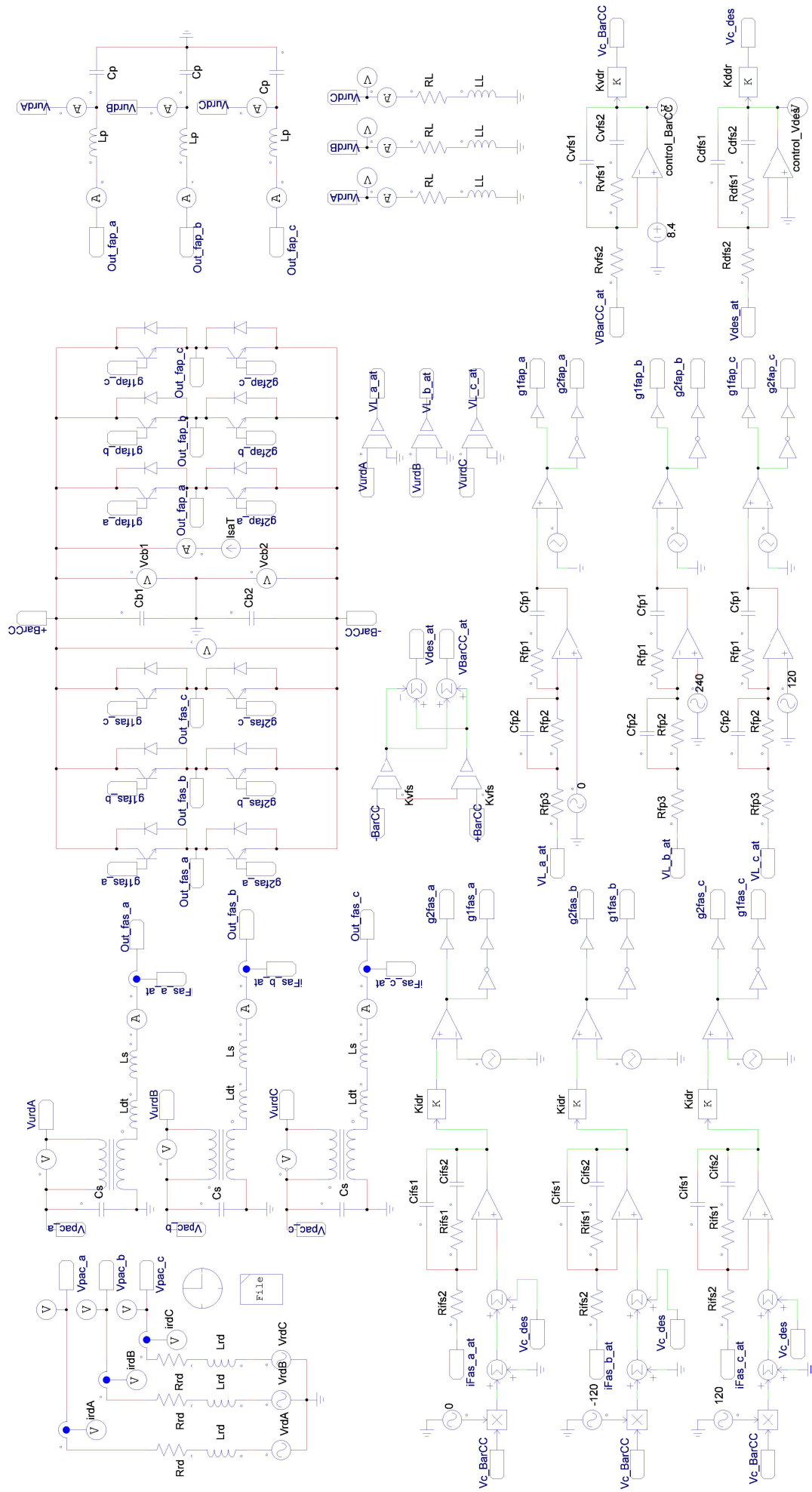
Este capítulo tem como objetivo verificar e validar o modelo matemático proposto no capítulo anterior para descrever o fluxo de potência nos filtros ativos do condicionador de energia funcionando junto com o sistema de armazenamento. Desta forma, são apresentados resultados numéricos que simulam as situações apresentadas na Tabela 7.

As simulações numéricas foram realizadas através do *software PSIM 2021a*.

### 4.1 ANÁLISE TRANSITÓRIA

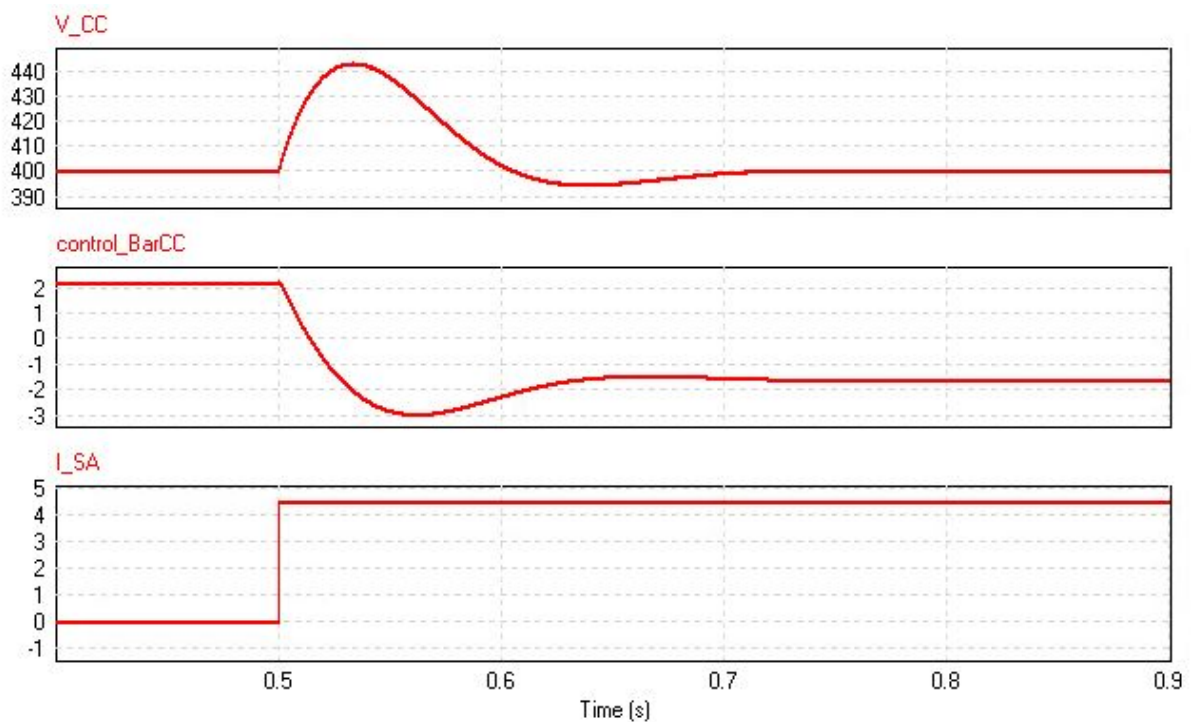
Para melhor compreensão do funcionamento do conversor e seu sistema de controle, é feita uma análise da transição entre dois pontos de operação para analisar o comportamento dos controladores em função da variação de  $P_{saT}$ . A Figura 12 mostra a tensão do barramento CC e o sinal do controlador de tensão do barramento CC durante a transição do ponto de operação 1.3 e 1.5, onde é feita a injeção de energia no barramento CC, através de um degrau de corrente com amplitude de 4,5 A aplicado a partir de 0,5 s. Os parâmetros utilizados para as simulações foram  $T_{step1}$  de 100 ns,  $T_{print}$  de 0,4 s e  $T_{total}$  de 0,9 s. As estruturas de potência e de controle utilizadas para as simulações são apresentadas na Figura 11.

Figura 11 – Estrutura utilizada para as simulações numéricas



A transição entre os pontos de operação 1.3 e 1.5 é apresentado na Figura 12.

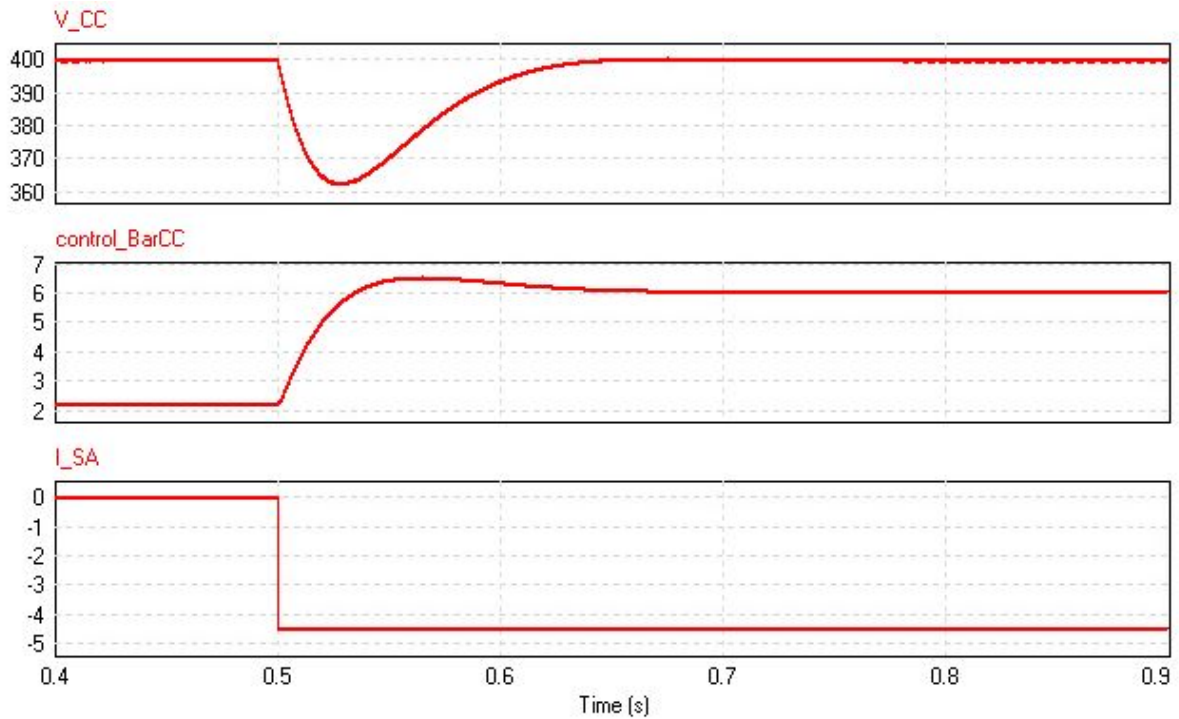
Figura 12 – Transição entre os modos de operação 1.3 e 1.5



Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

É possível notar que, ao iniciar a injeção de energia no barramento CC, a tensão do barramento começa a subir e, conseqüentemente, o sinal do controlador de tensão do barramento CC diminui proporcionalmente ao aumento da tensão, a fim de manter a tensão em 400 V. De forma análoga, na Figura 13 é mostrada a tensão do barramento CC e o sinal do controlador de tensão do barramento CC durante a transição entre os modos de operação 1.3 e 1.1, onde é iniciada a absorção de energia através do barramento CC, através de um degrau de corrente com amplitude de -4,5 A.

Figura 13 – Transição entre os modos de operação 1.3 e 1.1



Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

Neste caso, quando é iniciada a absorção de energia através do barramento CC, a tensão do barramento começa a cair e, consequentemente, o sinal do controlador de tensão do barramento CC aumenta proporcionalmente à queda de tensão, a fim de manter a tensão em 400 V.

É importante notar que essas transições ocorrem quando se começa a injetar ou absorver energia no sistema através do barramento CC, que é o necessário para fazer o deslocamento de consumo no tempo. Quando se deseja diminuir a absorção de energia da rede, é injetada potência no barramento CC ( $P_{saT} > 0$ , simulados nos pontos de operação terminados em 4 e 5).

## 4.2 ANÁLISE EM REGIME PERMANENTE

Nessa seção são analisados de forma numérica os fluxos de potência sob os filtros ativos série e paralelo. Para isso foram utilizados como parâmetros das simulações  $T_{step2}$  de 1  $\mu$  ns,  $T_{print}$  de 2,4 s e  $T_{total}$  de 2,5 s.

### 4.2.1 Filtro Ativo Série

Será analisado o fluxo de potência sobre o filtro ativo série nos 15 pontos de operação apresentados e, medidos os valores numéricos para serem comparados com os valores gerados na superfície com  $THD_I\% = 0\%$  e  $\cos(\phi_{\mu r d X}) = 0,7$  apresentados na Figura 9. Os valores de fluxo de potência são calculados de acordo com os valores da tensão  $V_{fsX}$  e da corrente  $I_{fsX}$ , nas três fases do sistema. Os valores obtidos de maneira numérica em cada um dos 15 pontos de

operação apresentados são mostrados na Tabela 8.

Tabela 8 – Valores numéricos de fluxo de potência sob o filtro ativo série

| $N_1$     | $N_2$    | $P_{saT}$<br>[W] | $S_{fsA}$<br>[VA] | $S_{fsB}$<br>[VA] | $S_{fsC}$<br>[VA] | $S_{\mu rdA}$<br>[VA] | $S_{\mu rdB}$<br>[VA] | $S_{\mu rdC}$<br>[VA] |
|-----------|----------|------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| <b>1.</b> | <b>1</b> | -1800            | 101,202           | 101,190           | 101,198           | 400,853               | 400,843               | 400,839               |
|           | <b>2</b> | -600             | 55,892            | 55,885            | 55,891            | 400,978               | 400,971               | 400,984               |
|           | <b>3</b> | 0                | 33,432            | 33,432            | 33,439            | 401,059               | 401,054               | 401,063               |
|           | <b>4</b> | 600              | 11,806            | 11,807            | 11,803            | 401,123               | 401,116               | 401,088               |
|           | <b>5</b> | 1800             | 36,574            | 36,571            | 36,574            | 401,247               | 401,235               | 401,238               |
| <b>2.</b> | <b>1</b> | -1800            | 16,739            | 16,766            | 16,779            | 400,883               | 400,882               | 400,865               |
|           | <b>2</b> | -600             | 9,242             | 9,240             | 9,244             | 401,012               | 401,008               | 401,003               |
|           | <b>3</b> | 0                | 5,598             | 5,571             | 5,601             | 401,066               | 401,064               | 401,064               |
|           | <b>4</b> | 600              | 2,049             | 2,054             | 2,054             | 401,11                | 401,111               | 401,102               |
|           | <b>5</b> | 1800             | 6,045             | 6,085             | 6,052             | 401,241               | 401,239               | 401,232               |
| <b>3.</b> | <b>1</b> | -1800            | 81,407            | 81,395            | 81,392            | 400,899               | 400,903               | 400,891               |
|           | <b>2</b> | -600             | 44,949            | 44,946            | 44,950            | 401,007               | 401,010               | 400,998               |
|           | <b>3</b> | 0                | 26,981            | 26,977            | 26,975            | 401,062               | 401,064               | 401,065               |
|           | <b>4</b> | 600              | 10,103            | 10,107            | 10,106            | 401,116               | 401,118               | 401,098               |
|           | <b>5</b> | 1800             | 29,321            | 29,322            | 29,319            | 401,225               | 401,220               | 401,219               |

Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

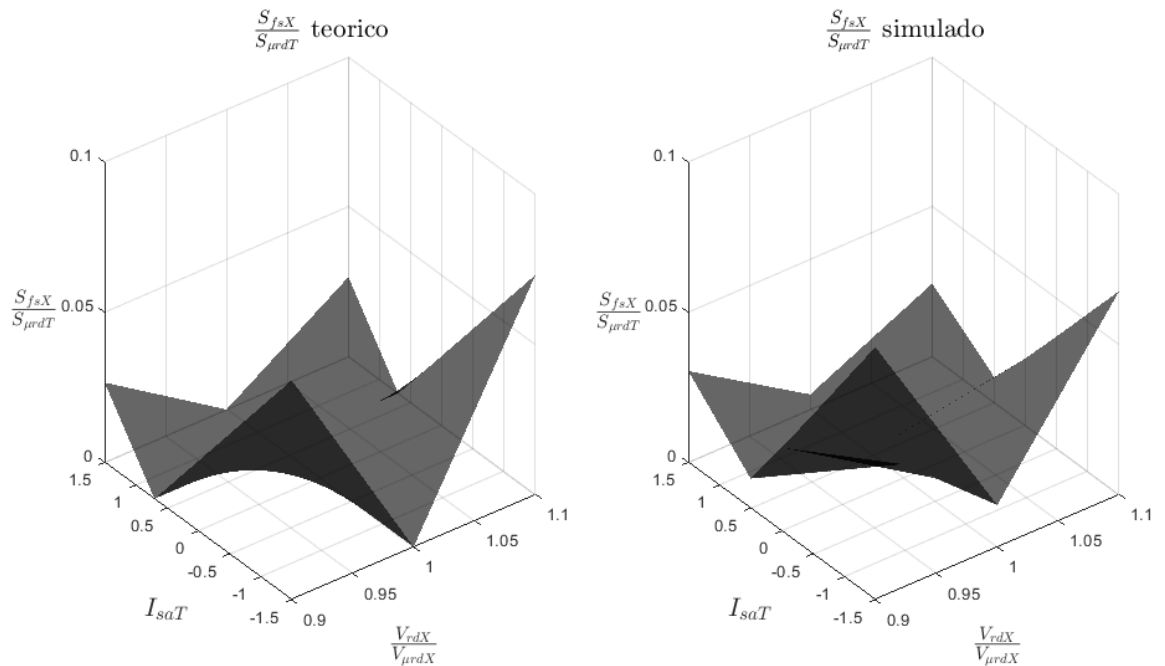
Fazendo a divisão do fluxo de potência obtido em cada fase sobre o filtro ativo série e a potência na carga da microrrede na respectiva fase, tem-se os valores em pu apresentados na Tabela 9 que podem ser comparados aos valores apresentados na Tabela 5.

Tabela 9 – Valores numéricos de fluxo de potência sob o filtro ativo série em pu

| $N_1$     | $N_2$    | $P_{saT}$ | $\frac{S_{fsA}}{S_{\mu rdT}}$ | $\frac{S_{fsB}}{S_{\mu rdT}}$ | $\frac{S_{fsC}}{S_{\mu rdT}}$ |
|-----------|----------|-----------|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|
| <b>1.</b> | <b>1</b> | -1.5      | -0,084                        | -0,084                        | -0,084                        |
|           | <b>2</b> | -0.5      | -0,047                        | -0,047                        | -0,047                        |
|           | <b>3</b> | 0         | -0,028                        | -0,028                        | -0,028                        |
|           | <b>4</b> | 0.5       | -0,010                        | -0,010                        | -0,010                        |
|           | <b>5</b> | 1.5       | 0,030                         | 0,030                         | 0,030                         |
| <b>2.</b> | <b>1</b> | -1.5      | 0,014                         | 0,014                         | 0,014                         |
|           | <b>2</b> | -0.5      | 0,008                         | 0,008                         | 0,008                         |
|           | <b>3</b> | 0         | 0,005                         | 0,005                         | 0,005                         |
|           | <b>4</b> | 0.5       | 0,002                         | 0,002                         | 0,002                         |
|           | <b>5</b> | 1.5       | 0,005                         | 0,005                         | 0,005                         |
| <b>3.</b> | <b>1</b> | -1.5      | 0,068                         | 0,068                         | 0,068                         |
|           | <b>2</b> | -0.5      | 0,038                         | 0,038                         | 0,038                         |
|           | <b>3</b> | 0         | 0,022                         | 0,022                         | 0,022                         |
|           | <b>4</b> | 0.5       | 0,008                         | 0,008                         | 0,008                         |
|           | <b>5</b> | 1.5       | -0,024                        | -0,024                        | -0,024                        |

Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

Os valores absolutos dessa tabela são adicionados ao *software* MATLAB, onde são utilizados para gerar a Figura 14.

Figura 14 – Comparação entre o  $\frac{S_{fsX}}{S_{\mu rdT}}$  teórico e o simulado

Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

#### 4.2.2 Filtro Ativo Paralelo

De forma análoga ao que foi feito nas simulações do FAS, é medido o fluxo de potência sobre o FAP nas 15 situações apresentadas. Os valores de fluxo de potência são calculados de acordo com os valores da tensão  $V_{fpX}$  e da corrente  $I_{fpX}$ , nas três fases do sistema.

Os valores obtidos de maneira numérica em cada um dos 15 pontos de operação apresentados são mostrados na Tabela 10.

Tabela 10 – Valores numéricos de fluxo de potência sob o filtro ativo paralelo

| $N_1$     | $N_2$    | $P_{saT}$<br>[W] | $S_{fpA}$<br>[VA] | $S_{fpB}$<br>[VA] | $S_{fpC}$<br>[VA] | $S_{\mu rdA}$<br>[VA] | $S_{\mu rdB}$<br>[VA] | $S_{\mu rdC}$<br>[VA] |
|-----------|----------|------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| <b>1.</b> | <b>1</b> | -1800            | 758,756           | 758,723           | 758,735           | 400,853               | 400,843               | 400,839               |
|           | <b>2</b> | -600             | 387,047           | 387,037           | 387,041           | 400,978               | 400,971               | 400,984               |
|           | <b>3</b> | 0                | 291,513           | 291,503           | 291,518           | 401,059               | 401,054               | 401,063               |
|           | <b>4</b> | 600              | 344,460           | 344,452           | 344,442           | 401,123               | 401,116               | 401,088               |
|           | <b>5</b> | 1800             | 696,497           | 696,476           | 696,472           | 401,247               | 401,235               | 401,238               |
| <b>2.</b> | <b>1</b> | -1800            | 669,096           | 669,075           | 669,096           | 400,883               | 400,882               | 400,865               |
|           | <b>2</b> | -600             | 354,200           | 354,198           | 354,199           | 401,012               | 401,008               | 401,003               |
|           | <b>3</b> | 0                | 290,191           | 290,201           | 290,21            | 401,066               | 401,064               | 401,064               |
|           | <b>4</b> | 600              | 350,539           | 350,541           | 350,532           | 401,11                | 401,111               | 401,102               |
|           | <b>5</b> | 1800             | 665,525           | 665,511           | 665,503           | 401,241               | 401,239               | 401,232               |
| <b>3.</b> | <b>1</b> | -1800            | 598,147           | 598,132           | 598,14            | 400,899               | 400,903               | 400,891               |
|           | <b>2</b> | -600             | 331,625           | 331,628           | 331,627           | 401,007               | 401,010               | 400,998               |
|           | <b>3</b> | 0                | 291,785           | 291,785           | 291,779           | 401,062               | 401,064               | 401,065               |
|           | <b>4</b> | 600              | 355,420           | 355,415           | 355,409           | 401,116               | 401,118               | 401,098               |
|           | <b>5</b> | 1800             | 639,708           | 639,697           | 639,69            | 401,225               | 401,220               | 401,219               |

Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

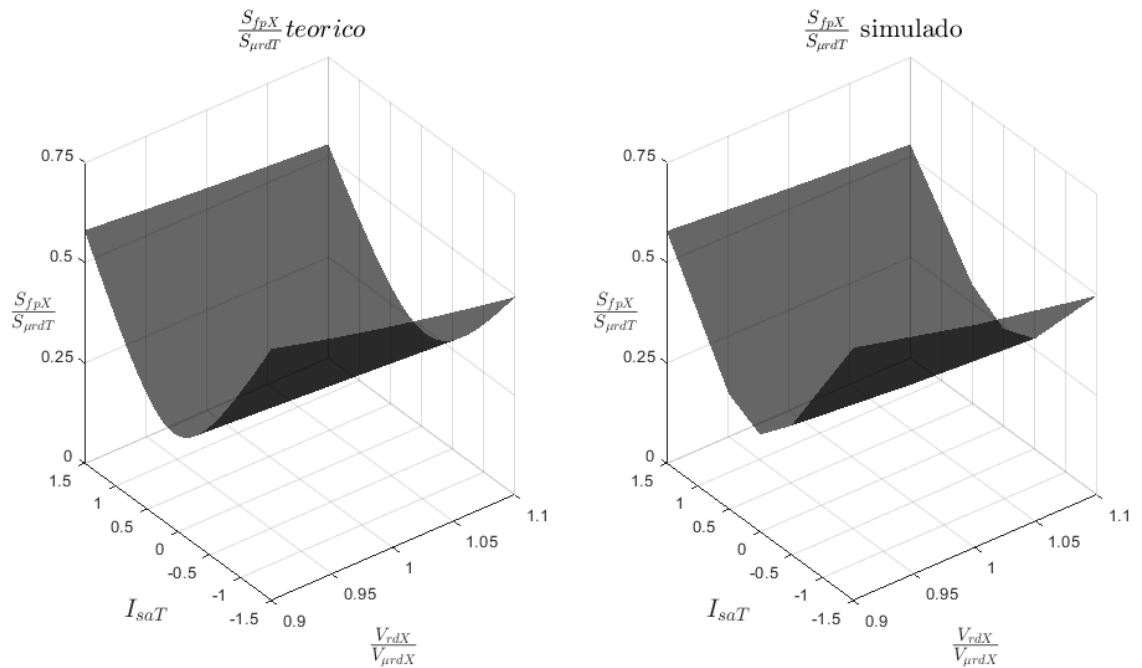
Fazendo a divisão do fluxo de potência obtido em cada fase sobre o filtro ativo paralelo e a potência na carga da microrrede na respectiva fase, tem-se os valores em pu apresentados na Tabela 11 que podem ser comparados aos valores apresentados na Tabela 5.

Tabela 11 – Valores numéricos de fluxo de potência sob o filtro ativo paralelo em pu

| $N_1$     | $N_2$    | $P_{saT}$ | $\frac{S_{fpA}}{S_{\mu rdT}}$ | $\frac{S_{fpB}}{S_{\mu rdT}}$ | $\frac{S_{fpC}}{S_{\mu rdT}}$ |
|-----------|----------|-----------|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|
| <b>1.</b> | <b>1</b> | -1.5      | 0,631                         | 0,631                         | 0,631                         |
|           | <b>2</b> | -0.5      | 0,322                         | 0,322                         | 0,322                         |
|           | <b>3</b> | 0         | 0,242                         | 0,242                         | 0,242                         |
|           | <b>4</b> | 0.5       | 0,286                         | 0,286                         | 0,286                         |
|           | <b>5</b> | 1.5       | 0,579                         | 0,579                         | 0,579                         |
| <b>2.</b> | <b>1</b> | -1.5      | 0,556                         | 0,556                         | 0,556                         |
|           | <b>2</b> | -0.5      | 0,294                         | 0,294                         | 0,294                         |
|           | <b>3</b> | 0         | 0,241                         | 0,241                         | 0,241                         |
|           | <b>4</b> | 0.5       | 0,291                         | 0,291                         | 0,291                         |
|           | <b>5</b> | 1.5       | 0,553                         | 0,553                         | 0,553                         |
| <b>3.</b> | <b>1</b> | -1.5      | 0,497                         | 0,497                         | 0,497                         |
|           | <b>2</b> | -0.5      | 0,276                         | 0,276                         | 0,276                         |
|           | <b>3</b> | 0         | 0,242                         | 0,242                         | 0,242                         |
|           | <b>4</b> | 0.5       | 0,295                         | 0,295                         | 0,295                         |
|           | <b>5</b> | 1.5       | 0,532                         | 0,532                         | 0,532                         |

Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

Esses valores são adicionados ao *software* MATLAB, onde são utilizados para gerar a Figura 15.

Figura 15 – Comparação entre o  $\frac{S_{fpX}}{S_{\mu rdT}}$  teórico e o simulado

Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

### 4.3 CONCLUSÕES DO CAPÍTULO

Neste capítulo foram implementadas as situações propostas matematicamente no capítulo 3 ao *software* PSIM v2021a. A partir do circuito implementado, foram analisados os fluxos de potência sobre os dois filtros ativos do condicionador de energia durante a operação em cada uma das situações propostas. Com os valores coletados das simulações foram possíveis gerar figuras que descrevessem o comportamento dos fluxos de potência em cada um dos filtros ativos do condicionador iUPQC.

A partir das figuras obtidas, foi possível fazer comparações ao modelo matemático que seria o comportamento ideal esperado pelo condicionador. Os resultados obtidos foram muito semelhantes aos obtidos a partir dos modelos matemáticos, mas é possível notar algumas diferenças em alguns pontos de operação. Uma das diferenças mais notáveis é o fluxo de potência sobre o filtro série nos pontos de operação 2.x, onde o fluxo de potência esperado através do modelo matemático era nulo e, nas simulações, apesar de pequeno, não é nulo. Esse comportamento se deve ao fato de que, para o fluxo de potência ser nulo no FAS é necessário que a tensão de entrada da rede e a tensão da microrrede sejam exatamente iguais em amplitude e fase. Apesar de o controle manter essas duas tensões em níveis muito semelhantes, em valores instantâneos elas não são sempre iguais, devido ao fato de que a tensão da microrrede é um sinal controlado a partir de elementos comutadores, ou seja, eles controlam o valor eficaz a partir de comutações que geram oscilações no sinal controlado. Então, mesmo que a tensão média no filtro ativo série seja nula, o seu valor eficaz não é nulo e faz com que haja um fluxo de potência sobre o filtro.

Outra diferença notável na figura 14 entre o fluxo de potência teórico e o obtido através das simulações é que, na superfície obtida através das simulações, o fluxo de potência não é nulo em função da potência fornecida/absorvida pelo sistema de armazenamento. Isso acontece devido à baixa resolução da superfície e, para que fossem analisados de forma mais precisa o comportamento dos fluxos de potência nos filtros ativos do condicionador, seriam necessárias mais simulações em diferentes pontos de operação.

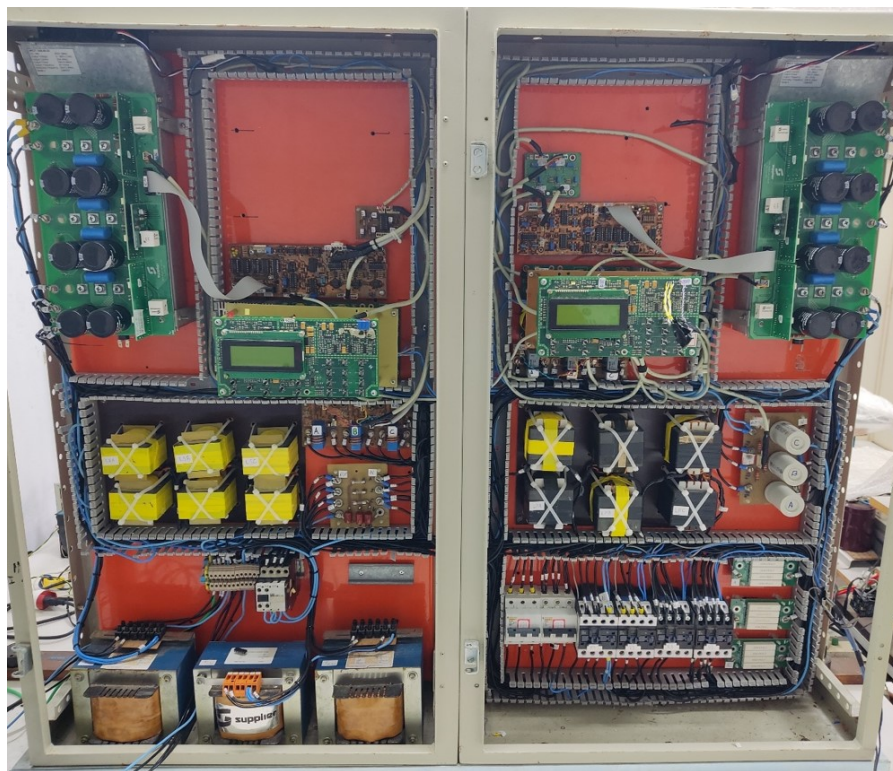
## 5 IMPLEMENTAÇÃO E RESULTADOS EXPERIMENTAIS

Neste capítulo serão apresentados os resultados experimentais obtidos a partir da implementação do protótipo do conversor proposto nos capítulos anteriores, a fim de validar os resultados obtidos na forma teórica e numérica.

### 5.1 ESTRUTURA

O conversor foi construído dentro do LAPEI (Laboratório de Pesquisa em Eletrônica Industrial) que fica localizado no nPEE (Núcleo de Processamento de Energia) da Universidade do Estado de Santa Catarina. Ele foi montado em um painel elétrico de duas portas, onde as estruturas dos filtros ativos série e paralelo foram parcialmente separadas de forma que os componentes referentes ao filtro ativo série ficassem localizados na porta esquerda do painel e os componentes referentes ao filtro ativo paralelo ficassem localizados na porta direita do painel. A Figura 16 apresenta a estrutura do conversor iUPQC implementado.

Figura 16 – Protótipo do iUPQC implementado



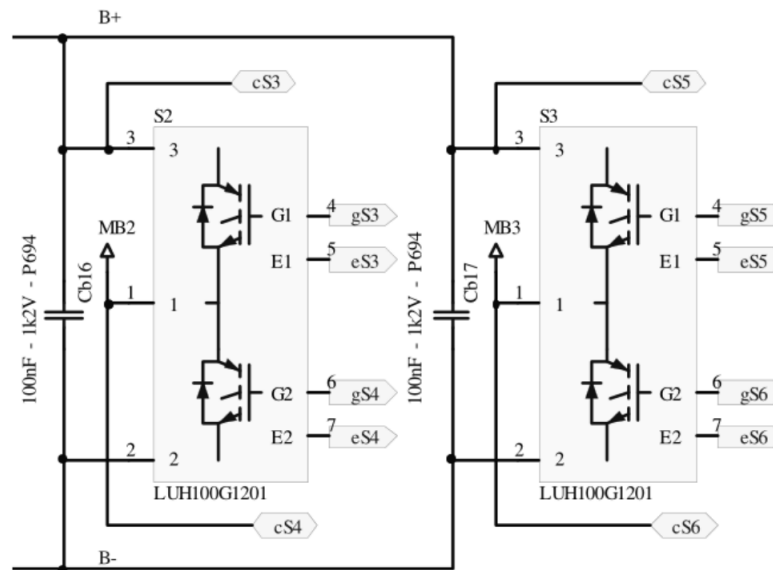
Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

#### 5.1.1 Unidade de potência

O módulo de potência utilizado na construção do protótipo foi o SPCIT 1000-60-20 da Supplier. Foram utilizadas duas unidades, uma para o Filtro Ativo Série e outra para o Filtro Ativo Paralelo. Esse inversor possui três braços com IGBTs conectados em topologia meia ponte.

Esse inversor suporta até 10 kVA de potência, 600V de tensão no barramento CC e frequência de comutação de até 20 kHz. Cada braço do inversor é equipado com drivers DRO100D25A, que possuem isolação ótica, proteção contra curto-circuito, intertravamento (interlock) com configuração de tempo morto e proteção contra subtensão na alimentação do secundário dos drivers (SUPPLIER, 2017). As figuras 17 e 18 mostram o esquemático do módulo e a imagem do inversor.

Figura 17 – Esquemático do módulo inversor SPCIT 1000-60-20



Fonte: (SUPPLIER, 2017)

Figura 18 – SPCIT 1000-60-20



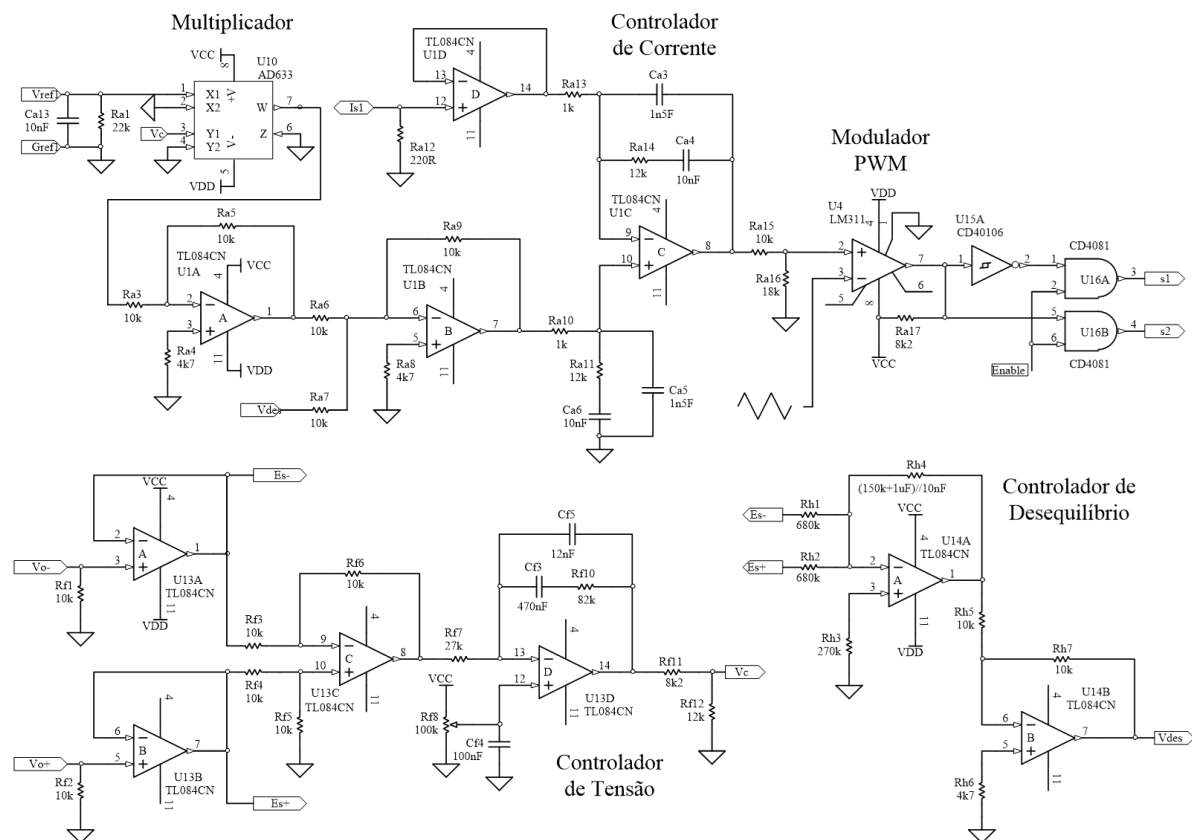
Fonte: (SUPPLIER, 2017)

### 5.1.2 Comando do FAS e FAP

O controle dos filtros ativos é feito através de circuitos analógicos de comando, que foram projetados por SANTOS (2012), a partir da utilização de amplificadores operacionais, resistores, capacitores, multiplicadores e moduladores PWM.

Como apresentados, os controladores do Filtro Ativo Série são do tipo proporcional integral (PI) com um pólo adicional, destinados a controlar a corrente de entrada, a tensão do barramento CC e o desequilíbrio da tensão deste mesmo barramento. Na Figura 19 é apresentado o circuito do controlador do desequilíbrio de tensão no barramento CC, da tensão total do barramento CC e da corrente de entrada de apenas de uma fase, sendo o mesmo circuito utilizado para as demais fases.

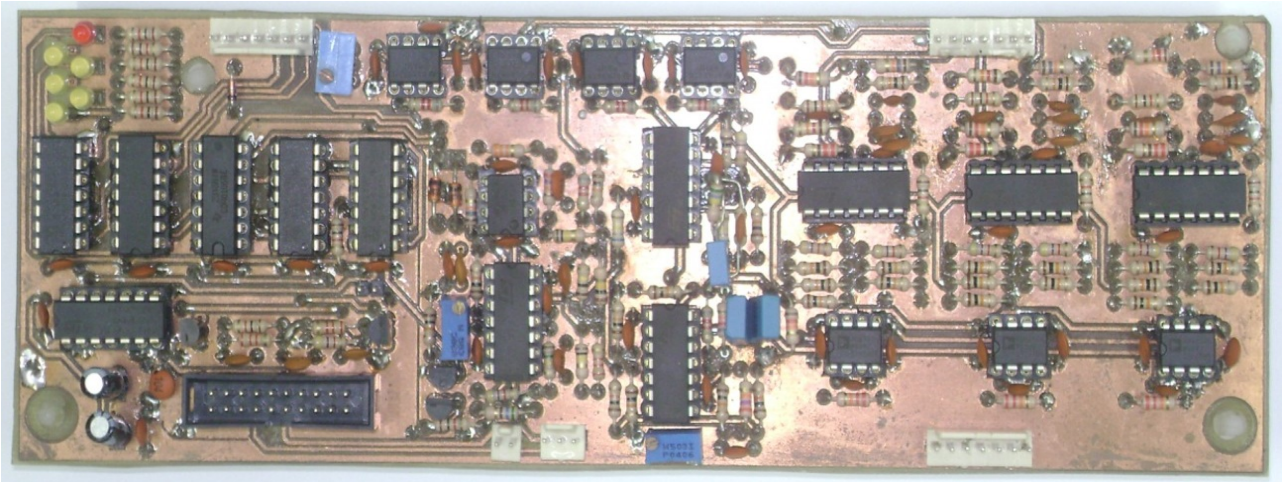
Figura 19 – Esquema da placa de comando do FAS



Fonte: (SANTOS, 2012)

A imagem da placa de comando do Filtro Ativo Série é apresentada na Figura 20.

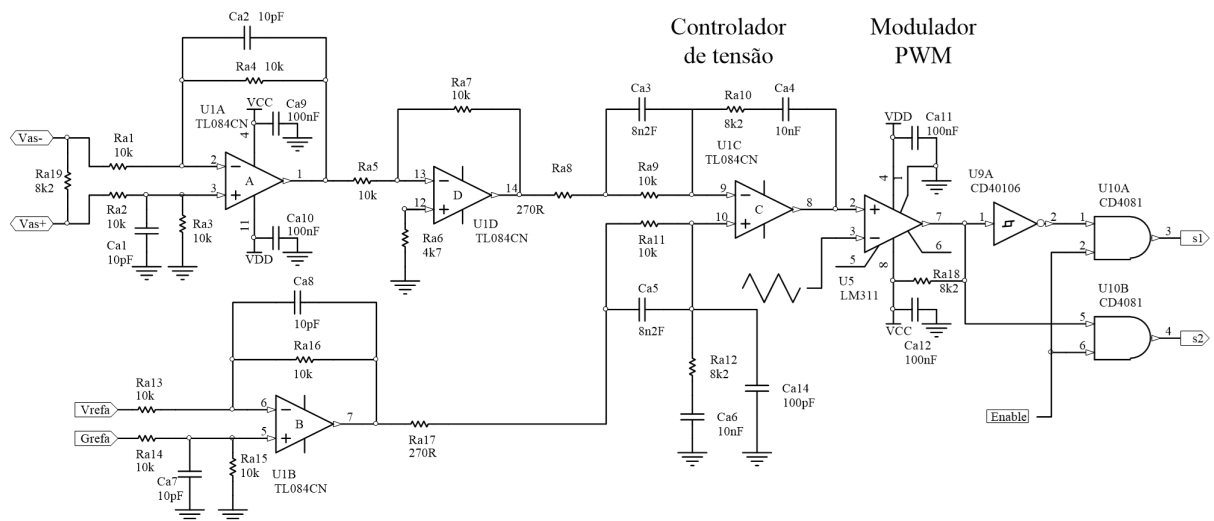
Figura 20 – Placa de comando do FAS



Fonte: (SANTOS, 2012)

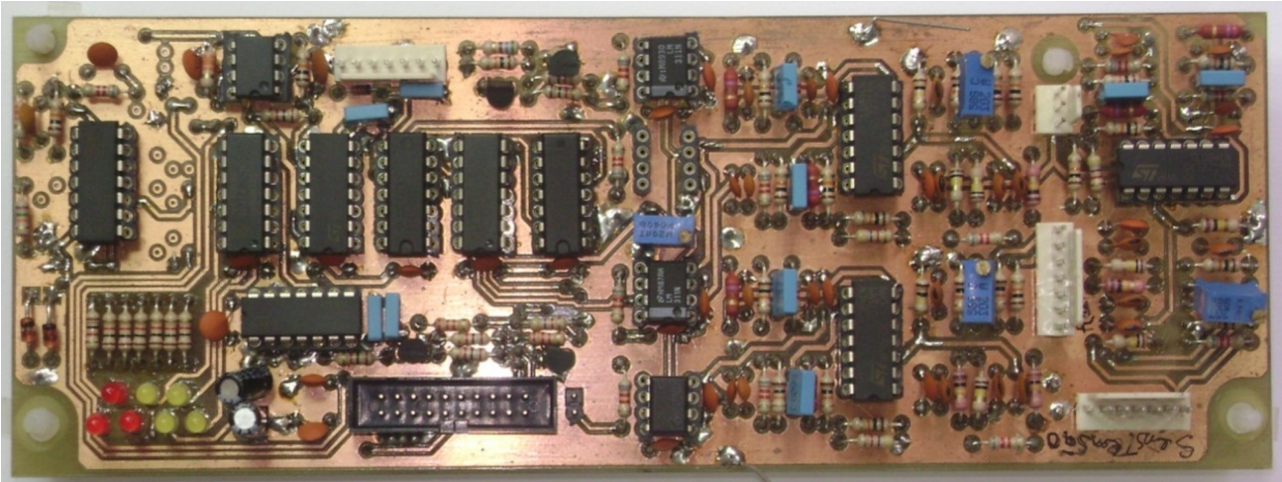
A placa de comando do Filtro Ativo Paralelo, projetada por SANTOS (2012), também foi construída a partir de circuitos analógicos para efetuar o controle da tensão da microrrede. O esquemático implementado é apresentado na Figura 21 e em seguida é apresentada a imagem da placa responsável pelos comandos do Filtro Ativo Paralelo, na Figura 22.

Figura 21 – Esquema da placa de comando do FAP



Fonte: (SANTOS, 2012)

Figura 22 – Placa de comando do FAP



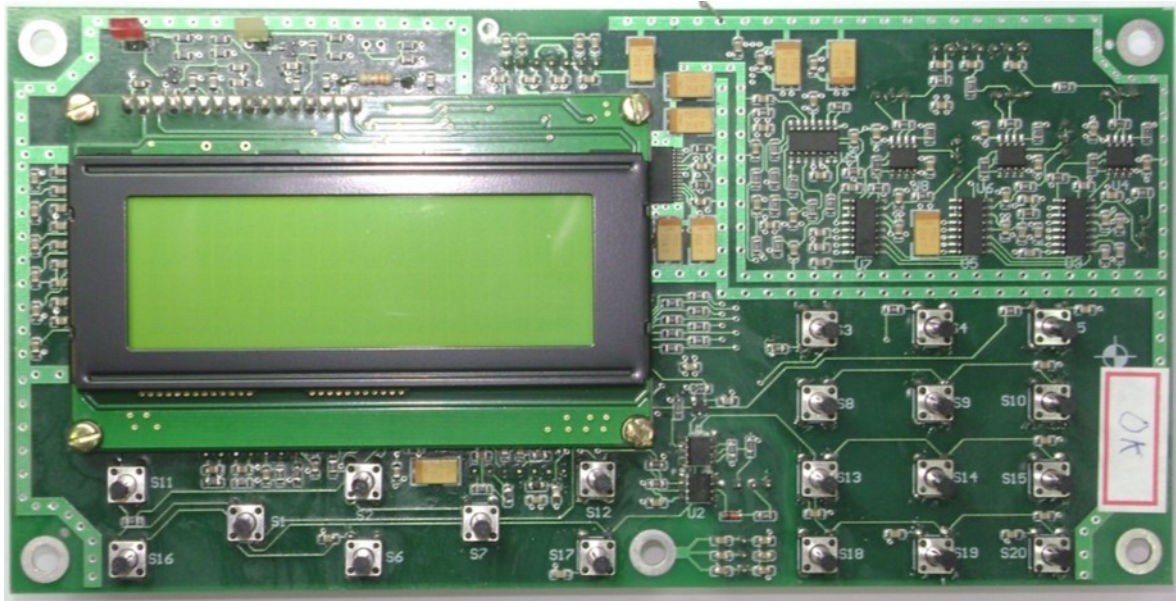
Fonte: (SANTOS, 2012)

### 5.1.3 Geradores de Referência

Para gerar as referências dos circuitos de controle dos filtros ativos, foram utilizadas duas IHMs (Interface Homem-Máquina) a fim de o usuário conseguir configurar os parâmetros de referência que mais se adéquem à sua aplicação, assim como explorar a influência da variação dos parâmetros de controle no conversor. Essas IHMs são responsáveis por gerar as senóides utilizadas como referência para os controladores de tensão da microrrede e de corrente de entrada. Além disso, esses componentes também são responsáveis pela sincronização das referências geradas com a tensão da rede de alimentação, através da detecção de passagem por zero (PLL - *Phase-Locked Loop*).

A placa da IHM de referências foi desenvolvida por (GIACOMINI et al., 2007, September), sendo adaptada para operar junto ao condicionador de energia apresentado. A placa dos geradores de referências é apresentada na Figura 23.

Figura 23 – Placa das IHMs



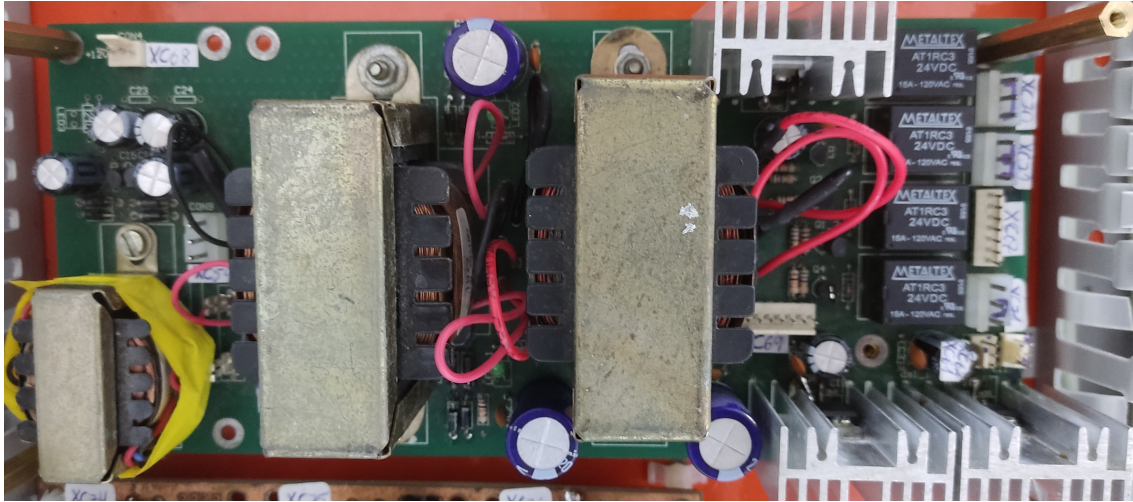
Fonte: (SANTOS, 2012)

#### 5.1.4 Fontes Auxiliares de Alimentação

Alguns dos componentes apresentados precisam de uma diferença de potencial contínua em seus terminais de alimentação para poderem funcionar de forma correta, como os amplificadores operacionais utilizados nas placas de comando dos filtros ativos, o display dos geradores de referência e os drivers dos módulos de potência.

Para serem gerados esses níveis de tensão auxiliares para alimentar esses componentes, foram utilizadas duas fontes auxiliares, uma para alimentar os drivers do módulo de potência do FAS, a placa de comando do FAS e o gerador de referências para o FAS e outra para alimentar os drivers do módulo de potência do FAP, a placa de comando do FAP e o gerador de referências para o FAP. Cada fonte possui uma saída simétrica de  $\pm 15V$  e  $\pm 12V$ , uma saída de  $+5V$  e relês auxiliares. Os relês presentes nesta placa são utilizados para acionar os contadores de pré-carga do condicionador, os quais são comandados através da placa do gerador de referências. A imagem da fonte auxiliar é apresentada na Figura 24.

Figura 24 – Fonte Auxiliar de Alimentação



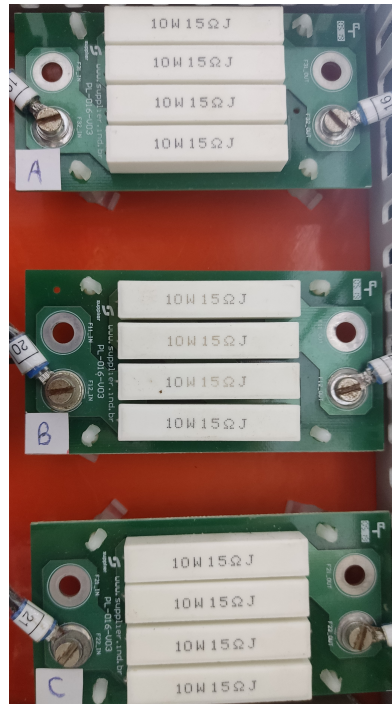
Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

### 5.1.5 Circuito de pré-carga

Para evitar picos de corrente e tensão durante a partida do conversor, foi implementado um circuito de pré-carga para que o conversor seja iniciado de maneira suave e, após atingir valores de tensão próximos aos estipulados pelo projeto apresentado, o circuito de pré-carga é desconectado do circuito do conversor, de forma a não atrapalhar o funcionamento do condicionador de energia após a sua partida.

A pré-carga do circuito é feita através de resistores conectados em cada fase, a fim de se adicionar uma carga durante a partida para limitar os picos de corrente. Os resistores implementados são apresentados na Figura 25.

Figura 25 – Resistores de Pré-Carga implementados

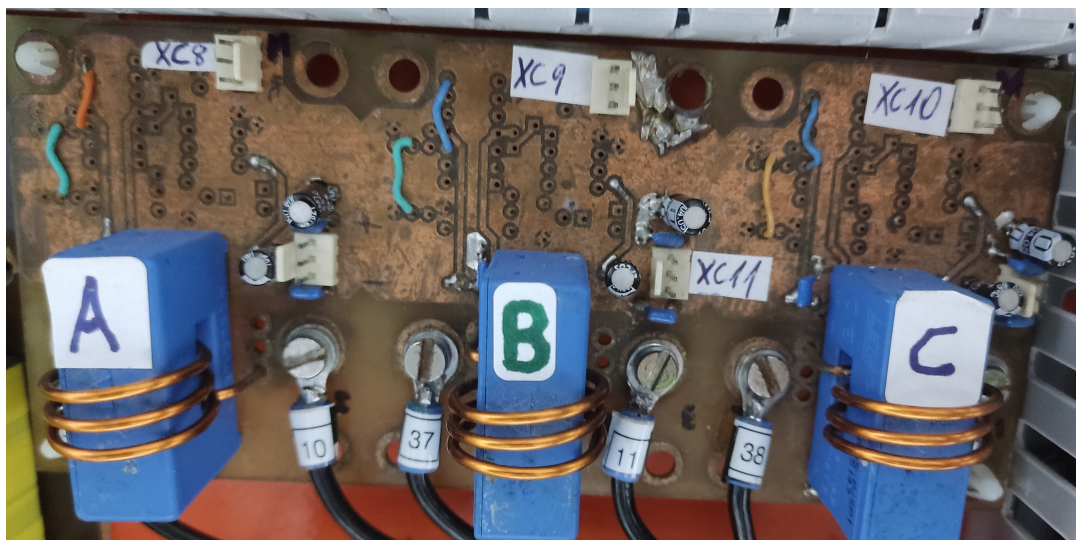


Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

### 5.1.6 Sensores

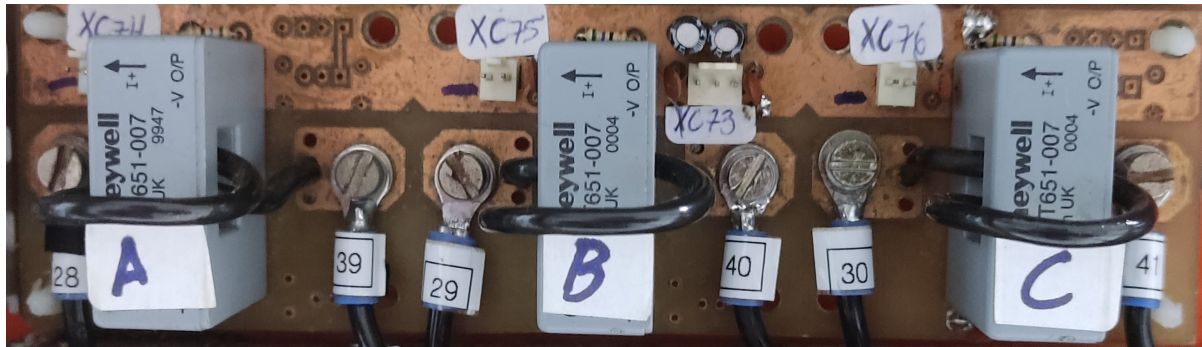
Foram adicionadas duas placas para fazer o sensoriamento dos parâmetros necessários para executar o controle dos filtros ativos. O ganho desses sensores já foi apresentado na seção 3.2 e foram considerados durante o projeto dos controladores por SANTOS (2012). As placas utilizadas são apresentadas nas Figuras 26 e 27.

Figura 26 – Sensores para medição de parâmetros utilizados pela placa de comando do FAS



Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

Figura 27 – Sensores para medição de parâmetros utilizados pela placa de comando do FAP



Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

### 5.1.7 Sistemas de proteção e acionamentos

Para aumentar a proteção do circuito, foram adicionados dois disjuntores ao conversor. Um deles localizado entre o barramento da rede (PAC) e o conversor e o outro entre o barramento da microrrede e o conversor. Esses disjuntores são de 25 A, implementados em todas as três fases do conversor.

Para fazer a transição entre modos ilhado e conectado à rede, para acionar e desacionar o circuito de pré-carga, para conectar/desconectar a inserção/absorção de energia no barramento CC, foram utilizados contatores, que são acionados de forma manual através de chaves seletoras de três posições. A Figura 28 apresenta os disjuntores e contatores implementados.

Figura 28 – Disjuntores e contatores implementados para segurança e acionamentos



Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

### 5.1.8 Cargas

Para que os resultados experimentais fossem o mais próximo possível dos valores teóricos e numéricos apresentados nos capítulos anteriores, foi implementada uma carga conectada ao barramento da microrrede com os valores mais próximos possíveis dos valores de carga utilizados

durante as simulações numéricas utilizadas nos capítulos anteriores. Para isso, a carga desejada de forma experimental é apresentada na equação (29).

$$\begin{aligned}
 S_{\mu rdX} &= 400VA \\
 V_{\mu,rdX} &= 127V \\
 \cos(\phi_{\mu rdX}) &= 0,7 \\
 Z_{\mu rdX} &= \frac{V_{\mu rdX}^2}{S_{\mu rdX}} = 40,32 \angle 45,6^\circ = 28,2 + j28,8\Omega
 \end{aligned} \tag{29}$$

Sendo assim, a resistência e indutância desejadas para se implementar no barramento da microrrede são apresentadas na equação (30).

$$\begin{aligned}
 R_{\mu rdX} &= 28,2\Omega \\
 L_{\mu rdX} &= \frac{28,8}{2\pi f_{rd}} = 76,4mH
 \end{aligned} \tag{30}$$

As cargas obtidas de forma experimental para cada fase é apresentada na tabela 12.

Tabela 12 – Cargas conectadas ao barramento da microrrede experimentais

| Teórico                   |                   | Experimental               |                   |                            |                   |                            |                   |
|---------------------------|-------------------|----------------------------|-------------------|----------------------------|-------------------|----------------------------|-------------------|
| $R_{\mu rdX}(\Omega)$     | $L_{\mu rdX}(mH)$ | $R_{\mu rdA}(\Omega)$      | $L_{\mu rdA}(mH)$ | $R_{\mu rdB}(\Omega)$      | $L_{\mu rdB}(mH)$ | $R_{\mu rdC}(\Omega)$      | $L_{\mu rdC}(mH)$ |
| 28,2                      | 76,4              | 29,7                       | 71,61             | 29,3                       | 66,3              | 29,2                       | 72,28             |
| $40,32 \angle 45,6^\circ$ |                   | $40,14 \angle 42,27^\circ$ |                   | $38,51 \angle 40,47^\circ$ |                   | $39,94 \angle 43,32^\circ$ |                   |

Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

De forma semelhante, foram calculadas resistências desejadas para serem adicionadas ao barramento CC, com a finalidade de absorver energia através do barramento, simulando uma conexão a um sistema de armazenamento. Como é desejado absorver duas quantidades de energias diferentes através do barramento CC, são calculados dois valores de resistências que serão testados separadamente ao conversor. Esses dois valores de resistências são apresentados na equação (31).

$$\begin{aligned}
 S_{\mu rdT} &= 1200VA \\
 V_{CC} &= 400V \\
 P_{saT1} &= 1,5 * S_{\mu rdT} = 1800W \\
 P_{saT2} &= 0,5 * S_{\mu rdT} = 600W \\
 R_{saT1} &= \frac{V_{CC}^2}{P_{saT1}} = 88,89\Omega \\
 R_{saT2} &= \frac{V_{CC}^2}{P_{saT2}} = 266,67\Omega
 \end{aligned} \tag{31}$$

Os valores obtidos de forma experimental para essas resistências são apresentados na Tabela 13.

Tabela 13 – Cargas conectadas ao barramento CC experimentais

| Teórico            |                    | Experimental       |                    |
|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|
| $R_{saT1}(\Omega)$ | $R_{saT2}(\Omega)$ | $R_{saT1}(\Omega)$ | $R_{saT2}(\Omega)$ |
| 88,89              | 266,69             | 60,83              | 232,26             |

Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

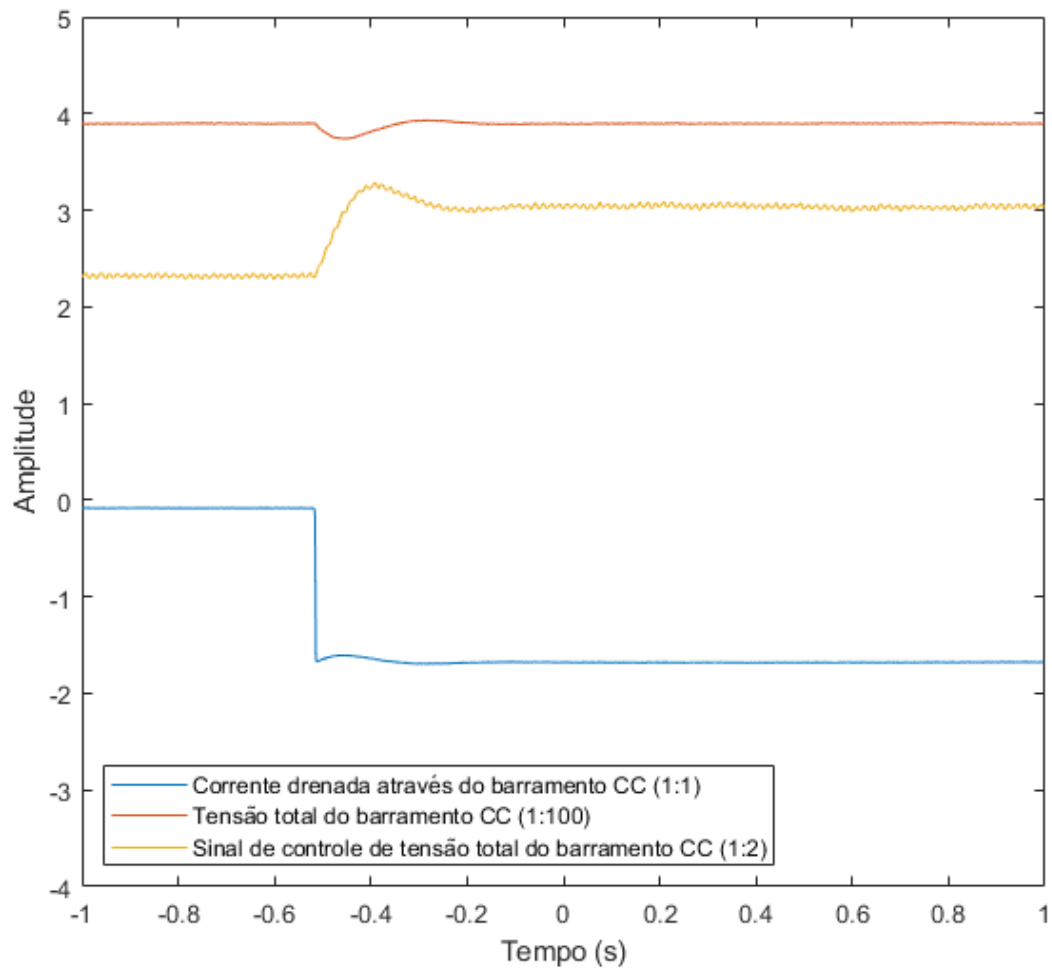
## 5.2 RESULTADOS PRÁTICOS

Nessa seção são apresentados os resultados obtidos de forma experimental através da implementação apresentada do conversor iUPQC proposto. Durante a coleta de resultados experimentais, houve um problema quando conectado o dispositivo que faria a inserção de energia no barramento CC e o protótipo foi danificado. Por isso, os resultados experimentais obtidos e apresentados só contemplam o estudo dos pontos de operação onde não é injetada e nem absorvida energia através do barramento CC e dos pontos de operação onde é feita absorção de energia através do barramento CC.

### 5.2.1 Análise transitória

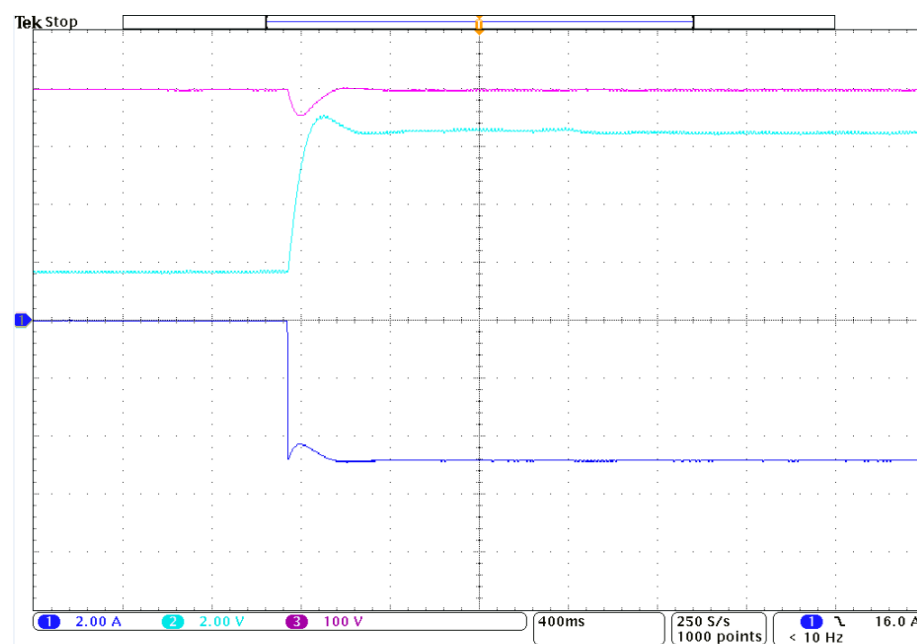
Buscando validar o controle do conversor para a absorção de energia através do barramento CC, foram feitas transições entre os pontos de operação experimentais, de forma semelhante ao apresentado na seção 4.1. O resultado experimental da transição entre os pontos de operação 2.3 para 2.2 e 2.3 para 2.1, apresentados na Tabela 5, podem ser observados nas Figuras 29 e 30. Os dados da Figura 29 são apresentados a partir de um gráfico gerado pelo *MATLAB* para melhor apresentação destes, já que os dados foram obtidos através de medidas feitas em múltiplos osciloscópios.

Figura 29 – Transição entre os pontos de operação 2.3 e 2.2 ( $I_{SA}$ ,  $V_{CC}$  e  $control\_barCC$ )



Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

Figura 30 – Transição entre os pontos de operação 2.3 e 2.1 ( $I_{SA}$ ,  $V_{CC}$  e  $control\_barCC$ )



Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

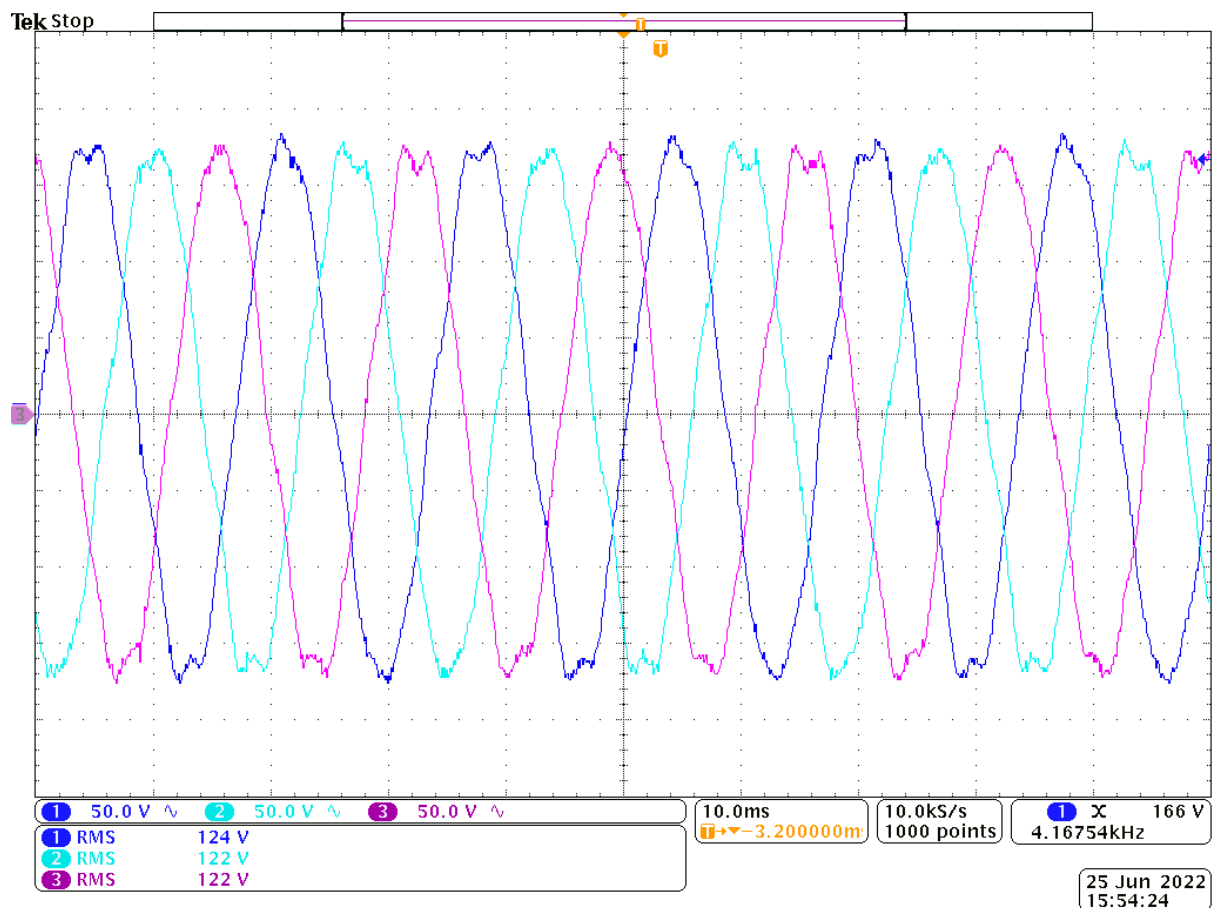
## 5.2.2 Análise em regime permanente

Para validar as superfícies obtidas de forma teórica e numérica, apresentadas nas figuras 9, 10, 14 e 15, neste capítulo são apresentados os dados obtidos de forma experimental referente aos fluxos de potência sob os filtros ativos do conversor iUPQC.

### 5.2.2.1 Coleta de dados

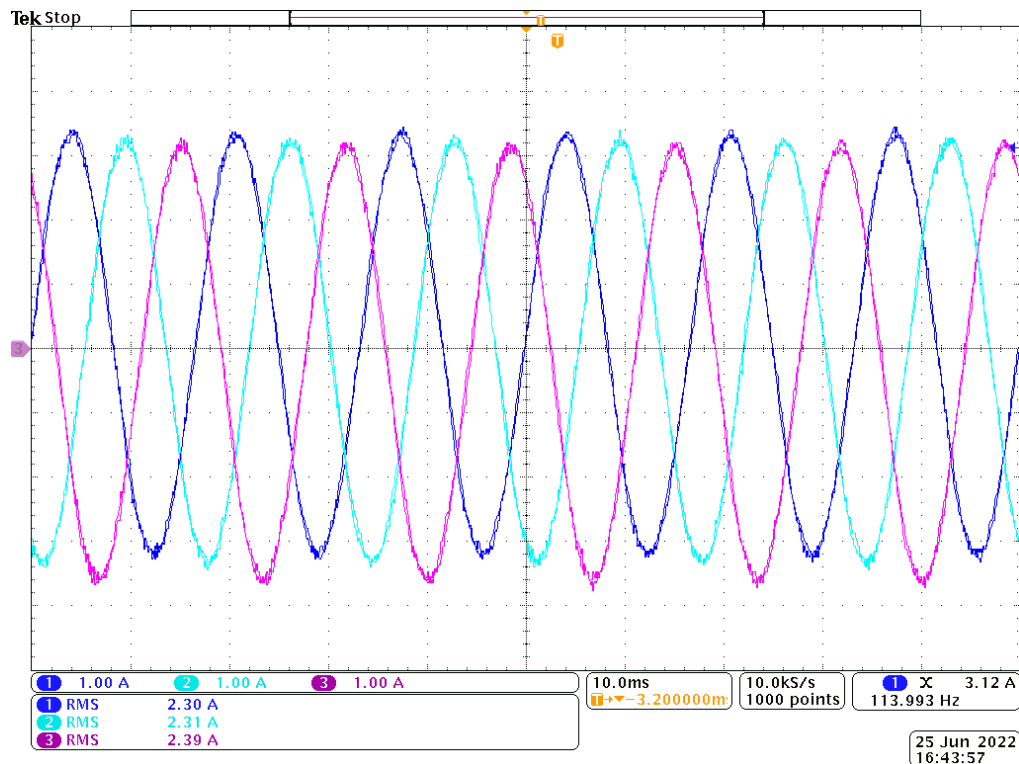
As variáveis a serem analisadas do conversor para serem calculados os fluxos de potência nos filtros ativos são as apresentadas nas equações (21), (22), (23), (24), (25) e (26). As figuras desta seção apresentam tais variáveis analisadas através dos osciloscópios no ponto de operação 2.3, apresentado na tabela 5, para validação das formas de ondas obtidas. Para os demais pontos de operação não serão apresentadas as formas de onda, apenas os valores obtidos através das medições.

Figura 31 – Tensão nas fases da rede  $V_{rdA}$ ,  $V_{rdB}$  e  $V_{rdC}$



Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

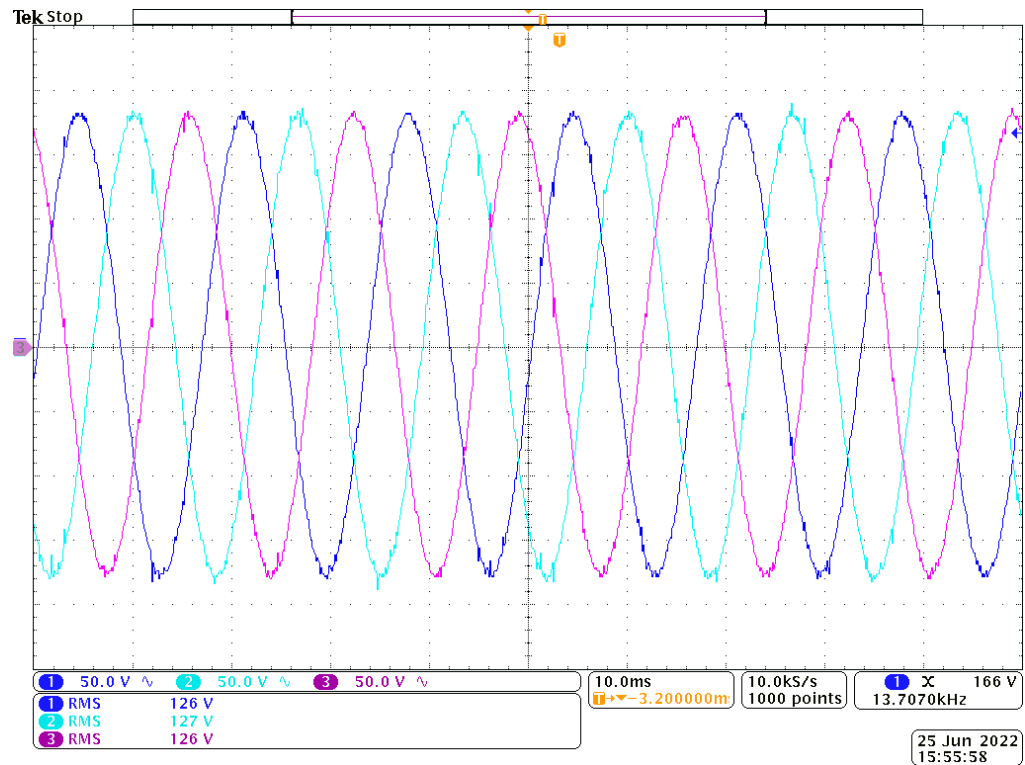
Figura 32 – Corrente nas fases da rede  $I_{rdA}$ ,  $I_{rdB}$  e  $I_{rdC}$



Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

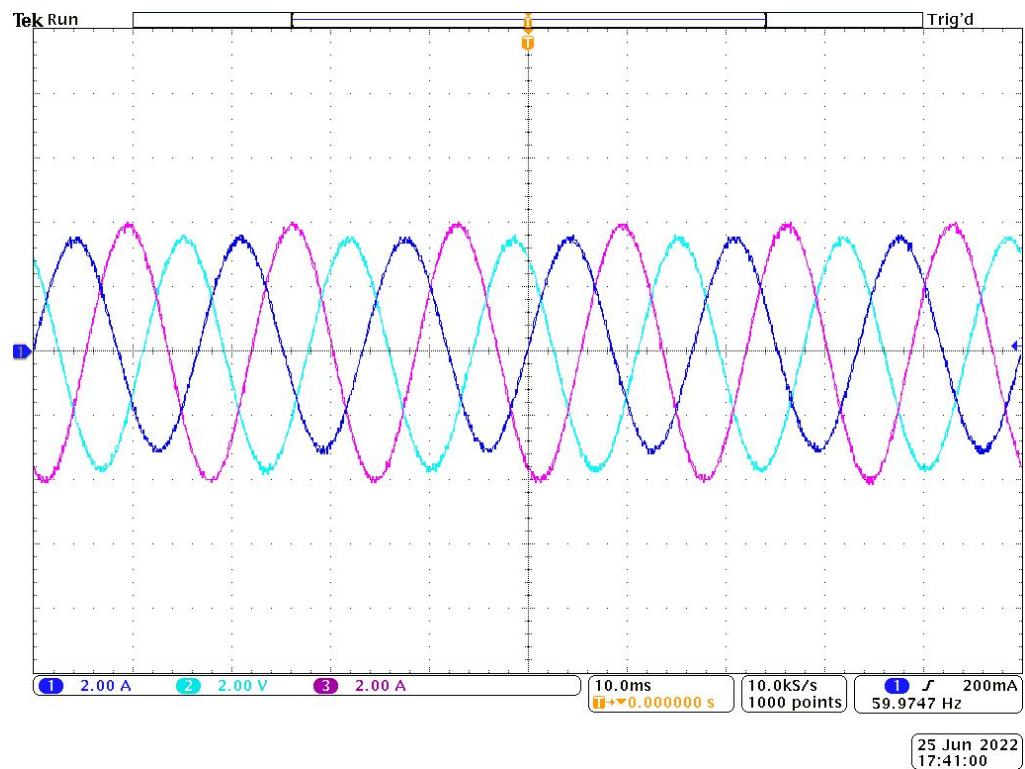
A partir dessas duas formas de onda pode-se encontrar o fator de potência do conversor neste ponto de operação, que é de 0,981. Isso mostra que, mesmo com uma carga indutiva conectada à microrrede, as correntes e as tensões da rede estão pouco defasadas, mostrando a capacidade de correção de fator de potência do conversor.

Figura 33 – Tensão nas fases da microrrede  $V_{\mu rdA}$ ,  $V_{\mu rdB}$  e  $V_{\mu rdC}$



Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

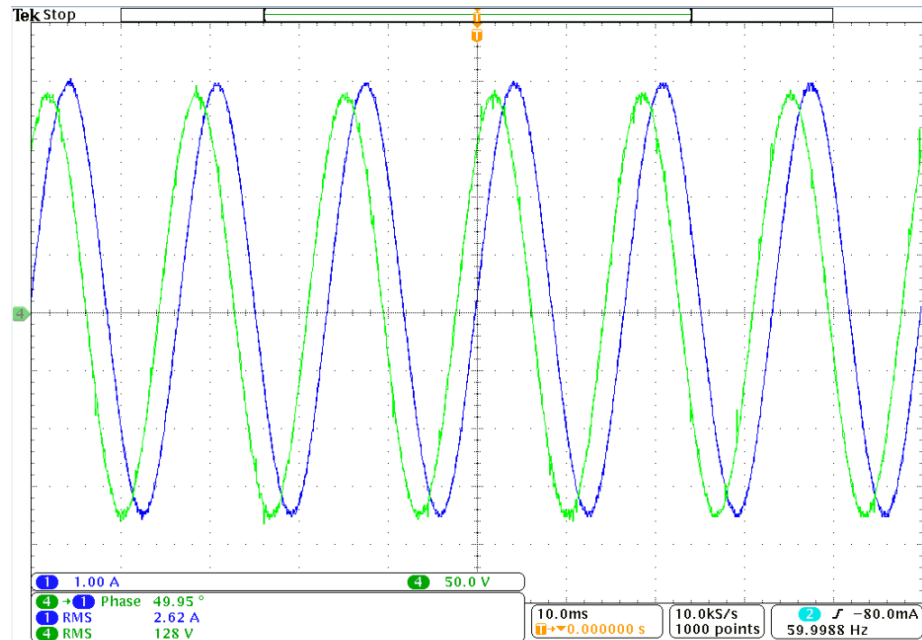
Figura 34 – Corrente nas fases da microrrede  $I_{\mu rdA}$ ,  $I_{\mu rdB}$  e  $I_{\mu rdC}$



Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

Para melhor apresentar a relação entre  $R_{\mu rdX}$ ,  $L_{\mu rdX}$ ,  $I_{\mu rdX}$  e  $V_{\mu rdX}$ , as Figuras 35, 36 e 38 apresentam as tensões e correntes de cada fase da microrrede de forma individual, assim como a medida do deslocamento entre elas.

Figura 35 – Tensão e corrente na fase A da microrrede  $V_{\mu rdA}$  e  $I_{\mu rdA}$



Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

Figura 36 – Tensão e corrente na fase B da microrrede  $V_{\mu rdB}$  e  $I_{\mu rdB}$

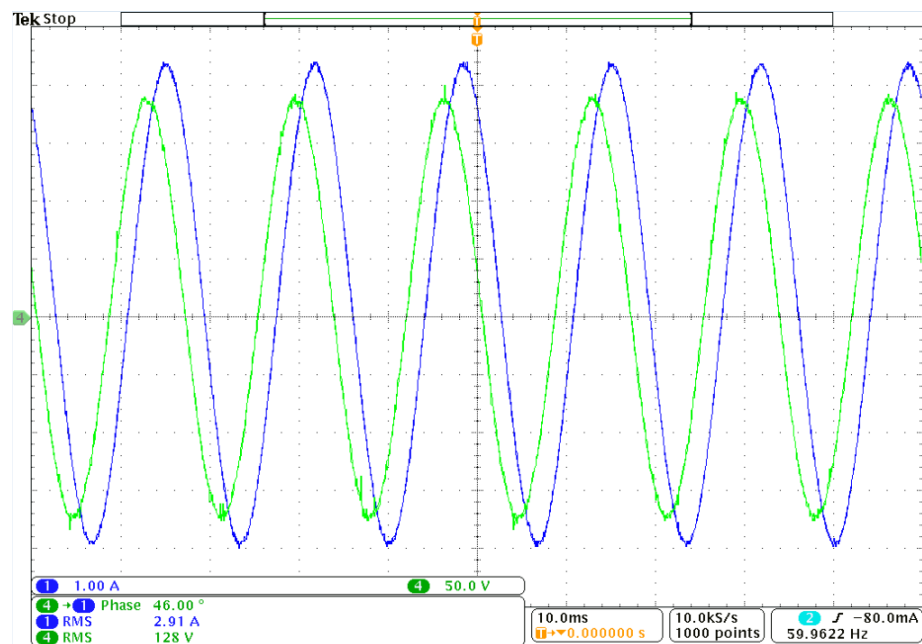
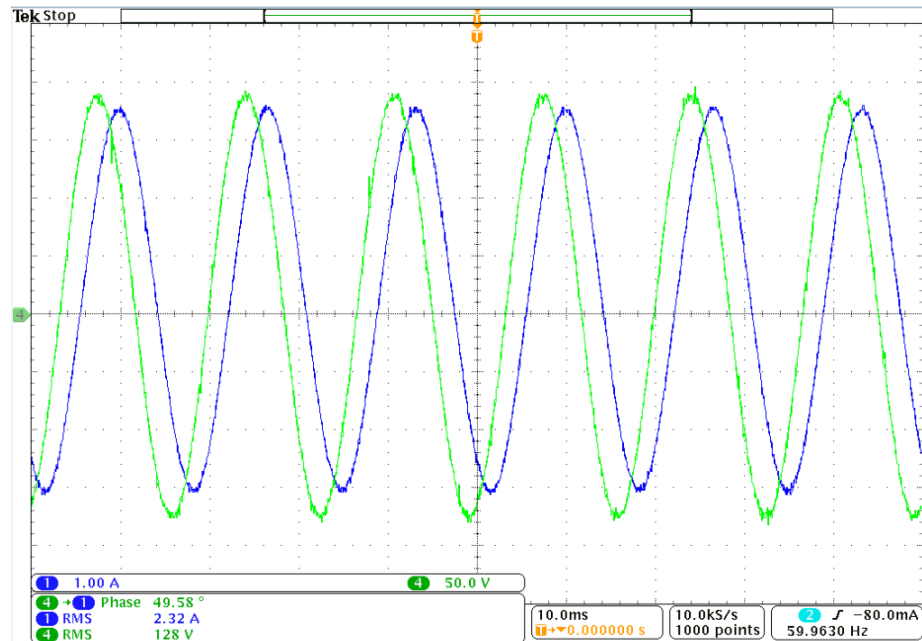
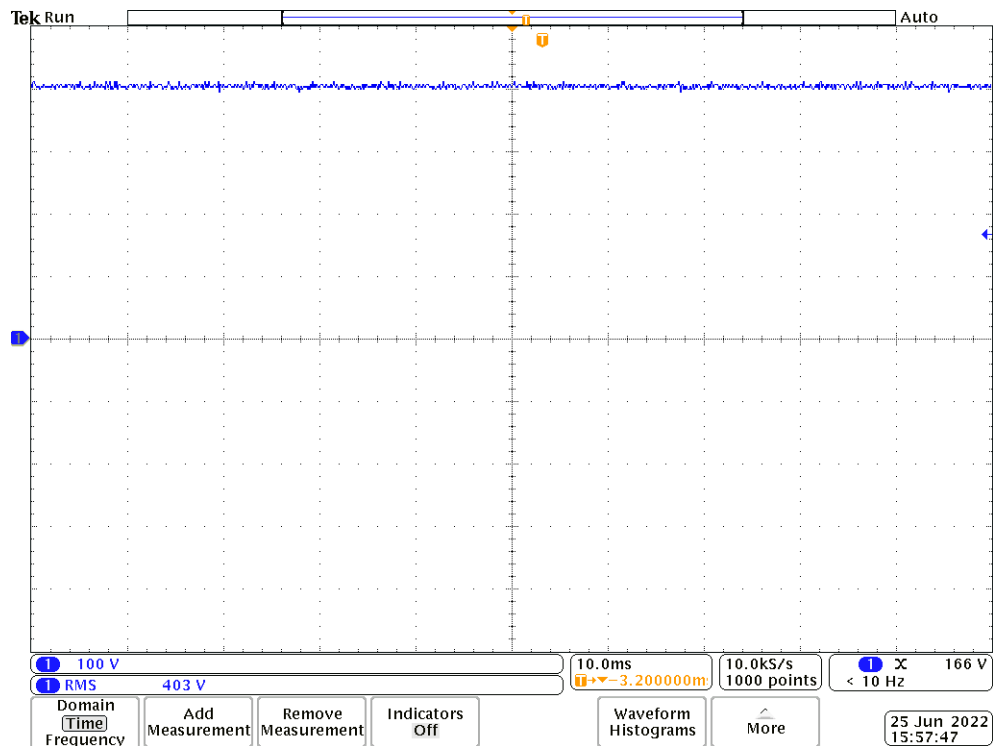


Figura 37 – Tensão e corrente na fase C da microrrede  $V_{\mu rdC}$  e  $I_{\mu rdC}$



É possível notar uma diferença na amplitude das correntes das três fases, tanto da rede quanto da microrrede, causada pelo desequilíbrio entre as cargas de cada fase. O desequilíbrio era esperado, pois as cargas conseguidas de forma experimental não eram iguais para cada fase, como apresentadas na Tabela 13, onde foram medidas as resistências e indutâncias através de multímetros e uma ponte RLC. No entanto, os valores de corrente obtidos com o conversor operando foram divergentes dos resultados obtidos através da Tabela 13, tanto em módulo como em fase das impedâncias. Uma possível causa para esse erro é a utilização da ponte RLC existente no laboratório, que não obtém resultados com grande precisão para indutores de maior volume. Para o cálculo dos fluxos de potência a serem apresentados na sequência desse trabalho, foram utilizados os valores obtidos através das formas de onda apresentadas nas Figuras 35, 36 e 38, já que esses valores melhor representam o que de fato está sendo consumido nas fases da microrrede.

Figura 38 – Tensão no barramento CC  $V_{CC}$ 

#### 5.2.2.1.1 Fluxo de Potência no Filtro Ativo Série

Tendo os valores de tensão eficaz de cada fase da rede ( $V_{rdX}$ ), tensão eficaz de cada fase da microrrede ( $V_{\mu rdX}$ ), a amplitude da corrente da microrrede em cada fase ( $I_{\mu rdX}$ ), o ângulo de defasagem entre tensão e corrente em cada fase da microrrede ( $\phi_{\mu rdX}$ ), a corrente injetada/absorvida através do sistema de armazenamento ( $I_{saT}$ ) e a tensão do barramento CC ( $V_{CC}$ ) é possível obter os valores de potência em cada fase da microrrede e o valor de potência sendo injetado ou absorvido através do sistema de armazenamento. Os valores experimentais do fluxo de potência sobre os filtros ativos são medidos através da medição de tensão sob os transformadores de acoplamento de cada fase e a corrente que passa pelo enrolamento secundário de cada transformador, para o FAS, e para o FAP é medida a corrente  $I_{fpX}$  e a tensão  $V_{fpX}$ , que é a tensão sob o capacitor do filtro de alta frequência do FAP.

A potência sendo absorvida em cada fase experimental é apresentada na Tabela 14.

Tabela 14 – Potências consumidas em cada fase da microrrede

| $S_{\mu rdA}$ (VA) | $S_{\mu rdB}$ (VA) | $S_{\mu rdC}$ (VA) | $S_{\mu rdT}$ (VA) |
|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|
| 335,4              | 372,5              | 297,0              | 1004,9             |

Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

Através dessas medições, foram montadas a Tabelas 15, 16 e 17 com os valores de fluxo de potência no Filtro Ativo Série nos pontos de operação com sistema de armazenamento

absorvendo energia através do barramento CC e nos pontos de operação onde não há nem inserção e nem absorção de energia através do barramento CC.

Tabela 15 – Resultados experimentais de fluxo de potência sob o Filtro Ativo Série na fase A

| $N_1$     | $N_2$    | $V_{rdA}$<br>(V) | $V_{\mu rdA}$<br>(V) | $I_{\mu rdA}$<br>(A) | $V_{CC}$<br>(V) | $I_{saT}$<br>(A) | $V_{fsA}$<br>(V) | $I_{fsA}$<br>(A) |
|-----------|----------|------------------|----------------------|----------------------|-----------------|------------------|------------------|------------------|
| <b>1.</b> | <b>1</b> | 114              | 128                  | 2,67                 | 401             | -4,82            | -15              | 7,98             |
|           | <b>2</b> | 115              | 127                  | 2,59                 | 396             | -1,68            | -13              | 4,39             |
|           | <b>3</b> | 114              | 127                  | 2,62                 | 393             | 0                | -13              | 3,10             |
|           | <b>4</b> | -                | -                    | -                    | -               | -                | -                | -                |
|           | <b>5</b> | -                | -                    | -                    | -               | -                | -                | -                |
| <b>2.</b> | <b>1</b> | 127              | 127                  | 2,60                 | 396             | -4,77            | 0                | 7,09             |
|           | <b>2</b> | 129              | 127                  | 2,69                 | 389             | -1,65            | 2                | 4,52             |
|           | <b>3</b> | 127              | 128                  | 2,72                 | 403             | 0                | -1               | 3,10             |
|           | <b>4</b> | -                | -                    | -                    | -               | -                | -                | -                |
|           | <b>5</b> | -                | -                    | -                    | -               | -                | -                | -                |
| <b>3.</b> | <b>1</b> | 140              | 127                  | 2,53                 | 400             | -4,85            | 13               | 6,94             |
|           | <b>2</b> | 140              | 128                  | 2,56                 | 401             | -1,68            | 12               | 4,25             |
|           | <b>3</b> | 141              | 127                  | 2,55                 | 400             | 0                | 14               | 2,80             |
|           | <b>4</b> | -                | -                    | -                    | -               | -                | -                | -                |
|           | <b>5</b> | -                | -                    | -                    | -               | -                | -                | -                |

Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

Tabela 16 – Resultados experimentais de fluxo de potência sob o Filtro Ativo Série na fase B

| $N_1$     | $N_2$    | $V_{rdB}$<br>(V) | $V_{\mu rdB}$<br>(V) | $I_{\mu rdB}$<br>(A) | $V_{CC}$<br>(V) | $I_{saT}$<br>(A) | $V_{fsB}$<br>(V) | $I_{fsB}$<br>(A) |
|-----------|----------|------------------|----------------------|----------------------|-----------------|------------------|------------------|------------------|
| <b>1.</b> | <b>1</b> | 115              | 127                  | 2,89                 | 401             | -4,82            | -12              | 8,02             |
|           | <b>2</b> | 115              | 127                  | 2,87                 | 396             | -1,68            | -12              | 4,59             |
|           | <b>3</b> | 113              | 127                  | 2,90                 | 393             | 0                | -14              | 3,09             |
|           | <b>4</b> | -                | -                    | -                    | -               | -                | -                | -                |
|           | <b>5</b> | -                | -                    | -                    | -               | -                | -                | -                |
| <b>2.</b> | <b>1</b> | 127              | 128                  | 2,87                 | 396             | -4,77            | -1               | 7,01             |
|           | <b>2</b> | 129              | 128                  | 2,89                 | 389             | -1,65            | 1                | 4,35             |
|           | <b>3</b> | 127              | 128                  | 2,92                 | 403             | 0                | 1                | 3,02             |
|           | <b>4</b> | -                | -                    | -                    | -               | -                | -                | -                |
|           | <b>5</b> | -                | -                    | -                    | -               | -                | -                | -                |
| <b>3.</b> | <b>1</b> | 139              | 127                  | 2,78                 | 400             | -4,85            | 12               | 6,81             |
|           | <b>2</b> | 142              | 128                  | 2,89                 | 401             | -1,68            | 14               | 4,18             |
|           | <b>3</b> | 141              | 127                  | 2,82                 | 400             | 0                | 14               | 2,79             |
|           | <b>4</b> | -                | -                    | -                    | -               | -                | -                | -                |
|           | <b>5</b> | -                | -                    | -                    | -               | -                | -                | -                |

Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

Tabela 17 – Resultados experimentais de fluxo de potência sob o Filtro Ativo Série na fase C

| $N_1$     | $N_2$    | $V_{rdC}$<br>(V) | $V_{\mu rdC}$<br>(V) | $I_{\mu rdC}$<br>(A) | $V_{CC}$<br>(V) | $I_{saT}$<br>(A) | $V_{fsC}$<br>(V) | $I_{fsC}$<br>(A) |
|-----------|----------|------------------|----------------------|----------------------|-----------------|------------------|------------------|------------------|
| <b>1.</b> | <b>1</b> | 115              | 128                  | 2,29                 | 401             | -4,82            | -15              | 7,91             |
|           | <b>2</b> | 115              | 126                  | 2,31                 | 396             | -1,68            | -13              | 4,57             |
|           | <b>3</b> | 115              | 127                  | 2,43                 | 393             | 0                | -13              | 3,03             |
|           | <b>4</b> | -                | -                    | -                    | -               | -                | -                | -                |
|           | <b>5</b> | -                | -                    | -                    | -               | -                | -                | -                |
| <b>2.</b> | <b>1</b> | 127              | 127                  | 2,40                 | 396             | -4,77            | 0                | 7,13             |
|           | <b>2</b> | 129              | 127                  | 2,39                 | 389             | -1,65            | 2                | 4,26             |
|           | <b>3</b> | 127              | 128                  | 2,32                 | 403             | 0                | -1               | 3,00             |
|           | <b>4</b> | -                | -                    | -                    | -               | -                | -                | -                |
|           | <b>5</b> | -                | -                    | -                    | -               | -                | -                | -                |
| <b>3.</b> | <b>1</b> | 139              | 127                  | 2,37                 | 400             | -4,85            | 12               | 6,88             |
|           | <b>2</b> | 142              | 128                  | 2,37                 | 401             | -1,68            | 14               | 4,12             |
|           | <b>3</b> | 141              | 127                  | 2,30                 | 400             | 0                | 14               | 2,84             |
|           | <b>4</b> | -                | -                    | -                    | -               | -                | -                | -                |
|           | <b>5</b> | -                | -                    | -                    | -               | -                | -                | -                |

Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

De forma semelhante ao que foi feito em capítulos anteriores, esses dados são normalizados em pu e utilizados para o cálculo das variáveis de interesse  $S_{\mu rdX}$ ,  $S_{\mu rdT}$ ,  $S_{fsX}$ ,  $P_{saT}$  e  $\frac{V_{rdX}}{V_{\mu rdX}}$  para que o resultado da comparação com os valores numéricos e teóricos sejam equivalentes. As variáveis de interesse normalizadas em pu são apresentadas na Tabela 18.

Tabela 18 – Resultados experimentais de fluxo de potência sob o Filtro Ativo Série em pu

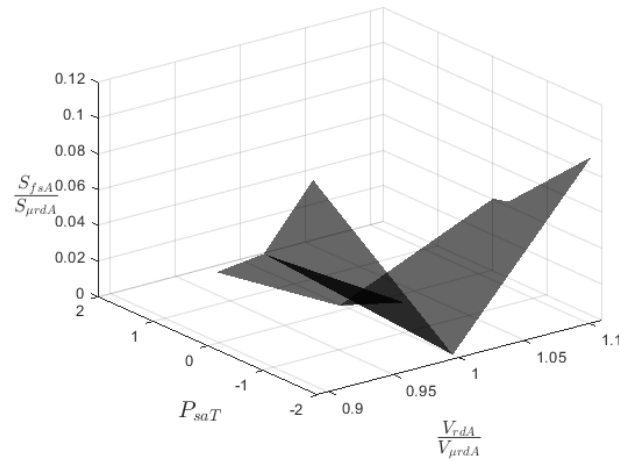
| $N_1$     | $N_2$    | $P_{saT}$ | $\frac{V_{rdA}}{V_{\mu rdA}}$ | $S_{fsA}$ | $\frac{V_{rdB}}{V_{\mu rdB}}$ | $S_{fsB}$ | $\frac{V_{rdC}}{V_{\mu rdC}}$ | $S_{fsC}$ |
|-----------|----------|-----------|-------------------------------|-----------|-------------------------------|-----------|-------------------------------|-----------|
| <b>1.</b> | <b>1</b> | 1,93      | 0,89                          | 0,12      | 0,91                          | 0,10      | 0,90                          | 0,12      |
|           | <b>2</b> | 0,68      | 0,90                          | 0,06      | 0,91                          | 0,06      | 0,91                          | 0,06      |
|           | <b>3</b> | 0         | 0,91                          | 0,04      | 0,89                          | 0,04      | 0,91                          | 0,04      |
|           | <b>4</b> | -         | -                             | -         | -                             | -         | -                             | -         |
|           | <b>5</b> | -         | -                             | -         | -                             | -         | -                             | -         |
| <b>2.</b> | <b>1</b> | 1,88      | 1,00                          | 0         | 0,99                          | 0,01      | 1,00                          | 0         |
|           | <b>2</b> | 0,63      | 1,02                          | 0,01      | 1,01                          | 0         | 1,02                          | 0,01      |
|           | <b>3</b> | 0         | 0,99                          | 0         | 0,99                          | 0         | 0,99                          | 0         |
|           | <b>4</b> | -         | -                             | -         | -                             | -         | -                             | -         |
|           | <b>5</b> | -         | -                             | -         | -                             | -         | -                             | -         |
| <b>3.</b> | <b>1</b> | 1,99      | 1,10                          | 0,09      | 1,09                          | 0,08      | 1,09                          | 0,08      |
|           | <b>2</b> | 0,67      | 1,09                          | 0,05      | 1,11                          | 0,06      | 1,11                          | 0,06      |
|           | <b>3</b> | 0         | 1,11                          | 0,04      | 1,11                          | 0,04      | 1,11                          | 0,04      |
|           | <b>4</b> | -         | -                             | -         | -                             | -         | -                             | -         |
|           | <b>5</b> | -         | -                             | -         | -                             | -         | -                             | -         |

Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

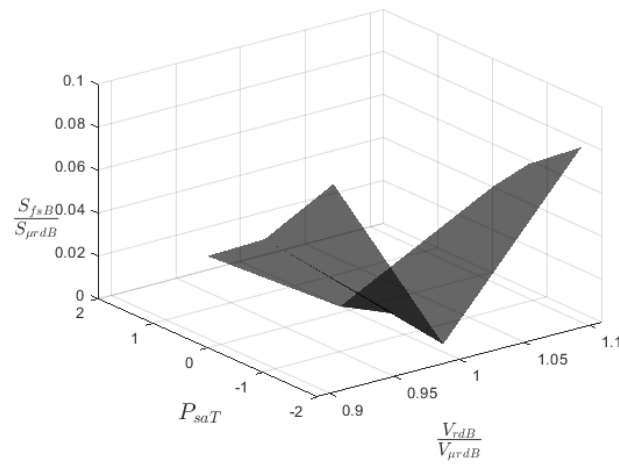
Esses dados são então adicionados ao *software* MATLAB onde são geradas as superfícies apresentadas na Figura 39.

Figura 39 – Fluxo de potência sobre o Filtro Ativo Série

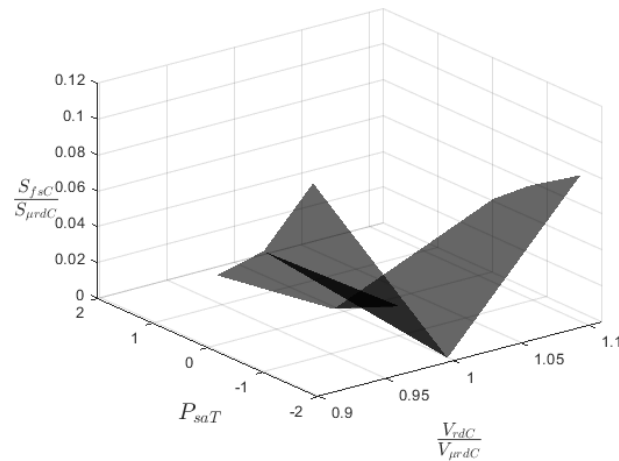
(a) Fluxo de Potência na fase A do Filtro Ativo Série



(b) Fluxo de Potência na fase B do Filtro Ativo Série



(c) Fluxo de Potência na fase C do Filtro Ativo Série



### 5.2.2.1.2 Fluxo de Potência no Filtro Ativo Paralelo

Foram montadas a Tabelas 19, 20 e 21 com os valores de fluxo de potência experimentais no Filtro Ativo Paralelo nos pontos de operação com sistema de armazenamento absorvendo energia através do barramento CC e nos pontos de operação onde não há nem inserção e nem absorção de energia através do barramento CC.

Tabela 19 – Resultados experimentais de fluxo de potência sob o Filtro Ativo Paralelo na fase A

| $N_1$     | $N_2$    | $V_{rdA}$<br>(V) | $V_{\mu rdA}$<br>(V) | $I_{\mu rdA}$<br>(A) | $V_{CC}$<br>(V) | $I_{saT}$<br>(A) | $V_{fpA}$<br>(V) | $I_{fpA}$<br>(A) |
|-----------|----------|------------------|----------------------|----------------------|-----------------|------------------|------------------|------------------|
| <b>1.</b> | <b>1</b> | 114              | 128                  | 2,67                 | 401             | -4,82            | 128              | 6,60             |
|           | <b>2</b> | 115              | 127                  | 2,59                 | 396             | -1,68            | 127              | 4,35             |
|           | <b>3</b> | 114              | 127                  | 2,62                 | 393             | 0                | 127              | 3,00             |
|           | <b>4</b> | -                | -                    | -                    | -               | -                | -                | -                |
|           | <b>5</b> | -                | -                    | -                    | -               | -                | -                | -                |
| <b>2.</b> | <b>1</b> | 127              | 127                  | 2,60                 | 396             | -4,77            | 127              | 6,31             |
|           | <b>2</b> | 129              | 127                  | 2,69                 | 389             | -1,65            | 127              | 3,65             |
|           | <b>3</b> | 127              | 128                  | 2,72                 | 403             | 0                | 128              | 2,88             |
|           | <b>4</b> | -                | -                    | -                    | -               | -                | -                | -                |
|           | <b>5</b> | -                | -                    | -                    | -               | -                | -                | -                |
| <b>3.</b> | <b>1</b> | 140              | 127                  | 2,53                 | 400             | -4,85            | 127              | 5,55             |
|           | <b>2</b> | 140              | 128                  | 2,56                 | 401             | -1,68            | 128              | 3,39             |
|           | <b>3</b> | 141              | 127                  | 2,55                 | 400             | 0                | 127              | 2,95             |
|           | <b>4</b> | -                | -                    | -                    | -               | -                | -                | -                |
|           | <b>5</b> | -                | -                    | -                    | -               | -                | -                | -                |

Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

Tabela 20 – Resultados experimentais de fluxo de potência sob o Filtro Ativo Paralelo na fase B

| $N_1$     | $N_2$    | $V_{rdB}$<br>(V) | $V_{\mu rdB}$<br>(V) | $I_{\mu rdB}$<br>(A) | $V_{CC}$<br>(V) | $I_{saT}$<br>(A) | $V_{fpB}$<br>(V) | $I_{fpB}$<br>(A) |
|-----------|----------|------------------|----------------------|----------------------|-----------------|------------------|------------------|------------------|
| <b>1.</b> | <b>1</b> | 115              | 127                  | 2,89                 | 401             | -4,82            | 127              | 6,24             |
|           | <b>2</b> | 115              | 127                  | 2,87                 | 396             | -1,68            | 127              | 4,35             |
|           | <b>3</b> | 113              | 127                  | 2,90                 | 393             | 0                | 127              | 3,40             |
|           | <b>4</b> | -                | -                    | -                    | -               | -                | -                | -                |
|           | <b>5</b> | -                | -                    | -                    | -               | -                | -                | -                |
| <b>2.</b> | <b>1</b> | 127              | 128                  | 2,87                 | 396             | -4,77            | 128              | 5,87             |
|           | <b>2</b> | 129              | 128                  | 2,89                 | 389             | -1,65            | 128              | 3,31             |
|           | <b>3</b> | 127              | 128                  | 2,92                 | 403             | 0                | 128              | 2,91             |
|           | <b>4</b> | -                | -                    | -                    | -               | -                | -                | -                |
|           | <b>5</b> | -                | -                    | -                    | -               | -                | -                | -                |
| <b>3.</b> | <b>1</b> | 139              | 127                  | 2,78                 | 400             | -4,85            | 127              | 5,18             |
|           | <b>2</b> | 142              | 128                  | 2,89                 | 401             | -1,68            | 128              | 3,25             |
|           | <b>3</b> | 141              | 127                  | 2,82                 | 400             | 0                | 127              | 3,09             |
|           | <b>4</b> | -                | -                    | -                    | -               | -                | -                | -                |
|           | <b>5</b> | -                | -                    | -                    | -               | -                | -                | -                |

Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

Tabela 21 – Resultados experimentais de fluxo de potência sob o Filtro Ativo Paralelo na fase C

| $N_1$     | $N_2$    | $V_{rdC}$<br>(V) | $V_{\mu rdC}$<br>(V) | $I_{\mu rdC}$<br>(A) | $V_{CC}$<br>(V) | $I_{saT}$<br>(A) | $V_{fpC}$<br>(V) | $I_{fpC}$<br>(A) |
|-----------|----------|------------------|----------------------|----------------------|-----------------|------------------|------------------|------------------|
| <b>1.</b> | <b>1</b> | 115              | 128                  | 2,29                 | 401             | -4,82            | 128              | 6,48             |
|           | <b>2</b> | 115              | 126                  | 2,31                 | 396             | -1,68            | 126              | 4,33             |
|           | <b>3</b> | 115              | 127                  | 2,43                 | 393             | 0                | 127              | 3,21             |
|           | <b>4</b> | -                | -                    | -                    | -               | -                | -                | -                |
|           | <b>5</b> | -                | -                    | -                    | -               | -                | -                | -                |
| <b>2.</b> | <b>1</b> | 127              | 127                  | 2,40                 | 396             | -4,77            | 127              | 6,00             |
|           | <b>2</b> | 129              | 127                  | 2,39                 | 389             | -1,65            | 127              | 3,64             |
|           | <b>3</b> | 127              | 128                  | 2,32                 | 403             | 0                | 128              | 2,81             |
|           | <b>4</b> | -                | -                    | -                    | -               | -                | -                | -                |
|           | <b>5</b> | -                | -                    | -                    | -               | -                | -                | -                |
| <b>3.</b> | <b>1</b> | 139              | 127                  | 2,37                 | 400             | -4,85            | 127              | 5,32             |
|           | <b>2</b> | 142              | 128                  | 2,37                 | 401             | -1,68            | 128              | 3,36             |
|           | <b>3</b> | 141              | 127                  | 2,30                 | 400             | 0                | 127              | 2,87             |
|           | <b>4</b> | -                | -                    | -                    | -               | -                | -                | -                |
|           | <b>5</b> | -                | -                    | -                    | -               | -                | -                | -                |

Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

Esses dados são normalizados em pu e utilizados para o cálculo das variáveis das variáveis de interesse  $S_{\mu rdX}$ ,  $S_{\mu rdT}$ ,  $S_{fpX}$ ,  $P_{saT}$  e  $\frac{V_{rdX}}{V_{\mu rdX}}$  para que o resultado da comparação com os valores numéricos e teóricos sejam equivalentes. As variáveis de interesse normalizadas em pu são apresentadas na Tabela 22.

Tabela 22 – Resultados experimentais de fluxo de potência sob o Filtro Ativo Paralelo em pu

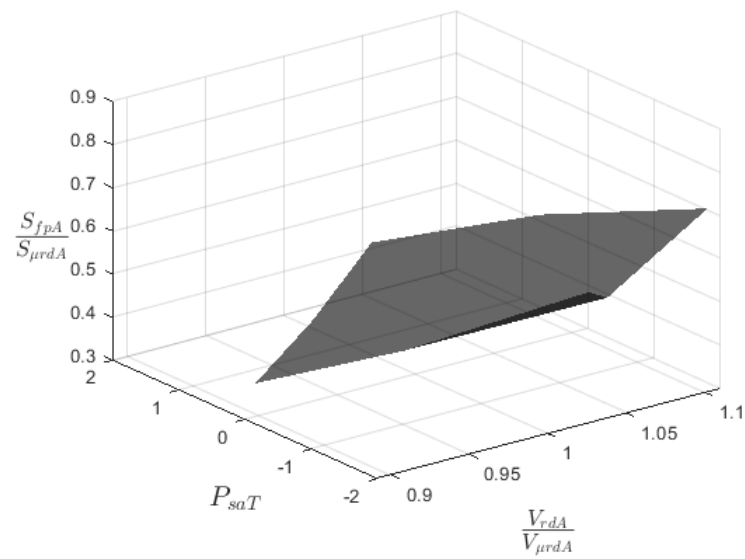
| $N_1$     | $N_2$    | $P_{saT}$ | $\frac{V_{rdA}}{V_{\mu rdA}}$ | $S_{fpA}$ | $\frac{V_{rdB}}{V_{\mu rdB}}$ | $S_{fpB}$ | $\frac{V_{rdC}}{V_{\mu rdC}}$ | $S_{fpC}$ |
|-----------|----------|-----------|-------------------------------|-----------|-------------------------------|-----------|-------------------------------|-----------|
| <b>1.</b> | <b>1</b> | 1,93      | 0,89                          | 0,84      | 0,91                          | 0,79      | 0,90                          | 0,83      |
|           | <b>2</b> | 0,68      | 0,90                          | 0,56      | 0,91                          | 0,56      | 0,91                          | 0,55      |
|           | <b>3</b> | 0         | 0,91                          | 0,38      | 0,89                          | 0,43      | 0,91                          | 0,40      |
|           | <b>4</b> | -         | -                             | -         | -                             | -         | -                             | -         |
|           | <b>5</b> | -         | -                             | -         | -                             | -         | -                             | -         |
| <b>2.</b> | <b>1</b> | 1,88      | 1,00                          | 0,80      | 0,99                          | 0,75      | 1,00                          | 0,76      |
|           | <b>2</b> | 0,63      | 1,02                          | 0,46      | 1,01                          | 0,42      | 1,02                          | 0,46      |
|           | <b>3</b> | 0         | 0,99                          | 0,36      | 0,99                          | 0,37      | 0,99                          | 0,35      |
|           | <b>4</b> | -         | -                             | -         | -                             | -         | -                             | -         |
|           | <b>5</b> | -         | -                             | -         | -                             | -         | -                             | -         |
| <b>3.</b> | <b>1</b> | 1,99      | 1,10                          | 0,72      | 1,09                          | 0,67      | 1,09                          | 0,69      |
|           | <b>2</b> | 0,67      | 1,09                          | 0,43      | 1,11                          | 0,42      | 1,11                          | 0,43      |
|           | <b>3</b> | 0         | 1,11                          | 0,38      | 1,11                          | 0,40      | 1,11                          | 0,37      |
|           | <b>4</b> | -         | -                             | -         | -                             | -         | -                             | -         |
|           | <b>5</b> | -         | -                             | -         | -                             | -         | -                             | -         |

Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

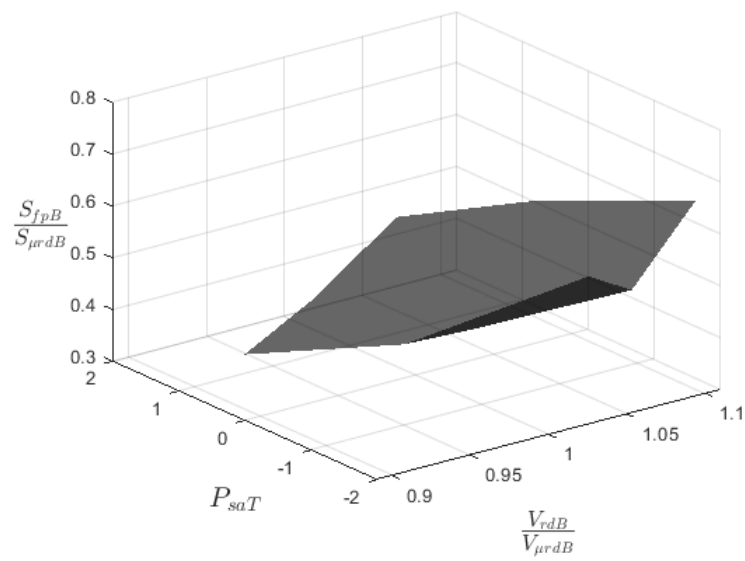
Esses dados são então adicionados ao *software* MATLAB onde são geradas as superfícies apresentadas na Figura 40.

Figura 40 – Fluxo de potência sobre o Filtro Ativo Paralelo

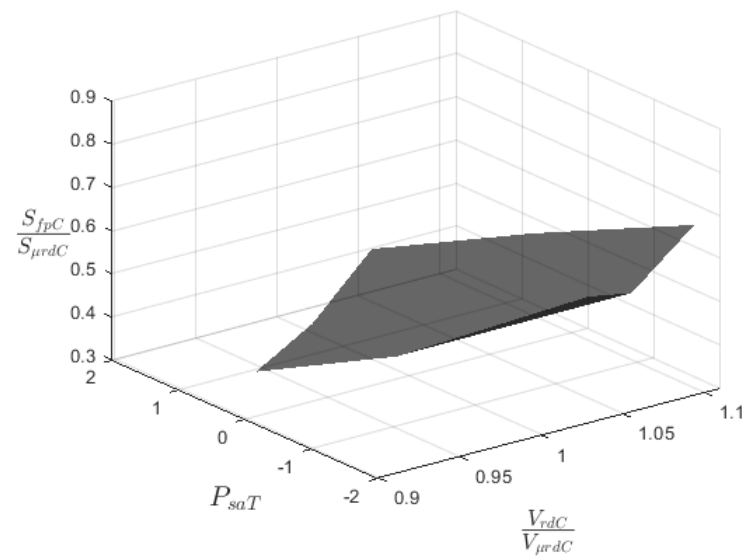
(a) Fluxo de Potência na fase A do Filtro Ativo Paralelo



(b) Fluxo de Potência na fase B do Filtro Ativo Paralelo



(c) Fluxo de Potência na fase C do Filtro Ativo Paralelo



## 6 CONCLUSÃO GERAL E CONTRIBUIÇÕES

Este trabalho apresentou no capítulo 2 um conversor iUPQC, dual do UPQC, com a vantagem de trabalhar com referências senoidais para executar o controle das variáveis do sistema. O conversor iUPQC possui dos filtros ativos de potência, o Filtro Ativo Série e o Filtro Ativo Paralelo, controlados em corrente e tensão, respectivamente. O filtro ativo série impõe uma corrente em corrente senoidal, equilibrada, livre de distorções e em fase com a tensão de rede, e o filtro ativo paralelo fornece à microrrede uma tensão senoidal, regulada, equilibrada e livre de distorções. Também nesse capítulo foi apresentada a possibilidade de implementar um elemento armazenador de energia acoplado ao barramento CC existente no conversor, a fim de aumentar as suas funções para com a rede e microrrede, sendo esse elemento armazenador bidirecional, ou seja, pode fornecer e absorver energia através do barramento CC, de acordo com as necessidades do sistema.

No capítulo 3 é apresentada a estrutura do conversor e os parâmetros utilizados para o projeto do condicionador iUPQC. Nesse capítulo também são apresentados os controladores do conversor e as equações matemáticas relevantes para descrever os fluxos de potência sobre os filtros ativos série e paralelo do iUPQC. Com os modelos matemáticos, foram geradas superfícies que servem como base para os resultados esperados de forma numérica e experimental no restante do trabalho.

O capítulo 4 contém todas as análises numéricas feitas sobre o conversor projetado, mostrando o comportamento esperado do iUPQC sob as condições propostas para uma análise dos fluxos de potência nos filtros ativos, a fim de validar a teoria apresentada no capítulo 3.

Para validar as simulações feitas no capítulo 4 referente às análises dos transientes do conversor iUPQC apresentado, foram feitas absorções de energia através de um degrau de corrente no barramento CC e os resultados foram apresentados, se mostrando bastante coerentes com os apresentados através de simulação numérica na Figura 13. Durante a primeira tentativa de conectar um elemento capaz de injetar energia através do barramento CC ao protótipo, ocorreram falhas que ocasionaram na falha nos drivers dos módulos inversores e, conseqüentemente, não foi possível obter os resultados experimentais dos pontos de operação que serviriam para fazer a análise dos fluxos de potência nos filtros ativos de acordo com a variação na injeção de potência através do sistema de armazenamento. Com isso, parte dos resultados teóricos e numéricos não puderam ser validados de forma experimental, no entanto, os resultados referentes aos pontos de operação que analisavam os fluxos de potência nos filtros ativos de acordo com a absorção de energia através do barramento CC tiveram resultados coerentes aos previstos pela teoria apresentada.

É possível notar que o formato das superfícies experimentais obtidas, quando comparado aos formatos das superfícies obtidas de formas experimental e numérica é semelhante nos pontos que foram medidos de forma experimental, mesmo possuindo uma carga experimental implementada às fases da microrrede menor do que as cargas utilizadas durante os cálculos

matemáticos e simulações, assim como uma potência sendo absorvida através do barramento CC maior do que as utilizadas para os cálculos e simulações. As normalizações em pu para a confecção das superfícies e o formato como as equações matemáticas apresentadas foram desenvolvidas levando em consideração variáveis referentes às outras fases, como a tensão total da microrrede ( $V_{\mu rdT}$ ), a tensão total da rede ( $V_{rdT}$ ) e a potência aparente total da microrrede ( $S_{\mu rdT}$ ), por exemplo, que fazem com que a superfície apresentadas sejam válidas para casos onde há desequilíbrio de cargas nas fases da microrrede, desequilíbrio na tensão das fases da rede e da microrrede, que é o que acontece nos resultados experimentais. Os resultados experimentais obtidos em função da potência absorvida pelo sistema de armazenamento tiveram maior amplitude do que as apresentadas nas superfícies teóricas e numéricas, devido à relação entre a potência absorvida e potência total na microrrede também ser maior e o comportamento da superfície em função de valores maiores de  $P_{saT}$  seguiu o mesmo comportamento das superfícies teóricas, o que valida o fluxo de potência sobre os filtros para casos onde  $P_{saT}$  possui é muito maior do que a potência necessária para alimentar as cargas da microrrede.

É importante conhecer o comportamento do fluxo de potência sobre o filtro quando há pouca potência sendo consumida pela microrrede, para que seja possível prever o comportamento do conversor nos casos onde é desejado fornecer/absorver da rede para descarregar/carregar o sistema de armazenamento a fim de fazer o deslocamento de consumo no tempo e, os resultados obtidos descrevem de forma satisfatória o fluxo de potência nos casos de recarga do sistema de armazenamento.

Os resultados experimentais foram interrompidos devido aos defeitos causados no condicionador de energia e, portanto, serão necessárias comprovações de que os resultados teóricos e numéricos descrevem também de forma satisfatória o comportamento do condicionador quando é feita a injeção de energia através do sistema de armazenamento localizado entre o barramento CC. Os danos causados ao condicionador foram causados devido ao acoplamento de uma fonte CC ao barramento CC sem uma impedância em série com a mesma, o que gerou um grande pico de corrente por um curto período de tempo, mas suficientemente grande para danificar os componentes eletrônicos dos módulos de potência. Sendo assim, para evitar novos danos ao conversor é necessário colocar uma resistência em série com a fonte CC que irá injetar energia através do barramento CC, para que essa resistência sirva como um limitador de corrente até que a tensão da fonte CC se estabilize e ela comece a ser controlada em corrente.

Outra proteção possível de ser implementada é uma proteção contra sobrecargas na microrrede, a fim de proteger o condicionador de casos onde flui mais potência sobre ele do que ele foi projetado para suportar.

Portanto, visando a continuidade desse trabalho, as sugestões para trabalhos futuros são:

- Coleta de dados com sistema de armazenamento injetando energia no sistema e validação completa das superfícies propostas;
- Aumentar a quantidade de pontos de operação, a fim de conseguir superfícies numéricas

e experimentais com maior resolução para comparação mais precisa com a superfície teórica;

- Analisar o comportamento do conversor com cargas não lineares conectadas à microrrede;
- Estudo de métodos de melhor distribuição do fluxo de potência entre os dois filtros ativos;
- Implementação de um controlador digital para substituição do atual controle analógico;
- Implementação de sistemas de segurança para o condicionador de energia iUPQC, a fim de evitar novos danos ao condicionador.

## REFERÊNCIAS

- ANEEL. **Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional –PRODIST: Módulo 8 – qualidade da energia elétrica.** [S.l.: s.n.], 2021. Citado na página 18.
- BARBI, I. **Projeto de Fontes Chaveadas.** Edição do autor. [S.l.: s.n.], 2001. Florianópolis. Citado na página 36.
- BELLINASSO, L.V. **Inversores Fotovoltaicos Conectados à Rede com Armazenamento de Energia - Classificação, Recomendações Técnicas e Gerenciamento.** [S.l.: s.n.], 2017. Citado na página 30.
- CELESC. **Tarifas de Energia.** [s.n.], 2022. Disponível em: <<https://www.celesc.com.br/tarifas-de-energia>>. Acesso em: 01 de agosto de 2022. Citado na página 30.
- FAGUNDES, S.M. **Estudo de um Condicionador Dual de Qualidade de Energia (iUPQC) com Controle do Fluxo de Potências entre os Conversores Série e Paralelo: Tese de doutorado.** universidade do estado de santa catarina - udesc. [S.l.: s.n.], 2020. Citado 2 vezes nas páginas 24 e 33.
- FUJITA, H.; AKAGI, H. **The Unified Power Quality Conditioner: The Integration of Series-and Shunt-Active Filters:** 13(2), 315-322. [S.l.]: IEEE Transactions On Power Electronics, 1998. Citado na página 22.
- GIACOMINI, N. et al. **Generic generator of three-phase periodic signals for application in AC power sources.** Blumenau: COBEP Power Electronics Conference, 2007, September. Citado na página 60.
- HATZIARGYRIOU, N et al. **Microgrids.** [S.l.]: IEEE Power Energy Mag, 2007. Vol. 5, no. 4, pp. 78–94, Jul. Citado na página 17.
- HOLMES, D. Grahame; LIPO, Thomas A. **Pulse width modulation for power converters: principles and practice.** [S.l.]: John Wiley Sons, 2003. Citado na página 21.
- IEEE. **IEEE Standard Definitions for the Measurement of Electric Power Quantities Under Sinusoidal, Nonsinusoidal, Balanced, or Unbalanced Conditions.** pp.1-50: IEEE Std 1459-2010 (Revision of IEEE Std 1459- 2000), 2010. Citado na página 39.
- KHADKIKAR, V. **Enhancing Electric Power Quality Using UPQC: A Comprehensive Overview.** [S.l.]: IEEE transactions on Power Electronics, 2011. V. 27, n. 5, p. 2284-2297, 2011. Citado na página 18.
- LASSETER, R.H. **MicroGrids.** [S.l.]: 2 IEEE Power Engineering Society Winter Meeting. Conference Proceedings (Cat. No.02CH37309), 2002. Vol. 1, no. C, pp. 305–308. Citado na página 17.
- MAFFEZZOLLI, Allan Diego et al. **Técnica de Limitação de Corrente por Meio de Resistência Virtual Não Linear Aplicado a um DSTATCOM Controlado em Tensão.** [S.l.]: Congresso Brasileiro de Automática-CBA, 2019. Citado na página 25.
- MONTEIRO, L.F.; AREDES, M; NETO, J.M. **A control strategy for unified power quality conditioner.** [S.l.]: 2003 IEEE International Symposium on Industrial Electronics, 2003. P. 391-396. Citado na página 23.

- MORAN, S. **A line voltage regulator/conditioner for harmonic-sensitive load isolation**. [S.l.]: Conference Record of the IEEE Industry Applications Society Annual Meeting, 1989. P. 947-951. Citado na página 23.
- PAITHANKAR, S; ZENDE, R. **Comparison between UPQC, iUPQC and improved iUPQC**. [S.l.]: 2017 third international conference on sensing, signal processing and security, 2017. P. 61-64. Citado na página 18.
- SANTOS, R.J.M DOS. **Condicionador Unificado de Qualidade de Energia Dual com Controle Simplificado**: Universidade do estado de santa catarina - udesc. [S.l.: s.n.], 2012. Citado 10 vezes nas páginas 25, 33, 34, 44, 46, 58, 59, 60, 61 e 63.
- SILVA, E.L.C. **Desenvolvimento de conversor bidirecional isolado para controle de carga e descarga de bancos de baterias**. [S.l.: s.n.], 2018. Dissertação de Mestrado. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Citado na página 26.
- SILVA, G.A.T. **Modos de operação de uma microrrede de baixa tensão baseada em inversores de potência**. [S.l.: s.n.], 2014. Universidade Federal do Espírito Santo. Citado na página 27.
- SILVA, S. A. O. DA. **Sistemas de Energia Ininterrupta Line Interactive Trifásico com Compensação Ativa de Potência Série e Paralela**: Tese de doutorado. [S.l.]: Universidade Federal de Minas Gerais, Dezembro, 2001. Citado na página 40.
- SIOSHANSI, F. **Evolution of Global Electricity Markets: New paradigms, new challenges, new approaches**. [S.l.]: Academic Press, 2013. Citado na página 17.
- SUPPLIER. **Manual do Usuário - Conjunto Inversor Trifásico SPCIT 1000-60-20**. [S.l.]: Joinville, [s.n.], 2017. Citado na página 57.