



UNIVERSIDADE FEDERAL FLUMINENSE  
ESCOLA DE ENGENHARIA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA E DE  
TELECOMUNICAÇÕES

VICTOR DA SILVA MONTEIRO

Funcionalidade adicional de compensação  
harmônica *shunt* na barra de conexão por um  
condicionador unificado de qualidade de  
energia

NITERÓI

2022

UNIVERSIDADE FEDERAL FLUMINENSE  
ESCOLA DE ENGENHARIA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA E DE  
TELECOMUNICAÇÕES

VICTOR DA SILVA MONTEIRO

Funcionalidade adicional de compensação  
harmônica *shunt* na barra de conexão por um  
condicionador unificado de qualidade de  
energia

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e de Telecomunicações da Universidade Federal Fluminense como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica e de Telecomunicações. Área de concentração: Sistemas de Energia Elétrica.

Orientador:  
Bruno Wanderley França

NITERÓI

2022

Ficha catalográfica automática - SDC/BEE  
Gerada com informações fornecidas pelo autor

M772f Monteiro, Victor da Silva  
Funcionalidade adicional de compensação harmônica shunt na barra de conexão por um condicionador unificado de qualidade de energia / Victor da Silva Monteiro. - 2022. 146 f.: il.

Orientador: Bruno Wanderley França.  
Dissertação (mestrado)-Universidade Federal Fluminense, Escola de Engenharia, Niterói, 2022.

1. Eletrônica de potência. 2. Qualidade de energia elétrica. 3. Simulação. 4. Corrente harmônica. 5. Produção intelectual. I. França, Bruno Wanderley, orientador. II. Universidade Federal Fluminense. Escola de Engenharia. III. Título.

CDD - XXX

# VICTOR DA SILVA MONTEIRO

Funcionalidade adicional de compensação harmônica *shunt* na barra de conexão por um condicionador unificado de qualidade de energia

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e de Telecomunicações da Universidade Federal Fluminense como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica e de Telecomunicações. Área de concentração: Sistemas de Energia Elétrica.

Aprovada em 22 de dezembro de 2022.

## BANCA EXAMINADORA



---

Prof. Bruno Wanderley França, D.Sc. – Orientador, UFF



---

Prof. Guilherme Gonçalves Sotelo, D.Sc. – UFF

---

Prof. Jesús de la Casa Hernández, Ph.D. – UJA



Firmado digitalmente por  
DE LA CASA HERNANDEZ  
JESUS - 26003937E  
Fecha: 2022.12.26 08:02:58  
+01'00'

Niterói

2022

*À minha família.*

# Agradecimentos

Agradeço primeiramente aos meus pais, Jairo e Eugenia, e ao meu irmão, Rodrigo, por sempre me apoiarem nos meus estudos e estarem ao meu lado quando eu mais preciso. E isso se estende a toda a minha família.

Agradeço especialmente à minha companheira de todos os momentos, Izadora, pela ajuda, paciência e por seu carinho ao longo da jornada do mestrado.

Sou grato aos amigos fora da vida acadêmica, que me proporcionaram diversão ao longo dos exaustivos meses de investimento nas minhas pesquisas.

A todos os meus colegas de laboratório do Núcleo de Inovação Tecnológica em Engenharia Elétrica (NITEE) da Universidade Federal Fluminense (UFF), meus sinceros agradecimentos por toda ajuda relacionada ao presente trabalho e a outros projetos, além da infraestrutura que contribuiu para as análises realizadas. Claro que não posso deixar de mencionar, em especial, meu orientador, Bruno França, pelas sugestões e discussões ao longo do desenvolvimento da dissertação, e também pela paciência e pela confiança.

Deixo aqui meus agradecimentos aos colegas pesquisadores que conheci no XXIV Congresso Brasileiro de Automática (CBA 2022), pelo interesse e pelos debates sobre meu projeto de mestrado, além dos momentos de descontração.

Agradeço à empresa Typhoon HIL Inc., pelo suporte dado, sanando dúvidas pertinentes relacionadas ao desenvolvimento da dissertação.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001. Portanto, agradeço à entidade.

# Resumo

O mundo vive uma era de grandes mudanças. Preocupações com o meio ambiente, evolução tecnológica cada vez mais intensa, crise energética, entre outros tópicos fomentam a pesquisa científica na área de engenharia elétrica. Com relação à qualidade da energia elétrica nos sistemas de potência, é possível destacar o equipamento conhecido como Condicionador Unificado de Qualidade de Energia (UPQC). Esse dispositivo é classificado como um condicionador de energia série-paralelo, sendo formado por dois filtros ativos conectados entre si no modo *back-to-back*, cujo elo de corrente contínua possui uma capacitância que atua no balanceamento de energia. Um dos conversores de potência é conectado em série com a rede, através de transformadores, e o outro é conectado em paralelo, podendo ser ou não através de transformadores. Sua finalidade é atuar na compensação de distúrbios de corrente e tensão simultaneamente no ponto de conexão. Sua utilidade se destaca em locais do sistema elétrico onde há cargas não-lineares e cargas sensíveis a distúrbios. O presente trabalho visa estudar a topologia dual desse equipamento através do *software* da empresa Typhoon HIL Inc., e propor uma nova funcionalidade para o dispositivo. Por ser um programa computacional relativamente novo, são apresentadas suas características relevantes. O desenvolvimento se dá na inclusão de uma etapa de controle que permita que o UPQC compense conteúdo harmônico de corrente na fonte de alimentação na presença de uma carga *shunt* não-linear próximo à fonte. Essa dissertação tem caráter de inovação, pois a bibliografia científica revisada ao longo do curso de mestrado não apresenta tal melhoria no UPQC dual. Resultados são demonstrados de forma a confirmar o que é proposto aqui.

**Palavras-chave:** Condicionador Unificado de Qualidade de Energia (UPQC), Teoria da Potência Instantânea, Qualidade de Energia Elétrica, Typhoon HIL.

# Abstract

The world lives in an era of great changes. Concerns about the environment, increasingly intense technological evolution, energy crisis, among other topics, encourage scientific research in electrical engineering area. With regard to the power quality in power systems, it is possible to highlight the equipment known as Unified Power Quality Conditioner (UPQC). This device is classified as a series-shunt power conditioner, consisting of two active filters connected together in back-to-back mode, whose direct current link has a capacitance that acts in energy balance. One of the power converters is connected in series with the network, through transformers, and the other is connected in parallel, whether or not through transformers. Its purpose is to compensate current and voltage disturbances simultaneously at the connection point. Its usefulness stands out in places in the electrical system where there are non-linear loads and loads sensitive to disturbances. The present work aims to study the dual topology of this equipment through the software of the company Typhoon HIL Inc., and to propose a new functionality for the device. As it is a relatively new computer program, its relevant characteristics are presented. The development takes place in the inclusion of a control step that allows the UPQC to compensate current harmonic content in the power supply in the presence of a non-linear shunt load close to the source. This dissertation has an innovative character, as the scientific bibliography reviewed throughout the master's course does not show such an improvement in the dual UPQC. Results are shown in order to confirm what is proposed here.

**Keywords:** Unified Power Quality Conditioner (UPQC), Instantaneous Power Theory, Power Quality, Typhoon HIL.

# Lista de Figuras

1.1	Quantidade de artigos publicados utilizando o Typhoon HIL ao longo dos anos [1]. . . . .	4
2.1	Filtro ativo tipo paralelo ( <i>shunt</i> ) [2]. . . . .	21
2.2	Filtro ativo tipo série [2]. . . . .	22
2.3	Filtro ativo tipo híbrido (combinação de filtro ativo série com filtros passivos paralelos) [2, 3]. . . . .	23
2.4	Filtro ativo tipo híbrido (combinação de filtro ativo <i>shunt</i> com filtros passivos paralelos) [4]. . . . .	23
2.5	Condicionador Série-Paralelo [2]. . . . .	24
3.1	Diagrama do UPQC original ideal [5]. . . . .	27
3.2	Diagrama do UPQC dual ideal [5]. . . . .	31
3.3	Pontos de medição para o controle do UPQC dual. . . . .	34
3.4	Controle base do UPQC dual [5, 6]. . . . .	35
3.5	Circuito do q-PLL [2, 5, 7]. . . . .	35
3.6	Detector de amplitude [2]. . . . .	37
3.7	Controle PWM do UPQC dual [5, 6]. . . . .	39
4.1	Simulação a) <i>offline</i> mais lenta que o tempo real b) <i>offline</i> mais rápida que o tempo real c) em tempo real [8, 9, 10]. . . . .	43
4.2	<i>Controller Hardware-in-the-Loop</i> (C-HIL). . . . .	45
4.3	<i>Power Hardware-in-the-Loop</i> (P-HIL). . . . .	45
4.4	<i>Software-in-the-Loop</i> (SIL). . . . .	46

---

4.5	Casos de conflitos topológicos, suas degenerações e possíveis soluções a) fontes de corrente em série b) fontes de tensão em paralelo com capacitores c) fonte de corrente em série com chave aberta [11]. . . . .	49
4.6	Representação do bloco <i>Single Phase Core Coupling</i> [11]. . . . .	51
4.7	Representação do bloco <i>Core Coupling</i> a) de 3 terminais b) de 4 terminais c) de 5 terminais [11]. . . . .	51
4.8	Exemplo de bloco <i>Core Coupling</i> com <i>snubbers</i> [11]. . . . .	52
4.9	Foto do <i>hardware</i> HIL402. . . . .	54
5.1	Diagrama da rede elétrica. . . . .	56
5.2	Tensões e correntes na rede durante o cenário 1. . . . .	57
5.3	Tensões e correntes na rede durante o cenário 2. . . . .	57
5.4	Tensões e correntes na rede durante o cenário 3. . . . .	58
5.5	Rede com UPQC dual idealizado. . . . .	59
5.6	Controle do UPQC dual idealizado. . . . .	60
5.7	Rede modelada com UPQC dual idealizado. . . . .	61
5.8	Correntes na rede elétrica no teste “ideal1”. . . . .	63
5.9	Correntes na rede elétrica no teste “ideal2”. . . . .	64
5.10	Correntes na rede elétrica para o pior cenário de carga com UPQC idealizado (Teste “ideal1”). . . . .	64
5.11	Tensões na rede elétrica para o pior cenário da fonte com UPQC idealizado (Teste “ideal2”). . . . .	65
5.12	Tensões na rede elétrica para a fonte com 7 <sup>a</sup> harmônica e com UPQC idealizado (Teste “ideal2”). . . . .	65
5.13	Tensões na rede elétrica ao longo de toda análise e destaque para a situação com ambas as cargas ligadas (Teste “ideal1”). . . . .	66
5.14	Tensões na rede elétrica ao longo de toda análise e destaque para a situação de pior cenário (Teste “ideal2”). . . . .	67
5.15	Tensão no capacitor do elo CC para o UPQC dual idealizado. . . . .	67

---

5.16	Sistema elétrico com UPQC dual. . . . .	69
5.17	Possíveis locais de particionamento do sistema com UPQC dual. . . . .	71
5.18	Subcircuito com compensador paralelo. . . . .	72
5.19	Subcircuito com compensador série. . . . .	72
5.20	Subcircuito com cargas. . . . .	72
5.21	Subcircuito com fonte de alimentação. . . . .	73
5.22	Sistema elétrico com UPQC dual e adição dos blocos de particionamento. .	74
5.23	Tensões na rede com carga não-linear e UPQC dual desligado. . . . .	76
5.24	Correntes na rede com carga não-linear e UPQC dual desligado. . . . .	77
5.25	Tensões na rede sem carga e UPQC dual ligado. . . . .	77
5.26	Correntes na rede sem carga e UPQC dual ligado. . . . .	78
5.27	Tensões na rede com carga não-linear e UPQC dual ligado. . . . .	78
5.28	Correntes na rede com carga não-linear e UPQC dual ligado. . . . .	78
5.29	Tensões na rede com cargas não-linear e bifásica, distúrbios de tensão na fonte e UPQC dual ligado. . . . .	79
5.30	Correntes na rede com cargas não-linear e bifásica, distúrbios de tensão na fonte e UPQC dual ligado. . . . .	79
5.31	Tensões na barra da carga compensadas para a rede com cargas não-linear e bifásica, distúrbios de tensão na fonte e UPQC dual ligado em comparação com senoides fundamentais. . . . .	80
5.32	Correntes na barra da fonte compensadas para a rede com cargas não-linear e bifásica, distúrbios de tensão na fonte e UPQC dual ligado em comparação com senoides fundamentais. . . . .	80
5.33	Potências ativas médias de cada parte da rede elétrica com o UPQC dual. .	81
5.34	Potências ativas oscilantes de cada parte da rede elétrica com o UPQC dual.	81
5.35	Tensões e correntes no sistema elétrico para uma ocorrência de VTCD de 0,7 pu. . . . .	83

---

5.36	Tensões e correntes no sistema elétrico para um desequilíbrio de tensão de 0,1 pu. . . . .	83
5.37	Tensões e correntes no sistema elétrico para uma distorção harmônica de tensão de sétima ordem com amplitude de 0,1 pu. . . . .	84
6.1	Sistema elétrico com UPQC dual para estudo do aprimoramento no controle.	88
6.2	Controle base das referências de tensão e corrente considerando a compensação harmônica <i>shunt</i> na barra da fonte. . . . .	90
6.3	Controlador ressonante. . . . .	90
6.4	Controle PWM do UPQC dual considerando a compensação harmônica <i>shunt</i> na barra da fonte. . . . .	91
6.5	Tensões na rede durante o “teste1”. . . . .	92
6.6	Correntes na rede durante o “teste1”. . . . .	93
6.7	Comparação de tensões na rede durante o “teste1” sem e com a nova funcionalidade. . . . .	93
6.8	Comparação de correntes na rede durante o “teste1” sem e com a nova funcionalidade. . . . .	94
6.9	Comparação de tensões na rede durante o “teste2” com a nova funcionalidade para a situação de acionamento da carga <i>shunt</i> com as demais cargas já ligadas. . . . .	96
6.10	Comparação de correntes na rede durante o “teste2” com a nova funcionalidade para a situação de acionamento da carga <i>shunt</i> com as demais cargas já ligadas. . . . .	96
A.1	Painel inicial do <i>software</i> Typhoon HIL [11]. . . . .	112
A.2	Área de trabalho do <i>Schematic Editor</i> [11]. . . . .	112
A.3	Painel para declaração de variáveis [11]. . . . .	113
A.4	Área de trabalho do <i>HIL SCADA</i> [11]. . . . .	114
A.5	Blocos de fontes de tensão e corrente [11]. . . . .	115
A.6	Blocos de elementos passivos [11]. . . . .	116
A.7	Bloco de retificador trifásico [11]. . . . .	116

---

A.8	Topologia de retificador trifásico [11]. . . . .	117
A.9	Bloco de inversor trifásico [11]. . . . .	117
A.10	Topologia de inversor trifásico [11]. . . . .	118
A.11	Bloco de transformador [11]. . . . .	118
A.12	Circuito do bloco de transformador [11]. . . . .	118
A.13	Blocos de medidores [11]. . . . .	119
A.14	Blocos de contadores [11]. . . . .	119
A.15	Bloco de fonte de tensão senoidal controlada por sinal [11]. . . . .	120
A.16	Rede modelada sem UPQC no <i>software</i> Typhoon HIL. . . . .	121
A.17	Rede modelada com UPQC dual idealizado no <i>software</i> Typhoon HIL. . . . .	122
A.18	Rede modelada com UPQC dual no <i>software</i> Typhoon HIL. . . . .	123
A.19	Rede modelada com UPQC dual no <i>software</i> Typhoon HIL para a nova compensação. . . . .	124

# Lista de Tabelas

2.1	Classificação dos níveis de tensão. . . . .	10
2.2	Classificação das variações de tensão de curta duração. . . . .	10
2.3	Limites das distorções harmônicas totais de tensão. . . . .	13
2.4	Limites das distorções harmônicas individuais de tensão segundo a norma EN 50160. . . . .	14
2.5	Limites das distorções harmônicas de corrente segundo a norma IEEE Std 519 (2014). . . . .	15
2.6	Limites das distorções harmônicas de corrente segundo a norma IEC Std 61000-3-2 (2014). . . . .	15
4.1	Características de <i>firmware</i> do <i>hardware</i> modelo HIL402. . . . .	47
4.2	Características físicas do <i>hardware</i> modelo HIL402. . . . .	54
5.1	Cenários de carga na rede elétrica sem UPQC. . . . .	56
5.2	THD% de tensão e corrente para o Cenário 3 de carga na rede elétrica sem UPQC. . . . .	58
5.3	Teste “ideal1”. . . . .	62
5.4	Teste “ideal2”. . . . .	63
5.5	THD% de corrente para o teste “ideal1” na pior condição. . . . .	65
5.6	THD% de tensão para o teste “ideal2” na pior condição. . . . .	66
5.7	Filtros passivos dos conversores. . . . .	69
5.8	Parâmetros dos transformadores monofásicos. . . . .	70
5.9	Ganhos dos controladores PI na rede com UPQC dual real. . . . .	70
5.10	Avaliação de THD% sem UPQC dual e com cargas não-linear e bifásica ligadas em comparação com rede base (sem <i>snubbers</i> ). . . . .	75

---

5.11	Rotina de testes de distúrbios e compensações na rede com UPQC dual. . .	76
5.12	Valores de THD% para a rede com distorção harmônica de tensão de ordem 7 e amplitude igual a 0,1 pu. . . . .	84
6.1	Rotina de testes para avaliar a nova funcionalidade do controle do UPQC dual com carga da fonte ligando antes. . . . .	92
6.2	Comparação de THD% sem e com a nova função de controle do UPQC dual atuando na rede com carga <i>shunt</i> na barra da fonte. . . . .	94
6.3	Comparação de $DIC_h\%$ de 5 <sup>a</sup> e 7 <sup>a</sup> ordens para a rede com carga <i>shunt</i> sem a nova funcionalidade de controle atuando em relação à rede com todas as cargas e com controle completo do UPQC dual. . . . .	95
6.4	Rotina de testes para avaliar a nova funcionalidade do controle do UPQC dual com carga da fonte ligando depois. . . . .	95
6.5	Comparação de THD% com a nova função de controle do UPQC dual atuando na rede com cargas não-linear e bifásica na barra de carga sem e com carga <i>shunt</i> na barra da fonte. . . . .	97

# Lista de Abreviaturas e Siglas

<b>3P3W</b>	trifásico a três fios (do inglês, <i>three-phase three-wire</i> ) . . . . .	28
<b>3P4W</b>	trifásico a quatro fios (do inglês, <i>three-phase four-wire</i> ) . . . . .	28
<b>ABSOLAR</b>	Associação Brasileira de Energia Solar Fotovoltaica . . . . .	2
<b>ANEEL</b>	Agência Nacional de Energia Elétrica . . . . .	8
<b>ANSI</b>	<i>American National Standards Institute</i> . . . . .	8
<b>BEN</b>	Balanço Energético Nacional . . . . .	2
<b>CA</b>	corrente alternada . . . . .	20
<b>CC</b>	corrente contínua . . . . .	20
<b>CENELEC</b>	Comitê Europeu de Normalização Eletrotécnica . . . . .	8
<b>C-HIL</b>	<i>Controller Hardware-in-the-Loop</i> . . . . .	44
<b>CIGRÉ</b>	Comitê Internacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica	11
<b>CPU</b>	<i>Central Processing Unit</i> . . . . .	43
<b>CSV</b>	valores separados por vírgula . . . . .	114
<b>DIC<sub>h</sub>%</b>	distorção harmônica de corrente individual de ordem h . . . . .	14
<b>DIT<sub>h</sub>%</b>	distorção harmônica individual de tensão de ordem h . . . . .	12
<b>DTC%</b>	distorção harmônica total de corrente . . . . .	14
<b>DTT%</b>	distorção harmônica total de tensão . . . . .	12
<b>DTT<sub>3</sub>%</b>	distorção harmônica total de tensão para as componentes múltiplas de 3 . . . . .	13
<b>DTT<sub>i</sub>%</b>	distorção harmônica total de tensão para as componentes ímpares não múltiplas de 3 . . . . .	13
<b>DTT<sub>p</sub>%</b>	distorção harmônica total de tensão para as componentes pares não múltiplas de 3 . . . . .	13
<b>EPE</b>	Empresa de Pesquisa Energética . . . . .	2

<b>FD%</b>	fator de desequilíbrio . . . . .	11
<b>FP</b>	fator de potência . . . . .	15
<b>FPD</b>	fator de potência de deslocamento . . . . .	16
<b>FPGA</b>	<i>Field Programmable Gate Array</i> . . . . .	42
<b>GD</b>	geração distribuída . . . . .	9
<b>HIL</b>	<i>Hardware-in-the-Loop</i> . . . . .	5
<b>HuT</b>	<i>Hardware-under-Test</i> . . . . .	5
<b>IEA</b>	<i>International Energy Agency</i> . . . . .	2
<b>IEC</b>	Comissão Eletrotécnica Internacional . . . . .	8
<b>IEEE</b>	Instituto de Engenheiros Eletricistas e Eletrônicos . . . . .	8
<b>Inc.</b>	<i>Incorporated</i> . . . . .	4
<b>IT</b>	transformador ideal (do inglês, <i>Ideal Transformer</i> ) . . . . .	50
<b>NITEE</b>	Núcleo de Inovação Tecnológica em Engenharia Elétrica . . . . .	44
<b>ONS</b>	Operador Nacional do Sistema Elétrico . . . . .	8
<b>PCC</b>	ponto de conexão comum . . . . .	2
<b>P-HIL</b>	<i>Power Hardware-in-the-Loop</i> . . . . .	45
<b>PI</b>	proporcional-integral . . . . .	35
<b>PLL</b>	<i>Phase Locked Loop</i> . . . . .	34
<b>PRODIST</b>	Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional . . . . .	8
<b>pu</b>	por unidade . . . . .	9
<b>PWM</b>	modulação por largura de pulso (do inglês, <i>pulse width modulation</i> ) . . . . .	20
<b>QEE</b>	qualidade de energia elétrica . . . . .	2
<b>RCC</b>	Relação de Curto-Circuito . . . . .	14
<b>RDT</b>	restaurador dinâmico de tensão . . . . .	22
<b>RTS</b>	simulação em tempo real (do inglês, <i>real-time simulation</i> ) . . . . .	3
<b>SI</b>	Sistema Internacional de Unidades . . . . .	117
<b>SIL</b>	<i>Software-in-the-Loop</i> . . . . .	45
<b>SIN</b>	Sistema Interligado Nacional . . . . .	17

---

<b>SPC</b>	<i>Standard Processing Core</i> . . . . .	47
<b>STATCOM</b>	compensador síncrono estático (do inglês, <i>Static Synchronous Compensator</i> ) . . . . .	23
<b>THD%</b>	Taxa de Distorção Harmônica Total (do inglês, <i>Total Harmonic Distortion</i> ) . . . . .	12
<b>TLM</b>	modelo de linha de transmissão (do inglês, <i>Transmission Line Model</i> ) . . . . .	50
<b>UFF</b>	Universidade Federal Fluminense . . . . .	44
<b>UPFC</b>	Condicionador Unificado de Fluxo de Potência (do inglês, <i>Unified Power Flow Controller</i> ) . . . . .	24
<b>UPLC</b>	Condicionador Universal de Energia (do inglês, <i>Universal Active Power Line Conditioner</i> ) . . . . .	24
<b>UPQC</b>	Condicionador Unificado de Qualidade de Energia (do inglês, <i>Unified Power Quality Conditioner</i> ) . . . . .	1
<b>UPS</b>	fonte de alimentação ininterrupta (do inglês, <i>uninterruptible power supply</i> ) . . . . .	18
<b>V-HIL</b>	<i>Virtual Hardware-in-the-Loop</i> . . . . .	45
<b>VTCD</b>	Variação de tensão de curta duração . . . . .	8

# Sumário

<b>1</b>	<b>Introdução</b>	<b>1</b>
1.1	Contextualização . . . . .	1
1.2	Motivação . . . . .	3
1.3	Objetivos . . . . .	3
1.4	Metodologia . . . . .	4
1.5	Contribuições . . . . .	5
1.6	Estrutura da Dissertação . . . . .	6
<b>2</b>	<b>Qualidade de Energia Elétrica (QEE)</b>	<b>7</b>
2.1	Fenômenos de QEE . . . . .	8
2.1.1	Tensão em Regime Permanente . . . . .	9
2.1.2	Variação de Tensão de Curta Duração (VTCD) . . . . .	10
2.1.3	Desequilíbrio de Tensão e Corrente . . . . .	11
2.1.4	Distorções Harmônicas . . . . .	12
2.1.5	Fator de potência (FP) . . . . .	15
2.1.6	Outros fenômenos de qualidade de energia elétrica . . . . .	17
2.2	Soluções de QEE . . . . .	18
2.2.1	Fonte de alimentação ininterrupta . . . . .	18
2.2.2	Regulador de tensão . . . . .	19
2.2.3	Compensador síncrono . . . . .	19
2.2.4	Banco de capacitores . . . . .	19
2.2.5	Filtro passivo . . . . .	20

---

2.2.6	Filtro ativo . . . . .	20
2.2.7	Condicionador de energia . . . . .	22
2.3	Síntese do capítulo . . . . .	25
<b>3</b>	<b>Condicionador Unificado de Qualidade de Energia</b>	<b>26</b>
3.1	UPQC clássico . . . . .	26
3.2	Estado da arte do UPQC . . . . .	28
3.3	UPQC dual . . . . .	29
3.3.1	Teoria da Potência Instantânea (Teoria PQ) . . . . .	31
3.3.2	Controle do UPQC dual . . . . .	33
3.4	Síntese do capítulo . . . . .	39
<b>4</b>	<b>Princípios de simulação</b>	<b>41</b>
4.1	Simulação em tempo real (RTS) e sistemas <i>hardware-in-the-loop</i> (HIL) . . . . .	41
4.2	Modelagem no Typhoon HIL . . . . .	46
4.2.1	Complexidade do modelo . . . . .	46
4.2.2	Limitações de configurações de modelagem . . . . .	47
4.2.3	Terra como ponto de referência de um circuito . . . . .	48
4.2.4	Conflitos topológicos . . . . .	48
4.2.5	Particionamento de circuitos . . . . .	50
4.2.6	Snubbers . . . . .	52
4.3	Hardware HIL402 . . . . .	53
4.4	Síntese do capítulo . . . . .	53
<b>5</b>	<b>Modelagem do UPQC dual</b>	<b>55</b>
5.1	Modelagem da rede elétrica . . . . .	55
5.2	Modelo ideal do UPQC dual . . . . .	59
5.2.1	Avaliação do Particionamento da rede com UPQC ideal . . . . .	61

---

5.2.2	Prova de conceito com UPQC ideal . . . . .	62
5.2.3	Análise do Fluxo de Potência . . . . .	68
5.3	Modelo real do UPQC dual . . . . .	68
5.3.1	Avaliação do Particionamento da rede com UPQC real . . . . .	70
5.3.2	Principais resultados das simulações . . . . .	75
5.3.3	Análises de QEE . . . . .	82
5.4	Síntese do capítulo . . . . .	84
<b>6</b>	<b>Simulação do UPQC dual para compensação harmônica na barra da fonte</b>	<b>86</b>
6.1	Alterações na modelagem para análise da compensação harmônica <i>shunt</i> na barra da fonte . . . . .	86
6.2	Aprimoramento no controle para a nova compensação . . . . .	89
6.3	Resultados da nova função de compensação . . . . .	91
6.4	Síntese do capítulo . . . . .	96
<b>7</b>	<b>Conclusões e Trabalhos Futuros</b>	<b>98</b>
7.1	Conclusões . . . . .	98
7.2	Trabalhos Futuros . . . . .	100
	<b>Referências</b>	<b>102</b>
	<b>Apêndice A – Typhoon HIL</b>	<b>111</b>
A.1	Software . . . . .	111
A.1.1	Editor . . . . .	112
A.1.2	Painel Supervisório . . . . .	114
A.1.3	Analisador de Sinais . . . . .	114
A.1.4	Outras ferramentas . . . . .	115
A.2	Elementos utilizados . . . . .	115

---

A.2.1	Fontes de tensão e corrente . . . . .	115
A.2.2	Elementos passivos . . . . .	116
A.2.3	Conversores de potência . . . . .	116
A.2.4	Transformadores . . . . .	117
A.2.5	Medidores . . . . .	119
A.2.6	Outros elementos . . . . .	119
A.3	Circuitos modelados . . . . .	120

# Capítulo 1

## Introdução

Ao longo das últimas décadas a preocupação com a qualidade de energia em sistemas elétricos vem aumentando. Estratégias para tentar manter as redes com tensões e correntes puramente senoidais e magnitude constante têm sido temas de estudos recentes. O presente trabalho se encaixa nesse contexto, tendo o objetivo de estudar um equipamento conhecido como Condicionador Unificado de Qualidade de Energia (do inglês, *Unified Power Quality Conditioner*) (UPQC), contribuindo para o seu desenvolvimento através da adição de uma nova funcionalidade operativa.

Este capítulo está dividido da seguinte forma: na Seção 1.1 é feita uma contextualização de um dos atuais problemas enfrentados na engenharia elétrica com uma possível solução que vem sendo desenvolvida no meio científico. A Seção 1.2 enuncia a motivação do projeto. Na Seção 1.3 são discorridos os objetivos da pesquisa. A Seção 1.4 apresenta a metodologia utilizada. As contribuições do presente trabalho são expostas na Seção 1.5. Por fim, na Seção 1.6, a estrutura da dissertação é definida.

### 1.1 Contextualização

O mundo está, atualmente, vivenciando uma crise energética sem precedentes. Mudanças climáticas, emissões de carbono, fontes limpas e renováveis de energia, uso e precificação de combustíveis fósseis, e acesso à diferentes formas de energia em locais remotos, são alguns dos temas mais discutidos por entidades governamentais e instituições internacionais [12, 13].

Especificamente com relação à energia elétrica, o uso de painéis fotovoltaicos e turbinas eólicas vem aumentando e tem uma projeção de crescimento exponencial para os próximos

anos até 2050. De acordo com a *International Energy Agency* (IEA), essas fontes são tratadas como a principal solução do setor elétrico para reduzir a emissão de carbono [12]. Especificamente no Brasil, o Balanço Energético Nacional (BEN) de 2022 [14], da Empresa de Pesquisa Energética (EPE), mostra que a produção de eletricidade através dessas fontes continua crescendo mesmo com a crise econômica nos últimos anos acarretada pela pandemia de COVID-19. Conforme dados da Associação Brasileira de Energia Solar Fotovoltaica (ABSOLAR) [15], a potência instalada dessas fontes juntas já representa mais de 20 % da matriz elétrica brasileira.

Uma vez que as fontes de energia fotovoltaica e eólica possuem dispositivos de eletrônica de potência em seus sistemas de geração e condicionamento para conexão com a rede elétrica, então mais equipamentos de característica não-linear serão conectados no sistema elétrico nos próximos anos, devido à tendência de aumento do uso dessas fontes. Somado aos sistemas de geração estão as cargas baseadas em eletrônica de potência que, com o avanço da tecnologia de semicondutores ao longo das últimas décadas, estão cada vez mais presentes nos ambientes residenciais, comerciais e industriais [16, 17].

Dentro desse contexto, a preocupação com a qualidade de energia elétrica (QEE) possui grande relevância para a engenharia elétrica, pois é sabido que os equipamentos de eletrônica de potência, devido ao chaveamento dos semicondutores, introduzem harmônicos na rede.

Diversas soluções para a manutenção da QEE na rede elétrica vêm sendo estudadas. Um equipamento que chama a atenção pela sua robustez e capacidade de mitigar distúrbios de tensão e de corrente concomitantemente é o UPQC. Esse dispositivo foi desenvolvido no final do século passado, por [18] e tem sido estudado e aprimorado ao longo dos anos, como por exemplo em [5, 19, 20, 21, 22, 23, 24, 25, 26, 27, 28, 29, 30, 31, 32, 33, 34].

O UPQC é um equipamento formado pela união de dois filtros ativos no modo *back-to-back* com um dos conversores conectado em série com a rede e o outro conectado em paralelo. Resumidamente, o condicionador série atua como uma fonte de tensão e o condicionador paralelo como uma fonte de corrente. Seu uso se torna justificável em pontos da rede elétrica onde há cargas não-lineares e também cargas sensíveis a distúrbios de corrente e tensão. Seu sistema clássico de controle identifica os distúrbios e gera sinais para que o chaveamento dos semicondutores ocorra de tal forma que haja a mitigação. Assim, as tensões e correntes no ponto crítico da rede onde o dispositivo é conectado, muitas vezes referenciado como ponto de conexão comum (PCC), são compensadas para a forma desejada, ou seja, o mais próximo de senoides puras e equilibradas.

Uma melhoria desenvolvida em [5] e [21], foi a modificação na topologia do UPQC, de tal forma que o condicionador série passa a atuar como uma fonte ideal de corrente e o condicionador paralelo passa a atuar como uma fonte ideal de tensão. A grande vantagem dessa topologia invertida, que pode ser interpretada como uma topologia dual, é que o sistema de controle deixa de ter a necessidade de reconhecer os distúrbios da rede, impondo no PCC as próprias tensões e correntes desejadas e a compensação passa a ocorrer de forma automática, conforme as leis de Kirchhoff. Com isso, o equipamento fica menos propício a erros e com uma melhor dinâmica de compensação [35].

Apesar de os trabalhos iniciais do UPQC em sua forma clássica e dual demonstrarem uma diversidade de compensações que o equipamento é capaz de fazer, estudos tentam explorar como o dispositivo pode ser útil na manutenção da QEE, seja com relação à topologia da rede, como por exemplo em [29, 30, 31, 36], seja no gerenciamento da tensão no elo que conecta os conversores em *back-to-back*, tal qual os trabalhos [19, 24, 32], ou seja no aprimoramento do sistema de controle, como em [27, 37, 38].

O presente trabalho pretende contribuir para o desenvolvimento do UPQC em sua topologia dual de forma a explorar uma nova compensação através da inclusão de uma nova etapa de controle.

## 1.2 Motivação

O aumento do uso de equipamentos baseados em eletrônica de potência possui suas vantagens, mas também tem desvantagens. Uma delas é a introdução de conteúdo harmônico na rede elétrica. Diversas pesquisas são feitas para encontrar soluções para os problemas causados por esse fenômeno. Dentro deste contexto se dá a motivação para o presente trabalho, visando aprimorar um equipamento, conhecido como UPQC, para que futuramente possa se tornar uma solução utilizada nos sistemas elétricos pelo mundo.

## 1.3 Objetivos

O presente trabalho tem o objetivo geral de estudar o uso do UPQC para a mitigação de problemas relacionados à QEE através de simulações do tipo simulação em tempo real (do inglês, *real-time simulation*) (RTS).

Já como principal objetivo, este projeto visa investigar a possibilidade de incluir uma nova funcionalidade na topologia dual do UPQC de forma que o equipamento seja capaz

de mitigar harmônicas de corrente provenientes de cargas não-lineares conectadas em paralelo no lado da fonte de alimentação do PCC.

## 1.4 Metodologia

Para se alcançar os objetivos do projeto, um estudo sobre os fenômenos relacionados à QEE deve ser feito. Além disso, uma revisão da bibliografia relacionada ao UPQC será realizada, a fim de entender o que já foi investigado e aprimorado no desenvolvimento do equipamento.

Para avaliar a proposta da nova funcionalidade de compensação serão feitas simulações com *software* e *hardware* (modelo HIL402) da empresa Typhoon HIL *Incorporated* (Inc.) Os produtos da companhia foram escolhidos para as simulações e análises deste trabalho porque o laboratório Núcleo de Inovação Tecnológica em Engenharia Elétrica (NITEE) da Universidade Federal Fluminense (UFF) possui um *hardware* da empresa. Além disso, conforme pode ser visto na Figura 1.1, a quantidade de artigos científicos utilizando o Typhoon HIL vem crescendo desde sua criação [1]. O conhecimento prévio do autor no programa computacional também contribuiu para essa escolha.

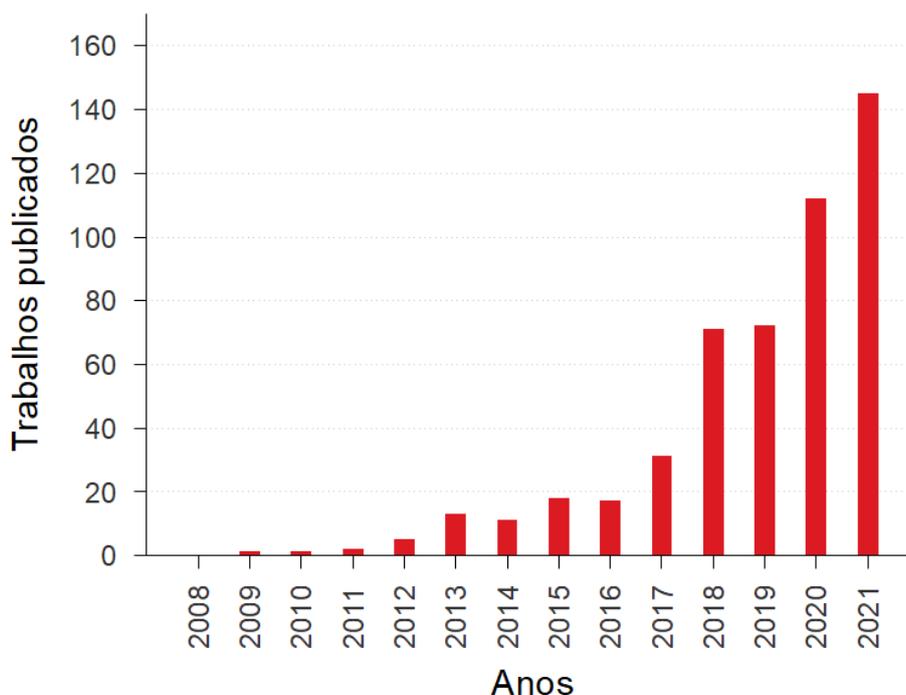


Figura 1.1: Quantidade de artigos publicados utilizando o Typhoon HIL ao longo dos anos [1].

Devido à complexidade da rede a ser analisada, baseada no sistema elétrico apresen-

tado em [5], um estudo profundo das características do *software* e do *hardware* precisa ser feito.

Como os trabalhos anteriores utilizaram outras ferramentas computacionais para as simulações, será realizada uma prova de conceito, comparando resultados do sistema modelado no Typhoon HIL com resultados anteriores.

Tendo como base o trabalho [5], a metodologia para análise do sistema de controle do UPQC pode ser resumida da seguinte forma: inicialmente uma rede será modelada sem o equipamento, para servir de base de comparação para circuitos posteriores; em seguida, será simulado um sistema elétrico com o UPQC dual em sua forma ideal, ou seja, representando os conversores de potência como fontes ideais de tensão e corrente; e, por fim, o circuito completo será analisado por meio de simulação, investigando as compensações feitas pelo equipamento. Esse passo-a-passo será feito inicialmente para o UPQC dual sem a novidade a ser investigada no presente trabalho. Posteriormente, serão feitas modificações na rede elétrica de estudo para avaliar a inclusão da nova funcionalidade ao controle do equipamento, ou seja, será apresentada e inserida a etapa de controle que atua na mitigação de correntes harmônicas no lado da fonte de tensão com a presença de cargas *shunt*.

## 1.5 Contribuições

O presente trabalho se destaca por apresentar uma novidade ainda não explorada pela literatura para o UPQC. Assim, os resultados a serem apresentados neste documento pretendem dar uma relevante contribuição no desenvolvimento do equipamento.

Também vale salientar que este trabalho é o primeiro na literatura que explora o uso de *software* e *hardware* da Typhoon HIL Inc. para o UPQC. O fato de serem da mesma empresa favorece a simulação em *Hardware-in-the-Loop* (HIL). Em outros trabalhos são utilizados *softwares* e *hardwares* de empresas diferentes para compor o sistema HIL, o que pode causar alguma dificuldade de compatibilidade, como por exemplo por questões de conexão e por linguagens de programação distintas. Ademais, alguns artigos mostram o desenvolvimento de protótipos de bancada para fazer as análises desejadas no UPQC, o que tende a ser um meio mais custoso para testar o equipamento. O HIL também tem a vantagem de ser um modo mais seguro de realizar análises. Apesar de o presente trabalho não alcançar a etapa de testes via HIL, é apresentado um passo-a-passo para possibilitar a integração de *software*, *hardware* e *Hardware-under-Test* (HuT).

Somado a isso, ao longo do desenvolvimento do projeto, um artigo científico foi gerado com resultados da investigação da modelagem do UPQC dual no *software* Typhoon HIL. O artigo mostra a necessidade de se fazer um estudo prévio de particionamento da rede elétrica e do uso de *snubbers* antes de serem executadas as simulações desejadas:

- MONTEIRO, V. S.; COSTA, M. C.; FRANÇA, B. W. Simulação no software Typhoon HIL para equipamentos de eletrônica de potência compostos por múltiplos conversores. *XXIV Congresso Brasileiro de Automática*. 2022 [39].

## 1.6 Estrutura da Dissertação

O documento está dividido em sete capítulos. Depois do Capítulo 1, onde foram introduzidos os objetivos e a metodologia do trabalho, o Capítulo 2 discorre sobre distúrbios de QEE e equipamentos de mitigação conhecidos na literatura. No Capítulo 3, uma revisão bibliográfica do UPQC é feita, apresentando o equipamento em sua forma clássica e, posteriormente, sua topologia dual, descrevendo as estratégias de controle envolvidas, com um breve resumo da Teoria da Potência Instantânea. Conceitos sobre simulações do tipo RTS e em HIL são abordados no Capítulo 4, que também descreve as características relevantes da modelagem no *software* da empresa Typhoon HIL Inc. e as principais características do *hardware* HIL402 utilizado para o projeto. O Capítulo 5 apresenta a modelagem da rede elétrica sem e com o UPQC e resultados encontrados, bem como comparações feitas com trabalhos anteriores. Finalmente, no Capítulo 6, investiga-se a nova funcionalidade de compensação do equipamento e são analisados os resultados. E o Capítulo 7 descreve as conclusões obtidas com o projeto e oportunidades de trabalhos futuros.

## Capítulo 2

# Qualidade de Energia Elétrica (QEE)

A rede elétrica de distribuição possui cargas de todos os tipos, desde as que causam distúrbios elétricos até as que são sensíveis a esses fenômenos. De acordo com [40], esses dois tipos de cargas possuem uma interdependência e há o desafio de manter essa relação de forma equilibrada. Com a evolução da eletrônica de potência e o crescimento do uso de fontes alternativas de energia para a geração de eletricidade, mais conversores de potência vêm sendo conectados ao sistema. Esses equipamentos são grandes causadores de perturbações nas tensões e correntes e, por isso, a preocupação com a qualidade de energia elétrica (QEE) tem sido cada vez maior [3, 40]. Além disso, como ressaltado em [41], dispositivos eletrônicos modernos são mais sensíveis a variações de tensão e corrente do que os utilizados antigamente. Outro ponto que evidencia o aumento da preocupação de engenheiros com a QEE é a difusão da informação nos consumidores finais a respeito de fenômenos elétricos.

Sendo assim, nos dias atuais é imprescindível a classificação dos distúrbios, a definição de limites aceitáveis e o estudo de possíveis soluções para a manutenção da QEE.

A QEE está fortemente ligada à qualidade da tensão. A energia é resultado da relação entre tensão e corrente, sendo que o sistema de geração não tem controle sobre a corrente, grandeza dependente da carga conectada [41]. Então, os critérios normativos de avaliação da QEE são, em sua maioria, relacionados às variações da forma de onda da tensão a partir do padrão de frequência e magnitude da rede.

Este capítulo aborda os fenômenos de QEE na Seção 2.1, com foco nas regras brasileiras, e na Seção 2.2 algumas soluções de mitigação são apresentadas.

## 2.1 Fenômenos de QEE

Apesar de existirem diversas normas que definem e recomendam ou impõem limites para os fenômenos elétricos relacionados à QEE, tais como a ANSI C84.1 da *American National Standards Institute* (ANSI) [41], a IEEE 519 e a IEEE 1159 do Instituto de Engenheiros Eletricistas e Eletrônicos (IEEE) [42], a EN 50160 do Comitê Europeu de Normalização Eletrotécnica (CENELEC) [43] e a IEC 555 e a IEC 61000 da Comissão Eletrotécnica Internacional (IEC) [44]. será dado um foco maior na referência utilizada no Brasil, que é documentada pelo Módulo 8 dos Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional (PRODIST), relacionada à Resolução Normativa da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) N<sup>o</sup> 956 [45].

Os procedimentos apresentados pelo Módulo 8 do PRODIST [45] são relacionados a consumidores, centrais geradoras, distribuidoras, agentes importadores ou exportadores de energia elétrica, transmissoras detentoras de Demais Instalações de Transmissão, o Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS), microssistemas isolados de geração e distribuição de energia elétrica e sistemas individuais de geração de energia elétrica com fontes intermitentes. O documento [45] estabelece regras para valores aceitáveis e intoleráveis, além do modo de medição.

Os fenômenos elétricos relevantes para o presente trabalho são:

- Variação de tensão em regime permanente;
- Variação de tensão de curta duração (VTCD);
- Desequilíbrio de tensão;
- Distorções harmônicas de tensão e de corrente; e
- Fator de potência (FP).

Com exceção da VTCD, que ocorre em regime transitório, os demais fenômenos ocorrem em regime permanente.

Outros fenômenos serão apenas comentados brevemente por não serem abordados nas análises.

### 2.1.1 Tensão em Regime Permanente

Apesar de as unidades geradoras serem controladas para gerarem tensões em um valor determinado, com poucas variações, existem fatores na rede de distribuição que tendem a alterar o nível de tensão em longos períodos, ou seja, em regime permanente. Flutuação de cargas demandadas, problemas de regulação em equipamentos da rede elétrica, como transformadores e reguladores de tensão, instalações com dimensionamento inadequado e sobrecargas acabam acarretando uma elevação ou redução no valor da tensão [46]. A própria distância de cargas conectadas a um mesmo alimentador acabam causando uma queda na tensão a cada barra. A penetração de geração distribuída (GD) nas redes de distribuição também tendem a alterar o nível da tensão [47].

O nível de tensão em regime permanente fora dos limites estipulados pelo PRODIST pode afetar alguns equipamentos, como motores, que tendem a ter rendimento reduzido quando submetidos a valores de tensão muito maiores ou muito menores do que o nominal. Na mesma situação, equipamentos eletrônicos tendem a não funcionar da maneira correta, além de haver a diminuição da vida útil [40, 46].

Os distúrbios de tensão em regime permanente são classificados de duas formas: subtensão, quando o valor eficaz da tensão é reduzido para além de um determinado limite por um período superior a um valor predefinido; e sobretensão, quando o valor eficaz excede um valor limite também por um período superior a um valor predefinido [46]. Esse valor de tempo de duração de sub ou sobretensão é, de acordo com o PRODIST, de 3 minutos. Alterações na magnitude da tensão que ocorrem em períodos menores são consideradas VTCDs. Outras referências definem um tempo menor, como por exemplo a ANSI C84.1 [41], que utiliza o valor de 1 minuto para a diferença entre uma variação de tensão em regime permanente e em regime transitório.

De acordo com o PRODIST [45], a tensão em regime permanente é classificada em adequada, precária e crítica, e as faixas de valores para cada classificação dependem do nível de tensão da rede elétrica. Para sistemas trifásicos onde a tensão nominal é 220 V entre fases, como é o caso da rede simulada no presente trabalho, é utilizada a Tabela 2.1, onde  $V_{medida}$  é a tensão medida no ponto de conexão comum (PCC) do consumidor com a rede elétrica e os valores são dados por unidade (pu).

Tabela 2.1: Classificação dos níveis de tensão.

Classificação	Faixa de variação de tensão em pu
Adequada	$0,92 \leq V_{medida} \leq 1,05$
Precária	$0,87 \leq V_{medida} < 0,92$ ou $1,05 < V_{medida} \leq 1,06$
Crítica	$V_{medida} < 0,87$ ou $V_{medida} > 1,06$

### 2.1.2 Variação de Tensão de Curta Duração (VTCD)

Além de períodos longos de alteração do valor da tensão, existem fenômenos, como entrada e saída de grandes cargas no sistema e ocorrências de curto-circuito, que causam uma VTCD. Essas variações podem ser de interrupção, afundamento ou elevação de tensão e são classificadas de acordo com o intervalo de tempo em que há a ocorrência: variação momentânea de tensão e variação temporária de tensão [45]. Os valores relativos a cada tipo de variação são apresentados na Tabela 2.2.

A conexão e desconexão de cargas pesadas na rede elétrica ocasionam variações no nível de tensão. Eventos de curto-circuito somados à ação de equipamentos com objetivo de isolar a falta também são causadores de VTCDs. Assim, esses fenômenos são difíceis de se mitigar, uma vez que ocorrem a partir de eventos praticamente incontroláveis pela distribuidora. Mesmo com eficientes sistemas de proteção, as VTCDs às vezes acontecem em um período tão curto que nem mesmo dispositivos de proteção são capazes de atuar a tempo de evitar que as variações na tensão causem defeitos a equipamentos sensíveis [40, 41, 46].

Tabela 2.2: Classificação das variações de tensão de curta duração.

Classificação	Duração	Magnitude
Interrupção Momentânea de Tensão	Inferior ou igual a 3 segundos	Inferior a 0,1 pu.
Afundamento Momentâneo de Tensão	Superior ou igual a 1 ciclo e inferior ou igual a 3 segundos	Superior ou igual a 0,1 pu. e inferior a 0,9 pu.
Elevação Momentânea de Tensão	Superior ou igual a 1 ciclo e inferior ou igual a 3 segundos	Superior a 1,1 pu.
Interrupção Temporária de Tensão	Superior a 3 segundos e inferior a 3 minutos	Inferior a 0,1 pu.
Afundamento Temporário de Tensão	Superior a 3 segundos e inferior a 3 minutos	Superior ou igual a 0,1 pu. e inferior a 0,9 pu.
Elevação Temporária de Tensão	Superior a 3 segundos e inferior a 3 minutos	Superior a 1,1 pu.

### 2.1.3 Desequilíbrio de Tensão e Corrente

O desequilíbrio de tensão ou de corrente é um fenômeno que ocorre quando há alguma diferença de amplitude em uma das fases do sistema elétrico ou quando há defasagem diferente de  $120^\circ$  entre as fases. A verificação do desequilíbrio é feita através do fator de desequilíbrio (FD%), que pode ser calculado de duas maneiras, de acordo com o PRODIST [45]: através da Equação (2.1) ou da Equação (2.2). O cálculo

$$FD\% = \frac{V_-}{V_+} \cdot 100 \quad (2.1)$$

utiliza os módulos das tensões de seqüências positiva ( $V_+$ ) e negativa ( $V_-$ ). Já a fórmula

$$FD\% = \sqrt{\frac{1 - \sqrt{3 - 6\beta}}{1 + \sqrt{3 - 6\beta}}} \cdot 100, \quad (2.2)$$

onde

$$\beta = \frac{V_{ab}^4 + V_{bc}^4 + V_{ca}^4}{(V_{ab}^2 + V_{bc}^2 + V_{ca}^2)^2}, \quad (2.3)$$

se baseia nos valores de tensão de linha ( $V_{ab}$ ,  $V_{bc}$  e  $V_{ca}$ ). Cabe observar que, de acordo com [48], a Equação (2.1) é também utilizada pela IEC e pelo CENELEC, e as Equações (2.2) e (2.3) são recomendadas pelo Comitê Internacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica (CIGRÉ).

Dentre as causas de desequilíbrio estão o modo de ligação de determinadas cargas e a assimetria existente nas redes elétricas. Como consequência, é possível citar a redução da potência ativa de motores em funcionamento, interferências em linhas de telecomunicação, aumento de perdas na rede de distribuição e redução da vida útil de determinados equipamentos como, por exemplo, banco de capacitores. Além disso, retificadores trifásicos passam a gerar harmônicas múltiplas de 3, o que não ocorre em sistemas equilibrados. Ou seja, sob desequilíbrio, esses dispositivos podem provocar ressonâncias não previstas na rede elétrica, danificando equipamentos [40, 46].

Segundo o PRODIST [45], para conexões em rede elétrica onde a tensão nominal é menor que 2,3 kV, o FD% não deve ultrapassar 3 %. Já para redes onde a tensão é superior a 2,3 kV e inferior a 230 kV, o FD% tem um limite de 2 %.

### 2.1.4 Distorções Harmônicas

As formas de onda da tensão gerada por máquinas girantes são controladas de forma que sejam senoidais. Cargas lineares drenam correntes também na forma senoidal. Entretanto, o sistema elétrico é composto por diversos elementos que modificam a forma de onda de tensão e corrente. Por exemplo, dispositivos baseados em eletrônica de potência drenam uma corrente cuja forma de onda não é uma senoide pura, podendo ser decomposta em ondas senoidais com frequências múltiplas inteiras da frequência fundamental e diferentes amplitudes, chamadas de correntes harmônicas ou harmônicos de corrente. Essa não-linearidade, devido à impedância intrínseca dos alimentadores, acaba causando uma alteração na forma de onda da tensão no ponto de conexão das cargas e em pontos vizinhos [40, 46].

Dentre as consequências da presença de harmônicas de corrente no sistema elétrico, é possível destacar [40, 46, 49, 50]:

- Aumento das perdas elétricas;
- Aumento da chance de ocorrência de ressonância entre elementos capacitivos e indutivos;
- Redução do FP;
- Distorção na forma de onda da tensão;
- Sobreaquecimento de transformadores e motores;
- Vibração de motores;
- Operação indevida de disjuntores e relés;
- Interferência na rede de telecomunicações;
- Medições incorretas de grandezas elétricas; e
- Mau funcionamento de sistemas de controle.

O PRODIST [45] define valores para a distorção harmônica individual de tensão de ordem  $h$  ( $DIT_h\%$ ) e para a distorção harmônica total de tensão ( $DTT\%$ ), que devem ser calculados através da Equação (2.4) e da Equação (2.5), respectivamente. A  $DTT\%$  é geralmente definida como Taxa de Distorção Harmônica Total (do inglês, *Total Harmonic*

*Distortion*) (THD%), que no caso da Equação (2.5) é relacionada à tensão, mas poderia ser relacionada à corrente. O PRODIST [45] define três fatores além da DTT%, calculados também pela Equação (2.5): distorção harmônica total de tensão para as componentes pares não múltiplas de 3 (DTT<sub>p</sub>%); distorção harmônica total de tensão para as componentes ímpares não múltiplas de 3 (DTT<sub>i</sub>%); e distorção harmônica total de tensão para as componentes múltiplas de 3 (DTT<sub>3</sub>%).

A DIT<sub>h</sub>% é definida por:

$$DIT_h\% = \frac{V_h}{V_1} \cdot 100, \quad (2.4)$$

onde  $h$  é a ordem harmônica,  $V_h$  é a tensão harmônica de ordem  $h$  e  $V_1$  é a tensão fundamental.

E a DTT% é determinada por:

$$THD\% = DTT\% = \frac{\sqrt{\sum_{h>1}^{h_{max}} V_h^2}}{V_1} \cdot 100, \quad (2.5)$$

onde  $h_{max}$  é a máxima ordem harmônica medida,  $V_h$  depende das ordens que se deseja considerar e  $V_1$  é a tensão fundamental.

Os limites aceitáveis pelo PRODIST [45] para cada indicador de distorção harmônica total de tensão é apresentado na Tabela 2.3, válida para redes onde a tensão nominal é igual ou inferior a 2,3 kV. Vale observar que o Módulo 8 do PRODIST [45] atualmente não define limites para as distorções harmônicas individuais de tensão. Também não há definição dos critérios a serem adotados para harmônicas relacionadas à corrente.

Tabela 2.3: Limites das distorções harmônicas totais de tensão.

<b>Indicador</b>	<b>Limite</b>
DTT%	10,0 %
DTT <sub>p</sub> %	2,5 %
DTT <sub>i</sub> %	7,5 %
DTT <sub>3</sub> %	6,5 %

A norma EN 50160 do CENELEC, define limites para a DIT<sub>h</sub>%, tanto para ordens ímpares quanto para ordens pares, conforme a Tabela 2.4 [43].

De acordo com a recomendação da norma IEEE Std 519 de 2014 [42], para sistemas com tensão nominal igual ou inferior a 1,0 kV, o limite para a DIT<sub>h</sub>% é 5,0 % e o limite

Tabela 2.4: Limites das distorções harmônicas individuais de tensão segundo a norma EN 50160.

Harmônica	DIT <sub>h</sub> %
$h = 3$	3,0 %
$h = 4$	1,0 %
$h = 5$	3,0 %
$h = 6$	0,5 %
$h = 7$	2,5 %
$h = 9$	1,5 %
$h = 11$	2,5 %
$h = 13$	2,0 %
$h = 15$	0,5 %
$h = 17$	2,0 %
$h = 19$	1,5 %
$h = 21$	0,5 %
$h = 23$	1,5 %
$h = 25$	1,0 %
$h$ ( <i>par</i> ) > 6	0,3 %
$h$ (ímpar múltiplo de 3) > 21	0,3 %
$h$ (ímpar não múltiplo de 3) > 25	0,5 %

para a DTT% é 8,0 %. Fazendo uma comparação com as outras normas, a IEEE Std 519 é um pouco mais flexível para DIT<sub>h</sub>% do que a EN 50160 e mais restrita do que o PRODIST para a DTT%. Essa norma também define, através da Tabela 2.5, limites para a distorção harmônica de corrente individual de ordem  $h$  (DIC<sub>h</sub>%) e distorção harmônica total de corrente (DTC%), cujos cálculos são análogos aos cálculos para a tensão. Essa tabela é válida para sistemas com tensão entre 120 V e 69 kV e precisa do valor da Relação de Curto-Circuito (RCC), que é determinado através de:

$$RCC = \frac{I_{sc}}{I_{L1}}, \quad (2.6)$$

que relaciona a máxima corrente de curto-circuito ( $I_{sc}$ ) com a máxima corrente demandada pela carga na frequência fundamental ( $I_{L1}$ ).

A razão entre  $I_{sc}$  e  $I_{L1}$ , dada pela Equação (2.6), é uma medida de rigidez do fornecimento de energia pela distribuidora. O cálculo é feito através do equivalente de Thévenin da tensão de fornecimento da concessionária de distribuição sendo curto-circuitado, gerando a corrente  $I_{sc}$ . Esse valor é então comparado com a corrente da carga na frequência fundamental [49].

Já a norma IEC Standard 61000-3-2 define os limites de gerações de harmônicas de

Tabela 2.5: Limites das distorções harmônicas de corrente segundo a norma IEEE Std 519 (2014).

RCC	DIC <sub>h</sub> % 3 ≤ h < 11	DIC <sub>h</sub> % 11 ≤ h < 17	DIC <sub>h</sub> % 17 ≤ h < 23	DIC <sub>h</sub> % 23 ≤ h < 35	DIC <sub>h</sub> % 35 ≤ h ≤ 50	DTC%
< 20	4,0 %	2,0 %	1,5 %	0,6 %	0,3 %	5,0 %
20 < 50	7,0 %	3,5 %	2,5 %	1,0 %	0,5 %	8,0 %
50 < 100	10,0 %	4,5 %	4,0 %	1,5 %	0,7 %	12,0 %
100 < 1000	12,0 %	5,5 %	5,0 %	2,0 %	1,0 %	15,0 %
> 1000	15,0 %	7,0 %	6,0 %	2,5 %	1,4 %	20,0 %

corrente por cargas para baixa e média tensão, tanto para ordem ímpar quanto para ordem par. Esses limites são diferentes para quatro diferentes tipos de cargas: equipamentos trifásicos equilibrados (Classe A); equipamentos portáteis (Classe B); lâmpadas (Classe C); e equipamentos cuja a potência seja menor do que 600 W com formas de onda especiais (Classe D). Os valores da norma são apresentados na Tabela 2.6, onde  $\lambda$  é o FP do circuito [44, 51].

Tabela 2.6: Limites das distorções harmônicas de corrente segundo a norma IEC Std 61000-3-2 (2014).

Harmônica	Classe A	Classe B	Classe C	Classe D
$h = 2$	1,08 A	1,62 A	2 %	-
$h = 3$	2,30 A	3,45 A	30 $\lambda$	3,4 mA/W
$h = 4$	0,43 A	0,645 A	-	-
$h = 5$	1,14 A	1,71 A	10 %	1,9 mA/W
$h = 6$	0,30 A	0,45 A	-	-
$h = 7$	0,77 A	1,155 A	7 %	1 mA/W
$h = 9$	0,40 A	0,60 A	5 %	0,5 mA/W
$h = 11$	0,33 A	0,495 A	3 %	0,35 mA/W
$h = 13$	0,21 A	0,315 A	3 %	3,85/13 mA/W
$8 \leq h$ (par) $\leq 40$	$0,23 \cdot 8/h$ A	$0,345 \cdot 8/h$ A	-	-
$15 \leq h$ (ímpar) $\leq 39$	$0,15 \cdot 15/h$ A	$0,225 \cdot 15/h$ A	3 %	$3,85/h$ mA/W

### 2.1.5 Fator de potência (FP)

O fator de potência (FP), calculado por

$$FP = \frac{P}{VI}, \quad (2.7)$$

é a relação entre a potência ativa ( $P$ ) e o produto da tensão eficaz ( $V$ ) com a corrente eficaz ( $I$ ) do sistema. Em sistemas com tensões e correntes equilibradas, o produto dessas grandezas, dado pela Equação (2.7), é equivalente à potência aparente ( $S$ ), conforme os cálculos a seguir:

$$S = VI \quad (2.8)$$

e

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2} . \quad (2.9)$$

A potência  $S$ , da Equação (2.8), é a resultante da soma vetorial da potência ativa ( $P$ ) com a potência reativa ( $Q$ ), sendo seu módulo calculado de acordo com a Equação (2.9) [49]. Assim, é possível reescrever a Equação (2.7) como:

$$FP = \frac{P}{\sqrt{P^2 + Q^2}} . \quad (2.10)$$

No PRODIST [45], o FP é calculado através da Equação (2.10) e deve ser mantido entre 1,0 e 0,92, para conexões à rede elétrica com tensões inferiores a 230 kV. Alternativamente, o documento também sugere o cálculo através da Equação (2.11), que utiliza os valores de energia ativa ( $E_A$ ) e energia reativa ( $E_R$ ) no lugar das potências:

$$FP = \frac{E_A}{\sqrt{E_A^2 + E_R^2}} . \quad (2.11)$$

Quando o sistema elétrico apresenta tensões equilibradas apenas na componente fundamental e correntes com conteúdo harmônico, o FP pode ser calculado através de um método diferente. A potência ativa ( $P$ ) pode ser definida como:

$$P = VI_1 \cos(\phi_1) , \quad (2.12)$$

onde  $I_1$  é a corrente fundamental e  $\phi_1$  é o ângulo de defasagem entre a corrente e a tensão, cujo cosseno define um fator conhecido como fator de potência de deslocamento (FPD), conforme:

$$FPD = \cos(\phi_1) . \quad (2.13)$$

Através da manipulação algébrica das Equações (2.7), (2.12) e (2.13), chega-se em:

$$FP = \frac{I_1}{I} \cdot FPD . \quad (2.14)$$

A Equação (2.14) pode ser reescrita utilizando a expressão de THD% analogamente para a corrente, calculada através da Equação (2.5)

$$FP = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{THD\%}{100}\right)^2}} \cdot FPD . \quad (2.15)$$

Assim, a Equação (2.15) se torna outra opção para o cálculo do FP [49, 50].

### 2.1.6 Outros fenômenos de qualidade de energia elétrica

- Flutuação de tensão

Como definido por [45], "*A flutuação de tensão é um fenômeno caracterizado pela variação aleatória, repetitiva ou esporádica do valor eficaz ou de pico da tensão instantânea*". As causas desse fenômeno, também conhecido como *flicker*, podem ser por motores e fornos a arco. Sua principal consequência é a cintilação em sistemas de iluminação, provocando uma sensação incômoda nas pessoas [40].

A norma ANSI C84.1 define que a flutuação de tensão é a ocorrência de variações da forma de onda de tensão dentro da faixa de 0,9 pu a 1,1 pu [41].

- Variação de frequência

A frequência da rede elétrica está diretamente relacionada à rotação das máquinas girantes que geram energia elétrica. Pequenas variações tendem a ocorrer de acordo com a dinâmica entre geração e carga. Entretanto, essas alterações não costumam ultrapassar valores que possam causar algum dano ao sistema. Já no caso de eventos de faltas na transmissão ou grandes grupos de cargas sendo desconectados da rede, uma variação na frequência pode chegar a valores prejudiciais para o correto funcionamento de equipamentos [41]. As variações de frequência podem impactar, por exemplo, sistemas de GD [40].

A frequência utilizada no Sistema Interligado Nacional (SIN), para corrente alternada, é 60 Hz. O PRODIST [45] define que esse valor só deve variar 0,1 Hz, para mais ou para menos, em condições normais de operação e em regime permanente. Na presença de distúrbios na rede de distribuição, é permitido uma variação de 0,5 Hz, em um período de 30 s. Há ainda a possibilidade de uma variação maior de frequência, para condições mais específicas do sistema elétrico.

- Microcortes de tensão

Microcortes de tensão, mais conhecidos por *Notches* ou *Notching*, é um distúrbio na tensão causado pelo chaveamento dos semicondutores presentes em dispositivos eletrônicos. Em um equipamento que contém um retificador trifásico, por exemplo, durante a comutação da corrente de uma fase para outra, ocorre um breve período de curto-circuito. Como é uma ocorrência constante, a tensão pode ser decomposta em harmônicas. Entretanto, esse fenômeno é abordado separadamente da distorção harmônica, pois como as frequências associadas são de valores bem elevados, os medidores de harmônicas dificilmente conseguem fazer a análise correta da forma de onda [41, 46].

- Ruídos

Ruídos são sinais sobrepostos às formas de onda de tensão e corrente que possuem frequência inferior a 20 kHz. Esses sinais indesejados são geralmente causados por dispositivos eletrônicos, que também são os equipamentos mais afetados. Como define [41]: "*basicamente, o ruído consiste em qualquer distorção indesejada do sinal de potência que não pode ser classificada como distorção harmônica ou transiente.*"

## 2.2 Soluções de QEE

Diversas soluções para controlar ou mitigar problemas de qualidade de energia elétrica são encontradas na literatura [2, 3, 40, 41, 46, 49]. Algumas serão apresentadas.

### 2.2.1 Fonte de alimentação ininterrupta

A fonte de alimentação ininterrupta (do inglês, *uninterruptible power supply*) (UPS) é uma solução muito útil para consumidores evitarem que determinados equipamentos, geralmente os considerados críticos, parem de funcionar em casos de falta de energia vinda do sistema de distribuição. Esse dispositivo conta com uma bateria que permite que o que tiver conectado a ele permaneça energizado por um determinado período, até que o fornecimento de energia retorne ao normal. Além disso, dependendo da configuração de operação utilizada, a UPS funciona como um equipamento que isola a carga a ela conectada fornecendo uma proteção contra diversos distúrbios que possam ocorrer na rede [41, 49].

### 2.2.2 Regulador de tensão

O regulador de tensão é um dispositivo que, como o seu nome já diz, visa a regulação de tensão. De acordo com [49]: "*Um regulador de tensão devidamente aplicado e controlado não somente mantém a tensão da entrada do consumidor dentro dos limites aprovados, mas também minimiza a faixa de flutuação da tensão entre períodos de carga pesada e leve*". Os dois tipos mais comuns são os transformadores ferromagnéticos e os transformadores com comutação automática de taps.

O transformador ferromagnético, também chamado de transformador de tensão constante, utiliza o fenômeno de ferromagnética para que a corrente no secundário do transformador seja mantida em um valor máximo projetado, independente da corrente no lado primário. Assim, a tensão na saída é sustentada em um determinado valor. Esse equipamento ainda possui a vantagem de baixa emissão de ruídos. Entretanto, por ter uma alta impedância, possui ação mais lenta com relação à demanda de corrente quando comparado com outros tipos de transformadores. Além disso, a tensão na saída possui elevado conteúdo harmônico, uma vez que a forma de onda é quadrada, e não senoidal [41, 46].

O transformador com comutação automática de taps possui um sistema que identifica as alterações de tensão e altera a relação de espiras do lado secundário, podendo aumentar ou reduzir a tensão de saída conforme o necessário. Por terem uma resposta mais rápida, chegando a 1 ciclo, esse tipo de regulador pode mitigar efeitos tanto da variação de tensão de regime permanente quanto de VTCDs [46].

### 2.2.3 Compensador síncrono

Outra estratégia para se regular a tensão é através da alteração da potência reativa. O compensador síncrono é uma das soluções possíveis nesse sentido. Esse equipamento pode consumir ou gerar potência reativa, dependendo da necessidade de aumentar ou diminuir a tensão na rede. Entretanto, uma desvantagem é seu tempo lento de resposta às variações de tensão. Por atuar na potência reativa, o compensador síncrono pode corrigir o FP da rede. Entretanto, essas duas mitigações não podem ocorrer ao mesmo tempo [41, 49].

### 2.2.4 Banco de capacitores

A utilização de bancos de capacitores é uma técnica bastante explorada pelas concessionárias de distribuição de energia com o objetivo de corrigir o FP. Além disso, eles também

auxiliam na regulação de tensão. Os capacitores são conectados em paralelo com a rede e, através do chaveamento, acrescentam cargas reativas capacitivas, contrabalançando com a carga predominantemente indutiva do sistema de distribuição. Porém, como geralmente a razão entre reatância e resistência possui um valor elevado, se a entrada de capacitores no circuito ocasionar ressonância com outros elementos, harmônicas de tensão e corrente tendem a aumentar [3, 41].

### 2.2.5 Filtro passivo

Filtros passivos são combinações de resistores, indutores e capacitores arranjados de forma a definir uma frequência de corte ou uma banda de frequência para limitar os conteúdos harmônicos a serem filtrados. Apesar de muito úteis em diversos casos, a desvantagem é que eles devem ser projetados para determinadas situações previstas, já que não há nenhum controle envolvido, além de que se forem mal dimensionados, podem ressonar com outros elementos do circuito [3, 41].

### 2.2.6 Filtro ativo

Diferente do que ocorre com os filtros passivos, os filtros ativos são mais versáteis, pois é possível criar um controle que faça com que a filtragem de harmônicos se adapte a diferentes situações impostas pelo sistema elétrico, além de não proporcionarem ressonâncias com o sistema. Os filtros ativos também auxiliam na solução de outros problemas de qualidade de energia elétrica, como por exemplo, variação de tensão, flutuação de tensão, desequilíbrio de tensão e FP.

A ideia básica de um filtro ativo é compensar as formas de onda que são afetadas por harmônicas, tornando-as o mais próximo possível de senoidais puras. Sua topologia tradicional é formada por um conversor de potência com um capacitor no lado de corrente contínua (CC), um filtro passivo no lado de corrente alternada (CA), para mitigar harmônicos do chaveamento das chaves semicondutoras do conversor, e um sistema de controle geralmente baseado na modulação por largura de pulso (do inglês, *pulse width modulation*) (PWM).

Uma vantagem do filtro ativo é que, idealmente, não há troca de energia ativa para a compensação ser feita. Contudo, por ser um dispositivo mais complexo, seu custo é elevado.

É possível classificar os filtros ativos de potência quanto à topologia. Assim, os equi-

pamentos podem ser do tipo série, do tipo paralelo (*shunt*), ou híbridos [2, 3, 41, 46].

- Filtro ativo paralelo

O filtro ativo paralelo, como seu nome já diz, é conectado paralelamente em um ponto do circuito onde se deseja mitigar harmônicas de corrente, que são sintetizadas pelo conversor através de um controlador. Um exemplo de circuito com esse equipamento pode ser visto na Figura 2.1. Idealmente, o conversor atua como uma fonte de corrente que gera uma forma de onda formada pela soma das harmônicas de corrente que se deseja compensar [2].

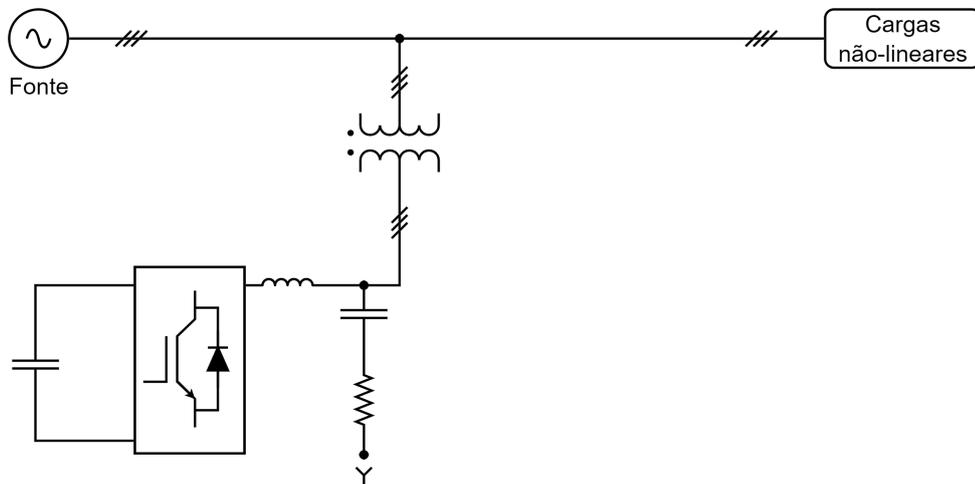


Figura 2.1: Filtro ativo tipo paralelo (*shunt*) [2].

De acordo com [2], o conversor deve ter uma frequência de chaveamento ( $f_s$ ) alta o suficiente para compensar as ordens harmônicas desejadas. É recomendado que  $f_s$  seja no mínimo uma década acima da frequência referente à maior ordem harmônica a ser compensada ( $f_{hmax}$ ), conforme a Equação (2.16):

$$f_s > 10 \cdot f_{hmax} . \quad (2.16)$$

- Filtro ativo série

O filtro ativo série é um equipamento dual do filtro ativo paralelo, com o objetivo de mitigar harmônicas na forma de onda da tensão. Sua conexão ao circuito é através de um transformador em série com a rede, conforme mostra a Figura 2.2. Assim, em teoria, o conversor série atua como uma fonte de tensão conectada em série com a fonte de alimentação e produz uma forma de onda constituída pela soma das harmônicas de tensão que se deseja compensar [2].

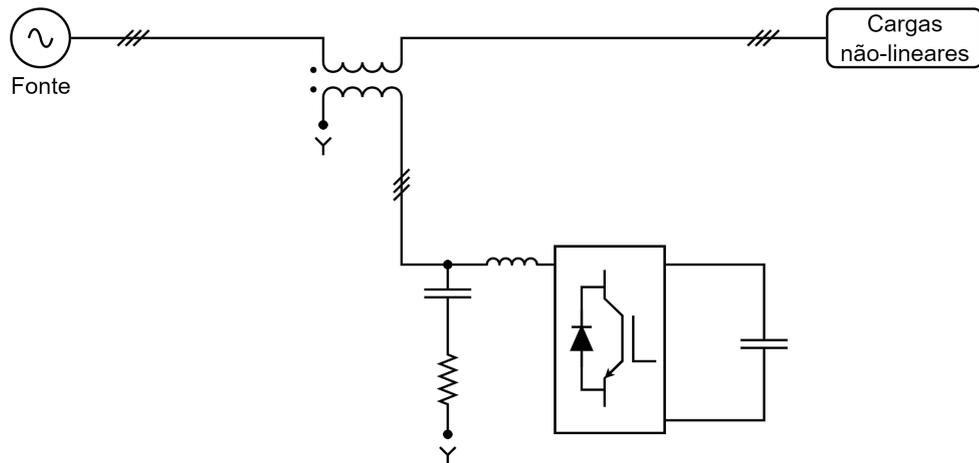


Figura 2.2: Filtro ativo tipo série [2].

- Filtro ativo híbrido

O filtro ativo híbrido é a união de um filtro ativo com um filtro passivo. A utilização dos dois tipos juntos traz a vantagem de reduzir a potência necessária do filtro ativo para atuar nas compensações e tende a evitar ressonâncias que podem ocorrer com o próprio sistema elétrico quando se usa somente filtros passivos. Assim, essa solução apresenta um melhor custo-benefício. Diversas topologias são encontradas na literatura [2, 3, 4, 52, 53, 54, 55, 56], desde a proposta inicial de [57].

A Figura 2.3 apresenta um exemplo de topologia na qual um filtro ativo tipo série é utilizado junto a filtros passivos conectados em paralelo com a rede [2, 3]. Já na Figura 2.4, é possível ver o uso de um filtro ativo *shunt* em conjunto com filtros passivos em paralelo com o circuito [4].

### 2.2.7 Condicionador de energia

Condicionadores de energia são equipamentos baseados em eletrônica de potência capazes de atuar na manutenção da qualidade de energia elétrica da rede. Uma breve descrição de alguns exemplos será feita a seguir.

- Condicionador de energia série

Um exemplo de condicionador que é conectado em série com o circuito é o restaurador dinâmico de tensão (RDT). Os restauradores dinâmicos de tensão são equipamentos baseados em eletrônica de potência que visam corrigir o nível da magnitude de tensão da rede de distribuição para que todos os consumidores recebam no PCC

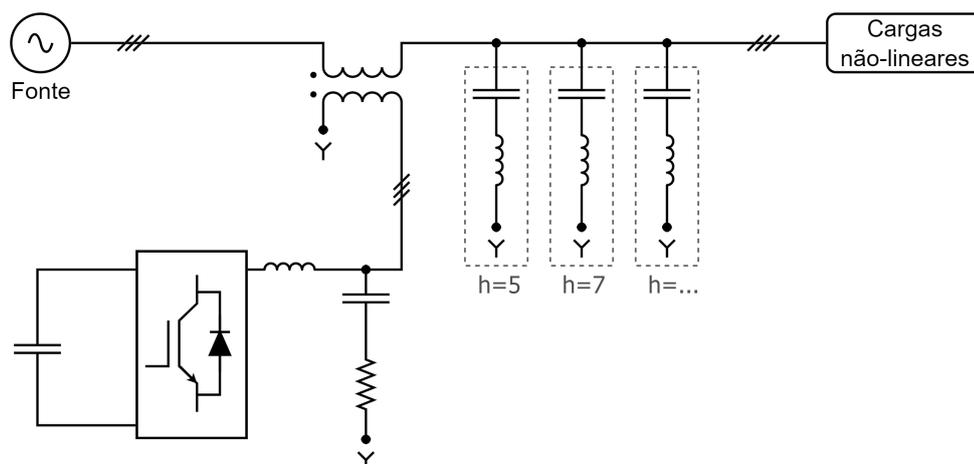


Figura 2.3: Filtro ativo tipo híbrido (combinação de filtro ativo série com filtros passivos paralelos) [2, 3].

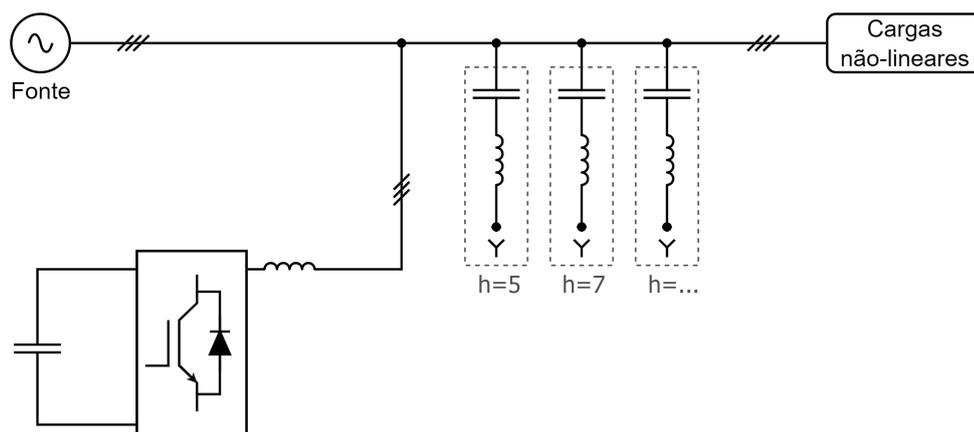


Figura 2.4: Filtro ativo tipo híbrido (combinação de filtro ativo *shunt* com filtros passivos paralelos) [4].

uma tensão dentro da faixa de valores aceitáveis. Além disso, ele também atua na compensação do conteúdo harmônico da tensão e pode mitigar outros distúrbios na tensão da rede [40, 41].

- Condicionador de energia paralelo

Um exemplo de condicionador conectado em paralelo com o sistema é o compensador síncrono estático (do inglês, *Static Synchronous Compensator*) (STATCOM), que utiliza a estratégia de regulação de tensão através da potência reativa. Sua topologia é semelhante a um filtro ativo do tipo *shunt*. Esse equipamento também pode fazer a correção do FP. Entretanto, não é capaz de realizar as duas compensações

simultaneamente [41, 49].

- Condicionador de energia série-paralelo

A fim de unir as funcionalidades dos condicionadores série e paralelo é possível fazer a combinação de dois filtros ativos (um do tipo série e outro do tipo *shunt*). Assim, ao conectá-los na configuração *back-to-back*, de modo que se forme um elo de corrente contínua com uma capacitância, um novo equipamento é formado, chamado de condicionador de energia série-paralelo.

A Figura 2.5 apresenta a estrutura geral do condicionador série-paralelo. Filtros passivos geralmente são inseridos no lado de corrente alternada de cada conversor a fim de reduzir as componentes harmônicas causadas pelo chaveamento dos semicondutores. Vale observar que os filtros apresentados na Figura 2.5 podem ser configurados de modo diferente.

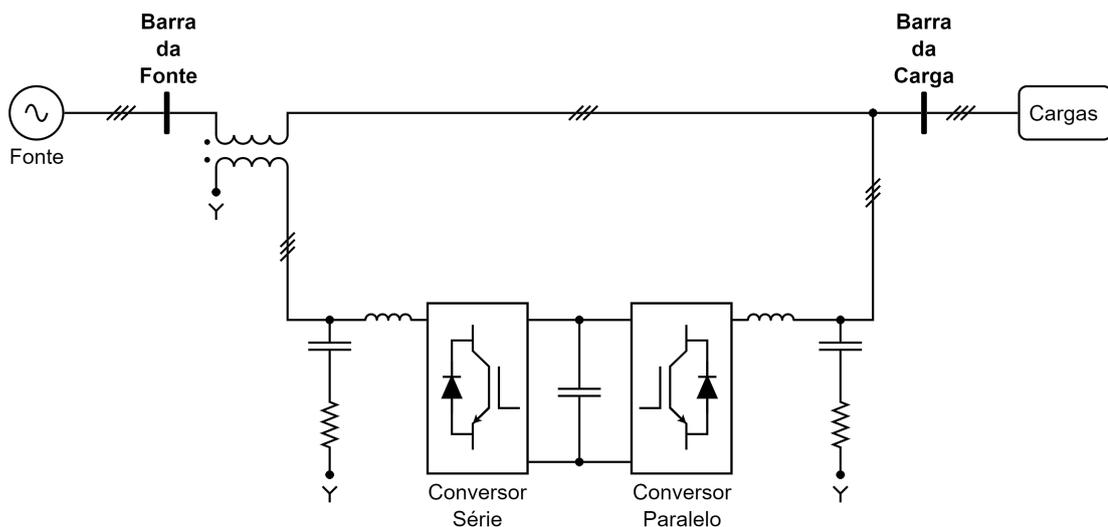


Figura 2.5: Condicionador Série-Paralelo [2].

Podem ser destacados três tipos de condicionadores série-paralelo: o Condicionador Unificado de Fluxo de Potência (do inglês, *Unified Power Flow Controller*) (UPFC), que tem como objetivo controlar o fluxo de potência, além de fazer a compensação de energia reativa e regulação de tensão; o Condicionador Unificado de Qualidade de Energia (do inglês, *Unified Power Quality Conditioner*) (UPQC), cujo propósito é mitigar harmônicas de corrente e de tensão, mas também atua na manutenção de outros distúrbios de qualidade de energia elétrica; e o Condicionador Universal de Energia (do inglês, *Universal Active Power Line Conditioner*) (UPLC), que combina as funções de ambos os conversores [2].

No presente trabalho, é estudado um aprimoramento do equipamento UPQC, cuja explicação de seu funcionamento será explorada no próximo capítulo.

## 2.3 Síntese do capítulo

Este capítulo apresentou os principais fenômenos elétricos relacionados à QEE e nos quais o UPQC é capaz de atuar na mitigação. Os distúrbios de tensão e corrente foram descritos em conjunto com normas e resoluções normativas que definem limites aceitáveis. A principal documentação de base para este estudo foi o PRODIST [45], que define regras e procedimentos para o setor de distribuição de energia elétrica no Brasil. Também foram apresentadas algumas soluções de mitigação dos distúrbios, com o equipamento de eletrônica de potência conhecido como condicionador série-paralelo sendo brevemente introduzido.

# Capítulo 3

## Condicionador Unificado de Qualidade de Energia

O presente trabalho propõe uma nova funcionalidade no controle do Condicionador Unificado de Qualidade de Energia (do inglês, *Unified Power Quality Conditioner*) (UPQC). Assim, este capítulo apresenta inicialmente, na Seção 3.1 as características do equipamento original. Em seguida, na Seção 3.2, um breve histórico dos estudos sobre o UPQC é feito. Na seção 3.3, o equipamento modificado, chamado de UPQC dual, é introduzido. Na mesma seção é feita uma breve descrição da principal teoria envolvida em seu desenvolvimento, a Teoria da Potência Instantânea, e seu sistema de controle é apresentado.

### 3.1 UPQC clássico

Como mencionado no item 2.2.7 do Capítulo 2, o UPQC é um tipo de condicionador série-paralelo cujo objetivo é realizar a manutenção da qualidade de energia elétrica. Sua principal aplicação é em locais de redes de distribuição ou sistemas industriais onde há cargas não-lineares e cargas sensíveis a distúrbios elétricos [2, 18].

Simplificando a estrutura do UPQC apresentada pela Figura 2.5 de modo a representá-lo por uma combinação de fontes de corrente e tensão, ilustrada pela Figura 3.1, é possível perceber como é a dinâmica das compensações. Nesse sentido, o filtro ativo série funciona como uma fonte de tensão ( $v_{ser}$ ) com forma de onda formada pelos distúrbios presentes na barra da fonte, fazendo com que idealmente a barra da carga tenha uma tensão puramente senoidal ( $v_{car}$ ), com amplitude nominal de sequência positiva na frequência da rede. Já o filtro paralelo, analogamente, age como uma fonte de corrente ( $i_{par}$ ) que filtra os distúrbios de corrente presentes na barra da carga a fim de impor, na barra da fonte, corrente ( $i_{fon}$ )

de sequência positiva na frequência fundamental. Assim, quando a tensão na barra da fonte ( $v_{fon}$ ) tiver distúrbios, a barra da carga não será afetada. Da mesma forma, quando a corrente drenada pelas cargas ( $i_{car}$ ) tiver distúrbios, a barra da fonte não será afetada. As Equações (3.1) e (3.2) são formadas pela aplicação das Leis de Kirchhoff no circuito da Figura 3.1 e mostram essas compensações, respectivamente:

$$v_{car} = v_{fon} - v_{ser} \quad (3.1)$$

e

$$i_{fon} = i_{car} - i_{par} . \quad (3.2)$$

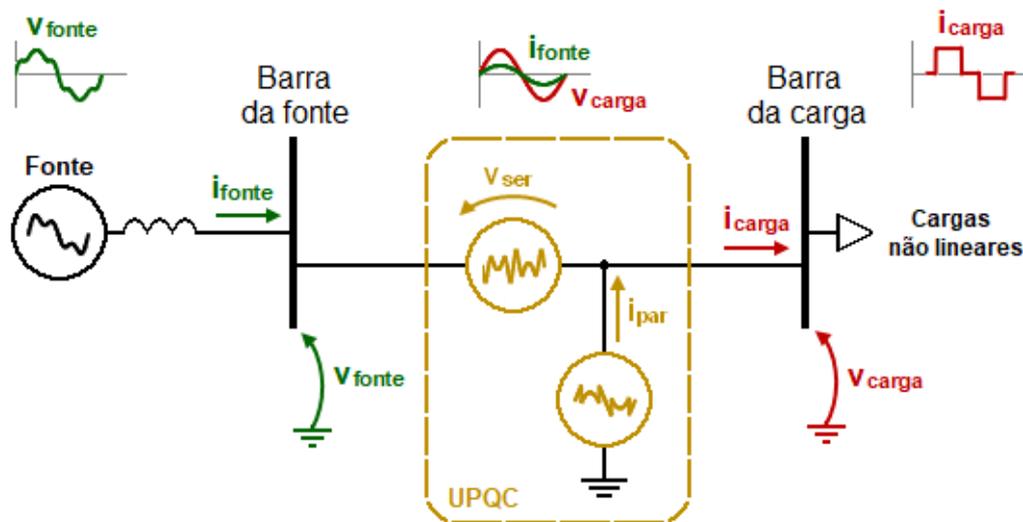


Figura 3.1: Diagrama do UPQC original ideal [5].

O controle do UPQC clássico, conforme [18], é baseado na Teoria da Potência Instantânea e pode ser resumido da seguinte forma: o controle identifica os distúrbios presentes na tensão da fonte e na corrente da carga e faz com que os conversores série e paralelo imponham na rede formas de onda formadas somente pelos distúrbios, mas de modo contrário, melhorando a qualidade de energia elétrica (QEE) no ponto de conexão comum (PCC) do sistema.

## 3.2 Estado da arte do UPQC

O UPQC é um dos equipamentos mais versáteis para mitigação de problemas de QEE. Diversos trabalhos mostram seu uso com diferentes objetivos. Em [23], é realizada uma revisão de mais de 150 artigos com relação à diferentes topologias.

De acordo com os estudos [18, 21, 27, 35, 58, 59], este tipo de condicionador é capaz de atuar nos seguintes problemas de QEE:

- Regulação de tensão em regime permanente e transitório;
- Compensação de desequilíbrio de corrente e de tensão;
- Filtragem de harmônicas de corrente da carga, impondo corrente senoidal na fonte;
- Filtragem de harmônicas de tensão da fonte, impondo tensão senoidal na carga;
- Correção de fator de potência; e
- Compensação de energia reativa na fonte, ou seja, funcionando como compensador síncrono estático (do inglês, *Static Synchronous Compensator*) (STATCOM).

A grande parte dos estudos do dispositivo faz análises em sistemas do tipo trifásico a três fios (do inglês, *three-phase three-wire*) (3P3W), mais comum em redes de média e alta tensão. Entretanto, em redes de distribuição de baixa tensão é comum a presença do condutor neutro. Sendo assim, alguns pesquisadores exploram o UPQC em sistemas desse tipo, como é o caso de [22, 25, 30, 33, 60]. Além disso, também são considerados sistemas monofásicos para o aprimoramento do equipamento, como em [20, 36, 61]. Há ainda trabalhos que exploram o uso do equipamento em redes de uma fase para alimentar cargas trifásicas, que é o caso de [31, 62, 63], e redes 3P3W que alimentam cargas em um circuito trifásico a quatro fios (do inglês, *three-phase four-wire*) (3P4W), como em [29].

Outra diferença encontrada na documentação sobre o UPQC é a presença de transformadores na conexão do conversor paralelo, com o objetivo de isolar eletricamente o dispositivo por completo, já que no lado do conversor série é imprescindível a utilização de transformadores. A utilização de transformadores *shunt* também permite que o UPQC possa trabalhar com uma potência menor [3, 64, 65].

O elo de corrente contínua é geralmente gerenciado pelo próprio controlador dos conversores, podendo ser inicialmente carregado através de resistores durante o processo de

inicialização do dispositivo, como demonstrado em [6]. Entretanto, pesquisas recentes mostram a utilização de um circuito auxiliar de geração distribuída (GD) para regular a tensão do elo [19, 30, 32, 60, 64]. Ainda sobre GD, o artigo [24] faz uma revisão da integração entre recursos distribuídos de geração de energia elétrica e condicionadores unificados de qualidade de energia. Em [28], a operação do UPQC em microrredes é explorada. Os trabalhos [34, 66] apresentam o uso do dispositivo para regular a tensão de um gerador eólico.

Com relação às estratégias de controle, diferentes técnicas de controle vêm sendo exploradas. Apesar de a maior parte dos trabalhos ter como base a Teoria da Potência Instantânea, estudos como [37] mostram a possibilidade da utilização da teoria convencional de potência para controlar os conversores do UPQC.

Para dimensionar os componentes elétricos que compõem o UPQC, uma análise de fluxo de potência pode ser feita. Os estudos [67, 68] apresentam uma metodologia para isso e trabalhos como [6, 27] a utilizam.

Como já foi dito, o UPQC é controlado de tal forma a proporcionar à rede as tensões e correntes formadas pelos distúrbios que se deseja compensar. Entretanto, um aprimoramento realizado inicialmente por [5, 21, 58] simplificou o método de controle utilizado de maneira que as tensões e correntes geradas pelos conversores passaram a ser as desejadas para o sistema, isto é, puramente senoidais com frequência fundamental. Para isso, o conversor série passou a ser o responsável por sintetizar as correntes e o conversor paralelo passou a sintetizar as tensões. Estudos posteriores melhoraram e exploraram outros tipos de controle e de compensação, como em [6, 26, 27, 29, 33, 35, 38, 63, 64, 66, 69, 70, 71, 72, 73]. Com essa mudança, nomenclaturas foram sugeridas para diferenciar este tipo de UPQC do original. É possível encontrar UPQC-i e iUPQC, fazendo referência à topologia invertida, e dUPQC e dual UPQC ou UPQC dual, já que se trata de uma topologia dual com relação à clássica. O presente trabalho explora melhorias neste tipo de compensador e foi adotado o nome UPQC dual.

### 3.3 UPQC dual

O UPQC dual também é utilizado para compensar distúrbios de tensão da rede e distúrbios de corrente da carga, assim como o UPQC em sua forma clássica. Entretanto, a fim de simplificar e otimizar a atuação dos conversores, os desenvolvedores da topologia invertida modificaram o controle para que os conversores passassem a sintetizar as tensões

e correntes desejadas, isto é, senoidais na frequência do sistema com magnitude nominal, em vez de sintetizarem os distúrbios presentes na rede. Dessa forma, como já comentado anteriormente, o conversor série passou a ser responsável pela geração da corrente desejada e o conversor paralelo pela geração da tensão desejada.

Em outras palavras, os distúrbios presentes na tensão da rede de alimentação passam a ser compensados automaticamente nos terminais do conversor série através da imposição da tensão ideal na barra da carga pelo conversor paralelo. Da mesma forma, os distúrbios de corrente gerados pelas cargas conectadas ao sistema são compensados nos terminais do conversor paralelo de forma automática, uma vez que a corrente ideal é forçada na barra da fonte de alimentação. Ou seja, a compensação dos distúrbios pelo UPQC dual ocorre através das leis de Kirchhoff.

Diante disso, a dinâmica de compensação do UPQC dual passa a ser regida pelas equações

$$v_{car} = v_{par} = v_{fon} - v_{ser} \quad (3.3)$$

e

$$i_{fon} = i_{ser} = i_{car} - i_{par} , \quad (3.4)$$

onde:  $v_{car}$  é a tensão compensada na barra da carga;  $v_{par}$  é a tensão na saída do conversor paralelo;  $v_{fon}$  é a tensão na barra da fonte, com distúrbios;  $v_{ser}$  é a tensão na saída do conversor série;  $i_{fon}$  é a corrente compensada na barra da fonte;  $i_{ser}$  é a corrente na saída do conversor série;  $i_{car}$  é a corrente na barra da carga, com distúrbios; e  $i_{par}$  é a corrente na saída do conversor paralelo. A Figura 3.2 apresenta a topologia dual com as compensações definidas pelas Equações (3.3) e (3.4).

Resumindo, a diferença entre as topologias clássica e dual do UPQC está no tipo de fonte que cada conversor se comporta, alterando os sinais resultantes do controle. Vale observar que, como a forma dual do UPQC não precisa reproduzir os distúrbios presentes no sistema elétrico, a possibilidade de uma compensação de forma errada é evitada. Além disso, a dinâmica de compensação é ótima, pois acontece de forma natural como consequência das tensões e correntes senoidais impostas [27]. Outra diferença é relacionada à operação do equipamento. Enquanto a topologia clássica pode atuar de forma que somente um dos conversores esteja em operação, o UPQC dual só é capaz de

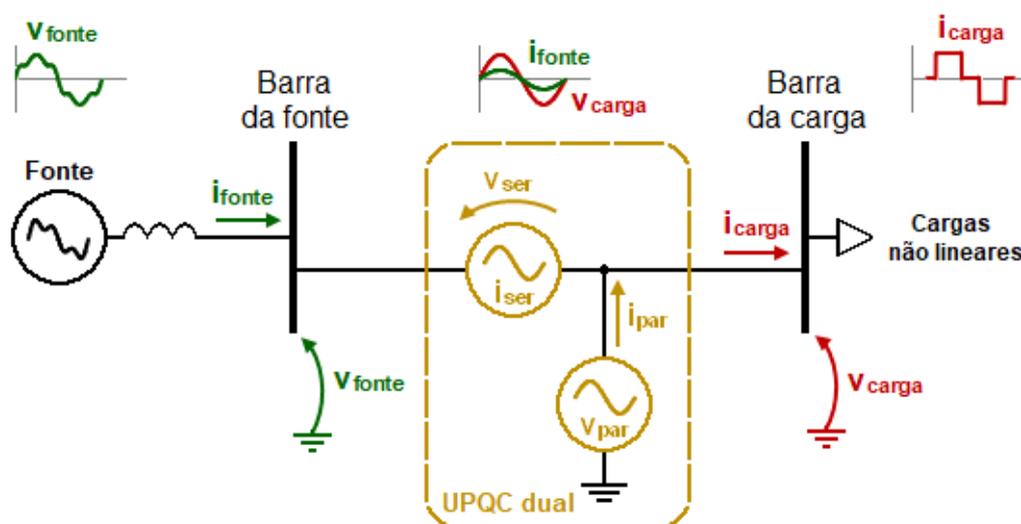


Figura 3.2: Diagrama do UPQC dual ideal [5].

atuar com a operação de ambos conversores concomitantemente [6].

### 3.3.1 Teoria da Potência Instantânea (Teoria PQ)

A teoria convencional para a potência elétrica, amplamente utilizada em estudos de engenharia elétrica, produz resultados confiáveis e satisfatórios quando o sistema possui tensões e correntes senoidais e balanceadas. Entretanto, esse cenário não é comum nas redes elétricas, principalmente devido à presença de equipamentos de eletrônica de potência, que causam distúrbios como, por exemplo, harmônicos. Ademais, geralmente as tensões e correntes da rede não são equilibradas. Em circuitos com essas características, a teoria convencional acarreta controles mais complexos, pois trata o sistema trifásico fase por fase, diferente da Teoria da Potência Instantânea que entende o sistema trifásico como um conjunto único de três fases.

Portanto, com o objetivo de possibilitar cálculos precisos das variáveis elétricas independentemente das formas de onda de tensão e corrente do sistema, foi elaborada a teoria denominada Teoria da Potência Instantânea, desenvolvida por [74, 75], também conhecida como Teoria PQ.

A Teoria PQ foi inicialmente proposta para sistemas do tipo 3P3W e, posteriormente, foi expandida para sistemas com o condutor neutro, ou seja, sistemas do tipo 3P4W [76]. De acordo com os idealizadores e com estudos posteriores, ela é válida para sistemas trifásicos em regime permanente e transitório. Existem estudos que apresentam sua

utilidade na análise de sistemas polifásicos e monofásicos, inclusive na aplicação do controle do UPQC, conforme comentado no item 3.2. Entretanto, como o sistema analisado neste trabalho é trifásico a três fios, a apresentação da Teoria PQ será para esse caso em particular.

A Teoria da Potência Instantânea considera o sistema trifásico de forma única, sem separar as fases para realização de cálculos. Para isso, geralmente a álgebra utilizada é através da Transformada de Clarke. Em [2], os autores explicam e apresentam detalhadamente a teoria, além de reforçá-la através de exemplos de aplicações.

A Transformada de Clarke foi proposta por Edith Clarke [77] na década de 1940. A transformação consiste em fazer a mudança de coordenadas  $abc$ , cujos vetores são fasores de defasagem igual a  $120^\circ$ , para  $\alpha\beta 0$ , cujos vetores são estacionários e ortogonais entre si.

A matriz geral de transformação direta e a de transformação inversa utilizadas pela Teoria PQ são apresentadas, respectivamente, a seguir e têm a propriedade de serem invariantes em termos de potência:

$$\begin{bmatrix} x_0 \\ x_\alpha \\ x_\beta \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ 1 & \frac{-1}{2} & \frac{-1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_a \\ x_b \\ x_c \end{bmatrix} \quad (3.5)$$

e

$$\begin{bmatrix} x_a \\ x_b \\ x_c \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} & 1 & 0 \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{-1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{-1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_0 \\ x_\alpha \\ x_\beta \end{bmatrix}, \quad (3.6)$$

onde  $x_0$ ,  $x_\alpha$  e  $x_\beta$  são as componentes das coordenadas zero, alfa e beta, respectivamente, e  $x_a$ ,  $x_b$  e  $x_c$  são as componentes das coordenadas  $abc$ . Em cálculos de engenharia elétrica a variável  $x$  pode ser interpretada como tensão ( $v$ ) ou como corrente ( $i$ ).

Em sistemas do tipo 3P3W, não há presença de componente de sequência zero e, por isso, as Equações 3.5 e 3.6 podem ser simplificadas desprezando os termos relacionados a  $x_0$ . O fato de a Transformada de Clarke isolar a componente de sequência zero torna sua utilização interessante para a Teoria da Potência Instantânea [2].

A Teoria PQ trata a ideia de potência elétrica de forma um pouco diferente da teoria convencional. A potência ativa, também chamada de potência real, indicada por  $p$ , é a potência que representa, instantaneamente, o fluxo total de energia que flui em um

sistema por unidade de tempo. Já a potência reativa, também chamada de potência imaginária, indicada por  $q$ , representa a energia trocada entre fases, em determinado ponto do sistema, sem que haja transferência de energia para outro ponto. O cálculo dessas potências é realizado através da Equação (3.7). Como a Transformada de Clarke isola a componente de sequência zero, outra potência aparece na equação, a potência real de sequência zero ( $p_0$ ), conforme:

$$\begin{bmatrix} p_0 \\ p \\ q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_0 & 0 & 0 \\ 0 & v_\alpha & v_\beta \\ 0 & v_\beta & -v_\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_0 \\ i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix}. \quad (3.7)$$

Desconsiderando o cálculo da potência de sequência zero, a Equação (3.7) pode ser reescrita como:

$$p = v_\alpha \cdot i_\alpha + v_\beta \cdot i_\beta \quad (3.8)$$

e

$$q = v_\beta \cdot i_\alpha - v_\alpha \cdot i_\beta. \quad (3.9)$$

Além disso, cada potência pode ser dividida entre uma parte média ( $\bar{p}$  e  $\bar{q}$ ) e uma parte oscilante ( $\tilde{p}$  e  $\tilde{q}$ ), como pode ser visto nas Equações (3.10) e (3.11):

$$p = \bar{p} + \tilde{p} \quad (3.10)$$

e

$$q = \bar{q} + \tilde{q}. \quad (3.11)$$

### 3.3.2 Controle do UPQC dual

O controle utilizado no presente estudo é semelhante ao desenvolvimento realizado pelos trabalhos [5, 6, 21, 27, 35, 38, 58, 69].

As medições relevantes para as estratégias do sistema de controle são: a tensão da barra da fonte de alimentação; a corrente na saída do conversor série; a tensão na saída do

conversor paralelo; a corrente na barra da carga, e; a tensão do elo de corrente contínua do conversor. Os pontos de medição são evidenciados na Figura 3.3.

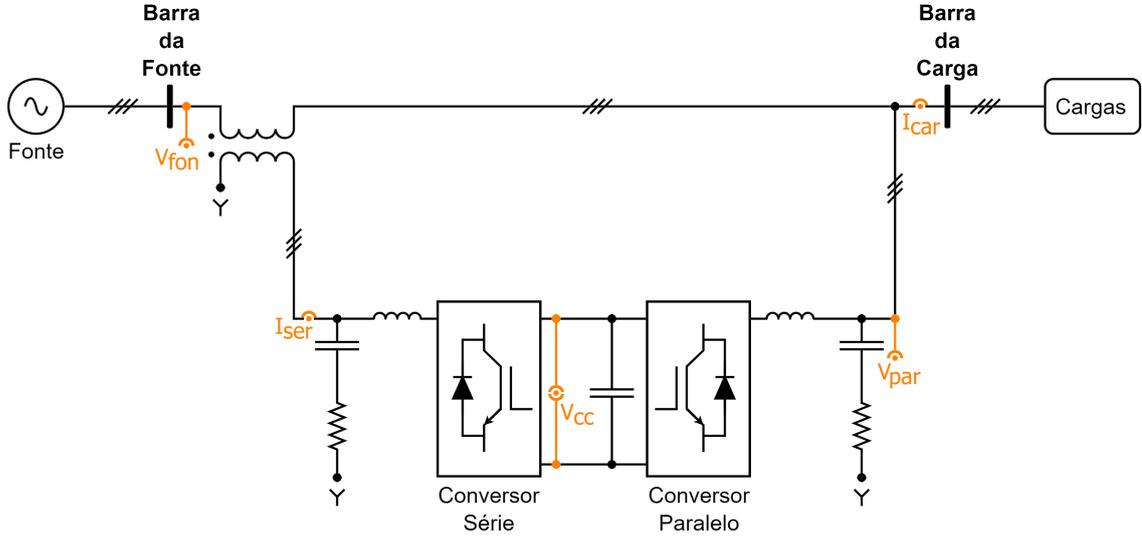


Figura 3.3: Pontos de medição para o controle do UPQC dual.

Como a rede estudada é do tipo 3P3W, basta que sejam medidas duas tensões e duas correntes. Assim, é possível reescrever a Equação (3.5) para dois sinais de tensões de linha, através de

$$\begin{bmatrix} v_\alpha \\ v_\beta \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & \frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_{ab} \\ v_{bc} \end{bmatrix}, \quad (3.12)$$

e para dois sinais de corrente de linha, através de

$$\begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \frac{3}{2} & 0 \\ \frac{\sqrt{3}}{2} & \sqrt{3} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \end{bmatrix}. \quad (3.13)$$

O sistema de controle do UPQC dual pode ser dividido em duas partes: uma parte para gerar os sinais de referência e outra para gerar os sinais do tipo modulação por largura de pulso (do inglês, *pulse width modulation*) (PWM) para a atuação dos conversores. Um diagrama de blocos para os cálculos das referências de tensão e corrente é mostrado na Figura 3.4.

O controle do conversor paralelo inicia recebendo as tensões de linha vindas dos medidores e as normaliza. Em seguida, a Transformada de Clarke é aplicada, utilizando a Equação (3.12). Esses sinais são então enviados para um circuito de sincronismo do tipo *Phase Locked Loop* (PLL). Na literatura, diferentes estudos deste e de outros tipos de

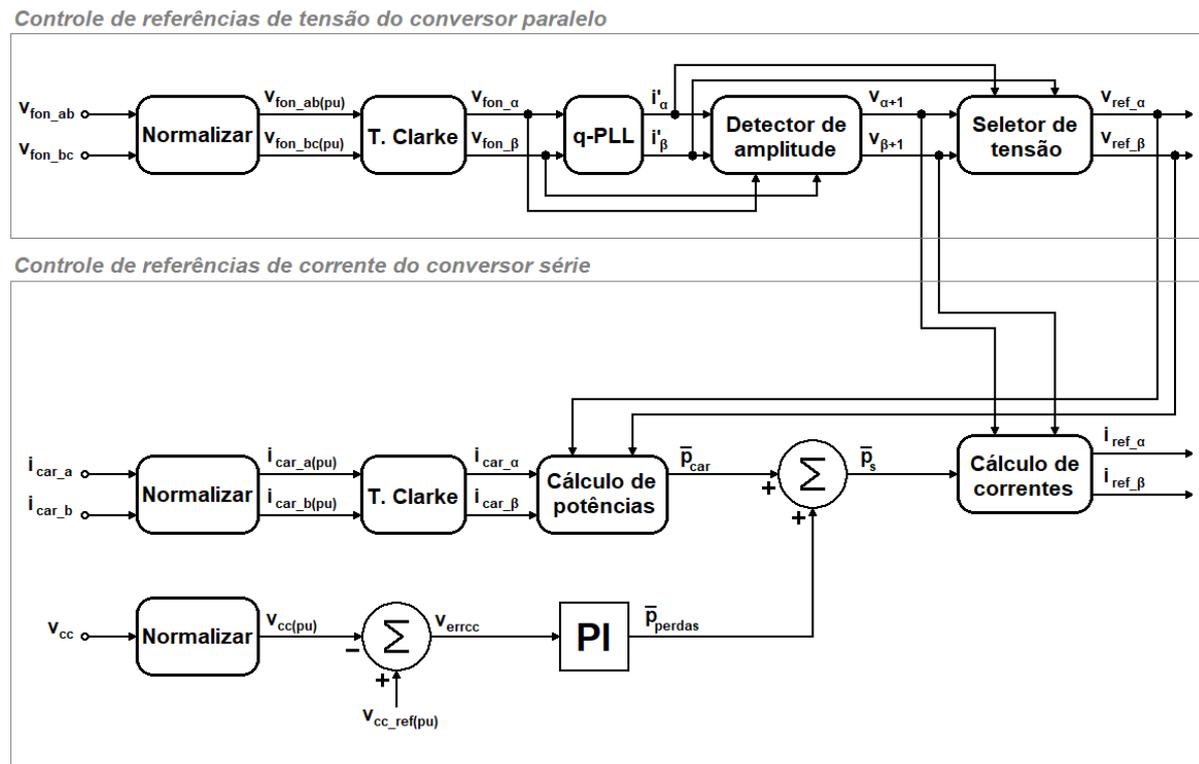


Figura 3.4: Controle base do UPQC dual [5, 6].

sistemas de sincronismo podem ser encontrados, vide [7, 78, 79, 80, 81, 82, 83, 84]. A topologia utilizada neste trabalho é conhecida como q-PLL [7] e pode ser vista na Figura 3.5.

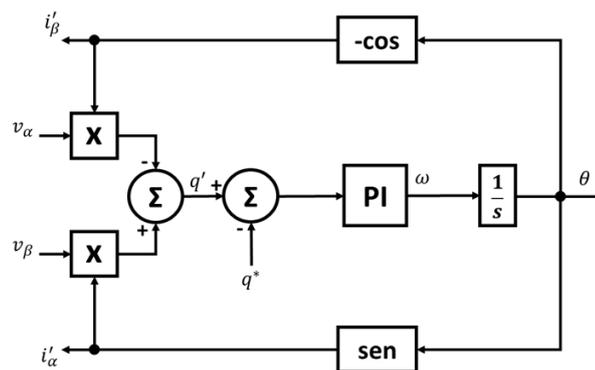


Figura 3.5: Circuito do q-PLL [2, 5, 7].

O sistema q-PLL funciona da seguinte forma: as tensões nas coordenadas  $\alpha\beta$  são multiplicadas por sinais matemáticos  $i'_\alpha$  e  $i'_\beta$ , resultantes da saída do q-PLL, e somadas de forma a gerar um sinal resultante da Equação (3.9); o valor de  $q'$  é então comparado com uma referência, que no caso é zero; em seguida, o erro entra em um controlador do tipo proporcional-integral (PI); a partir daí a frequência angular da rede ( $\omega$ ) é calculada; então o sinal  $\omega$  passa por um integrador, resultando em um sinal de frequência que varia

no tempo ( $\theta$ ), conforme a Equação (3.14); para que os sinais  $i'_\alpha$  e  $i'_\beta$  sejam calculados, as Equações (3.15) e (3.16) são aplicadas. Portanto, esses sinais gerados estão em fase e possuem a mesma frequência da tensão de entrada, mas com amplitude unitária. Vale observar que, como há integradores no circuito de sincronismo, o valor inicial de cada sinal de saída ( $\theta$ ,  $i'_\alpha$  e  $i'_\beta$ ) depende dos valores iniciais definidos para os blocos de integração. Esses sinais são calculados por:

$$\theta = \omega \cdot t , \quad (3.14)$$

$$i'_\alpha = \text{sen}(\theta) \quad (3.15)$$

e

$$i'_\beta = -\text{cos}(\theta) . \quad (3.16)$$

É importante destacar que os sinais  $i'_\alpha$ ,  $i'_\beta$  e  $q'$  não são correntes e potências reais, e sim, sinais de controle obtidos por manipulações matemáticas. O uso dessa nomenclatura é para facilitar o entendimento em analogia aos sinais de controle com cálculos de correntes e potências da Teoria PQ.

Para que os sinais  $i'_\alpha$  e  $i'_\beta$  possam representar de fato as tensões fundamentais de sequência positiva da fonte, um bloco de detecção de amplitude é executado em seguida, ilustrado pela Figura 3.6. A detecção é feita da seguinte forma: primeiro são calculadas as potências  $p'$  e  $q'$  através das Equações (3.8) e (3.9); em seguida essas potências são filtradas, a fim de obter os valores médios desses sinais; e depois as tensões são calculadas por

$$\begin{bmatrix} v_{\alpha+1} \\ v_{\beta+1} \end{bmatrix} = \frac{1}{i'^2_\alpha + i'^2_\beta} \begin{bmatrix} i'_\alpha & -i'_\beta \\ i'_\beta & i'_\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{p}' \\ \bar{q}' \end{bmatrix} , \quad (3.17)$$

desprezando a potência de sequência zero e considerando que as parcelas oscilantes das potências foram desconsideradas. As saídas da etapa de detecção de amplitude são os sinais  $v_{\alpha+1}$  e  $v_{\beta+1}$ , ou seja, as tensões nas componentes  $\alpha\beta$  de frequência fundamental e amplitude igual à da fonte de alimentação. Vale observar que a Equação (3.17) é uma manipulação algébrica da Equação (3.7) e o fator que multiplica as matrizes é formado pelos sinais  $i'_\alpha$  e  $i'_\beta$ , que quando seus quadrados são somados o resultado será uma constante

unitária. Esse detalhe simplifica o controle do detector de amplitude.

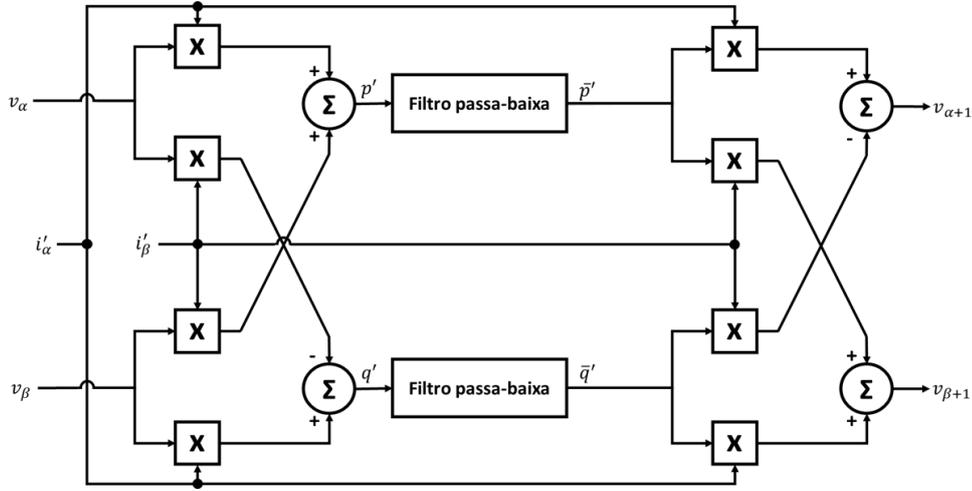


Figura 3.6: Detector de amplitude [2].

A partir dos sinais de tensão com amplitude, fase e frequência da rede pode-se selecionar as tensões que devem ser sintetizadas pelo conversor paralelo na barra da carga, de acordo com o desejado. Em caso de uma variação de tensão permanente ou de curta duração no sistema, o bloco seletor de tensões de referência irá identificar se o nível de tensão está dentro do intervalo adequado ou se ultrapassou um dos limites (máximo ou mínimo) de acordo com a norma regulamentadora do país ou região onde a rede se encontra. Caso um dos limites seja ultrapassado, o nível de tensão será fixado no valor do limite violado. No caso do presente trabalho, foi adotada a faixa de tensão considerada como adequada pelo Módulo 8 do Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional (PRODIST) [45], apresentada nos itens 2.1.1 e 2.1.2 do Capítulo 2, ou seja, com limites mínimo e máximo de 0,92 pu e 1,05 pu, respectivamente, em valores por unidade (pu).

No sistema de controle do conversor série, a primeira etapa é normalizar os sinais de corrente recebidos dos medidores. Em seguida é feita a Transformada de Clarke, de acordo com a Equação (3.13). As correntes são então utilizadas para calcular a potência real (potência ativa média) da carga, usando as tensões já manipuladas para serem referências do conversor paralelo. Assim, é calculado o valor de  $p_{car}$  pela Equação (3.8) e aplicado um filtro passa-baixa para extrair seu valor médio ( $\bar{p}_{car}$ ). Entretanto, essa potência não é a única que deve ser levada em conta no cálculo das correntes de referência. É preciso calcular a potência das perdas do UPQC dual, que impacta diretamente na tensão do elo. Para isso, o sinal recebido do voltímetro no elo de corrente contínua (CC) é normalizado e comparado com uma referência, para depois entrar em um controlador do tipo PI. A

saída desse controlador é o valor da potência necessária para regulação da tensão no elo CC ( $\bar{p}_{elocc}$ ). A soma das potências  $\bar{p}_{car}$  e  $\bar{p}_{elocc}$  resulta na potência ( $\bar{p}_s$ ) a ser inserida no cálculo das correntes de referência para a sintetização do conversor série, através da Equação (3.18), gerada pela manipulação algébrica da Equação (3.7):

$$\begin{bmatrix} i_{\alpha ref} \\ i_{\beta ref} \end{bmatrix} = \frac{1}{v_{\alpha+1}^2 + v_{\beta+1}^2} \begin{bmatrix} v_{\alpha+1}^2 & v_{\beta+1}^2 \\ v_{\beta+1}^2 & -v_{\alpha+1}^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{p}_s \\ 0 \end{bmatrix}. \quad (3.18)$$

Depois de calculadas as tensões e as correntes de referência, é necessário garantir que os conversores sejam capazes de reproduzir essas referências de maneira correta. Conforme comentado anteriormente, o presente trabalho utiliza a estratégia PWM, que vem sendo usada em estudos do UPQC dual. Nos estudos [5, 21, 58], essa estratégia era combinada com a Teoria PQ, utilizando a Transformada de Clarke. Porém, por questões de otimização e melhoria na robustez do controle, foi proposto por [6] um controle com a Transformada de Park [85], que é definida por

$$\begin{bmatrix} v_d \\ v_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\omega_1 t) & \text{sen}(\omega_1 t) \\ -\text{sen}(\omega_1 t) & \cos(\omega_1 t) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_\alpha \\ v_\beta \end{bmatrix}, \quad (3.19)$$

que faz a transformação das coordenadas  $\alpha\beta$  para as coordenadas  $dq$ . O trabalho [38] comparou as duas estratégias. A vantagem de utilizar a Transformada de Park, dada pela Equação (3.19), é separar o valor de amplitude e o valor médio dos sinais nas coordenadas  $d$  e  $q$ , respectivamente. Isso possibilita a utilização de controladores PI, permitindo que uma referência desejada seja definida e o sinal de saída tenda a ter esse valor, ou seja, tornando o erro nulo.

O diagrama da Figura 3.7 apresenta a segunda parte do controle do UPQC dual, onde são gerados os sinais PWM para os dispositivos paralelo e série, a partir das referências de tensão e corrente, respectivamente, resultantes da primeira parte.

De acordo com a melhoria implantada por [6, 38] o controle do conversor paralelo recebe os sinais de referência de tensão  $v_{ref\_ \alpha}$  e  $v_{ref\_ \beta}$  nas coordenadas  $\alpha\beta$  e os transforma para as coordenadas  $dq$ , através da Transformada de Park [85]. Os sinais  $v_{ref\_ d}$  e  $v_{ref\_ q}$  são usados como referência para os vinhos dos medidores na saída do conversor paralelo, que também são normalizados e transformados em coordenadas  $dq$ . Vale observar que os sinais  $v_{par\_ d}$  e  $v_{par\_ q}$  são filtrados, através de um filtro passa-baixa, para que qualquer distúrbio presente nas tensões no lado da carga seja desconsiderado no controle, fazendo com que o controlador PI trate apenas da regulação da tensão em regime permanente. Cada sinal

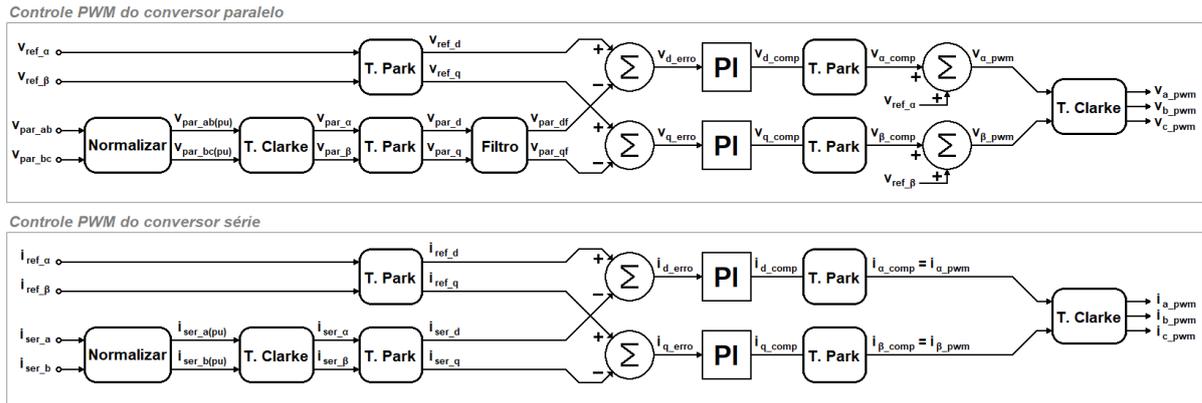


Figura 3.7: Controle PWM do UPQC dual [5, 6].

de erro ( $v_{d\_erro}$  e  $v_{q\_erro}$ ) proveniente da comparação é enviado a um controlador PI. Em seguida, os resultados são transformados de volta para coordenadas  $\alpha\beta$ . Então,  $v_{\alpha\_comp}$  e  $v_{\beta\_comp}$  são somados com o valor de referência de tensão ( $v_{ref\_alpha}$  e  $v_{ref\_beta}$ ), formando uma realimentação positiva. Depois os sinais são transformados de volta para as coordenadas  $abc$  para que sejam gerados os sinais PWM. A transformada de Clarke inversa utilizada para as tensões é dada pela Equação (3.6), desconsiderando a componente de sequência zero.

O controle do conversor série é semelhante ao controle do conversor paralelo. Como no conversor série é desejado que os distúrbios de corrente sejam considerados no controle, não é usado o filtro passa-baixa para os sinais vindos dos medidores de corrente da saída do conversor série. Outra diferença fica por conta da última etapa antes da transformação de coordenadas  $\alpha\beta$  para coordenadas  $abc$ , onde não há a presença de realimentação positiva. A transformada inversa de Clarke para as correntes é apresentada pela Equação (3.6), também desconsiderando a componente de sequência zero.

Para atingir o objetivo principal do presente trabalho, um novo aprimoramento foi realizado no controle do UPQC dual, que será explicado no Capítulo 6.

### 3.4 Síntese do capítulo

O capítulo apresentou o equipamento de estudo deste trabalho, o UPQC. Inicialmente foi descrito brevemente o UPQC em sua forma clássica, isto é, como foi inicialmente desenvolvido, e posteriormente foi percorrido o equipamento na topologia dual, que é a topologia utilizada nas análises desta dissertação. Foi feito um estudo do estado da arte, com base em artigos científicos e outras fontes bibliográficas, a fim de mostrar a relevância

---

e a atualidade do tema nas pesquisas de engenheiros eletricitas que atuam na área de eletrônica de potência com foco em mitigação de problemas de QEE. Neste capítulo também foi apresentado o controle do equipamento, baseado em estudos anteriores e, de forma resumida, foram introduzidos alguns conceitos da Teoria da Potência Instantânea (Teoria PQ), utilizados no controle.

# Capítulo 4

## Princípios de simulação

A simulação em tempo real (do inglês, *real-time simulation*) (RTS) com sistemas *Hardware-in-the-Loop* (HIL) tem sido cada vez mais presente nos estudos de novos equipamentos de eletrônica de potência. Há algumas empresas no mercado que apresentam soluções para análises de sistemas elétricos e controles de dispositivos. Um exemplo é a empresa Typhoon HIL Inc., que possui *hardware* e *software* capazes de trabalhar com esse tipo de simulação.

Como já mencionado no Capítulo 1, a utilização dos produtos da Typhoon HIL Inc. vem crescendo ao longo dos últimos anos, demonstrando seu potencial e utilidade em pesquisas como a do atual trabalho. O fato de a empresa possuir *software* e *hardwares* próprios favorece a composição do sistema HIL para simulações. Entretanto, a modelagem para permitir a execução desse tipo de sistema não é trivial. Assim, dá-se a necessidade de realização de um estudo prévio que possibilite o HIL.

Este capítulo aborda brevemente conceitos relacionados à RTS e sistemas do tipo HIL na Seção 4.1. Em seguida, a Seção 4.2 discorre sobre os princípios de modelagem no *software* Typhoon HIL, fundamentais para as simulações realizadas neste trabalho. E, na Seção 4.3, as características do *hardware* modelo HIL402 utilizado são apresentadas.

### 4.1 Simulação em tempo real (RTS) e sistemas *hardware-in-the-loop* (HIL)

Uma simulação é considerada como sendo em tempo real quando é capaz de apresentar as saídas do sistema de forma sincronizada com o relógio do mundo real. Entretanto, é preciso ter cuidado com essa definição, pois pode parecer controversa, uma vez que

uma RTS não é necessariamente uma simulação ultra-rápida, e sim uma simulação que reproduza as saídas de forma satisfatória para o tipo de sistema desejado, que pode ter uma dinâmica muito alta, na casa de micro ou nanosegundos, ou uma dinâmica mais lenta, na casa de segundos.

A simulação de uma planta modelada pode ocorrer de três formas diferentes em relação ao tempo de execução das operações ( $t_e$ ) e ao tempo de simulação ( $t_n$ ). A Figura 4.1 apresenta essas três situações. O tempo de execução das operações é o tempo que o simulador leva para processar as informações e cálculos necessários em cada iteração. Já o tempo de simulação é o passo de tempo de cada iteração. Caso  $t_e$  seja superior a  $t_n$ , uma situação chamada de *overrun* acontece e a simulação não pode ser em tempo real, denominada como simulação *offline*. No caso de a execução ocorrer de forma consecutiva e mais rápida que  $t_n$ , sem aguardar o próximo passo de simulação, a simulação também é considerada como *offline*. Esse caso acontece quando se deseja que o processamento se dê da forma mais rápida possível. Assim, a RTS só ocorre quando  $t_e$  é menor ou igual a  $t_n$ , mas com cada processamento de operações iniciando concomitantemente com a iteração referente a  $t_n$  [8, 9, 10].

Vale observar que uma boa simulação em tempo real não necessita apenas de uma boa representação da dinâmica do sistema, mas também do tempo em que os resultados dos cálculos são obtidos, que deve estar dentro de um período de simulação. Caso uma situação de *overrun* ocorra, exemplificada na Figura 4.1a, acabando com a confiabilidade da resposta do *software*, o passo de tempo da simulação deve ser aumentado ou a modelagem deve ser simplificada, de forma que se adéque à situação mostrada na Figura 4.1c [8, 9].

Conforme [9] explica, as operações necessárias para o processamento da simulação são executadas uma vez a cada passo de simulação. Dentre essas operações é possível citar: leitura de sinais de entrada (do simulador ou de outro dispositivo); cálculo das equações relacionadas ao sistema modelado; geração de sinais de saída, e; espera da próxima iteração.

Um detalhe importante é que os sistemas operacionais de computadores tradicionais não são capazes de executar ações de forma a atender às necessidades de uma simulação em tempo real. Assim, é necessário que haja um *hardware* capaz de fazer o processamento de dados que permitem a RTS. Esse *hardware* nada mais é do que um computador, porém sem sistema operacional, dedicado exclusivamente para resolver as operações necessárias para a simulação. Uma tecnologia bastante utilizada para um desempenho confiável dos simuladores com RTS é o circuito integrado do tipo *Field Programmable Gate Ar-*

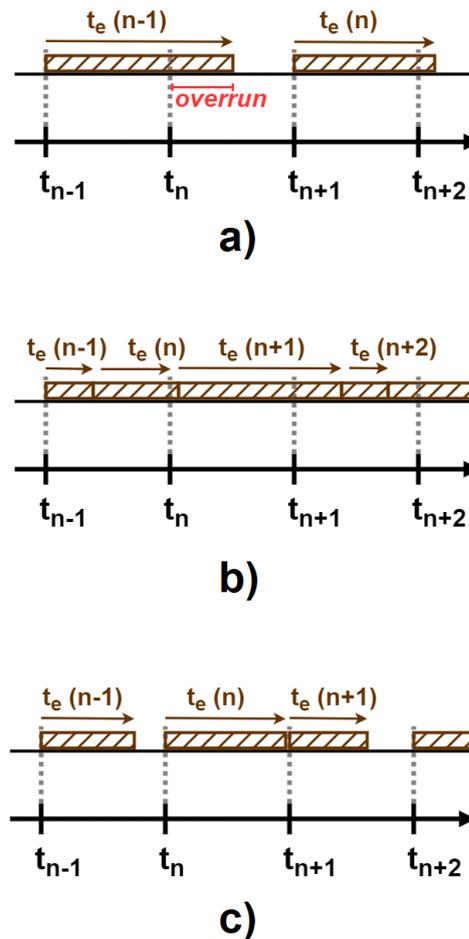


Figura 4.1: Simulação a) *offline* mais lenta que o tempo real b) *offline* mais rápida que o tempo real c) em tempo real [8, 9, 10].

*ray* (FPGA) que é, resumidamente, um circuito que pode ser reprogramado e que executa processos na casa de nanosegundos, o que é essencial em simulações em tempo real com aplicações de eletrônica de potência. Entretanto, algumas empresas possuem *hardwares* apenas com processadores do tipo *Central Processing Unit* (CPU), para simulações com menor tempo de execução requerido, como é o caso de sistemas mecânicos [9]. Os *hardwares* da empresa Typhoon HIL Inc. possui tanto circuitos do tipo FPGA quanto do tipo CPU [86].

Simultaneamente com o avanço tecnológico das RTSs, os sistemas de teste conhecidos como HIL vêm sendo cada vez mais utilizados. O HIL é uma ferramenta que une *software* e *hardware* para simular conjuntamente uma planta modelada que se aproxime do sistema real. Seu objetivo pode ser, por exemplo, testar um equipamento elétrico ou um controle embarcado em microcontrolador, ou ainda ambos, em questão de desempenho frente à eventos que possam ocorrer no sistema real. A esse *hardware* a ser testado dá-se o nome de *Hardware-under-Test* (HuT).

Com tantos nomes semelhantes e siglas, é importante ter o cuidado de não confundir determinadas nomenclaturas. Por exemplo, o *hardware* que possibilita a simulação em tempo real não é o HuT e não forma um sistema HIL. O HIL só é formado com a presença de um HuT conectado a um *hardware* que permite a RTS em conjunto com um computador que execute o *software* para a simulação.

A ferramenta HIL surgiu no início do século passado, com as primeiras aplicações realizadas nas indústrias aeroespacial e automotiva. Atualmente, diversas áreas tecnológicas fazem uso dessa estratégia, inclusive a engenharia elétrica, avaliando sistemas elétricos de potência e equipamentos de eletrônica de potência, por exemplo. O HIL se torna muito útil quando o processo de avaliação de um sistema é complicado, caro e pode causar danos em componentes ou à integridade dos operadores. Além disso, existem casos em que fazer testes em um ambiente real se torna perigoso ou inviável, como são os casos de veículos autônomos e veículos espaciais [87].

Recentemente, com a evolução dos microprocessadores e da tecnologia FPGA, as RTSs e os sistemas HIL se tornaram viáveis comercialmente, como é o caso dos produtos das companhias OPAL-RT Technologies [88] e Typhoon HIL Inc. [1], com foco em simulações de sistemas elétricos. Ambas possuem soluções para testes de sistemas em tempo real com HIL, cada uma com características próprias, mas que atendem às necessidades de engenheiros de forma equivalente, conforme mostram os estudos [89, 90, 91, 92].

A escolha de utilizar os produtos da Typhoon HIL Inc. para o presente trabalho se deu por causa de um conhecimento prévio no programa computacional da empresa e por ter o *hardware* disponibilizado no laboratório Núcleo de Inovação Tecnológica em Engenharia Elétrica (NITEE) da Universidade Federal Fluminense (UFF). Além disso, conforme visto na Figura 1.1, a utilização dos produtos da companhia em artigos científicos teve um grande crescimento nos últimos anos, mostrando a importância que pesquisadores estão dando à empresa.

As simulações do tipo HIL podem ser classificadas da seguinte forma, de acordo com o explicado em [93]:

- *Controller Hardware-in-the-Loop* (C-HIL)

O HIL com controlador, chamado de *Controller Hardware-in-the-Loop* (C-HIL), é um sistema formado por um *hardware* de controle em conjunto com um *hardware* e um *software* que realizam a simulação de uma rede elétrica real. O objetivo principal desse sistema é testar o controlador, em termos de *hardware*, *firmware* e *software*.

Uma ilustração do C-HIL pode ser vista Figura 4.2. Um exemplo desse sistema é a validação de um sistema de controle para um conversor de potência, como é o caso do presente trabalho.

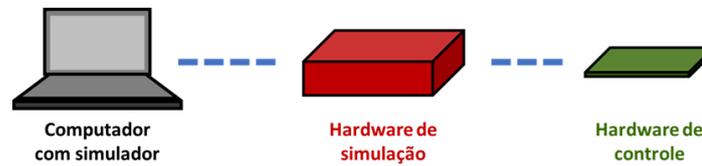


Figura 4.2: *Controller Hardware-in-the-Loop* (C-HIL).

- *Power Hardware-in-the-Loop* (P-HIL)

O HIL com sistema de potência, chamado de *Power Hardware-in-the-Loop* (P-HIL), ilustrado pela Figura 4.3, é o conjunto formado por *software* e *hardware* de simulação conectados com um sistema de tensões superiores a valores comumente encontrados em sistemas eletrônicos, como 3,3 V e 5,0 V. Dessa forma, um sistema de amplificador é necessário para realizar a integração entre o *hardware* de simulação e os equipamentos a serem testados. O P-HIL tem o objetivo de testar um equipamento elétrico antes que ele seja conectado a um sistema real. Um exemplo pode ser o estudo do comportamento de um limitador de corrente de curto-circuito frente a ocorrências de faltas no sistema.

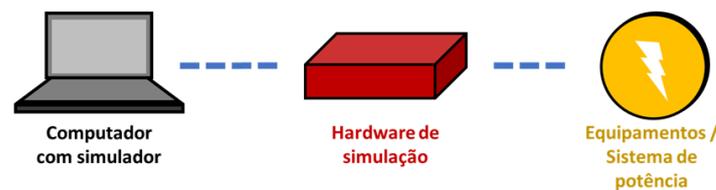


Figura 4.3: *Power Hardware-in-the-Loop* (P-HIL).

Antes de realizar a simulação em HIL, o usuário pode testar sua modelagem através do *software* e o *hardware* de simulação, com RTS, que é a configuração chamada de *Software-in-the-Loop* (SIL), conforme mostra a Figura 4.4.

Existem ainda outras configurações para testes de controle e de equipamentos, mas que se afastam do escopo do trabalho e não serão apresentadas.

Vale observar que os produtos da Typhoon HIL Inc. são capazes de trabalhar como SIL, C-HIL e P-HIL. Neste projeto, o primeiro tipo de simulação é utilizado, além do chamado *Virtual Hardware-in-the-Loop* (V-HIL), onde somente o *software* é executado no

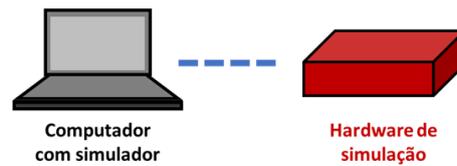


Figura 4.4: *Software-in-the-Loop* (SIL).

computador, sem a presença de qualquer *hardware* conectado e, portanto, é uma simulação *offline*. Nesse sentido, é possível perceber que há uma ordem sensata para se testar um sistema: inicialmente a simulação através de somente um *software* é usada para verificar se a modelagem está correta e apresenta respostas plausíveis; em seguida, o computador é conectado a um *hardware* dedicado de simulação para transformar a simulação *offline* em RTS, ou seja, em SIL; a partir daí, se for desejado testar um controle, então embarca-se um algoritmo em um microprocessador, que é conectado ao *hardware* e ao computador com o *software*, formando o C-HIL; já no caso de se ter um dispositivo de potência a ser testado, um sistema do tipo P-HIL deve ser formado [1].

## 4.2 Modelagem no Typhoon HIL

Como todo *software* de simulação tem suas peculiaridades, o Typhoon HIL possui algumas características que merecem atenção ao se modelar e simular, seja para o modo *offline* ou para RTS (sem ou com um HuT).

O artigo [39] apresenta um estudo de modelagem de um Condicionador Unificado de Qualidade de Energia (do inglês, *Unified Power Quality Conditioner*) (UPQC) no *software* Typhoon HIL, utilizado como base para análises no presente trabalho.

### 4.2.1 Complexidade do modelo

A interpretação da modelagem é feita através do espaço de estados. Assim, o *software* calcula previamente, antes de iniciar a simulação, todos os modos possíveis do sistema modelado ( $N_{modos}$ ), isto é, todas as circuitos formados pelas possíveis combinações de estado de chaves (aberto e fechado). Assim, quanto mais chaves ( $N_{chaves}$ ) a rede tiver, mais complexos se tornarão os cálculos e mais equações de estado terão que ser resolvidas para preparar o sistema para a simulação. Os elementos modelados como chaves são os contadores (disjuntores) e os semicondutores dos conversores de potência, sendo que para o caso de contatos que sejam comandados ao mesmo tempo, como é o caso de contadores

trifásicos e semicondutor com diodo antiparalelo, o simulador interpreta como uma chave única.

Portanto, é razoável considerar que a complexidade da modelagem se dá basicamente pela quantidade de modos de circuitos, representada pela Equação (4.1). Ou seja, o aumento da quantidade de elementos chaveados no circuito faz a quantidade de cálculos necessários na compilação crescer como uma potência de 2 [11]:

$$N_{modos} = 2^{N_{chaves}} . \quad (4.1)$$

### 4.2.2 Limitações de configurações de modelagem

Para cada *hardware* da Typhoon HIL Inc. existe uma limitação de processamento, logo, dependendo dos tipos de blocos, da quantidade de elementos, e da topologia utilizados na modelagem, o dispositivo pode não ser capaz de executar a simulação. A fim de guiar o usuário na criação de seu sistema, o *software* mostra possíveis configurações, relacionadas ao *firmware* do modelo do *hardware*, que são combinações da quantidade admitida de certos blocos, dos tipos de elementos permitidos na modelagem, da memória disponível para realização dos cálculos, e do número máximo de subcircuitos. Esse valor máximo da quantidade de subcircuitos está relacionado com a quantidade de núcleos de processamento FPGA do *hardware*, chamados de *Standard Processing Cores* (SPCs). A Tabela 4.1 mostra as configurações possíveis relevantes, identificadas como *Configuration id*, para o *hardware* mais simples da empresa, o HIL402, usado no presente estudo, mas com um bom potencial para executar uma grande variedade de sistemas com um determinado nível de complexidade.

Tabela 4.1: Características de *firmware* do *hardware* modelo HIL402.

Limitação	<i>id 1</i>	<i>id 2</i>	<i>id 3</i>	<i>id 4</i>	<i>id 5</i>	<i>id 6</i>
Subcircuitos (SPCs)	3	4	2	2	2	2
Geradores de sinais	12	12	12	12	12	12
Canais PWM	12	12	12	12	12	12
Pico de processamento por SPC	0,64	0,64	1,28	0,64	0,64	0,64
Memória de matriz por SPC	16,0	16,0	16,0	16,0	16,0	16,0
Memória das variáveis de saída por SPC	256	256	512	512	256	256
Peso total de conversores por SPC	3	3	3	4	3	3
Contatores por SPC	6	6	6	6	6	6

Com o objetivo de reduzir a complexidade do modelo criado, pode ser necessário fazer o particionamento do circuito, formando-se dois ou mais subcircuitos. Cada configuração

tem sua limitação de divisão de processamento em SPCs. O limite de geradores de sinais está relacionado à quantidade de fontes de tensão e corrente incluídas na modelagem. O processador do *hardware* tem uma limitação quanto à quantidade de canais do tipo modulação por largura de pulso (do inglês, *pulse width modulation*) (PWM) utilizada em conversores de potência controlados, contabilizados por cada perna de semicondutores. Com relação à memória disponível por SPC, isto é, por núcleo FPGA, cada dispositivo da empresa tem seus valores máximos. O peso de um conversor está relacionado à complexidade dele, influenciada pelo número de semicondutores que ele contém e os modos possíveis de circuito criados pelas combinações de chaves. Como contadores também influenciam na quantidade de matrizes de estado do modelo criado pelo usuário, há uma quantidade máxima permitida por subcircuito.

### 4.2.3 Terra como ponto de referência de um circuito

Outra informação importante sobre o Typhoon HIL é que não há a necessidade de se inserir o elemento terra (bloco *Ground*) no modelo a fim de criar um ponto de referência de tensão. O bloco *Ground* funciona como um ponto de conexão entre partes do circuito, de forma global. Ou seja, ao se inserir dois blocos desse tipo o *software* interpretará como uma ligação física entre os dois pontos [11].

### 4.2.4 Conflitos topológicos

Dependendo da topologia do modelo criado, conflitos entre elementos podem ocorrer. Basicamente esses problemas são relacionados a fontes de tensão em paralelo e fontes de corrente em série. Capacitores e indutores são considerados fontes dependentes de tensão e corrente, respectivamente, enquanto uma chave aberta é interpretada como uma fonte de tensão nula e uma chave fechada é interpretada como uma fonte de corrente nula. Assim, situações conflitantes podem ocorrer, exemplificadas na Figura 4.5. Nesse caso, o *software* identificará automaticamente qual elemento deverá ser degenerado, isto é, ignorado do circuito na compilação, com a seguinte regra: fontes de tensão se tornam um circuito aberto e fontes de corrente um curto-circuito.

No primeiro exemplo, na Figura 4.5a, quando duas fontes independentes de corrente estão em série, o *software* não conseguirá definir qual a fonte prioritária para permanecer no circuito e qual deverá ser eliminada (degenerada). Então, um alerta de erro será emitido e a compilação será interrompida. Uma solução possível para adequar o sistema

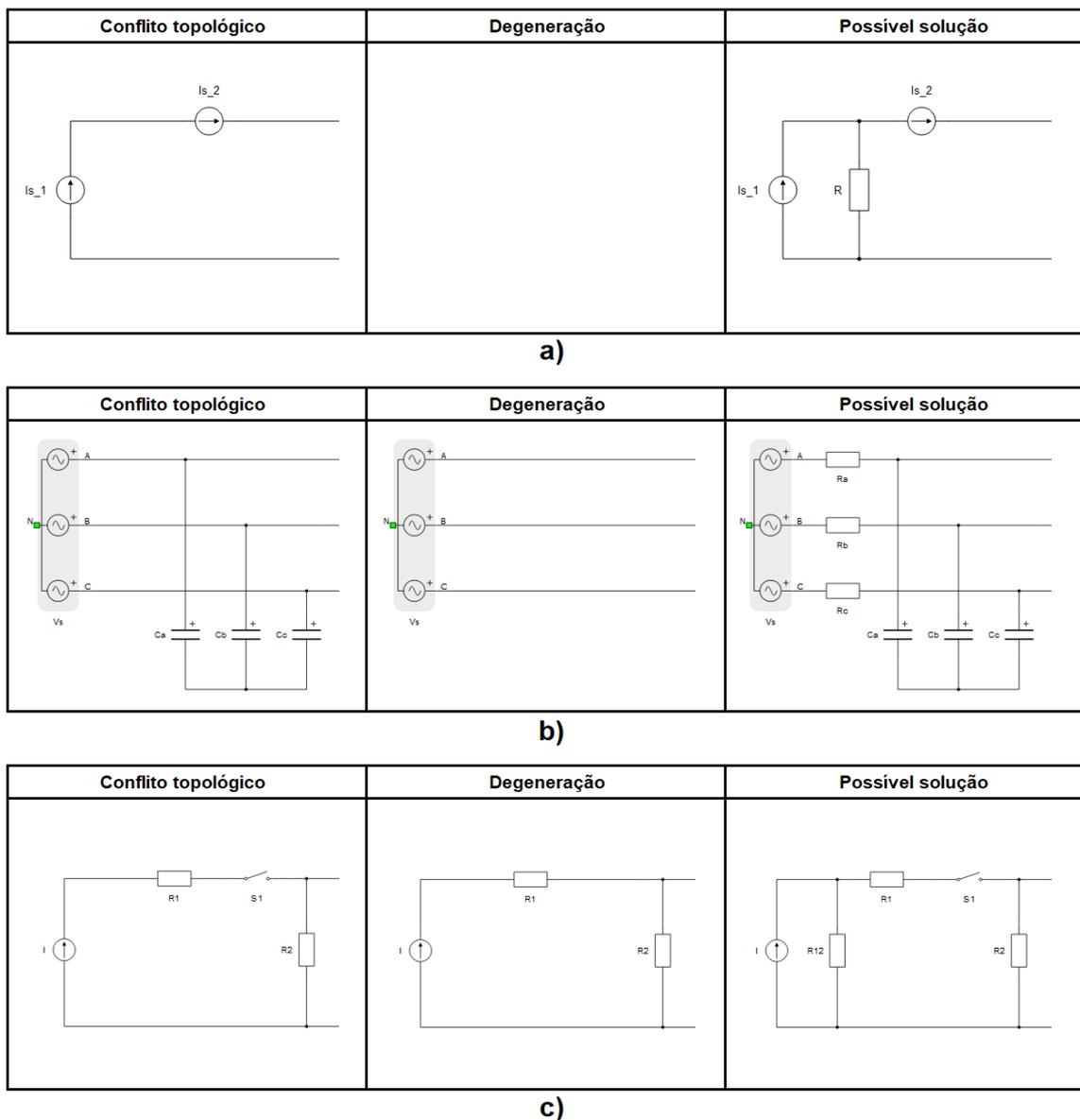


Figura 4.5: Casos de conflitos topológicos, suas degenerações e possíveis soluções a) fontes de corrente em série b) fontes de tensão em paralelo com capacitores c) fonte de corrente em série com chave aberta [11].

é incluir um resistor em paralelo entre as fontes. No exemplo da Figura 4.5b, ao tentar compilar a rede modelada o *software* entenderá que as fontes de tensão devem permanecer e os capacitores serão tratados como um circuito aberto. Para que o usuário consiga ter as capacitâncias incluídas na simulação, uma solução é acrescentar resistores em série com as fontes. Já na situação da Figura 4.5c, no modo do circuito quando a chave está desligada, a fonte de corrente fica aberta. Para solucionar esse conflito um resistor pode ser incluído em paralelo com a fonte.

### 4.2.5 Particionamento de circuitos

Existem situações no Typhoon HIL em que é necessário dividir a rede modelada em subcircuitos. Essa necessidade está relacionada à complexidade do modelo frente ao poder de processamento do *hardware* utilizado para permitir que a simulação seja executada em tempo real. Assim, se pelo menos um dos limites definidos para a configuração de *hardware* utilizada for violado, o usuário tem três opções: mudar o *id* de configuração de *firmware*; usar outro *hardware*; ou particionar o circuito. Dependendo das características da rede elétrica modelada, pode se tornar inviável a modificação do *id*. Com relação à mudança de *hardware*, pode ser que o usuário só tenha acesso a um modelo específico, como é o caso do presente trabalho. Portanto, particionar o circuito pode ser a única solução.

O Typhoon HIL dispõe de alguns tipos de blocos capazes de fazer o particionamento. O *Core Coupling* é o principal deles, especificamente com esse objetivo. O elemento que representa o modelo de Bergeron para uma linha de transmissão executa a divisão de circuitos automaticamente. Já um bloco de transformador pode funcionar como um *Core Coupling*, caso o usuário defina isso em suas configurações.

O *Core Coupling* pode ser de dois tipos: transformador ideal (do inglês, *Ideal Transformer*) (IT) ou modelo de linha de transmissão (do inglês, *Transmission Line Model*) (TLM), sendo o primeiro tipo mais indicado para aplicações com eletrônica de potência e o segundo para sistemas elétricos de potência [11].

Esses dois métodos de particionamento (IT e TLM) têm sido estudados e utilizados para a interface entre o simulador e o HuT em sistemas de teste do tipo P-HIL [92, 94, 95, 96]. No caso do Typhoon HIL, essa estratégia tem o objetivo de separar o circuito principal em subcircuitos menos complexos para uma melhor execução da simulação em tempo real, admitida pelos núcleos FPGA.

Como o presente trabalho utiliza somente o bloco *Core Coupling* do tipo IT, os demais não serão explicados detalhadamente. Esse bloco consiste em um transformador ideal com relação de transformação 1:1, sendo um lado (vermelho) representado por uma fonte de corrente e o outro (verde) representado por uma fonte de tensão, e pode ser de dois terminais (Figura 4.6), três (Figura 4.7a), quatro (Figura 4.7b) ou cinco (Figura 4.7c) terminais. A tensão é mensurada no lado vermelho e seu valor é passado para a fonte de tensão, enquanto a corrente é mensurada pelo amperímetro no lado verde e seu valor é enviado para a fonte de corrente. As fontes recebem os valores medidos com um atraso de uma iteração, mas que dificilmente acarreta problemas para os resultados da simulação.

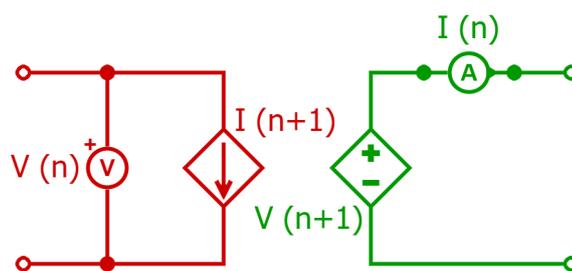


Figura 4.6: Representação do bloco *Single Phase Core Coupling* [11].

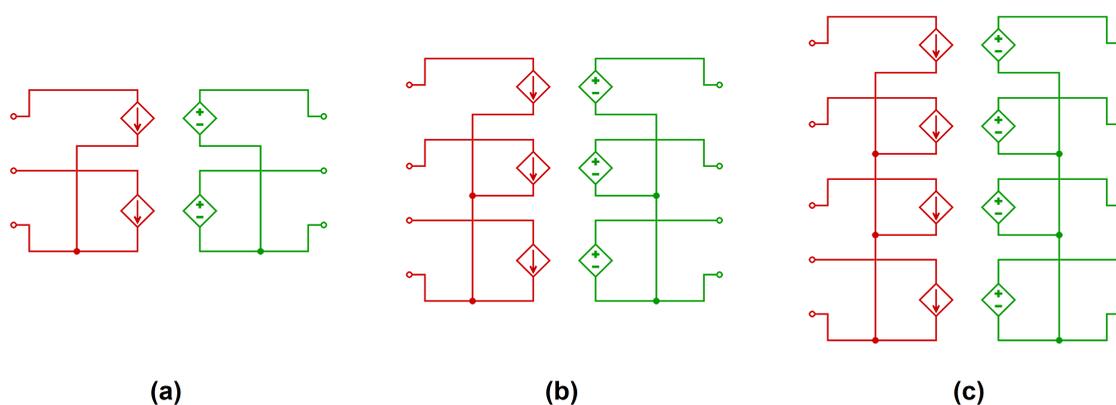


Figura 4.7: Representação do bloco *Core Coupling* a) de 3 terminais b) de 4 terminais c) de 5 terminais [11].

A inclusão de blocos *Core Coupling* do tipo IT tende a ocasionar conflitos não previstos inicialmente para a modelagem, devido à introdução de fontes de tensão e corrente no circuito. Por isso, é recomendado que o lado da fonte de corrente fique voltado para o lado do circuito onde há, próximo do local de particionamento, um elemento de baixa dinâmica de tensão, e o lado da fonte de tensão seja colocado para o lado onde há um elemento de menor dinâmica de corrente. No caso de um conversor de potência, é mais interessante que o lado onde há a fonte de tensão do bloco *Core Coupling* fique voltada para o equipamento de eletrônica de potência, pois só haverá situação conflitante no caso de haver um curto-circuito nas fases do dispositivo, o que geralmente não acontece.

Com relação à estabilidade, é possível configurar o *software* de modo que seja feita uma análise automática no momento da compilação. No caso do resultado ser de instabilidade ou de situação próxima à instabilidade, a recomendação é verificar a possibilidade de mudar o posicionamento dos blocos e alterar os valores dos *snubbers*.

### 4.2.6 Snubbers

Na ocorrência de conflitos topológicos, uma solução que pode ser adotada é a inserção de *snubbers*. A fim de facilitar a modelagem para o usuário quando há a necessidade de se particionar um sistema, o próprio bloco *Core Coupling* já possui a opção de configuração de *snubbers*, que podem ser de quatro tipos: resistor em série com a fonte de tensão; arranjo de resistor em paralelo com indutor (RL) em série com a fonte de tensão; resistor em paralelo com a fonte de corrente; e arranjo de resistor em série com capacitor (RC) em paralelo com a fonte de tensão. Além disso, os *snubbers* podem ser dinâmicos ou fixos, dependendo se um conflito ocorre para apenas um modo do circuito ou para todos os modos. A Figura 4.8 ilustra o bloco *Core Coupling* de dois terminais com *snubbers* RC e RL. A conexão dos *snubbers* nos demais blocos *Core Coupling* segue a mesma lógica.

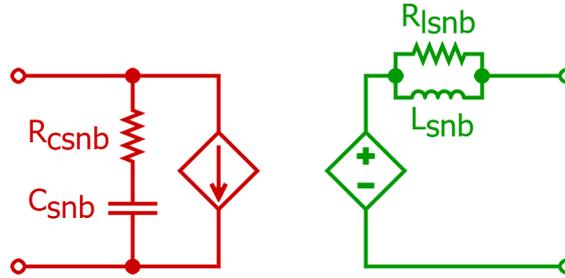


Figura 4.8: Exemplo de bloco *Core Coupling* com *snubbers* [11].

O manual do *software* [11] apresenta uma sugestão para o cálculo dos *snubbers*, através das equações:

$$C_{snb} = k_{snb} \frac{1}{\omega} \frac{S}{\sqrt{3}V^2} \sqrt{1 + (\omega\tau_{snb})^2}, \quad (4.2)$$

$$R_{csnb} = \frac{\tau_{snb}}{C_{snb}}, \quad (4.3)$$

$$L_{snb} = k_{snb} \frac{1}{\omega} \frac{\sqrt{3}V^2}{S} \sqrt{1 + (\omega\tau_{snb})^2} \quad (4.4)$$

e

$$R_{lsnb} = \frac{L_{snb}}{\tau_{snb}}, \quad (4.5)$$

onde  $S$  é a máxima potência que flui pelo *Core Coupling* em volt-ampère (VA),  $V$  é a

tensão eficaz entre terminais do *Core Coupling* em volts (V),  $\omega$  é a frequência angular da rede em radianos por segundo (rad/s),  $k_{snb}$  é a razão entre a potência do *snubber* e potência  $S$ ,  $\tau$  é a constante de tempo do *snubber* em segundos (s),  $C_{snb}$  é a capacitância do *snubber* RC em farads (F),  $R_{csnb}$  é a resistência do *snubber* RC em ohms ( $\Omega$ ),  $L_{snb}$  é a indutância do *snubber* RL em henrys (H), e  $R_{l_{snb}}$  é a resistência do *snubber* RC em ohms ( $\Omega$ ).

Nota-se que essas equações são provenientes da relação de um circuito equivalente contendo a fonte e a impedância do sistema com a impedância do *snubber* a ser adicionado.

Vale observar que as informações necessárias para a parametrização desses circuitos auxiliares está relacionada ao fluxo de potência que passa pelo bloco *Core Coupling*. No manual do *software* [11] é sugerido que o valor de  $k_{snb}$  seja 0,1 e o valor de  $\tau_{snb}$  seja 10  $\mu s$ . Esses valores podem ser alterados como o usuário desejar, desde que não provoquem a instabilidade do sistema, que é alertada quando a opção de verificação automática de estabilidade é acionada nas configurações de compilação do *software*.

### 4.3 Hardware HIL402

A Typhoon HIL Inc. possui alguns modelos de *hardware*, que diferem entre si pelas características de processamento, quantidade de entradas e saídas, portas de comunicação, entre outros detalhes. Os *hardwares* da Typhoon HIL Inc. utilizam processadores FPGA para realizar os cálculos da maioria dos elementos elétricos e CPU para executar os cálculos dos demais elementos, principalmente os relacionados ao processamento de sinais, permitindo que as operações sejam executadas em um tempo satisfatório para que a simulação seja em tempo real. Como já foi dito, o modelo utilizado no presente trabalho é o HIL402, mostrado na Figura 4.9. Na tabela 4.2 é possível ver as características físicas relevantes do HIL402. Outras informações podem ser encontradas no manual de *hardware* da empresa [86].

### 4.4 Síntese do capítulo

Neste capítulo foram apresentados conceitos relacionados a simulações do tipo RTS e sistemas do tipo HIL. Em seguida, uma fundamental descrição dos princípios de modelagem do *software* Typhoon HIL foi feita. Esses detalhes são importantes para as simulações que serão realizadas nos capítulos posteriores, pois com a complexidade do circuito se

Tabela 4.2: Características físicas do *hardware* modelo HIL402.

Característica	Detalhe
Dimensões	293 x 195 x 52 mm
Peso	2,1 kg
Entradas analógicas	16
Saídas analógicas	16
Entradas digitais	32
Saídas digitais	32
Conectividade	USB e Ethernet
Pinos analógicos com tensão	-5 V, +5 V, -5 V, -5 V (4x cada)
Pinos analógicos aterrados	32
Pinos digitais com tensão	+3,3 V e +5 V (5x cada)
Pinos digitais aterrados	22
Limites de tensão dos pinos (1 conectado)	$\pm 24$ V
Limites de tensão dos pinos (16 conectados)	$\pm 15$ V
Núcleos FPGA	4

Figura 4.9: Foto do *hardware* HIL402.

torna necessário o particionamento da rede e o uso de *snubbers*, não previstos no início da pesquisa de mestrado. Conforme foi dito, quando o circuito modelado possui muitas chaves e mais de um conversor de potência trifásico, é necessário dividir o sistema em subcircuitos, o que tende a acarretar conflitos topológicos, fazendo com que se tenha que inserir *snubbers*. A parametrização desses *snubbers* pode interferir negativamente nos resultados e, por isso, se deve fazer uma análise dos resultados para ajustar os valores de resistências, capacitâncias e indutâncias visando uma menor influência nas simulações. No final, também foram mostradas algumas informações do *hardware* de simulação HIL402 da Typhoon Hil Inc..

# Capítulo 5

## Modelagem do UPQC dual

Este capítulo é destinado a apresentar a modelagem do compensador série-paralelo no *software* Typhoon HIL e os primeiros resultados obtidos.

A divisão das seções se dá da seguinte forma: inicialmente, na Seção 5.1, a rede elétrica sem o equipamento é modelada, com o objetivo de servir de base de comparações para as demais modelagens com o equipamento de estudo. Na Seção 5.2, o modelo idealizado do Condicionador Unificado de Qualidade de Energia (do inglês, *Unified Power Quality Conditioner*) (UPQC) é apresentado. Na mesma seção também é feito um estudo de fluxo de potência com o objetivo de ter uma base de valores para o correto dimensionamento dos transformadores monofásicos conectados em série com o equipamento. Na Seção 5.3, é mostrado o desenvolvimento do modelo real, apresentando uma análise para o particionamento da rede em subcircuitos, necessário para as simulações do Typhoon HIL. Ao final, os principais resultados são discutidos.

### 5.1 Modelagem da rede elétrica

O primeiro passo dado na modelagem do circuito a ser estudado pelo presente trabalho foi criar a rede elétrica sem o UPQC dual. Essa etapa se torna necessária devido à complexidade do modelo a ser feito no Typhoon HIL frente às características de *software* e *hardware* explicadas na Seção 4.2 do Capítulo 4. Nesse primeiro momento, a configuração mais básica de *firmware* é suficiente, ou seja, a “*id* 1” da Tabela 4.1.

Como o projeto atual dá continuidade no aprimoramento do controle do UPQC dual apresentado nos trabalhos [5, 6], a rede modelada é baseada nesses documentos, sendo apresentada pela Figura 5.1.

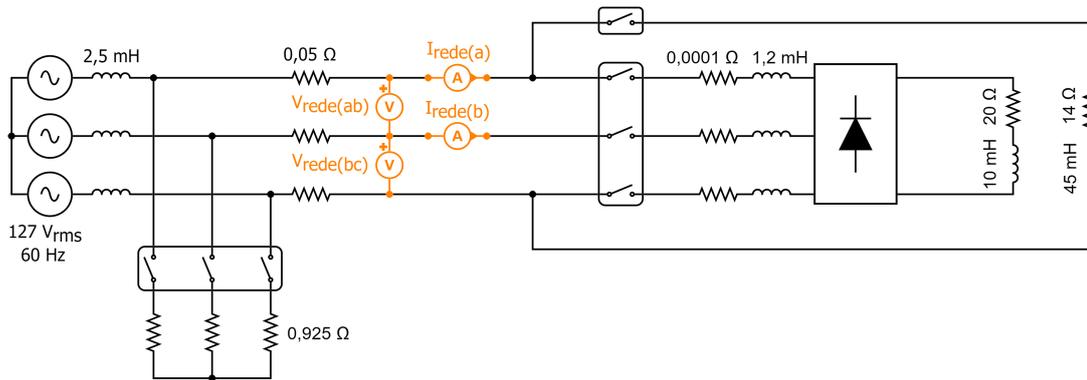


Figura 5.1: Diagrama da rede elétrica.

A fonte de alimentação da rede possui tensão eficaz de fase de 127 V e uma impedância constituída por uma indutância de 2,5 mH e uma resistência de 0,05  $\Omega$ . Sua frequência nominal é 60 Hz. Junto à fonte existe um conjunto de resistores *shunt* conectados em estrela, com valor de 0,925  $\Omega$  para simular um afundamento de tensão equivalente a 70 % do valor nominal.

Com relação às cargas, dois tipos foram modelados: uma carga RL bifásica composta por uma resistência de 14  $\Omega$  e uma indutância de 45 mH, conectadas em série entre as fases A e C da rede; e uma carga não-linear representada por uma ponte trifásica de diodos, com uma resistência de 20  $\Omega$  e uma indutância de 10 mH no lado de corrente contínua. Na entrada do retificador há resistores de 0,0001  $\Omega$  e indutores de comutação de 1,2 mH.

Por se tratar de um estudo preliminar, a simulação foi realizada somente via *software*, no modo *Virtual Hardware-in-the-Loop* (V-HIL). Foram executados quatro cenários, apresentados na Tabela 5.1. Os valores adotados como base para tensões e correntes foram, respectivamente, 311 V e 20 A. Posteriormente, foi realizada uma simulação do tipo *Software-in-the-Loop* (SIL), caracterizando um sistema simulação em tempo real (do inglês, *real-time simulation*) (RTS), obtendo-se os mesmos resultados.

Tabela 5.1: Cenários de carga na rede elétrica sem UPQC.

Cenário	Descrição
1	Carga não-linear ligada.
2	Carga bifásica ligada.
3	Cargas não-linear e bifásica ligadas.
4	Sem cargas ligadas.

Para o cenário 1, quando somente a carga não-linear está ligada, as tensões e correntes na rede, em valores por unidade (pu), podem ser vistas na Figura 5.2. Para o cenário 2,

quando só há a carga bifásica ligada, as formas de onda estão representadas na Figura 5.3. E a Figura 5.4 mostra as grandezas no caso do cenário 3, quando ambas as cargas estão ligadas.

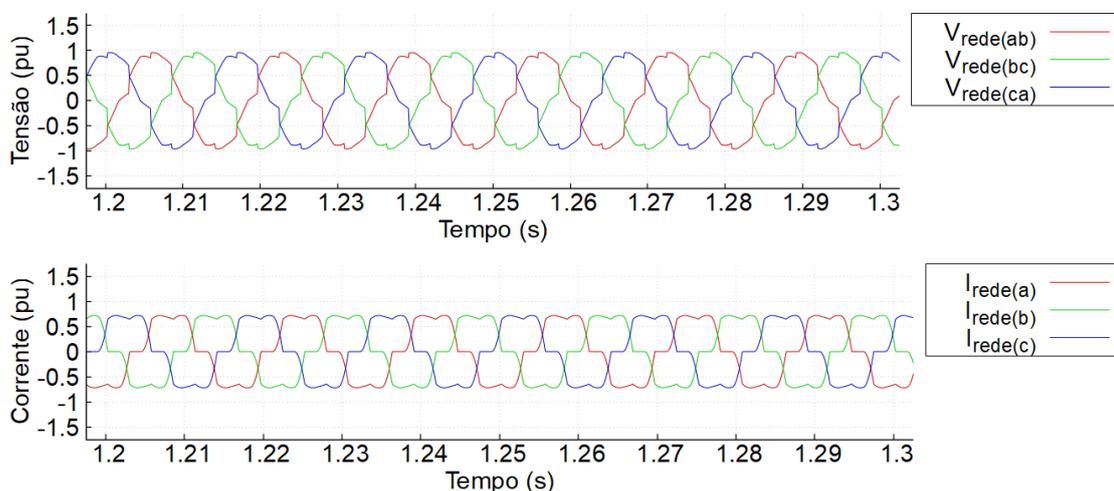


Figura 5.2: Tensões e correntes na rede durante o cenário 1.

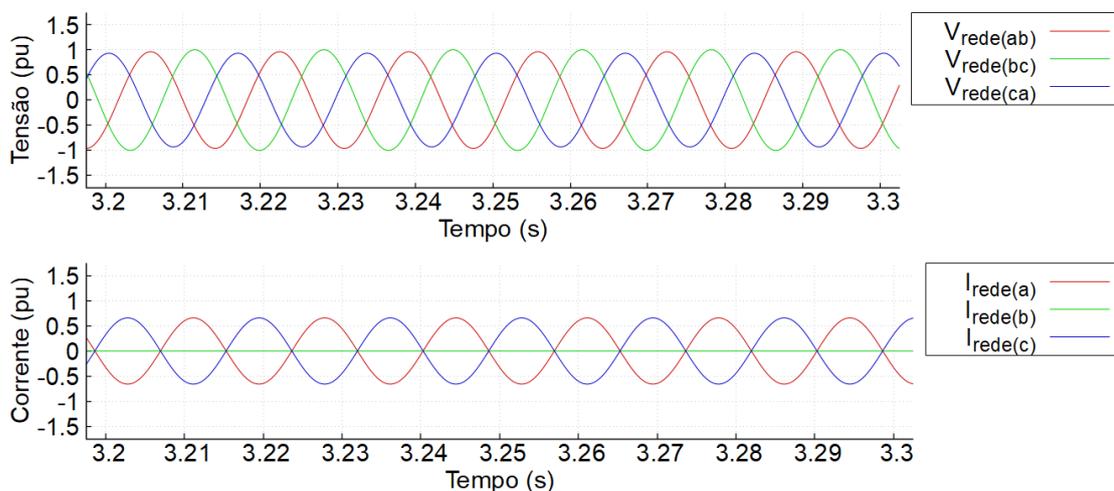


Figura 5.3: Tensões e correntes na rede durante o cenário 2.

Como no último cenário não há cargas conectadas, as correntes são nulas e as tensões são puramente senoidais, equilibradas, e com amplitude e frequência nominais. Por se tratar de um caso ideal, optou-se por não apresentar as formas de onda.

Com relação aos índices de Taxa de Distorção Harmônica Total (do inglês, *Total Harmonic Distortion*) (THD%), a Tabela 5.2 mostra os valores para o cenário em que há a carga não-linear junto com a carga bifásica ligadas. É possível observar que, de acordo com os limites indicados pelo Módulo 8 dos Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional (PRODIST) [45], apresentados no item 2.1.4 do

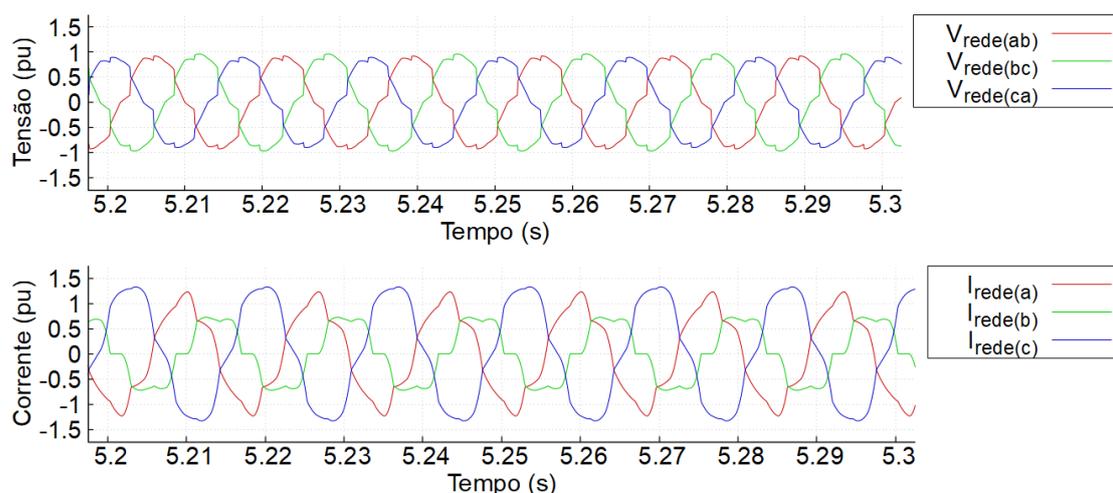


Figura 5.4: Tensões e correntes na rede durante o cenário 3.

Capítulo 2, as cargas causam uma distorção harmônica fora dos padrões recomendados de tensão. Com relação aos limites de corrente, com base na norma IEEE Std 519, é preciso calcular o valor da corrente de curto-circuito e a máxima corrente fundamental da carga. Os valores resultantes da simulação foram, respectivamente, 9,51 pu e 1,33 pu. Assim, a Relação de Curto-Circuito (RCC) é 7,15. Logo, os limites a serem respeitados são os da primeira linha da Tabela 2.5. Verifica-se que os valores encontrados para a distorção harmônica total da corrente também ultrapassou os limites recomendados. Diante dessas análises, é justificado o uso de um equipamento de manutenção da qualidade de energia elétrica na rede em questão.

Tabela 5.2: THD% de tensão e corrente para o Cenário 3 de carga na rede elétrica sem UPQC.

Grandeza	THD%
$V_{rede(ab)}$	10,40 %
$V_{rede(bc)}$	10,46 %
$V_{rede(ca)}$	10,45 %
$I_{rede(a)}$	13,63 %
$I_{rede(b)}$	20,03 %
$I_{rede(c)}$	10,98 %

Outro dado relevante é a potência demandada pela carga no pior cenário. O valor encontrado para este caso foi 5243 VA.

## 5.2 Modelo ideal do UPQC dual

Após a modelagem da rede elétrica sem o equipamento de estudo, foi criado um modelo com o UPQC dual de forma idealizada, isto é, com os conversores de potência sendo representados por fontes ideais, para realizar uma prova de conceito e um estudo inicial de fluxo de potência. Como base de comparações foram utilizados os trabalhos [5, 6, 27]. Essa simulação foi realizada via *software* (modo V-HIL) e em conjunto com o *hardware* HIL402 (modo SIL), caracterizando uma simulação do tipo RTS. Ambas as simulações não apresentaram diferenças relevantes nos resultados encontrados.

O circuito ideal do UPQC é apresentado na Figura 5.5. Vale observar que na rede utilizada por [5] não havia disjuntores para comandar o início da operação do UPQC, sendo esta realizada apenas através do controle. Já na rede modelada por [6] um contato de *bypass* para cada fonte de corrente controlada foi utilizado. Para desenvolver uma modelagem mais otimizada no Typhoon HIL, conforme explicado anteriormente no item 4.2 do Capítulo 4, foi empregado um único contator para as três fontes de corrente e também adicionado um contator para as fontes de tensão controladas. Outra modificação foi a exclusão dos elementos de aterramento, já que o Typhoon HIL não necessita de pontos de referência modelados.

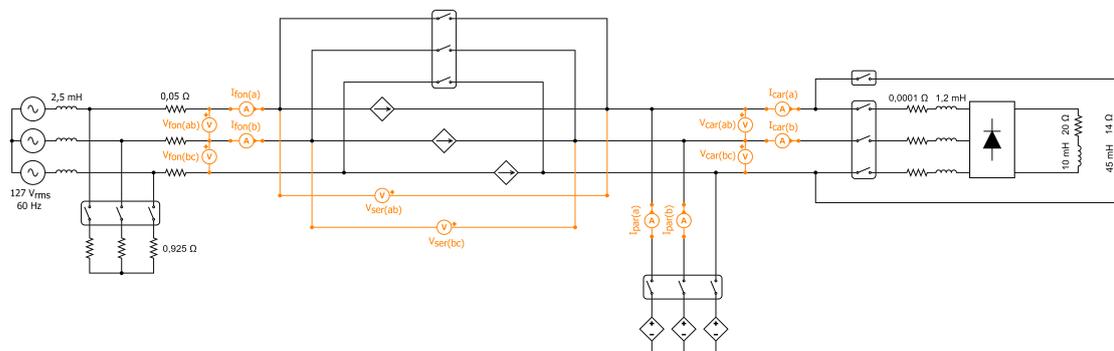


Figura 5.5: Rede com UPQC dual idealizado.

Os elementos elétricos da rede modelada são os mesmos apresentados na Seção 5.1.

O controle utilizado na simulação idealizada dispensa a parte da modulação por largura de pulso (do inglês, *pulse width modulation*) (PWM), ou seja, somente as etapas mostradas na Figura 3.4 são usadas, adicionando a Transformada inversa de Clarke, dada pela simplificação da Equação (3.6) para sistemas do tipo trifásico a três fios (do inglês, *three-phase three-wire*) (3P3W), aplicada nos sinais de referência de tensão e corrente. A Figura 5.6 ilustra o controle do UPQC dual idealizado.

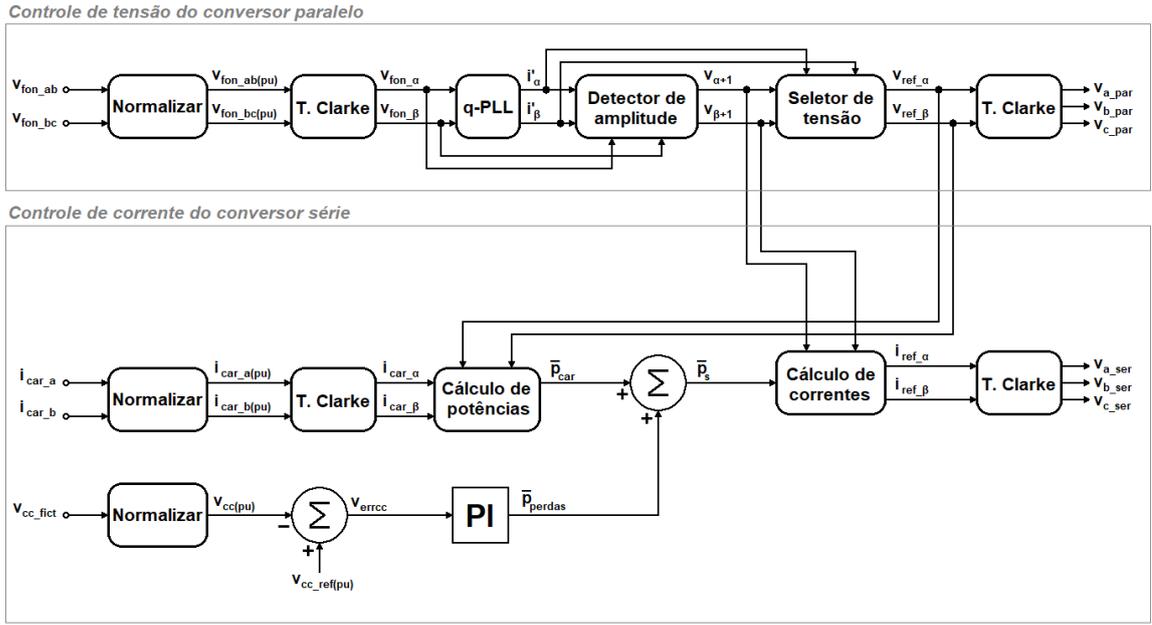


Figura 5.6: Controle do UPQC dual idealizado.

Como no circuito ideal do UPQC não há a representação do elemento capacitivo do elo corrente contínua (CC), responsável por realizar o balanço de energia do equipamento, um controle adicional se torna necessário, de modo a emular a presença do capacitor. Conforme explicado em [5], o balanço energético é dado por:

$$\frac{1}{2}C_{CC} \cdot v^2(t) + \int_{-\infty}^t (p_{ser}(\tau) + p_{par}(\tau))d\tau = 0, \quad (5.1)$$

onde a primeira parcela corresponde à variação de energia no capacitor e a segunda parcela representa a relação entre as potências ativas  $p_{ser}$  e  $p_{par}$  (absorvidas ou fornecidas) dos conversores série e paralelo.  $C_{CC}$  é a capacitância do elo CC,  $v(t)$  é a tensão no elo e  $\tau$  é uma variável auxiliar para a integral no tempo  $t$ .

Através de uma simples manipulação algébrica na Equação (5.1), é possível chegar na Equação (5.2), que permite calcular a tensão do capacitor ( $v_{CCfict}(t)$ ) dinamicamente:

$$v_{CCfict}(t) = \sqrt{-\frac{2}{C_{CC}} \int_{-\infty}^t (p_{ser}(\tau) + p_{par}(\tau))d\tau}. \quad (5.2)$$

Neste trabalho, assim como em [5], o valor adotado para a capacitância ( $C_{CC}$ ) foi 9400  $\mu\text{F}$ .

Com relação aos ganhos dos controladores do tipo proporcional-integral (PI) utilizados, foram adotados os mesmos valores para o *Phase Locked Loop* (PLL) do tipo q-PLL apresentados em [5], isto é,  $k_p = 20$  rad e  $k_i = 1000$  rad/s, onde  $k_p$  é o ganho proporcional

e  $k_i$  é o ganho integral. Os ganhos do controlador da etapa de controle da tensão do elo CC foram  $k_p = 4$  e  $k_i = 150$ .

### 5.2.1 Avaliação do Particionamento da rede com UPQC ideal

Mesmo com as alterações realizadas, o circuito continua complexo para ser executado pelo Typhoon HIL. Portanto, há a necessidade de particioná-lo em subcircuitos. Com base em [39], foi feita uma avaliação do particionamento da rede modelada.

Nesse caso da rede com o UPQC dual idealizado, é razoável concluir que uma boa estratégia é fazer a divisão em subcircuitos de modo a separar as cargas do restante do sistema elétrico.

Devido aos conflitos topológicos que passam a ocorrer com a adição do bloco *Core Coupling*, *snubbers* RC se tornam necessários. Além disso, as fontes de corrente ficam em série com os indutores da fonte de alimentação. Logo, uma possível solução é adicionar resistores em paralelo com cada uma das fontes. A partir dessas considerações, o circuito equivalente se torna o da Figura 5.7.

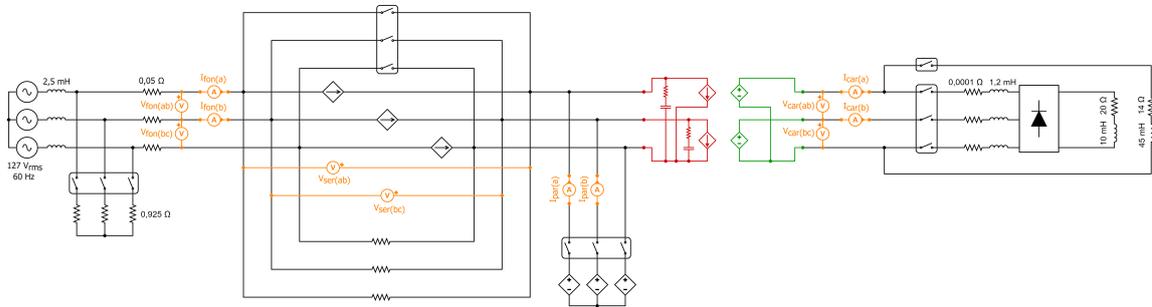


Figura 5.7: Rede modelada com UPQC dual idealizado.

O conjunto de *snubbers* RC foi calculado de acordo com as Equações (4.2) e (4.3), inicialmente adotando os valores recomendados para  $k_{snb}$  e  $\tau_{snb}$ . Os valores utilizados para a tensão entre fases e a frequência da rede foram 220 V e 60 Hz, respectivamente. Como a potência aparente da carga no pior cenário da rede foi de 5243,5 VA, definiu-se um valor de potência do bloco *Core Coupling* de 6 kVA. Assim, os valores de capacitância e resistência utilizados foram  $18,99 \mu\text{F}$  e  $0,527 \Omega$ , respectivamente. Por se tratar de um circuito auxiliar, somente necessário para a execução do *software*, não foram utilizados valores comerciais. Quanto aos resistores conectados em paralelo com as fontes de corrente, foi adotado o valor de  $100 \Omega$ .

Para a compilação, foi acionada a análise automática de estabilidade dos blocos *Core*

*Coupling*. O resultado foi positivo, ou seja, a configuração do bloco foi feita corretamente.

Como esse circuito faz parte apenas de uma avaliação inicial de modelagem de rede baseada em um estudo anterior, foi descartada a realização de uma análise criteriosa para a influência dos *snubbers*.

### 5.2.2 Prova de conceito com UPQC ideal

Uma forma de verificar o correto funcionamento do UPQC modelado pela primeira vez no *software* Typhoon HIL é fazer a comparação com resultados obtidos anteriormente por outros estudos, que no caso utilizaram o PSCAD/EMTDC, como em [5] e [6].

Um dos testes realizados por [5] foi chamado de “ideal1”, onde a tensão da fonte de alimentação do sistema era mantida constante e as cargas variavam. Outro teste foi chamado de “ideal2”, com a análise de distúrbios de tensão na fonte, mantendo a carga constante. As Tabelas 5.3 e 5.4 mostram as etapas para cada teste, respectivamente. Vale observar que antes de iniciar os testes, as cargas estão desligadas, assim como o UPQC.

Tabela 5.3: Teste “ideal1”.

Período	Ocorrência
$t = 0$ s	UPQC dual é ligado
$t = 1,5$ s	Carga bifásica é ligada
$t = 2,5$ s	Carga bifásica é desligada
$t = 3,5$ s	Carga não-linear é ligada
$t = 4,5$ s	Carga não-linear é desligada
$t = 5,5$ s	Carga não-linear é ligada, sem a fase A
$t = 6,5$ s	Carga não-linear é desligada
$t = 7,5$ s	Carga bifásica e carga não-linear são ligadas
$t = 8,5$ s	Carga bifásica e carga não-linear são desligadas
$t = 9,0$ s	Fim do período de análise

Alguns resultados obtidos com as simulações são apresentados de modo a comprovar que o circuito modelado no Typhoon HIL atuou conforme o esperado. De acordo com os gráficos apresentados em [5], é possível considerar que a modelagem está correta.

Durante as simulações foi observado que uma pequena alteração nos ganhos do controlador PI da tensão do elo CC resultavam em uma melhor resposta dinâmica. Portanto, os valores utilizados para o ganho proporcional e para o ganho integral foram, respectivamente,  $k_p = 20$  e  $k_i = 100$ . Através de pequenas variações e da observação do comportamento dos resultados, foi feito o ajuste desse ganhos, assim como dos demais. Como valores iniciais, foram utilizados os ganhos apresentados em [5].

Tabela 5.4: Teste “ideal2”.

Período	Ocorrência
$t = 0$ s	UPQC dual é ligado
$t = 1,0$ s	Carga bifásica e carga não-linear são ligadas
$t = 1,5$ s	Aplicado 10% de componente harmônica de ordem 7
$t = 2,5$ s	Tensão volta ao normal
$t = 3,5$ s	Aplicado 10% de componente de desequilíbrio de tensão
$t = 4,5$ s	Tensão volta ao normal
$t = 5,5$ s	Aplicado afundamento de 70% do valor nominal
$t = 6,5$ s	Tensão volta ao normal
$t = 7,5$ s	Aplicados os três distúrbios de tensão simultaneamente
$t = 8,5$ s	Tensão volta ao normal
$t = 9,0$ s	Fim do período de análise

Uma visão geral da dinâmica de compensação das correntes ao longo do teste “ideal1” pode ser vista na Figura 5.8, assim como a Figura 5.9 mostra os resultados do teste “ideal2” para as tensões da rede.

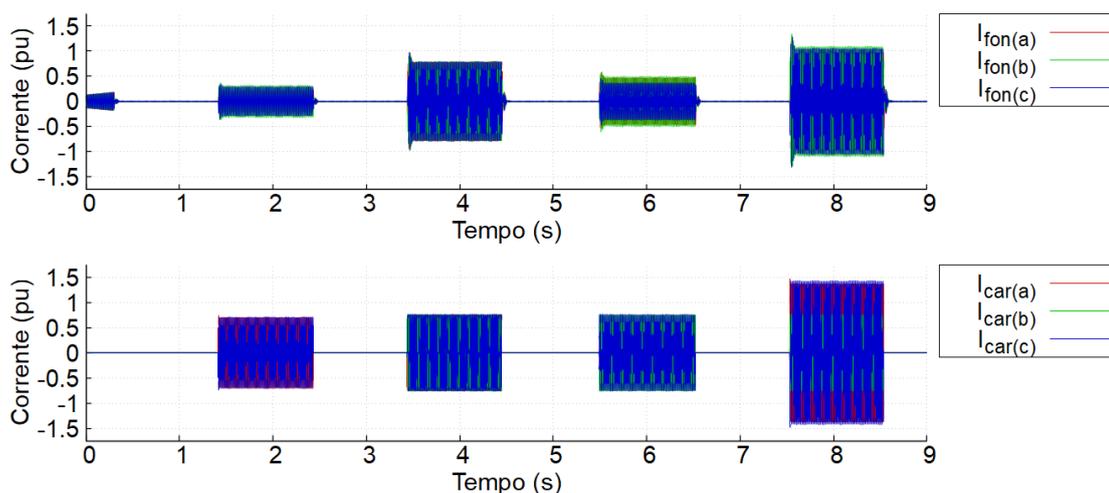


Figura 5.8: Correntes na rede elétrica no teste “ideal1”.

A Figura 5.10 apresenta as correntes para o teste “ideal1” quando as cargas bifásica e não-linear estão acionadas e a Figura 5.11 mostra as tensões para o teste “ideal2” para o cenário com os três distúrbios de tensão ocorrendo ao mesmo tempo. Nota-se as compensações sendo realizadas efetivamente pelo UPQC.

Com relação às taxas de distorção harmônica, a Tabela 5.5 mostra os valores de THD% para a atuação do UPQC na presença das cargas não-linear e bifásica. E a Tabela 5.6 apresenta os valores de THD% quando o condicionador atua na presença de distúrbios na fonte com as cargas ligadas. É possível observar que o equipamento é capaz de corrigir os distúrbios de corrente e de tensão presentes na rede, apresentando valores dentro dos

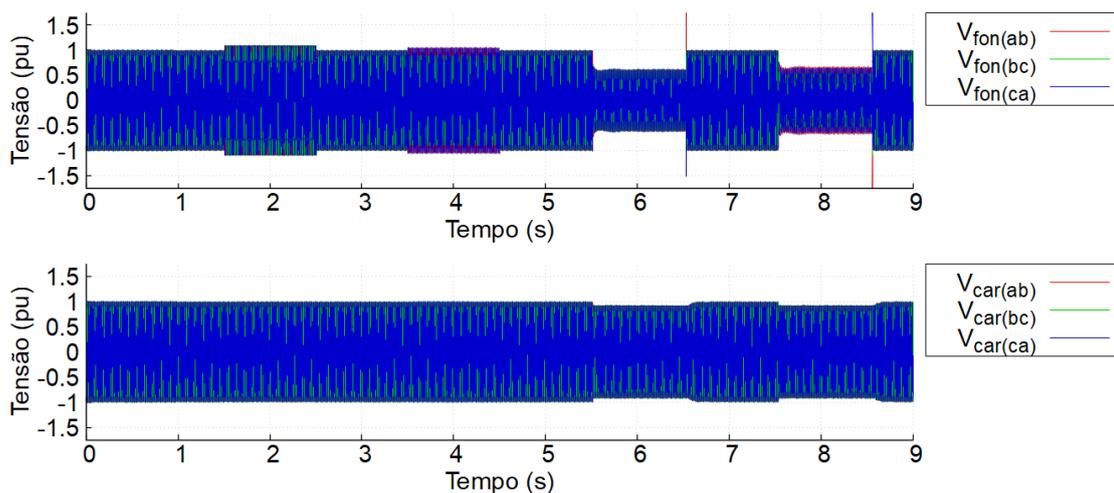


Figura 5.9: Correntes na rede elétrica no teste “ideal2”.

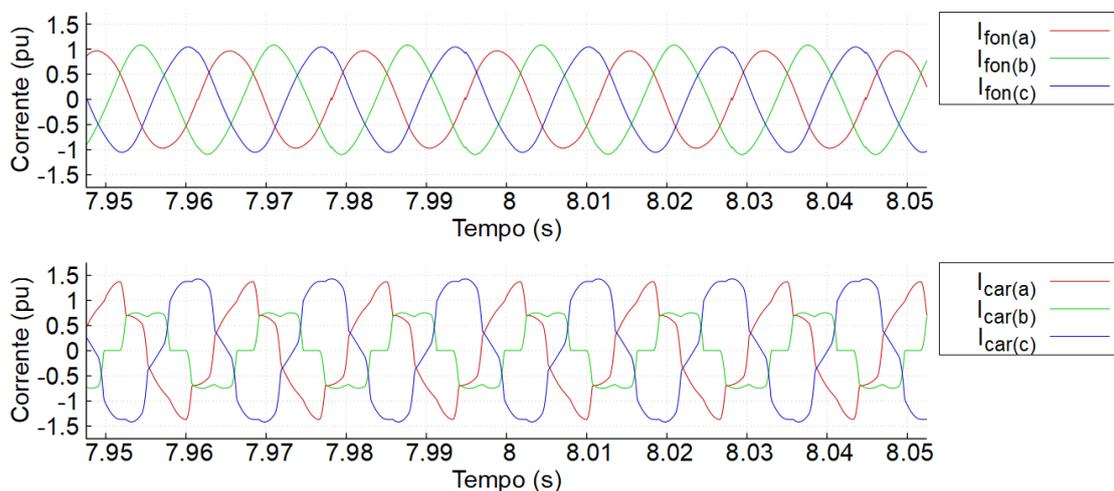


Figura 5.10: Correntes na rede elétrica para o pior cenário de carga com UPQC idealizado (Teste “ideal1”).

limites estipulados por resolução normativa nacional e norma internacional. Vale lembrar que a norma IEEE Std 519 (2014) [42] define o limite de 5 % para o distorção harmônica total de corrente (DTC%) (ou THD% de corrente). Já o PRODIST [45] define que o distorção harmônica total de tensão (DTT%) (ou THD% de tensão) deve ser no máximo 10 %.

Os dados de distorção harmônica apresentados na Tabela 5.5 mostram que o UPQC atua conforme o esperado na correção de correntes harmônicas para a barra da fonte de alimentação. Observando o gráfico de tensões da Figura 5.11 e os valores da Tabela 5.6, percebe-se que ocorre uma correção de harmônicos de tensão na barra da fonte que não era esperado. Isso acontece somente quando os resistores *shunt* são acionados para simular uma situação de *sag* de tensão. O motivo disso não foi encontrado. Todavia, quando

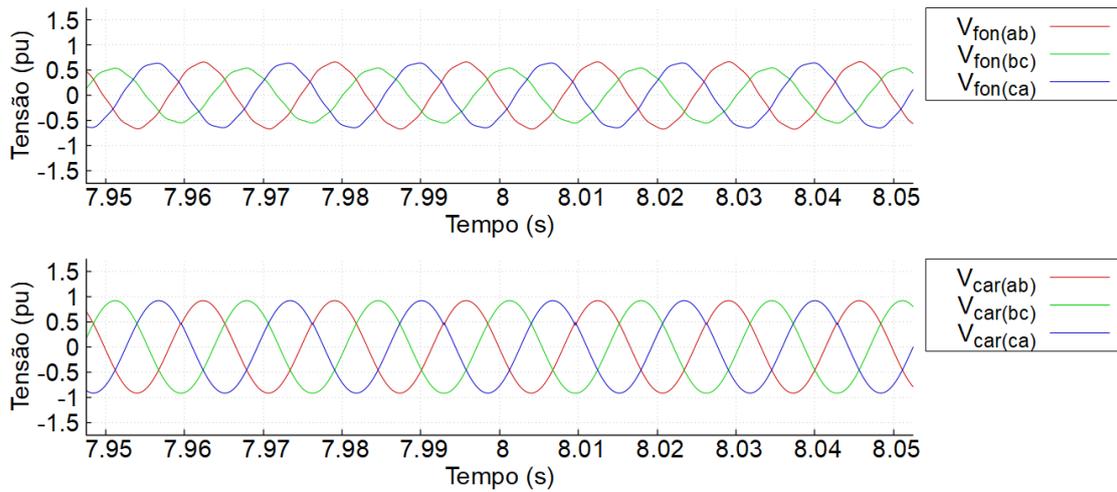


Figura 5.11: Tensões na rede elétrica para o pior cenário da fonte com UPQC idealizado (Teste “ideal2”).

Tabela 5.5: THD% de corrente para o teste “ideal1” na pior condição.

Grandeza	THD%
$I_{fon(a)}$	3,31 %
$I_{fon(b)}$	4,34 %
$I_{fon(c)}$	4,67 %
$I_{car(a)}$	16,79 %
$I_{car(b)}$	25,35 %
$I_{car(c)}$	13,92 %

somente é aplicado um conteúdo harmônico de sétima ordem na fonte, a tensão nesse ponto aparece distorcida, como mostra a Figura 5.12. Ao avaliar as formas de onda na carga, nota-se que a compensação ocorre como previsto.

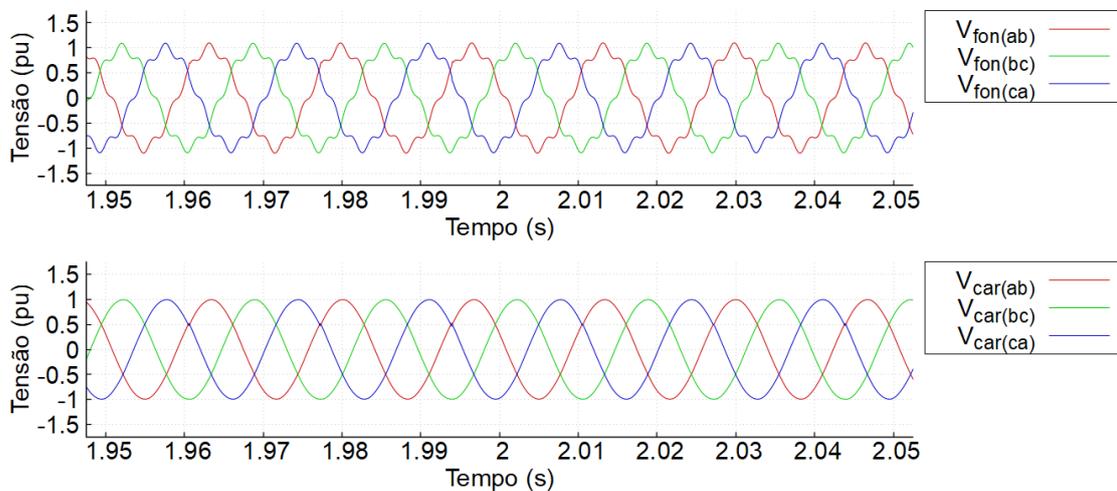


Figura 5.12: Tensões na rede elétrica para a fonte com 7<sup>a</sup> harmônica e com UPQC idealizado (Teste “ideal2”).

Tabela 5.6: THD% de tensão para o teste “ideal2” na pior condição.

Grandeza	THD%
$V_{fon(ab)}$	2,71 %
$V_{fon(bc)}$	3,37 %
$V_{fon(ca)}$	4,13 %
$V_{car(ab)}$	2,14 %
$V_{car(bc)}$	2,33 %
$V_{car(ca)}$	3,72 %

Como o teste “ideal1” mantém a tensão da fonte de alimentação sem distúrbios, é possível verificar, através da Figura 5.13, que o nível é mantido durante os 9 segundos. Para a mesma situação da Figura 5.10, ou seja, quando ambas as cargas estão ligadas, a Figura 5.13 também mostra as formas de onda de tensão, sem influências.

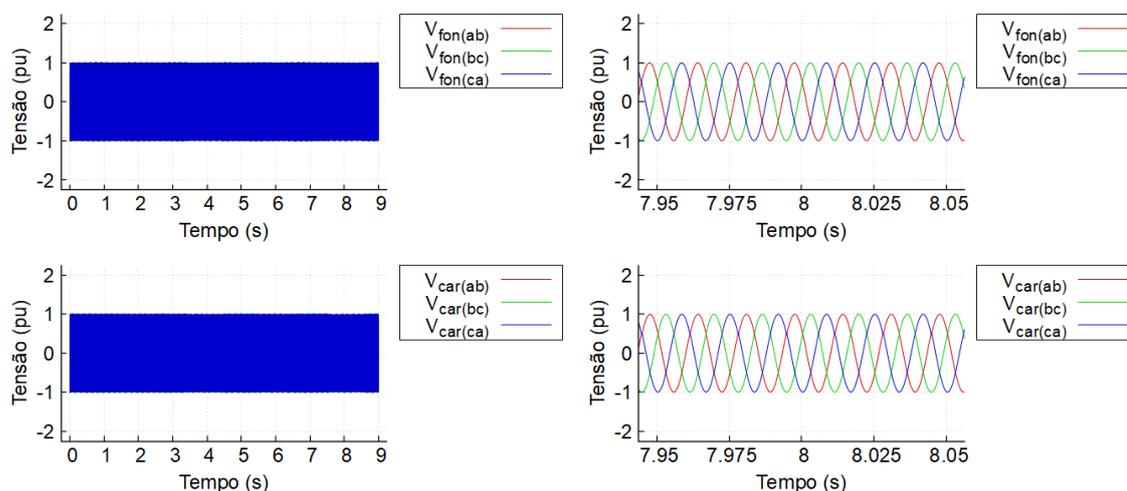


Figura 5.13: Tensões na rede elétrica ao longo de toda análise e destaque para a situação com ambas as cargas ligadas (Teste “ideal1”).

Já para o teste “ideal2”, que inclui distúrbios na tensão da fonte de alimentação e mantém a barra de carga com a carga bifásica e a carga não-linear ligadas ao longo de todo o teste, é possível realizar algumas análises através da Figura 5.14. Durante os 9 segundos, um afundamento momentâneo de tensão ocorre duas vezes. É possível perceber que para esses eventos o nível da corrente na barra da fonte tende a se elevar razoavelmente, como era esperado, uma vez que para suprir uma potência com tensão reduzida a corrente tende a aumentar. Com relação à corrente na barra de carga, há uma pequena redução de amplitude. Isso ocorre porque o UPQC mantém o nível de tensão nesse ponto em 0,92 pu e, se há uma redução de tensão, conseqüentemente haverá uma redução proporcional no nível de corrente no mesmo ponto. Além disso, também é possível observar que, para a mesma situação da Figura 5.11, ou seja, quando os três distúrbios de tensão ocorrem

na barra da fonte e ambas as cargas estão ligadas, a Figura 5.14 mostra que as formas de onda de corrente na barra da fonte são mantidas senoidais na frequência fundamental, mesmo com os distúrbios presentes na rede.

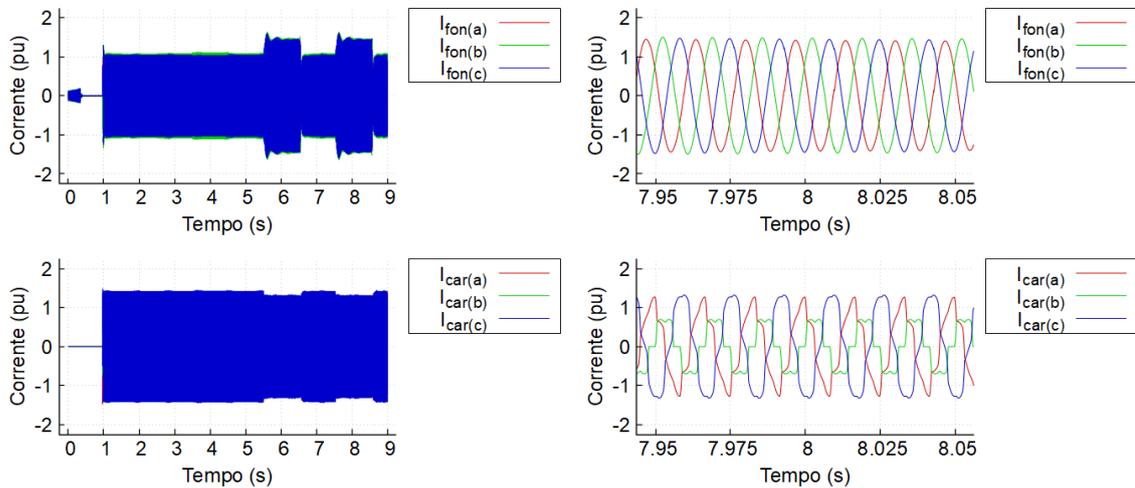


Figura 5.14: Tensões na rede elétrica ao longo de toda análise e destaque para a situação de pior cenário (Teste “ideal2”).

Outra avaliação interessante para ser feita é observar a variação de tensão no capacitor do elo CC, que significa analisar o balanço energético do UPQC. É possível notar, através da Figura 5.15 que as formas de onda encontradas estão dentro do esperado, quando comparadas ao estudo [5]. Vale notar que a tensão sofre uma maior alteração transitória quando ocorre um evento de Variação de tensão de curta duração (VTCD) na rede.

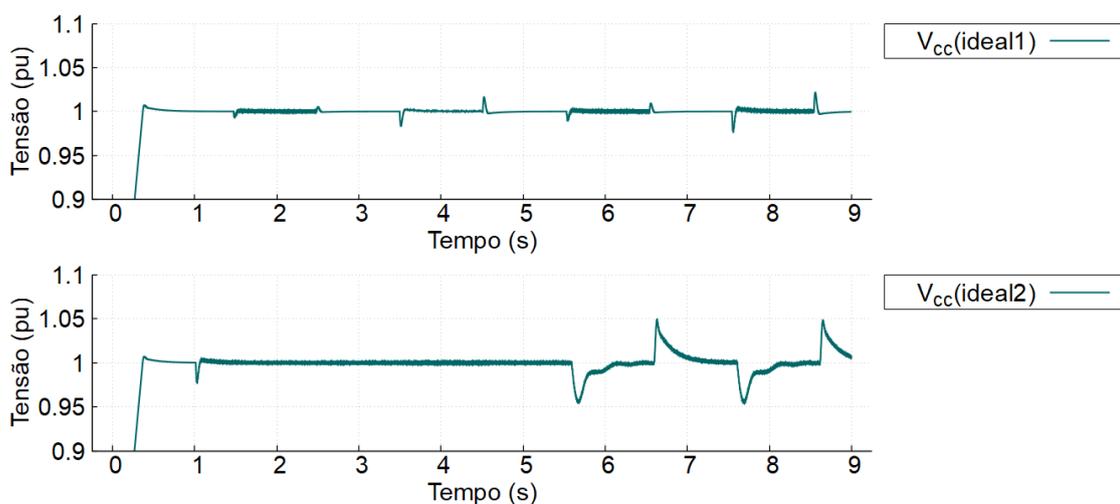


Figura 5.15: Tensão no capacitor do elo CC para o UPQC dual idealizado.

### 5.2.3 Análise do Fluxo de Potência

Após realizar uma simulação idealizada do UPQC dual para observar a dinâmica de compensação, uma análise de fluxo de carga se faz necessária, a fim de determinar a potência do equipamento frente às características da rede. Vale observar que, para as simulações, o valor da potência dos conversores não possui muita importância, pois em análises somente em *software* não há a necessidade de se definir esse parâmetro para os dispositivos. Entretanto, essa etapa de projeto se torna necessária para o caso em que se deseja construir um protótipo.

Conforme apresentado em [6, 27, 35], o nível de VTCD pode ser classificado através da constante  $k_{sag/swell}$ , definida por:

$$k_{sag/swell} = \frac{V_{fon}}{V_{car}}, \quad (5.3)$$

onde  $V_{fon}$  é a tensão no barramento da fonte, com afundamento (*sag*) ou elevação (*swell*), e  $V_{car}$  é a tensão no barramento da carga compensada pelo UPQC, que deve ser equivalente à componente nominal de sequência positiva e frequência fundamental da tensão da fonte. Definido esse valor, através da Equação (5.3), é feito o seguinte cálculo:

$$\bar{p}_{ser} = \bar{p}_{par} = \frac{1 - k_{sag/swell}}{k_{sag/swell}} \bar{p}_{car}. \quad (5.4)$$

A Equação (5.4) é deduzida em [27] e tem como objetivo nortear a escolha dos equipamentos elétricos que irão compor o UPQC, sendo  $\bar{p}_{car}$  a potência ativa média na carga durante a ocorrência de VTCD, e  $\bar{p}_{ser}$  e  $\bar{p}_{par}$  as potências ativas médias nos conversores série e paralelo, respectivamente.

Para fazer essa análise de fluxo de carga, foi adotada uma metodologia simplificada, testando um evento de 2 segundos de um afundamento de tensão com as cargas bifásica e não-linear ligadas. Assim, o valor de potência para os condicionadores foi de 4 kW.

## 5.3 Modelo real do UPQC dual

O circuito real do UPQC é apresentado na Figura 5.16. Os valores dos elementos elétricos da rede são os mesmos das modelagens anteriores. Os dados dos filtros passivos dos condicionadores série e paralelo são mostrados na Tabela 5.7. Por não fazer parte do escopo

do presente projeto, o dimensionamento dos filtros não será mostrado, sendo baseado em trabalhos anteriores [5, 6].

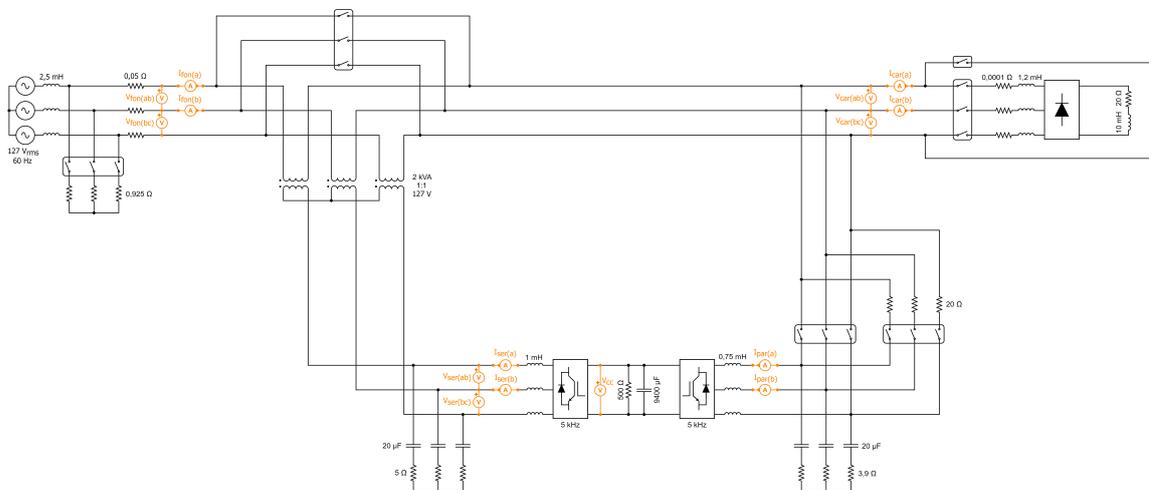


Figura 5.16: Sistema elétrico com UPQC dual.

Tabela 5.7: Filtros passivos dos conversores.

Grandeza	Valor
Indutância do filtro do conversor série	1 mH
Capacitância do filtro do conversor série	20 $\mu$ F
Resistência do filtro do conversor série	5 $\Omega$
Indutância do filtro do conversor paralelo	0,75 mH
Capacitância do filtro do conversor paralelo	20 $\mu$ F
Resistência do filtro do conversor paralelo	3,9 $\Omega$

Para a capacitância do elo de corrente contínua foi utilizado o mesmo valor da modelagem anterior e adicionado um resistor em paralelo de 500  $\Omega$  com o objetivo de facilitar o descarregamento do capacitor se o UPQC for desligado.

Os transformadores monofásicos que fazem a ligação do condicionador série no circuito foram parametrizados de forma a suportar a potência ativa média circulante no UPQC dual quando há um evento de VTCD. Assim, foi definido um valor de 2 kVA para cada. Para a modelagem no Typhoon HIL foi necessário definir valores das resistências e indutâncias de dispersão para os dois lados dos transformadores. Admitiu-se que ambos os lados eram idênticos. A escolha foi feita de modo que a impedância total fosse de 3 %. Os valores das características elétricas podem ser vistas na Tabela 5.8, considerando uma relação de transformação de 1:1.

Para que o capacitor do elo CC pudesse ser carregado antes do início da operação do UPQC dual, um sistema com uma chave trifásica e três resistências de 20  $\Omega$  foi adicionado

Tabela 5.8: Parâmetros dos transformadores monofásicos.

Parâmetro	Valor
Potência	2 kVA
Tensão	127 V
Resistência total de dispersão	$11,98 \cdot 10^{-3}$ pu
Indutância total de dispersão	$23,95 \cdot 10^{-6}$ pu
Resistência do núcleo	100 pu
Indutância de magnetização	40 pu

ao circuito que conecta o conversor *shunt* na rede de forma a realizar essa tarefa. Conforme explicado em [6], o processo de inicialização do UPQC dual deve ser feito acionando-se ambos os conversores ao mesmo tempo. Portanto, esse detalhe foi considerado no circuito de controle.

Com relação aos ganhos dos controladores PI, os valores adotados estão apresentados na Tabela 5.9. Vale observar que os ganhos do circuito de sincronismo q-PLL foram mantidos, mas os do controle do elo CC foram alterados, visando à estabilidade do sistema. A modificação dos ganhos foi feita testando-se pequenas variações nos valores e observando-se os resultados, com base nos valores iniciais de [5].

Tabela 5.9: Ganhos dos controladores PI na rede com UPQC dual real.

Etapa de controle	$k_p$	$k_i$
q-PLL	20,0	1000,0
Elo CC	0,05	50,0
PWM de tensão	1,5	7,5
PWM de corrente	0,5	5,0

As simulações do UPQC dual real também foram realizadas no modo V-HIL.

### 5.3.1 Avaliação do Particionamento da rede com UPQC real

Assim como no caso do circuito do UPQC idealizado, uma análise de particionamento do modelo teve que ser realizada, conforme é mostrado em [39]. Dessa vez, além da complexidade imposta pela quantidade de modos de operação do circuito, devido ao número de contadores, outra característica teve que ser respeitada: o limite do peso de conversores de potência por circuito. De acordo com as informações dadas no item 4.2.2 e na Tabela 4.1, o peso máximo é de 4 por subcircuito, mas somente podendo ter 2 subcircuitos, na configuração *id 4*, ou peso 3 nas demais configurações. Como cada conversor trifásico possui peso 3 e a rede modelada a ser simulada tem 3 dispositivos, o menor número de subcircuitos será 3. Possíveis locais para a divisão estão indicados na Figura 5.17.

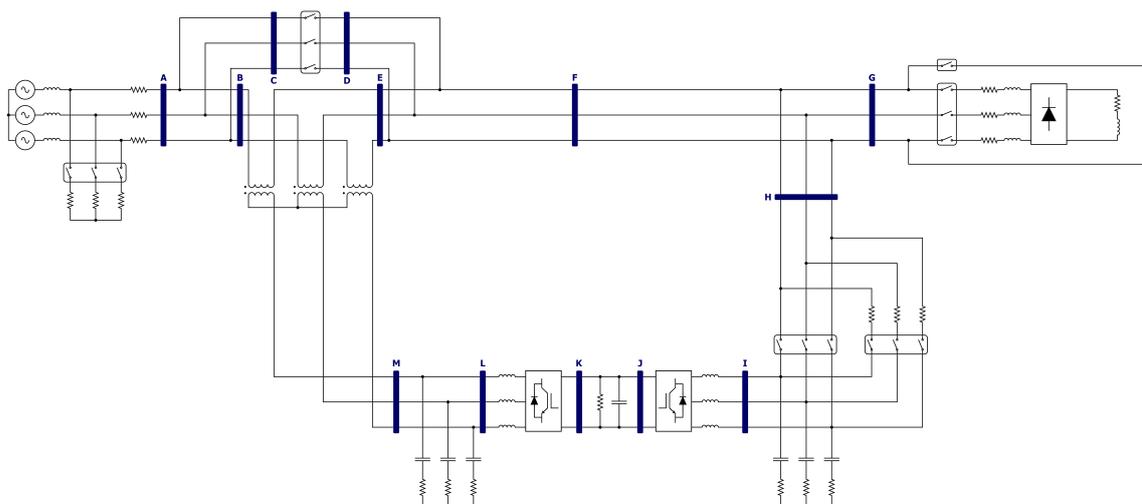


Figura 5.17: Possíveis locais de particionamento do sistema com UPQC dual.

Diversas combinações de lugares para a inserção dos blocos *Core Coupling* foram analisadas, com três e quatro subcircuitos, como por exemplo: B-D-H-J-M; C-E-I-K; E-D-G-K; E-C-H-J-M; A-F-I-K; F-G-K-M; F-G-J-L. Devido à complexidade do sistema como um todo, foi avaliado que seria necessário o particionamento em 4 partes, sendo a melhor combinação possível formada pelos locais F-G-J-L, aprimorando a escolha feita em [39], que utilizou os locais F-G-K-M, necessitando configurar mais *snubbers* do que o presente trabalho. Vale observar que a melhor combinação é a que implica na menor quantidade de conflitos topológicos, ou seja, necessitando de menos *snubbers*. Devido ao particionamento ser em 4 subcircuitos, a única configuração de *firmware* possível é a *id 2*, como pode ser visto na Tabela 4.1.

Conforme as recomendações do item 4.2.5 da Seção 4.2, os blocos *Core Coupling* foram adicionados ao circuito de forma a dividi-lo nos subcircuitos das Figuras 5.18, 5.19, 5.20 e 5.21. Nessa configuração de particionamento, somente o bloco *Core Coupling* que divide o subcircuito contendo a fonte de alimentação dos subcircuitos do compensador paralelo e das cargas precisou de *snubbers*. Esses circuitos auxiliares, do tipo RC, se devem ao conflito topológico que ocorre porque as fontes de corrente do elemento de particionamento ficam em série com os indutores da fonte de alimentação e também em série com os indutores dos transformadores.

Assim, o sistema elétrico modelado conforme as necessidades de *software* e *hardware* da Typhoon HIL se torna o ilustrado pela Figura 5.22.

Para a parametrização dos *snubbers* RC, foi realizado um estudo, conforme [39], onde se verificou um conjunto de valores das variáveis  $k_{snb}$  e  $\tau_{snb}$  que fizessem com que a influên-

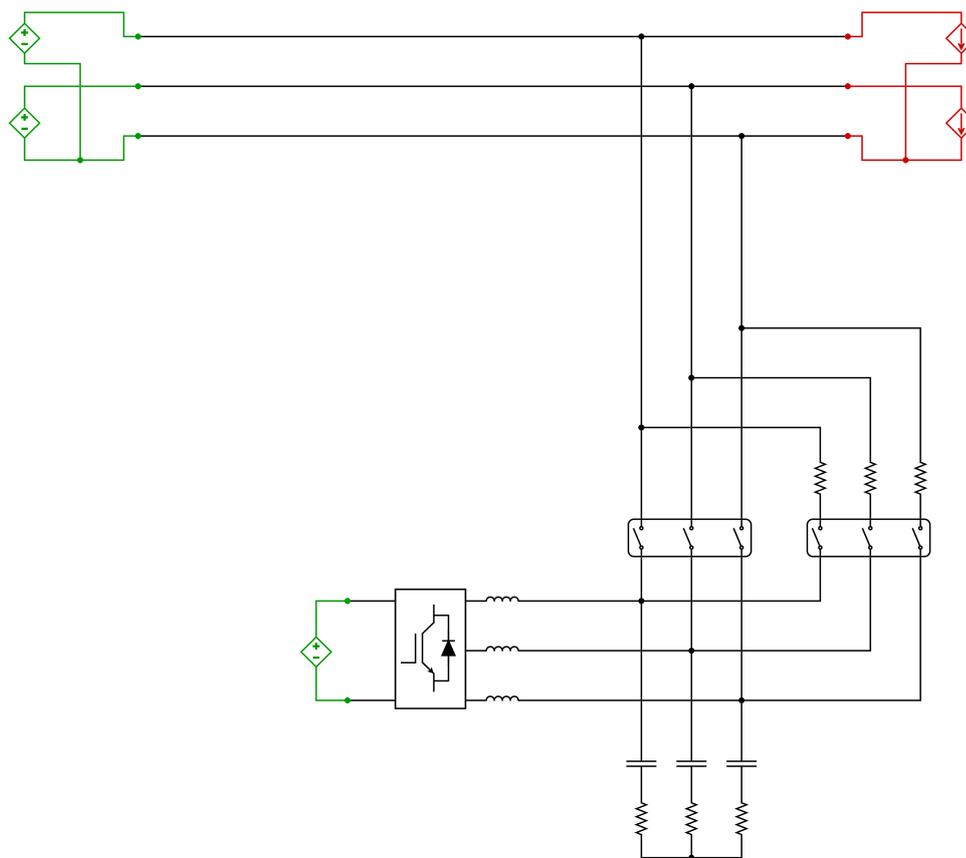


Figura 5.18: Subcircuito com compensador paralelo.

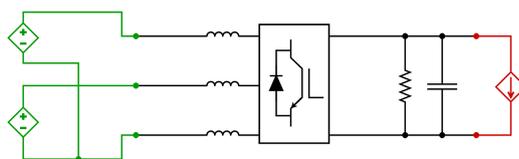


Figura 5.19: Subcircuito com compensador série.

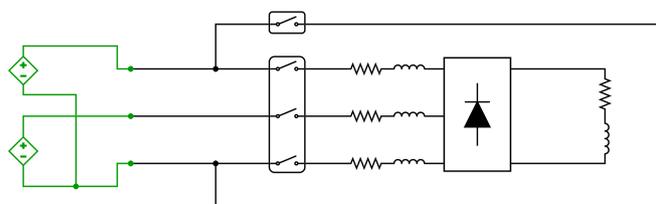


Figura 5.20: Subcircuito com cargas.

cia desses circuitos auxiliares não fossem tão grandes, mas também que não instabilizasse a rede. Assim, os valores utilizados foram  $k_{snb} = 0,025$  e  $\tau_{snb} = 15,0 \mu s$ , resultando em

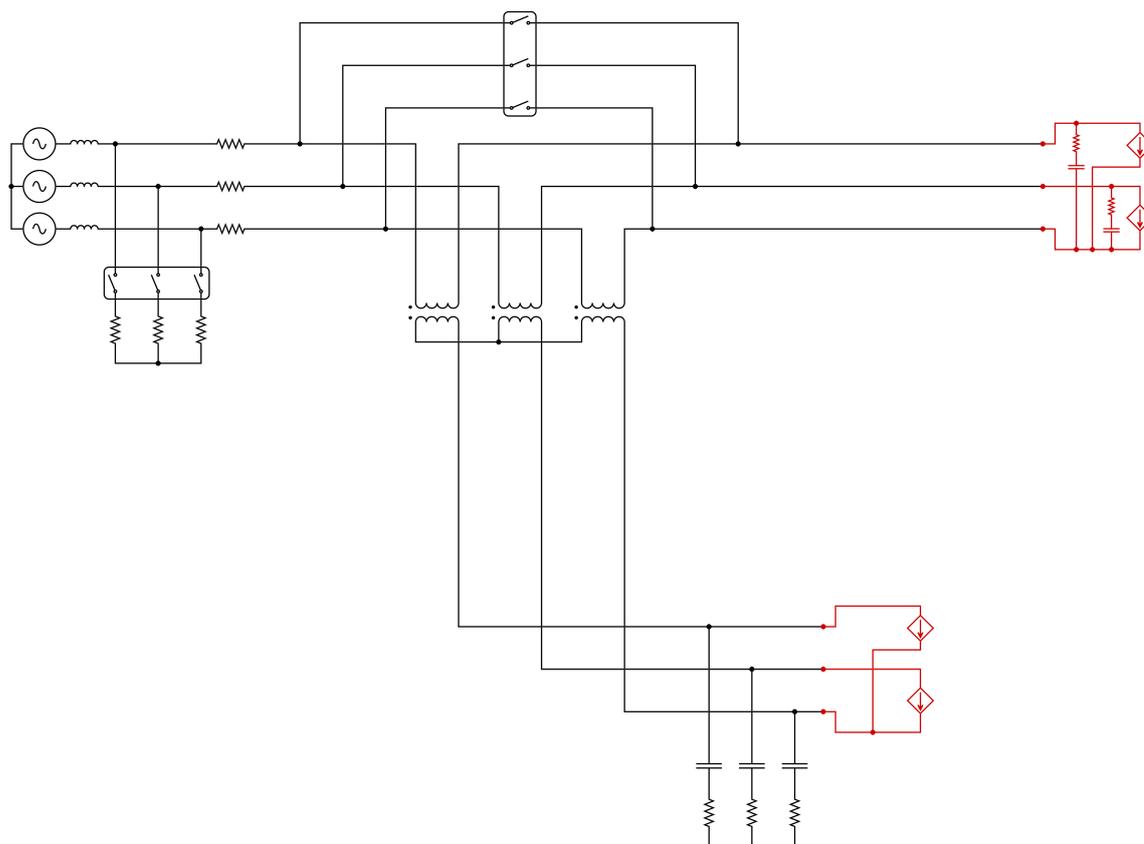


Figura 5.21: Subcircuito com fonte de alimentação.

um *snubber* com capacitância de  $4,75 \mu\text{F}$  e resistência de  $3,16 \Omega$ . Uma comparação entre os resultados de THD% para o par de valores recomendados pelo manual do *software* [11] e o par de valores escolhido é apresentada na Tabela 5.10, na situação em que o UPQC dual está desligado e ambas as cargas estão ligadas, junto com os resultados encontrados para o caso base da Seção 5.1.

Pode-se perceber que a influência dos *snubbers* RC é maior em cima das tensões. A parametrização feita foi capaz de reduzir os níveis de THD% para valores mais próximos do esperado. Um estudo de otimização não foi feito, o que poderia trazer melhores resultados. Mesmo assim, como se tratam de circuitos com resistências e capacitâncias entre as fases da rede, os resultados não seriam iguais ao caso sem *snubbers*. Avaliando a situação da corrente, a parametrização desses circuitos auxiliares fez com que se fossem obtidos valores satisfatórios.

Conforme é dito em [39], a atuação do UPQC dual faz com que a influência dos *snubbers* não seja tão impactante. Todavia, ao simular o circuito com o UPQC dual ligado e ambas as cargas também, verificou-se que os resultados de THD% ainda são

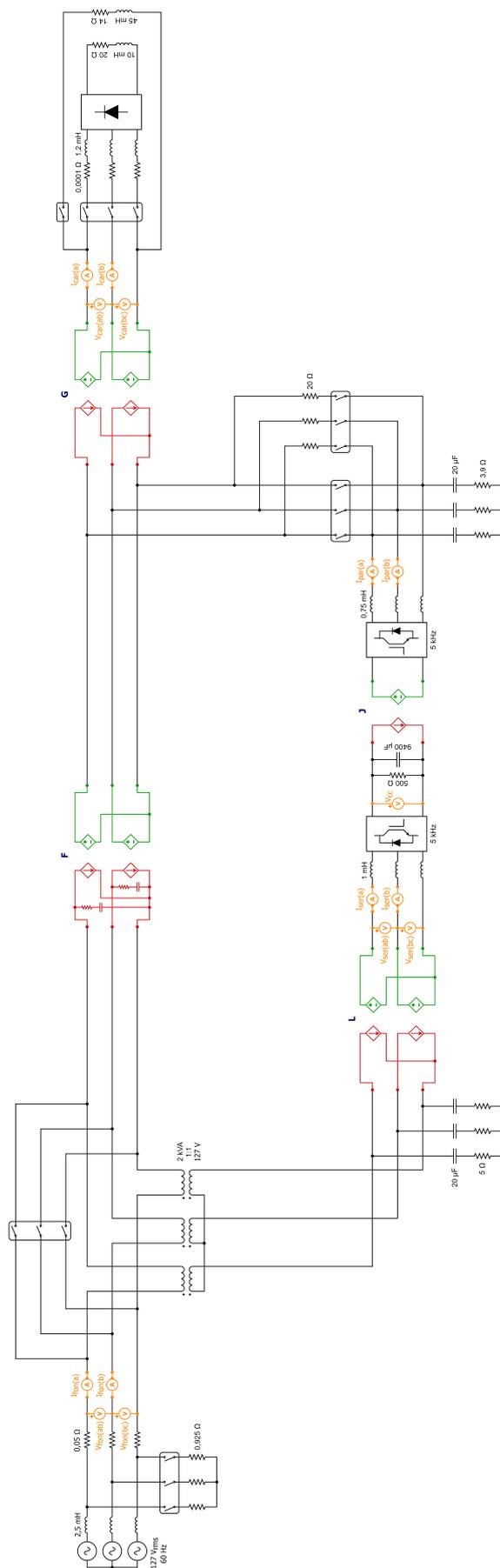


Figura 5.22: Sistema elétrico com UPQC dual e adição dos blocos de particionamento.

Tabela 5.10: Avaliação de THD% sem UPQC dual e com cargas não-linear e bifásica ligadas em comparação com rede base (sem *snubbers*).

Grandeza	$k_{snb} = 0,10$ $\tau_{snb} = 10,0 \mu s$	$k_{snb} = 0,025$ $\tau_{snb} = 15,0 \mu s$	Rede base (sem <i>snubbers</i> )
$V_{fon(ab)}$	18,37 %	13,81 %	10,40 %
$V_{fon(bc)}$	19,57 %	15,22 %	10,46 %
$V_{fon(ca)}$	17,23 %	16,97 %	10,45 %
$V_{car(ab)}$	18,37 %	13,80 %	10,40 %
$V_{car(bc)}$	19,57 %	15,22 %	10,46 %
$V_{car(ca)}$	17,23 %	16,97 %	10,45 %
$I_{fon(a)}$	18,68 %	15,17 %	13,63 %
$I_{fon(b)}$	35,89 %	22,04 %	20,03 %
$I_{fon(c)}$	19,67 %	12,58 %	10,98 %
$I_{car(a)}$	13,91 %	13,33 %	13,63 %
$I_{car(b)}$	19,45 %	19,08 %	20,03 %
$I_{car(c)}$	8,96 %	9,60 %	10,98 %

elevados com relação a trabalhos anteriores e normas. Por exemplo, para a corrente na barra da fonte, os valores encontrados para cada fase foram  $I_{fon(a)} = 8,92 \%$ ,  $I_{fon(b)} = 10,69 \%$  e  $I_{fon(c)} = 8,53 \%$ , sendo que o esperado era que o THD% ficasse em torno de 3 %, de acordo com [5]. Além disso, cabe observar que os valores estão acima do limite de 5 %, estipulado pela norma IEEE Std 519, como mostra a Tabela 2.5.

### 5.3.2 Principais resultados das simulações

Para a simulação dos distúrbios e avaliação das compensações realizadas pelo UPQC dual, foi criada uma rotina de testes conforme indicado na Tabela 5.11, baseada na junção das rotinas denominadas “ideal1” e “ideal2” utilizadas nas análises do modelo ideal do UPQC dual.

Cabe ressaltar que as rotinas de testes foram criadas de forma a facilitar as análises e a criação dos gráficos. Como a simulação ocorre continuamente, diversas combinações de distúrbios e presença de cargas podem ser feitas e as mudanças nas formas de onda observadas instantaneamente, quando a simulação é do tipo RTS, e quase instantaneamente quando a simulação é *offline*.

Uma análise da compensação de harmônicos de corrente pelo UPQC na presença de uma carga não-linear pode ser feita observando três momentos da rotina de teste: quando somente a carga está ligada; quando somente o equipamento está ligado; e quando ambos estão ligados.

Tabela 5.11: Rotina de testes de distúrbios e compensações na rede com UPQC dual.

Período	Ocorrência
$t = 0$ s	Circuito sem carga, sem UPQC dual e sem distúrbios.
$t = 1$ s	Carga não-linear é ligada.
$t = 2$ s	Carga não-linear é desligada.
$t = 3$ s	É iniciada a energização do capacitor do UPQC.
$t = 5$ s	UPQC dual é acionado e circuito de energização é desligado.
$t = 7$ s	Carga bifásica é ligada.
$t = 8$ s	Carga bifásica é desligada.
$t = 9$ s	Carga não-linear é ligada.
$t = 10$ s	Carga não-linear é desligada.
$t = 11$ s	Cargas bifásica e não-linear são ligadas.
$t = 13$ s	É aplicado 10 % de componente harmônica de ordem 7 na fonte.
$t = 14$ s	Tensão volta ao normal.
$t = 15$ s	É aplicado 10 % de desequilíbrio de tensão na fonte.
$t = 16$ s	Tensão volta ao normal.
$t = 17$ s	É aplicada uma VTCD de 0,7 pu na fonte.
$t = 18$ s	Tensão volta ao normal.
$t = 19$ s	Os três distúrbios de tensão são aplicados na fonte.
$t = 20$ s	Tensão volta ao normal.
$t = 21$ s	Fim da rotina de testes.

A Figura 5.23 mostra as tensões na fonte e na carga quando apenas a carga não-linear é acionada. A Figura 5.24 mostra as correntes para este mesmo caso.

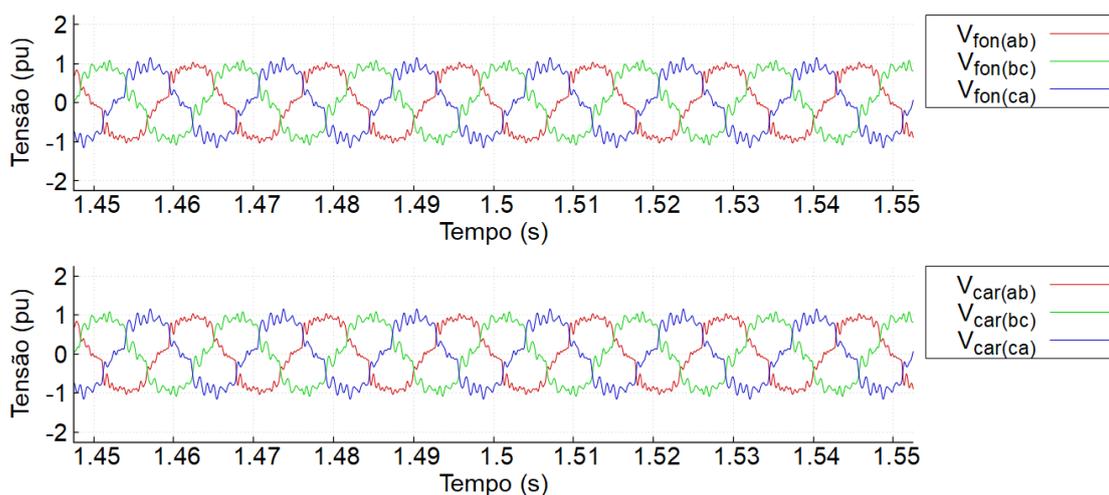


Figura 5.23: Tensões na rede com carga não-linear e UPQC dual desligado.

Pode ser visto que, ao comparar as formas de onda de tensão e corrente com as da Figura 5.2, os *snubbers* exercem uma influência no sistema. Esse efeito também é observado para o caso em que somente o UPQC dual está ligado, como mostram a Figura 5.25 para as tensões e a Figura 5.26 para as correntes, onde o nível de tensão do lado da carga

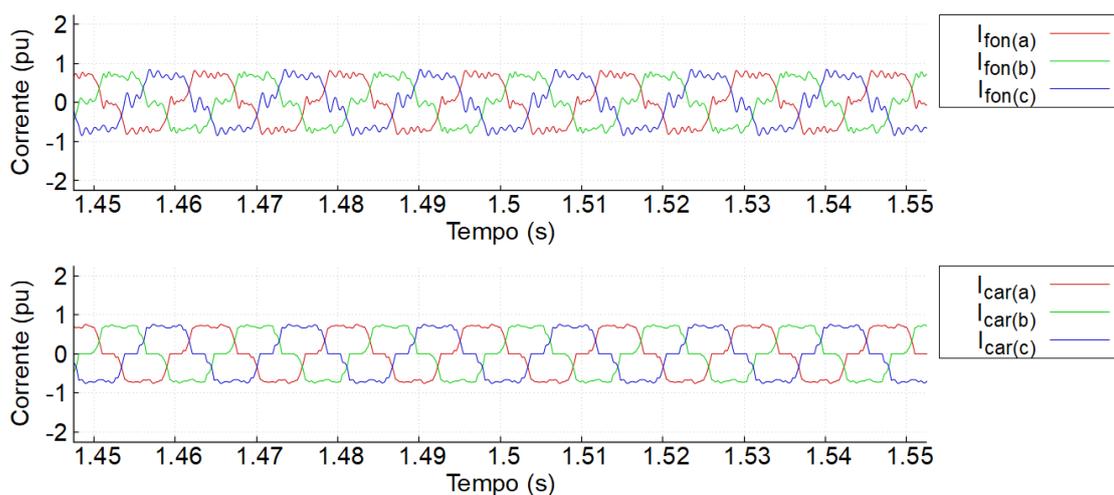


Figura 5.24: Correntes na rede com carga não-linear e UPQC dual desligado.

é ligeiramente inferior ao nível da fonte de alimentação devido a uma pequena corrente que passa pelos circuitos de *snubber* do bloco *Core Coupling* da posição F.

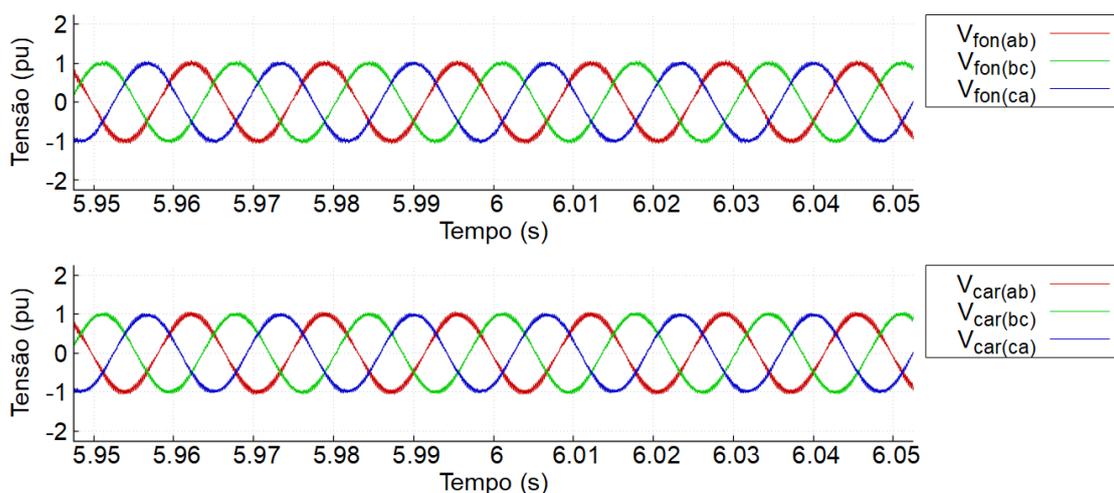


Figura 5.25: Tensões na rede sem carga e UPQC dual ligado.

Já a Figura 5.27 apresenta as formas de onda de tensão quando há uma carga não-linear presente na rede e o UPQC dual está atuando. Para a mesma situação, a Figura 5.28 apresenta as formas de onda de corrente. Observa-se que o equipamento compensa o conteúdo harmônico presente nas correntes da carga fazendo com que as correntes no lado da fonte de alimentação se aproximem de senoides puras.

Outro resultado da rotina de testes é o momento em que há cargas não-linear e bifásica conectadas ao sistema elétrico, com distúrbios de tensão no lado da fonte de alimentação, e o UPQC dual é capaz de atuar na mitigação dos problemas de qualidade de energia elétrica (QEE). Esse caso é mostrado na Figura 5.29 e na Figura 5.30, para as tensões e

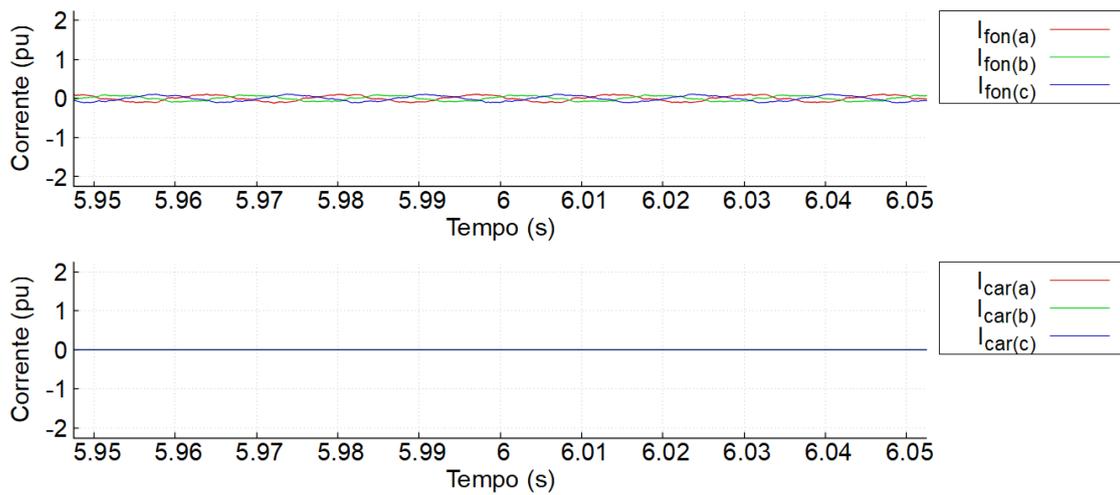


Figura 5.26: Correntes na rede sem carga e UPQC dual ligado.

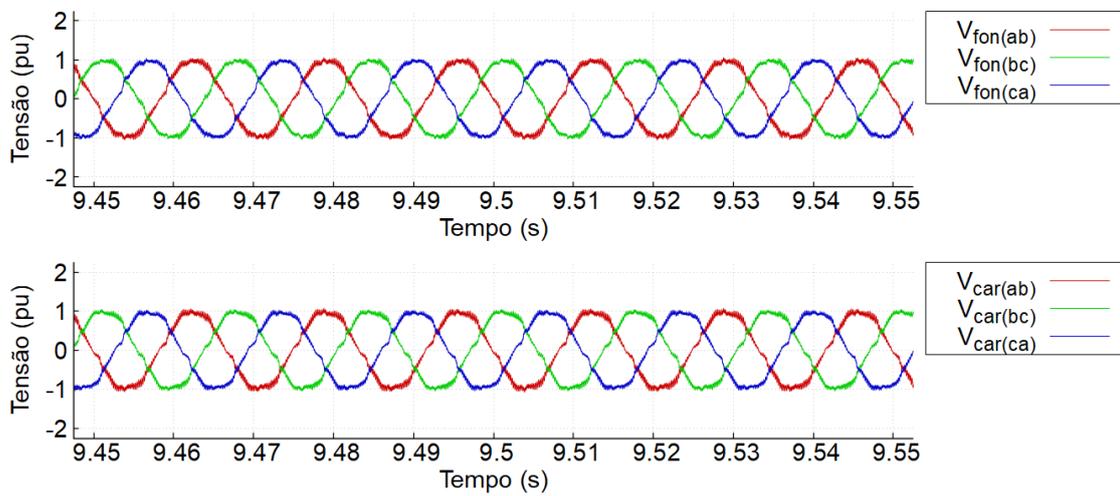


Figura 5.27: Tensões na rede com carga não-linear e UPQC dual ligado.

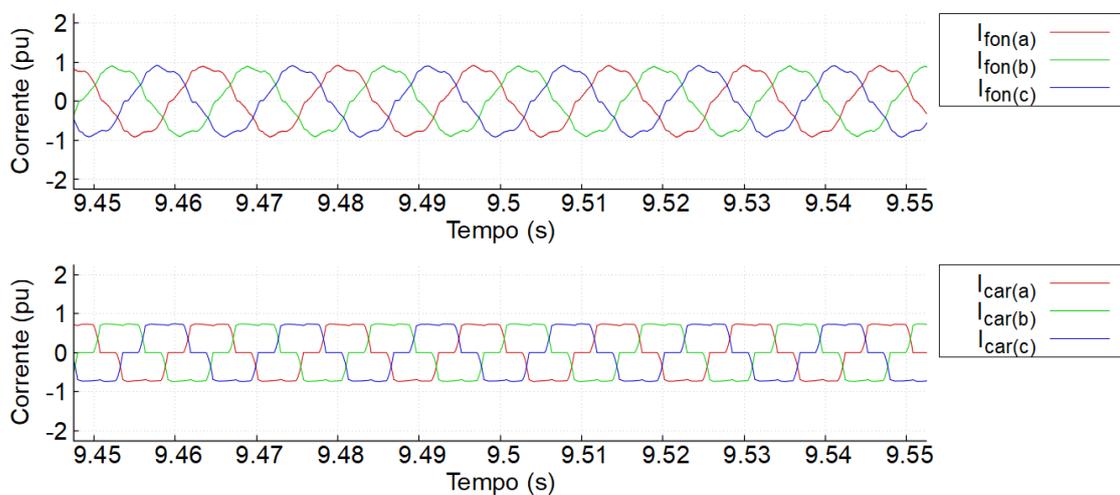


Figura 5.28: Correntes na rede com carga não-linear e UPQC dual ligado.

correntes, respectivamente.

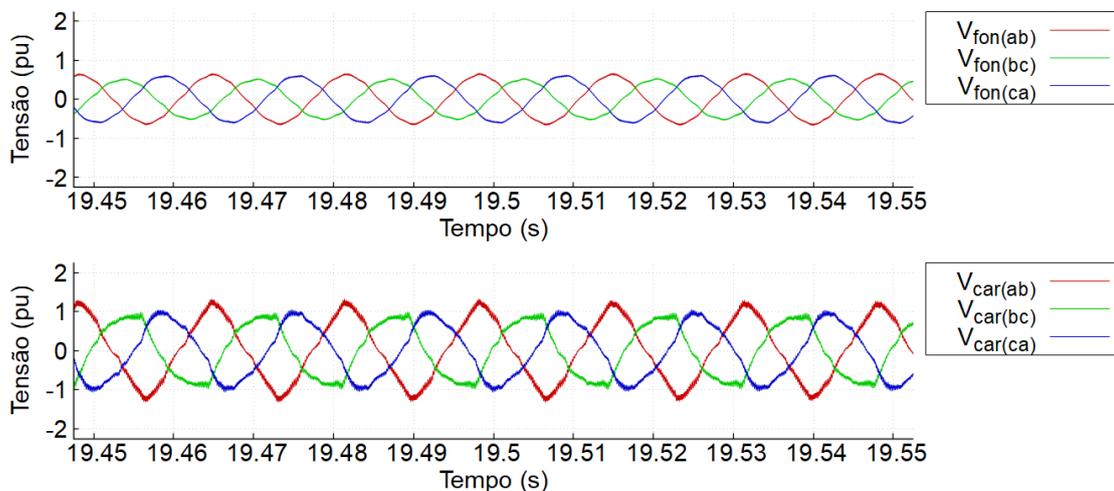


Figura 5.29: Tensões na rede com cargas não-linear e bifásica, distúrbios de tensão na fonte e UPQC dual ligado.

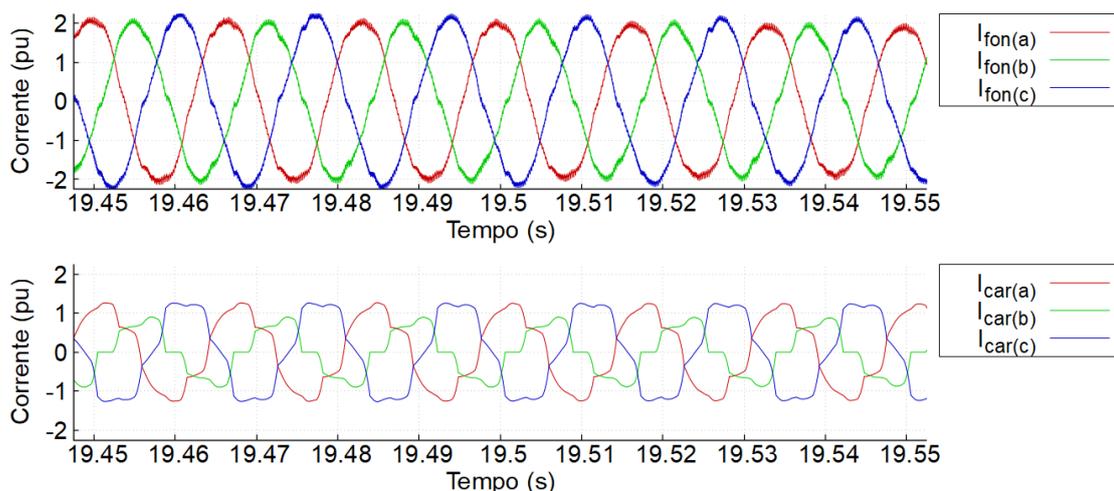


Figura 5.30: Correntes na rede com cargas não-linear e bifásica, distúrbios de tensão na fonte e UPQC dual ligado.

É possível perceber que o UPQC é capaz de fazer a compensação simultânea de distúrbios de corrente e tensão presentes na rede. Para se obter melhores resultados dos que os apresentados poderia ser feito um estudo de otimização do *hardware* do equipamento, ajustando-se os ganhos dos controladores PI de forma mais acurada. As Figuras 5.31 e 5.32 mostram as formas de onda de tensão e de corrente compensadas, respectivamente, em comparação suas senoides fundamentais.

Com relação ao fluxo de potência em cada parte da rede elétrica, ou seja, na barra da fonte, na barra de carga, no ramo de conexão do conversor série e no ramo de conexão do conversor paralelo, é possível analisar o comportamento do UPQC dinamicamente. A

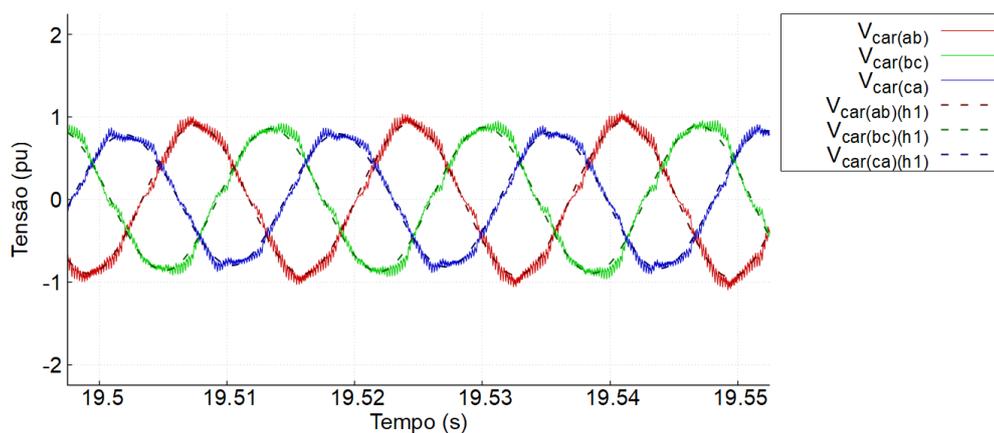


Figura 5.31: Tensões na barra da carga compensadas para a rede com cargas não-linear e bifásica, distúrbios de tensão na fonte e UPQC dual ligado em comparação com senoides fundamentais.

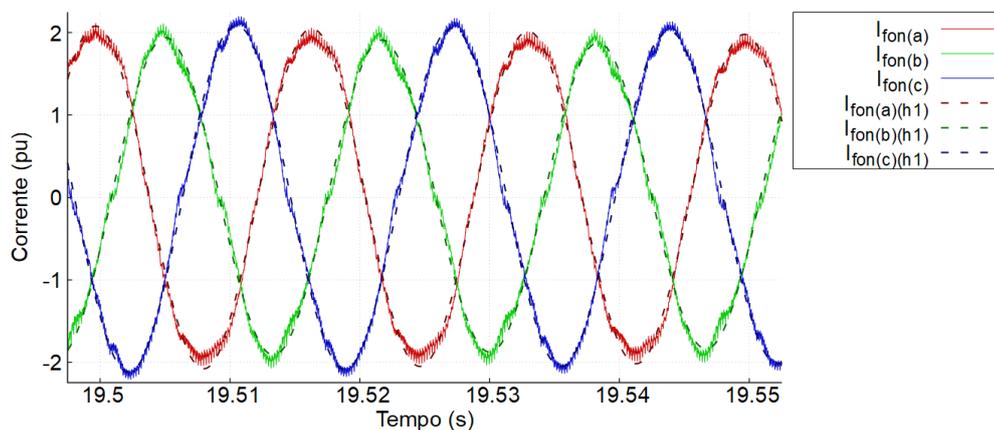


Figura 5.32: Correntes na barra da fonte compensadas para a rede com cargas não-linear e bifásica, distúrbios de tensão na fonte e UPQC dual ligado em comparação com senoides fundamentais.

Figura 5.33 apresenta os gráficos da potência média ( $\bar{p}$ ). Para as potências em cada ramo, foi adotado uma determinada convenção. A barra da fonte e o conversor série tiveram a convenção de fonte de tensão, isto é, a energia que sai é positiva. Já a barra de carga e o conversor paralelo tiveram a convenção de carga, isto é, a energia que chega é positiva.

Analisando as curvas da Figura 5.33, é possível perceber que somente há uma quantidade considerável de potência ativa média no UPQC, ou seja, de potência circulante nos conversores série e paralelo quando há um evento de VTCD na rede (entre os instantes  $t = 17$  s e  $t = 18$  s e entre os instantes  $t = 19$  s e  $t = 20$  s). Vale observar que a potência nos conversores deveria se manter nula quando o UPQC é acionado. Entretanto isso não acontece. Devido à presença dos *snubbers* RC no circuito, que inserem uma pequena perturbação na forma de onda, o equipamento entra em ação para fazer a correção a partir

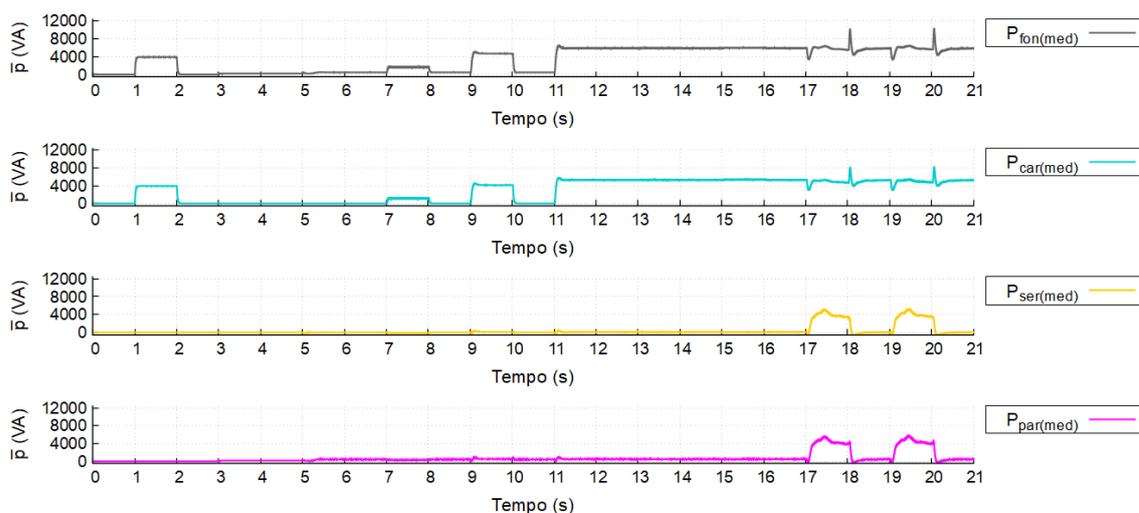


Figura 5.33: Potências ativas médias de cada parte da rede elétrica com o UPQC dual.

do momento que é acionado na simulação. Dessa forma, uma pequena quantidade de potência, da ordem de 8 % com relação à potência na rede quando ambas as cargas estão ligadas, flui pelos conversores.

A parte oscilante ( $\tilde{p}$ ) da potência ativa instantânea ( $p$ ) está relacionada com os distúrbios presentes no circuito, influenciando no fluxo de carga, e pode ser obtida através da diferença com a parcela da potência ativa média, conforme mostra a Equação 3.10 da Teoria PQ. Dessa forma, podem ser obtidos os gráficos da Figura 5.34.

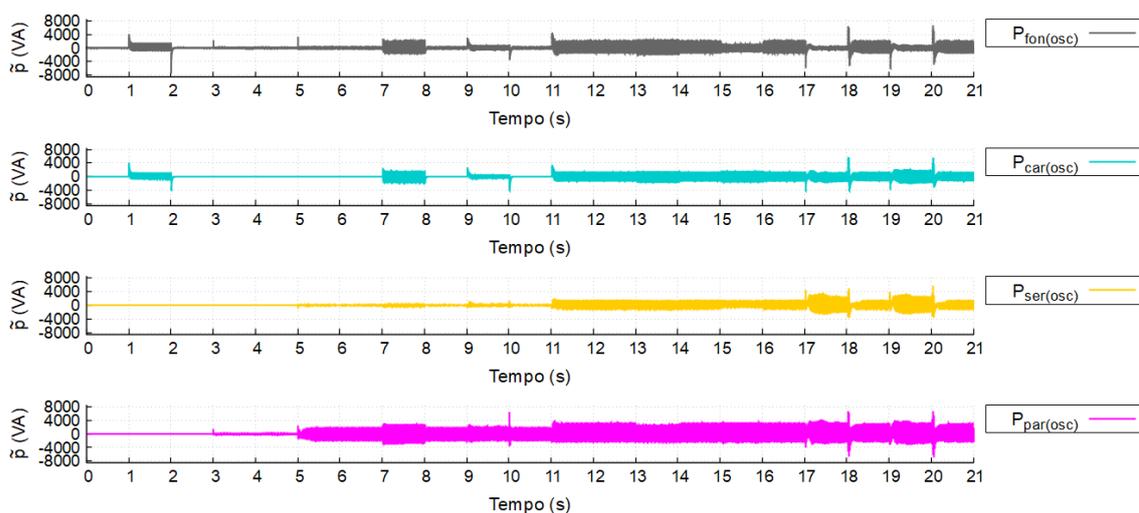


Figura 5.34: Potências ativas oscilantes de cada parte da rede elétrica com o UPQC dual.

Através da Figura 5.34 é possível notar que sempre que uma carga não-linear ou uma carga bifásica é acionada, ocorre a presença de potência oscilante no circuito. Outra observação que pode ser feita é que quando há um evento de VTCD na rede, a potência oscilante em ambos os conversores aumenta. Isso ocorre porque passa a ter circulação de

corrente no UPQC de forma a suprir a queda de tensão na barra de carga, ao mesmo tempo que é necessário continuar corrigindo a corrente na barra da fonte. Logo, o conversor paralelo continua drenando os distúrbios de corrente impostos pela barra de carga e o conversor série passa a ter em seus terminais uma diferença de potencial considerável, para que a barra de carga possua amplitude de tensão dentro dos valores desejados (do PRODIST [45], no caso deste trabalho) enquanto a barra da fonte está com amplitude reduzida.

### 5.3.3 Análises de QEE

A fim de averiguar se o equipamento está realmente funcionando conforme o desejado, uma análise de distúrbios de QEE foi realizada, para diferentes situações no sistema elétrico modelado, todas com apenas a carga não-linear ligada.

- Variação de tensão

Seja em regime permanente ou transitório, o UPQC é capaz de atuar no nível da tensão no ponto de conexão comum (PCC), fazendo com que o barramento da carga tenha um valor dentro da faixa adequada recomendada pelo PRODIST.

Foi avaliada uma condição de VTCD classificada como afundamento momentâneo de tensão, cuja duração foi de 1 segundo e a magnitude foi de 0,7 pu. A Figura 5.35 mostra a compensação acontecendo para esse evento. Nota-se que a amplitude de tensão na barra da carga é mantida em 0,92 pu, mesmo com a fonte de alimentação sofrendo uma redução para 70 % do seu valor nominal. Com relação às correntes, a compensação ocorre de forma eficiente na barra da fonte ao mesmo tempo das correções de tensão na barra da fonte.

- Desequilíbrio de Tensão

Para uma condição de um desequilíbrio de tensão na fonte de alimentação da ordem de 0,1 pu, o UPQC dual não se mostrou muito eficiente em sua atuação. A Figura 5.36 apresenta as tensões e correntes na rede elétrica. É possível perceber uma leve compensação, mas ainda um perfil de tensão com distorções. Provavelmente isso se deve à presença dos *snubbers* no circuito.

A compensação de desequilíbrio não ocorreu de forma a garantir o fator de desequilíbrio (FD%) dentro do limite recomendado pelo PRODIST [45], de 3,0 %. O FD% encontrado para a tensão na fonte teve valor de 10,0 % e para a tensão na carga teve

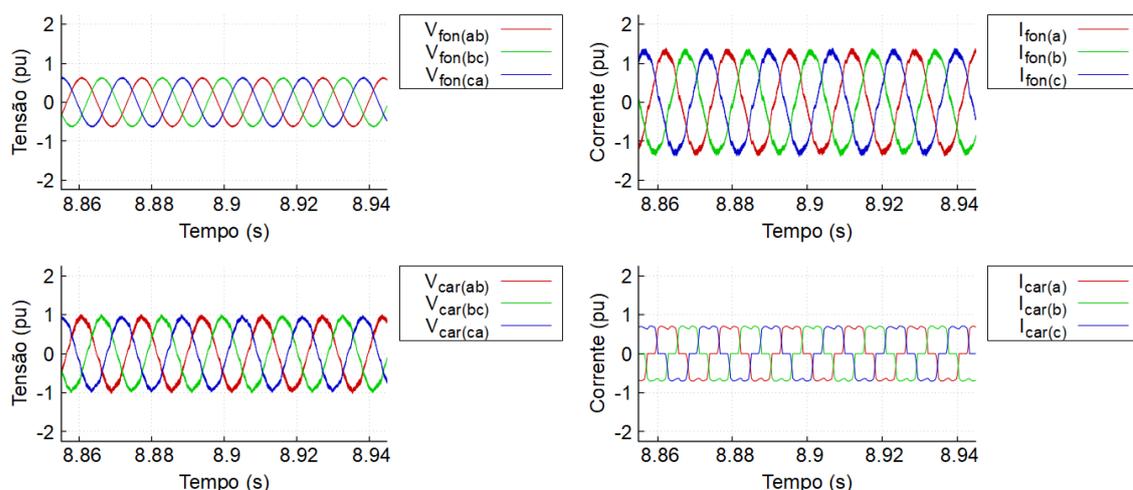


Figura 5.35: Tensões e correntes no sistema elétrico para uma ocorrência de VTCD de 0,7 pu.

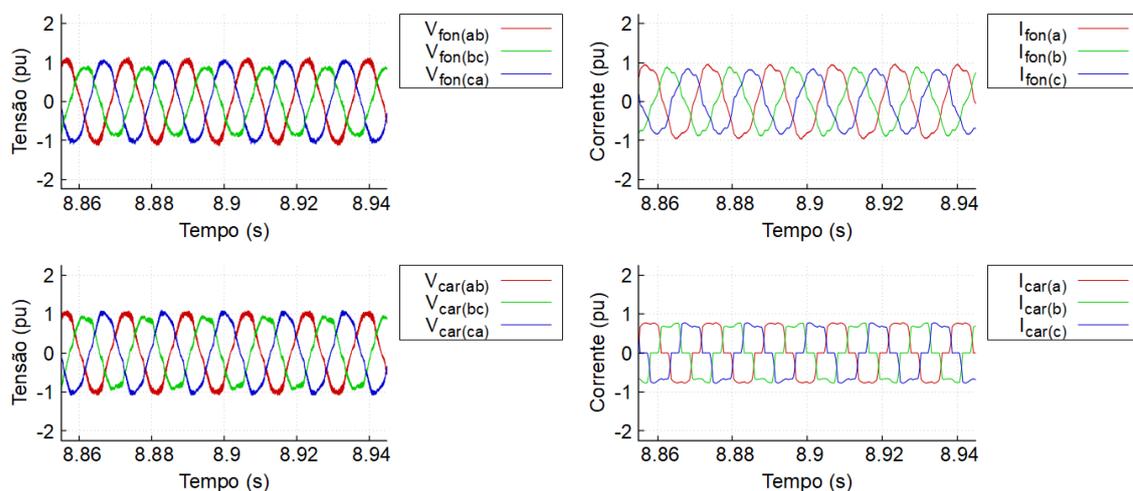


Figura 5.36: Tensões e correntes no sistema elétrico para um desequilíbrio de tensão de 0,1 pu.

valor de 4,5 %. Porém, é razoável concluir que o UPQC foi capaz de atuar nessa situação, pela notável redução do índice. Melhores ajustes no sistema de controle poderiam produzir melhores resultados.

- Distorções Harmônicas

Com o objetivo de avaliar a compensação de harmônicos de tensão presentes na fonte de alimentação da rede, foi simulada uma situação com harmônicos de sétima ordem com amplitude de 0,1 pu, cujos resultados de tensão e corrente estão expostos na Figura 5.37. Para uma melhor avaliação, os dados de THD% são apresentados na Tabela 5.12. É perceptível que o UPQC consegue atuar na mitigação de harmônicas de tensão para a barra da carga. Os dados da tabela mostram que os níveis

de THD% ficam abaixo de 10 %, limite estipulado pelo PRODIST [45]. Todavia, pode-se perceber que as formas de onda de corrente na barra da fonte são influenciadas pelo distúrbio harmônico injetado na fonte de alimentação, atrapalhando uma compensação eficiente por parte do UPQC.

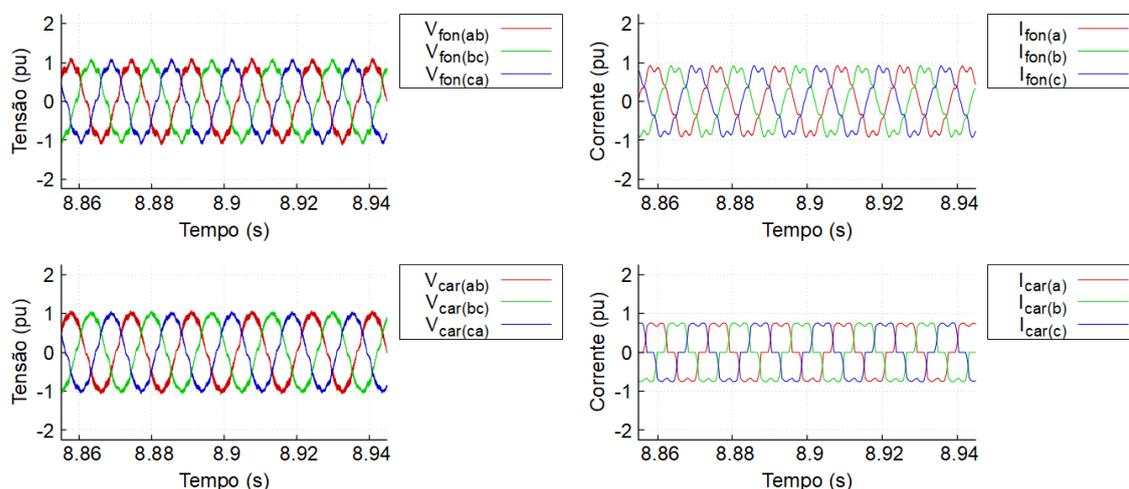


Figura 5.37: Tensões e correntes no sistema elétrico para uma distorção harmônica de tensão de sétima ordem com amplitude de 0,1 pu.

Tabela 5.12: Valores de THD% para a rede com distorção harmônica de tensão de ordem 7 e amplitude igual a 0,1 pu.

Grandeza	THD%
$V_{fon(ab)}$	10,87 %
$V_{fon(bc)}$	10,12 %
$V_{fon(ca)}$	10,12 %
$V_{car(ab)}$	7,94 %
$V_{car(bc)}$	6,74 %
$V_{car(ca)}$	6,78 %
$I_{fon(a)}$	11,28 %
$I_{fon(b)}$	11,37 %
$I_{fon(c)}$	11,31 %
$I_{car(a)}$	22,97 %
$I_{car(b)}$	22,75 %
$I_{car(c)}$	22,75 %

## 5.4 Síntese do capítulo

Neste capítulo foram feitas as primeiras análises do UPQC dual através do *software* Typhoon HIL, algo que não havia sido feito até o desenvolvimento do presente trabalho. Para as análises, inicialmente foi modelado o equipamento de forma idealizada, ou

---

seja, substituindo-se os conversores por fonte de tensão e corrente. No circuito com o UPQC dual ideal foram feitas comparações dos resultados obtidos com os apresentados em trabalhos anteriores. Isso comprovou a correta modelagem do equipamento no *software* Typhoon HIL, pois as simulações ocorreram conforme o esperado, mesmo com a introdução de *snubbers* na rede. Em seguida, o modelo real do UPQC dual foi modelado. Para este caso, uma avaliação do particionamento, bem como da influência dos *snubbers* teve que ser feita. Os principais resultados encontrados foram mostrados e discutidos, além de análises relacionadas a determinados fenômenos de QEE.

# Capítulo 6

## Simulação do UPQC dual para compensação harmônica na barra da fonte

O capítulo anterior mostrou os estudos e resultados iniciais da modelagem da rede com o Condicionador Unificado de Qualidade de Energia (do inglês, *Unified Power Quality Conditioner*) (UPQC) dual. No presente capítulo o aperfeiçoamento do controle do dispositivo é apresentado e explorado. Dessa forma, investiga-se a possibilidade de o UPQC dual ser capaz de compensar o conteúdo harmônico de corrente causado por uma carga *shunt* conectada à barra da fonte de alimentação. Essa compensação é realizada pelo filtro série. Por isso, o sistema de controle precisa ser alterado de forma que essa nova função seja considerada na modulação por largura de pulso (do inglês, *pulse width modulation*) (PWM) do conversor.

A divisão das seções se dá da seguinte forma: a Seção 6.1 mostra as alterações na rede elétrica modelada para o estudo da inclusão da nova etapa do controle do condicionador série-paralelo; na Seção 6.2, a estratégia utilizada para permitir a compensação de potência oscilante na barra da fonte é apresentada. E os resultados das simulações referentes a essa compensação são mostrados na Seção 6.3.

### 6.1 Alterações na modelagem para análise da compensação harmônica *shunt* na barra da fonte

Com o objetivo de avaliar a possibilidade do UPQC dual compensar as harmônicas de corrente na barra da fonte devido a uma carga conectada em paralelo com a rede, a primeira modificação realizada no modelo estudado foi a inclusão de uma carga não-linear

próxima à fonte de alimentação, ou seja, no lado oposto ao local das cargas estudadas do circuito do capítulo anterior.

Devido à alteração da complexidade da modelagem, em outras palavras, ao aumento do número de chaves presentes do circuito, outras modificações tiveram que ser feitas. Como explicado na Seção 4.2 do Capítulo 4, existe uma limitação na quantidade de conversores de potência e outros elementos chaveados, sendo influenciada principalmente pelo modelo de *hardware* utilizado, que no caso foi o HIL402, cujos limites são apresentados na Tabela 4.1. Por isso, foi feita uma análise de modo semelhante ao que ocorreu nas Seções 5.2 e 5.3 do Capítulo 5, e o sistema elétrico a ser estudado teve que ser modificado do apresentado na Figura 5.22 para o da Figura 6.1. A configuração de *firmware* mais adequada continuou sendo a *id2*, devido à necessidade de se particionar a rede quatro subcircuitos.

Com as alterações feitas, o sistema modelado passa a ser complexo demais para a emulação em conjunto com o *hardware* HIL402. Dessa forma, teve que ser alterada a configuração de *firmware* para o tipo “VHIL+”. Uma possibilidade para realizar esses testes em *Hardware-in-the-Loop* (HIL) com os produtos da Typhoon HIL Inc. é utilizar um modelo de *hardware* da série 600, pois eles permitem a compilação de circuitos de maior complexidade, além de terem mais núcleos *Field Programmable Gate Array* (FPGA), possibilitando um particionamento com mais subcircuitos. Infelizmente, como o laboratório do Núcleo de Inovação Tecnológica em Engenharia Elétrica (NITEE) só possui o modelo de *hardware* HIL402, somente foram executados testes por simulação em *software*, no modo *Virtual Hardware-in-the-Loop* (V-HIL). Outra possibilidade, não explorada no presente trabalho, é a modificação das características das cargas, por exemplo, trocando os retificadores trifásicos por retificadores monofásicos.

É possível perceber que para essa nova modelagem, mais *snubbers* tiveram que ser configurados, devido aos conflitos topológicos que passaram a ocorrer, uma vez que um bloco *Core Coupling* teve que ser remanejado para o lado da fonte de alimentação. Foi escolhido o posicionamento invertido do bloco de forma a evitar inserir indutâncias no circuito, pois isso poderia significar uma elevação da reatância na rede elétrica. Assim, é de se esperar que as formas de onda de tensão e corrente tendam a sofrer mais influências que não estariam presentes em um sistema de potência real.

Através de uma análise de valores de Taxa de Distorção Harmônica Total (do inglês, *Total Harmonic Distortion*) (THD%), alterando-se os parâmetros  $k_{snb}$  e  $\tau_{snb}$ , foi identificado que o melhor conjunto de valores para os *snubbers* dos blocos *Core Coupling* foi:  $k_{snb}$

## 6.1 Alterações na modelagem para análise da compensação harmônica *shunt* na barra da fonte<sup>88</sup>

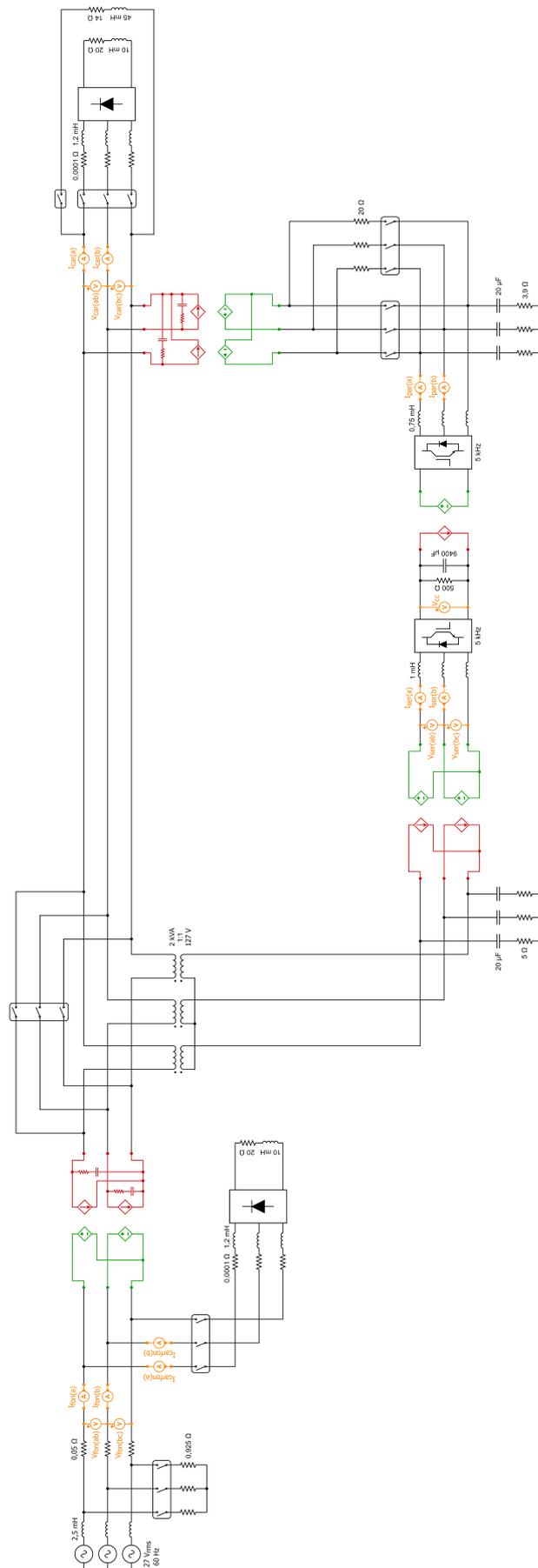


Figura 6.1: Sistema elétrico com UPQC dual para estudo do aprimoramento no controle.

$= 0,05$  e  $\tau_{snb} = 14,0 \mu s$ . Vale observar que apesar de no circuito simulado apresentado na Seção 5.3 o valor de  $k_{snb}$  ser inferior, na presente modelagem não é possível chegar a um valor tão baixo da relação de potência do *snubber* com a potência que flui pelo bloco, pois o sistema se instabiliza. Isso é percebido no momento da compilação, quando o *software* emite uma mensagem de erro. Com a configuração feita, os *snubbers* passam a ter capacitância de  $9,495 \mu F$  e resistência de  $1,474 \Omega$ .

## 6.2 Aprimoramento no controle para a nova compensação

Para adicionar uma nova compensação no controle do UPQC dual, algumas alterações precisam ser feitas. Primeiro é a etapa de cálculo dos sinais de referência de corrente que devem ser considerados na modulação do conversor série. Essa parte do controle é realizada através do cálculo das potências oscilantes referentes à demanda imposta pela carga *shunt* na barra da fonte ( $\tilde{p}_{carfon}$  e  $\tilde{q}_{carfon}$ ), através das Equações 3.8 e 3.9 com filtros do tipo passa-baixa para retirar as parcelas médias, com base nas Equações 3.10 e 3.11. As componentes oscilantes de potência são calculadas porque são relacionadas ao conteúdo harmônico presente nos sinais de corrente da carga não-linear. Posteriormente, os sinais de referência são determinados por:

$$\begin{bmatrix} i_{\alpha ref(til)} \\ i_{\beta ref(til)} \end{bmatrix} = \frac{1}{v_{\alpha+1}^2 + v_{\beta+1}^2} \begin{bmatrix} v_{\alpha+1}^2 & v_{\beta+1}^2 \\ v_{\beta+1}^2 & -v_{\alpha+1}^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -\tilde{p}_{carfon} \\ -\tilde{q}_{carfon} \end{bmatrix}, \quad (6.1)$$

que é semelhante ao caso apresentado na Equação 3.18 relacionada à Figura 3.4, mas com tipos de potências diferentes. A Figura 6.2 ilustra a inclusão dessa parte do controle, sendo as novas saídas ( $I_{ref\_alpha\_til}$  e  $I_{ref\_beta\_til}$ ) calculadas através da Equação (6.1).

Como a modulação do conversor série irá considerar, dessa vez, sinais com distúrbios a serem compensados, a utilização de controladores do tipo proporcional-integral (PI) se torna pouco eficiente. Dessa forma, optou-se por fazer essa etapa de controle com controladores do tipo ressonante. A topologia utilizada é baseada nos estudos [97] e [98], apresentada na Figura 6.3, onde  $h$  é a ordem harmônica que se deseja compensar,  $\omega_1$  é a frequência angular da rede, vinda do *Phase Locked Loop* (PLL) do tipo q-PLL,  $\omega_{ch}$  é a frequência de corte referente à ordem harmônica que se deseja compensar, e  $K_h$  é o ganho do controlador ressonante referente à ordem harmônica que se deseja compensar.

Como as ordens harmônicas que mais afetam a corrente na fonte de alimentação são

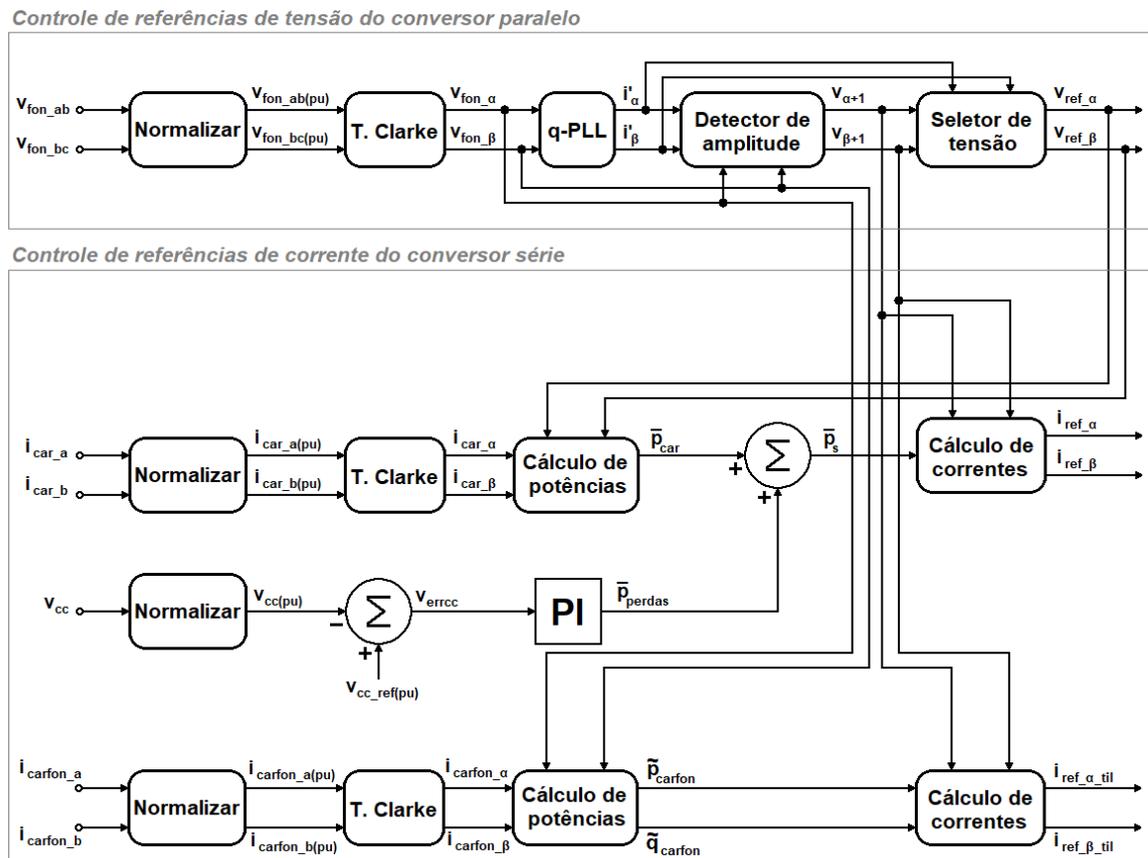


Figura 6.2: Controle base das referências de tensão e corrente considerando a compensação harmônica *shunt* na barra da fonte.

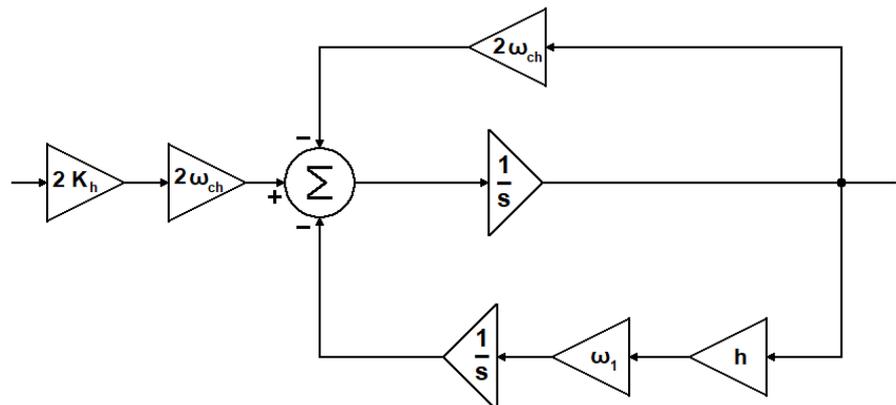


Figura 6.3: Controlador ressonante.

a 5<sup>a</sup> e a 7<sup>a</sup>, optou-se por utilizar somente controladores ressonantes para as frequências referentes. A Figura 6.4 mostra o diagrama de blocos para a determinação dos sinais de modulação tipo PWM do conversor série em conjunto com as etapas já existentes do controle do UPQC dual.

De forma empírica, partindo de valores próximos utilizados no trabalho [97], foram

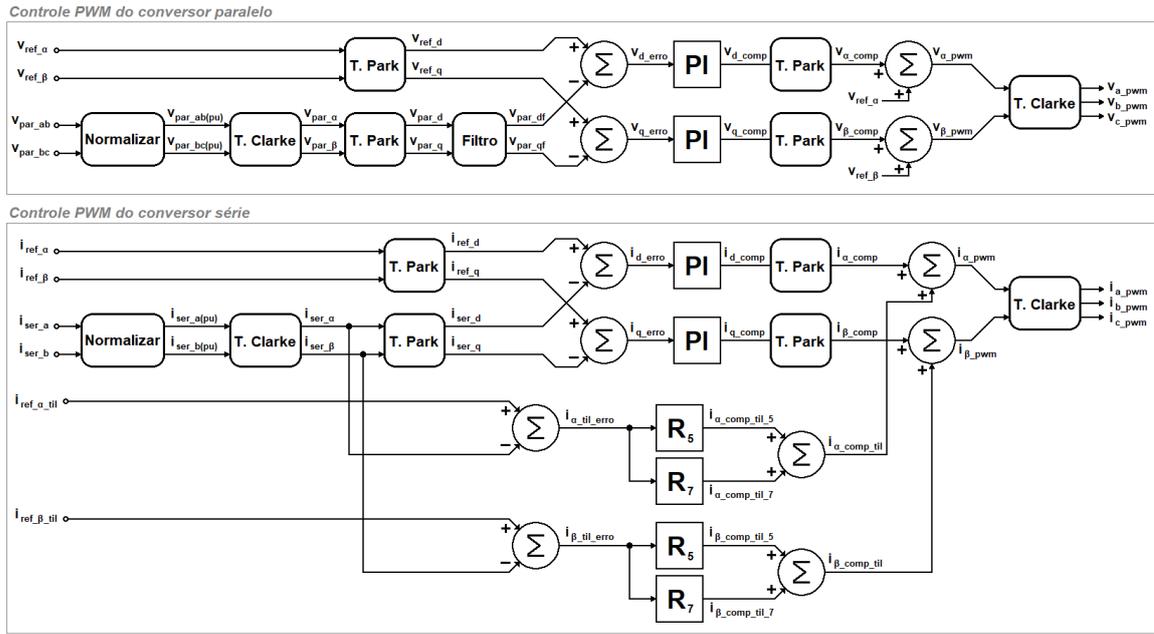


Figura 6.4: Controle PWM do UPQC dual considerando a compensação harmônica *shunt* na barra da fonte.

definidos os valores para os parâmetros dos controladores ressonantes, iguais para as ordens 5 e 7:  $K_5 = K_7 = 10,0$  e  $\omega_{c5} = \omega_{c7} = 7,0$  rad/s.

### 6.3 Resultados da nova função de compensação

Com o objetivo de avaliar a atuação do UPQC dual com a nova funcionalidade, foram elaborados dois testes distintos, sendo que a nova etapa de compensação inicia não atuando no controle, podendo ser acionada a qualquer momento. A primeira rotina de testes, chamada aqui de “teste1” e descrita na Tabela 6.1, tem o objetivo de avaliar a compensação harmônica *shunt* na barra da fonte de modo a comparar os efeitos da carga em paralelo sem e com a nova funcionalidade. Além disso, verificar o que ocorre quando as demais cargas da rede são ligadas.

As Figuras 6.5 e 6.6 mostram as formas de onda de tensões e correntes, respectivamente, ao longo de todo o período do “teste1”. Percebe-se que o sistema é estável em regime permanente para todas as situações, ou seja, o controle do UPQC dual é capaz de atuar quando somente a carga *shunt* na barra da fonte é ligada assim como quando há outras cargas no circuito. Vale observar que no instante  $t = 10$  segundos na Figura 6.5 há um desequilíbrio acentuado. Para contornar este problema um estudo mais detalhado da impedância do filtro do conversor *shunt*, bem como um refinamento do controle de tensão poderiam ser feitos. Entretanto, como esse fato não interfere nas análises, decidiu-se por

Tabela 6.1: Rotina de testes para avaliar a nova funcionalidade do controle do UPQC dual com carga da fonte ligando antes.

Período	Ocorrência
$t = 0$ s	Circuito sem carga, sem UPQC dual e sem distúrbios.
$t = 1$ s	Carga não-linear é ligada.
$t = 2$ s	Carga não-linear é desligada.
$t = 3$ s	É iniciada a energização do capacitor do UPQC dual.
$t = 5$ s	UPQC dual é acionado e circuito de energização é desligado.
$t = 7$ s	Carga da fonte é ligada.
$t = 8$ s	Nova funcionalidade é acionada.
$t = 9$ s	Carga não-linear é ligada.
$t = 10$ s	Carga bifásica é ligada.
$t = 11,5$ s	Fim da rotina de testes.

não avançar neste ponto no presente trabalho.

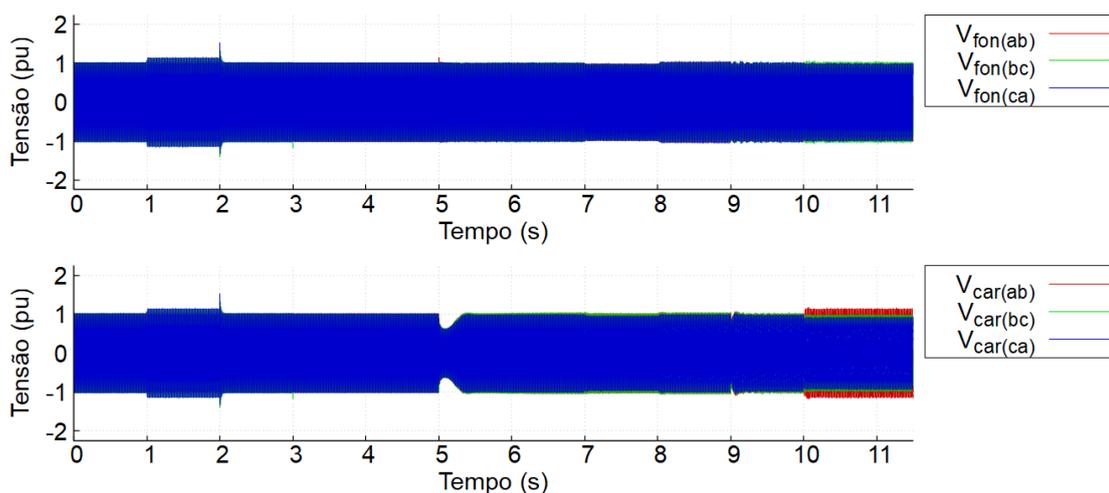


Figura 6.5: Tensões na rede durante o “teste1”.

De forma a avaliar a atuação do UPQC dual sem e com a etapa de controle de compensação harmônica *shunt*, foram avaliadas as formas de onda e os níveis de THD% para ambas as condições, sem ainda ter as cargas não-linear e bifásica conectadas ao sistema elétrico. A Figura 6.7 apresenta as formas de onda de tensão. É possível perceber, já pelas formas de onda, que a qualidade da tensão na carga é deteriorada quando a nova etapa de controle é ativada. Isso pode ser confirmado na Tabela 6.2, que compara o THD% para ambas as situações. Vale observar que o limite para o THD% de tensão é de 10 %, de acordo com o PRODIST [45] e o limite para o THD% de corrente é de 5 %, de acordo com a norma IEEE Std 519 [42].

A Figura 6.8 mostra as formas de onda de corrente. Nesse caso em que somente há cargas no lado da fonte, o UPQC dual atua como um simples filtro ativo. Nota-se que

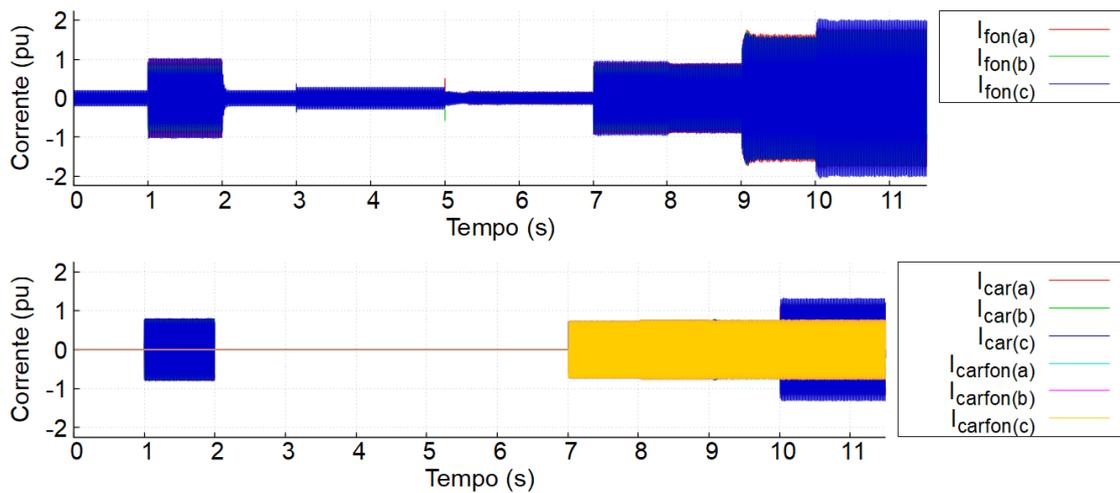


Figura 6.6: Correntes na rede durante o “teste1”.

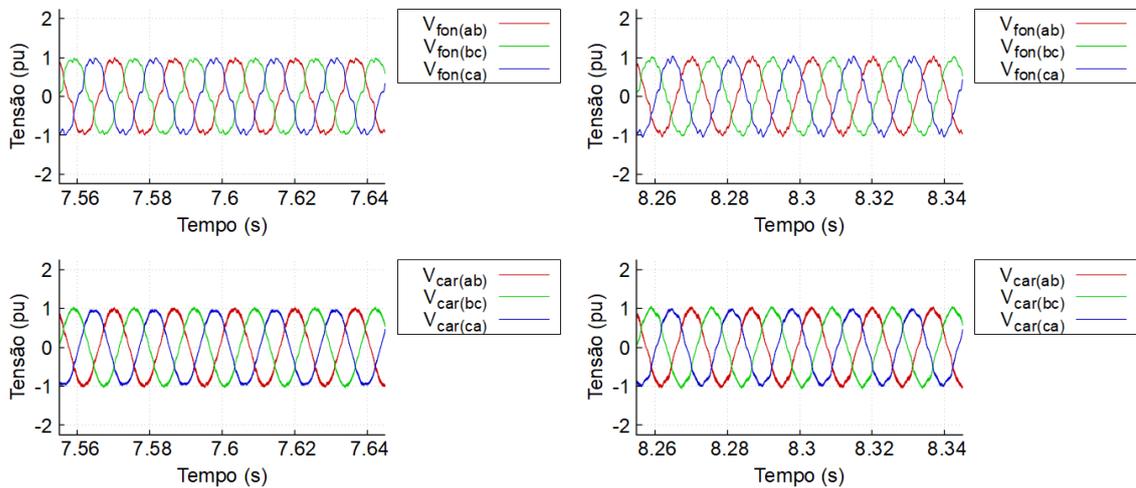


Figura 6.7: Comparação de tensões na rede durante o “teste1” sem e com a nova funcionalidade.

as formas de onda na fonte sofrem uma boa correção de conteúdo harmônico. Os níveis de distorção harmônica de corrente individual de ordem  $h$  ( $DIC_h\%$ ) para as ordens 5 e 7 reduzem de 19 % e 8 % em média por fase para valores próximos a 6 %. Essa mitigação não atinge o que é recomendado pela norma IEEE Std 519 [42] porque no caso em que não há cargas na barra de carga os *snubbers* RC atuam como cargas do circuito. Portanto, os capacitores atrapalham uma melhor operação do UPQC dual. Dessa forma, resultados mais confiáveis são os que consideram todas as cargas ligadas. A Tabela 6.3 compara a situação em que somente a carga da barra da fonte está ligada sem a nova função de controle com o caso em que as demais cargas estão ligadas e o controle atua por completo.

A partir dos resultados apresentados para os índices de  $DIC_h\%$  na Tabela 6.3 fica claro que o UPQC é capaz de atuar de forma eficiente na redução das ordens harmônicas

Tabela 6.2: Comparação de THD% sem e com a nova função de controle do UPQC dual atuando na rede com carga *shunt* na barra da fonte.

Grandeza	Sem a nova função	Com a nova função
$V_{fon(ab)}$	10,00 %	5,90 %
$V_{fon(bc)}$	10,85 %	6,85 %
$V_{fon(ca)}$	11,40 %	7,28 %
$V_{car(ab)}$	4,83 %	6,07 %
$V_{car(bc)}$	3,68 %	5,74 %
$V_{car(ca)}$	3,99 %	6,14 %
$I_{fon(a)}$	20,00 %	8,06 %
$I_{fon(b)}$	20,48 %	9,22 %
$I_{fon(c)}$	22,45 %	10,93 %
$I_{car(a)}$	0,00 %	0,00 %
$I_{car(b)}$	0,00 %	0,00 %
$I_{car(c)}$	0,00 %	0,00 %
$I_{carfon(a)}$	21,27 %	23,72 %
$I_{carfon(b)}$	21,83 %	23,69 %
$I_{carfon(c)}$	20,51 %	23,47 %

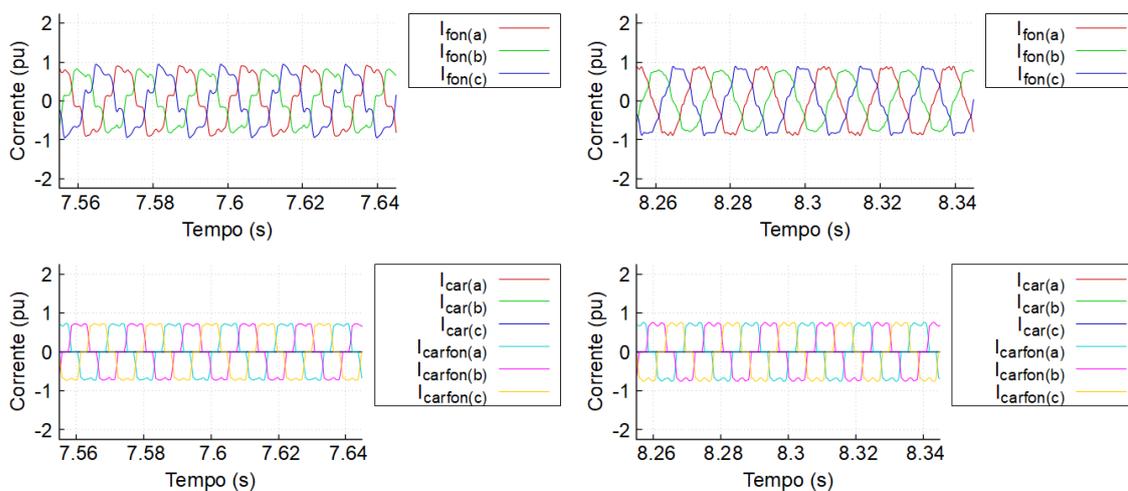


Figura 6.8: Comparação de correntes na rede durante o “teste1” sem e com a nova funcionalidade.

mais influentes pela carga *shunt* na barra de conexão. De acordo com a norma IEEE Std 519 [42], os valores das ordens 5 e 7 devem ficar abaixo de 4 %, o que ocorre.

Outros resultados interessantes a serem analisados são: o caso em que há cargas não-linear e bifásica ligadas na rede e a nova funcionalidade é acionada; e quando as três cargas estão ligadas e a compensação está acionada. Essas análises foram feitas utilizando a rotina de testes denominada de “teste2”, descrito na Tabela 6.4.

Foi verificado que quando não há presença de carga *shunt* na barra da fonte, a nova

Tabela 6.3: Comparação de  $DIC_h\%$  de 5<sup>a</sup> e 7<sup>a</sup> ordens para a rede com carga *shunt* sem a nova funcionalidade de controle atuando em relação à rede com todas as cargas e com controle completo do UPQC dual.

Grandeza	Carga <i>shunt</i>	Sistema completo
$I_{fon(a)(h=5)}$	18,61 %	2,37 %
$I_{fon(b)(h=5)}$	18,44 %	3,26 %
$I_{fon(c)(h=5)}$	20,34 %	2,88 %
$I_{carfon(a)(h=5)}$	18,25 %	20,28 %
$I_{carfon(b)(h=5)}$	19,16 %	20,61 %
$I_{carfon(c)(h=5)}$	17,47 %	20,57 %
$I_{fon(a)(h=7)}$	6,05 %	1,85 %
$I_{fon(b)(h=7)}$	7,99 %	2,09 %
$I_{fon(c)(h=7)}$	8,51 %	3,49 %
$I_{carfon(a)(h=7)}$	9,84 %	10,31 %
$I_{carfon(b)(h=7)}$	9,09 %	8,17 %
$I_{carfon(c)(h=7)}$	9,58 %	8,77 %

Tabela 6.4: Rotina de testes para avaliar a nova funcionalidade do controle do UPQC dual com carga da fonte ligando depois.

Período	Ocorrência
$t = 0$ s	Circuito sem carga, sem UPQC e sem distúrbios.
$t = 1$ s	Carga não-linear é ligada.
$t = 2$ s	Carga não-linear é desligada.
$t = 3$ s	É iniciada a energização do capacitor do UPQC.
$t = 5$ s	UPQC é acionado e circuito de energização é desligado.
$t = 7$ s	Cargas bifásica e não-linear são ligadas.
$t = 8$ s	Nova funcionalidade é acionada.
$t = 9$ s	Carga da fonte é ligada.
$t = 10,5$ s	Fim da rotina de testes.

funcionalidade não impacta nas demais compensação do UPQC dual. A Figura 6.9 compara as formas de onda das tensões e a Figura 6.10 compara as das correntes quando as três cargas do sistema de estudo estão ligadas e a etapa de controle da nova compensação está acionada. A Tabela 6.5 apresenta os valores de THD% para ambas as situações.

A compensação conjunta dos harmônicos de corrente das três cargas do circuito não foi capaz de reduzir os níveis de distorção harmônica total de corrente (DTC%) na fonte de alimentação para o limite recomendado pela norma IEEE Std 519 [42]. Como já foi comentado no Capítulo 5, os *snubbers* exercem uma pequena influência nesse sentido. Um ponto positivo é que, mesmo depois de todas as cargas estarem acionadas, o UPQC conseguiu manter os níveis de DTC% compensados com a presença somente de cargas na barra de carga. Porém, com relação ao THD% de tensão na carga, há uma elevação

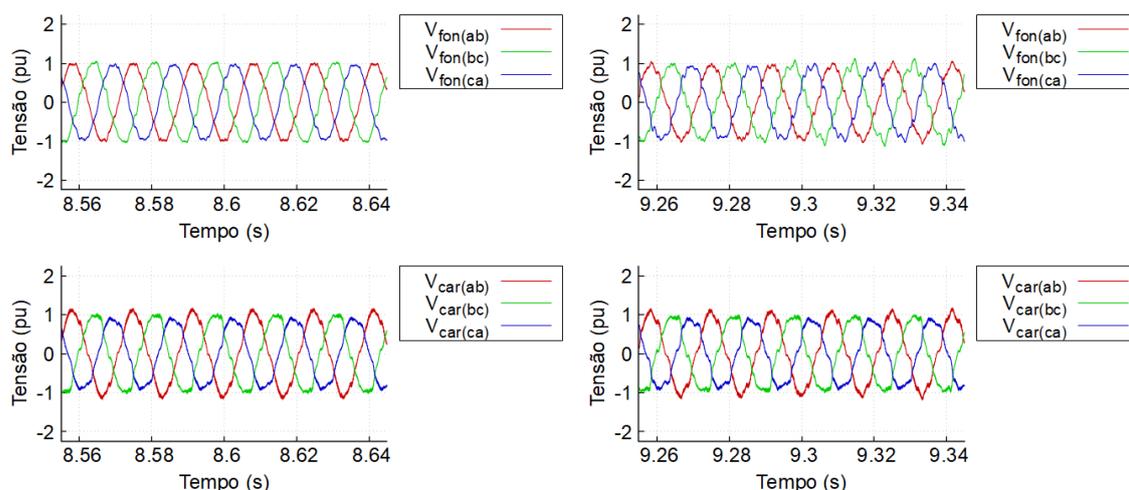


Figura 6.9: Comparação de tensões na rede durante o “teste2” com a nova funcionalidade para a situação de acionamento da carga *shunt* com as demais cargas já ligadas.

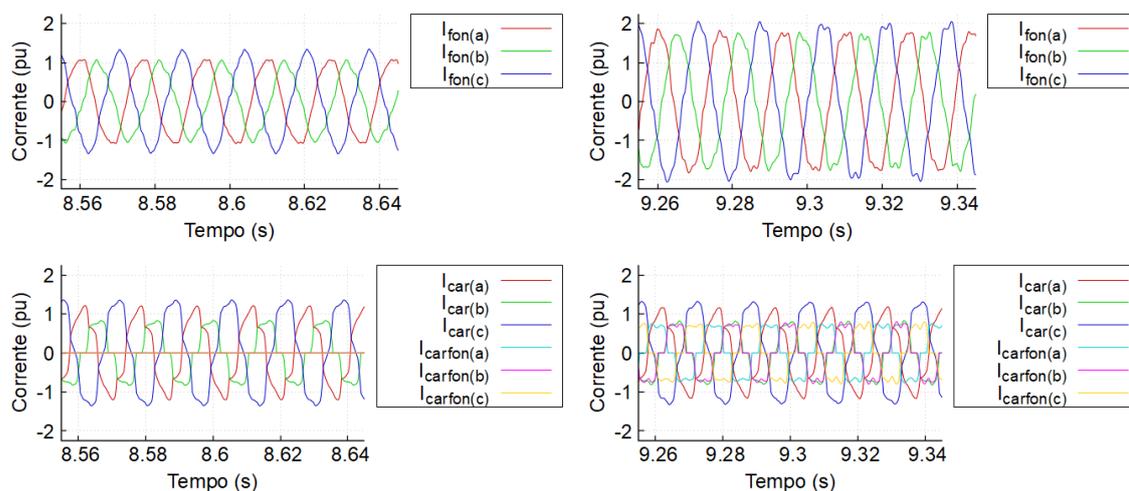


Figura 6.10: Comparação de correntes na rede durante o “teste2” com a nova funcionalidade para a situação de acionamento da carga *shunt* com as demais cargas já ligadas.

dos valores, o que mostra que a nova compensação influencia negativamente na mitigação de tensão pelo conversor paralelo.

Após todas as análises realizadas, é possível concluir que o equipamento é capaz de atuar na compensação harmônica *shunt* na barra da fonte.

## 6.4 Síntese do capítulo

Este capítulo apresentou uma novidade no aprimoramento do UPQC, nunca antes evidenciada pela literatura. No presente trabalho foi estudada uma nova função para o equipamento, de forma que seja capaz de mitigar harmônicos de corrente na fonte de

Tabela 6.5: Comparação de THD% com a nova função de controle do UPQC dual atuando na rede com cargas não-linear e bifásica na barra de carga sem e com carga *shunt* na barra da fonte.

<b>Grandeza</b>	<b>Sem carga <i>shunt</i></b>	<b>Com carga <i>shunt</i></b>
$V_{fon(ab)}$	4,52 %	6,90 %
$V_{fon(bc)}$	6,02 %	8,63 %
$V_{fon(ca)}$	5,07 %	8,74 %
$V_{car(ab)}$	7,69 %	10,06 %
$V_{car(bc)}$	9,02 %	11,82 %
$V_{car(ca)}$	8,11 %	10,75 %
$I_{fon(a)}$	7,16 %	5,29 %
$I_{fon(b)}$	9,02 %	5,81 %
$I_{fon(c)}$	7,66 %	6,36 %
$I_{car(a)}$	16,40 %	15,28 %
$I_{car(b)}$	20,30 %	18,93 %
$I_{car(c)}$	13,35 %	12,23 %
$I_{carfon(a)}$	0,00 %	23,79 %
$I_{carfon(b)}$	0,00 %	23,17 %
$I_{carfon(c)}$	0,00 %	23,14 %

alimentação causados por cargas não-lineares conectadas em paralelo na barra da fonte. Inicialmente, foram discutidas as alterações necessárias na modelagem da rede no *Typhoon HIL*, com base no capítulo anterior. As modificações no controle do equipamento foram discutidas em seguida. Para a nova etapa de controle, controladores ressonantes foram utilizados, diferentemente do que já havia sido feito para as demais etapas de controle. Resultados para a nova função de compensação foram apresentados, confirmando a possibilidade do UPQC ser capaz de mitigar conteúdo harmônico de corrente com uma carga *shunt* na barra da fonte, simultaneamente com as outras compensações em ação. Contudo, o estudo mostrou que essa nova compensação interfere negativamente nas demais compensações e, por isso, uma avaliação mais aprofundada se torna necessária para contornar o problema.

# Capítulo 7

## Conclusões e Trabalhos Futuros

Os objetivos do presente projeto foram alcançados, mas ainda há diversas investigações que podem ser realizadas com o propósito de aprimorar o Condicionador Unificado de Qualidade de Energia (do inglês, *Unified Power Quality Conditioner*) (UPQC). Dessa forma, este capítulo apresenta as conclusões, na Seção 7.1 e ideias de trabalhos futuros, na Seção 7.2. Junto com sugestões de pesquisas para dar continuidade ao projeto apresentado pelo presente trabalho são comentados dois artigos científicos já em desenvolvimento.

### 7.1 Conclusões

Foi realizado um estudo de um compensador do tipo série-paralelo, conhecido como Condicionador Unificado de Qualidade de Energia (do inglês, *Unified Power Quality Conditioner*) (UPQC), que se destina a atuar na manutenção da qualidade de energia elétrica (QEE) de um ponto da rede elétrica onde há cargas não-lineares e distúrbios de tensão. O objetivo principal do projeto de pesquisa foi avaliar a inclusão de uma nova funcionalidade nesse equipamento, utilizando uma plataforma de simulação em tempo real (do inglês, *real-time simulation*) (RTS) da empresa Typhoon HIL Inc., cujo *hardware* dedicado para as simulações foi o modelo HIL402.

O modelo de UPQC estudado foi o de topologia dual, que se difere da topologia clássica por eliminar a necessidade de fazer o reconhecimento das harmônicas presentes na rede para que sejam feitas as devidas compensações. O UPQC dual atua impondo na rede as próprias tensões e correntes desejadas, isto é, com formas de onda na frequência fundamental e amplitude desejada, eliminando os distúrbios automaticamente.

Com relação à eliminação de harmônicas por este equipamento, ele já é capaz de

atuar na correção da tensão com distúrbios na barra da fonte impondo tensão puramente senoidal na barra de carga e na correção da corrente com distúrbios na barra da carga impondo corrente puramente senoidal na barra da fonte.

De forma a ampliar a capacidade de compensação do UPQC, a nova funcionalidade investigada por este trabalho faz com que o equipamento seja capaz de mitigar o conteúdo harmônico de corrente presente em uma carga *shunt* conectada na barra da fonte de forma que a fonte de alimentação passe a ter correntes puramente senoidais.

Para essa nova etapa de controle foram utilizados controladores ressonantes, em vez de controladores do tipo proporcional-integral (PI), como é feito nas etapas das compensações já existentes. Isso se deu pelo fato de que o novo processo de tratamento dos sinais precisa que o conversor série sintetize formas de onda com distúrbios e controladores PI só garantem um bom funcionamento com sinais puramente senoidais.

Diante dos resultados encontrados nas simulações com a compensação harmônica *shunt* atundo foi verificado que essa nova etapa de controle tende a prejudicar as demais etapas. Neste trabalho não foi investigado o quanto precisamente é essa influência nem meios de corrigir esse problema. Essas análises serão feitas em trabalhos que darão continuidade ao estudo apresentado nesta dissertação.

Vale acrescentar que os ganhos dos controladores não foram otimizados e por isso os resultados das simulações com o UPQC real apresentam algumas pequenas variações nas formas de onda. Entretanto, os valores escolhidos produzem resultados satisfatórios para o que se desejou investigar. A otimização dos ganhos dos controladores do UPQC não é uma tarefa trivial, e necessitaria de um estudo mais aprofundado.

Quanto ao simulador utilizado, a modelagem no *software* Typhoon HIL foi desafiadora. Devido à complexidade da rede a ser simulada, que tem relação com a quantidade de chaves e conversores de potência, o circuito teve que ser particionado em subcircuitos, o que gerou a necessidade de se incluir *snubbers*. A inserção desses circuitos auxiliares tende a piorar a QEE. Como o projeto visa justamente a manutenção da QEE, isso se torna um obstáculo nas análises, principalmente com relação a harmônicas. Entretanto, esse empecilho não foi impeditivo para se observar a atuação do UPQC dual nas compensações de distúrbios.

Através dos resultados encontrados nas simulações, conclui-se que o UPQC dual é capaz de mitigar harmônicos de corrente provenientes de cargas *shunt* na barra da fonte, além de harmônicos de corrente causados por cargas não-lineares na barra de carga.

Contudo, a inserção dessa nova etapa de controle influencia nas demais compensações, principalmente na tensão da barra de carga.

## 7.2 Trabalhos Futuros

O presente estudo apresentou um aprimoramento no controle do UPQC dual para permitir a compensação de harmônicos de corrente na barra da fonte. Todavia, essa nova funcionalidade atrapalha a correção de distúrbios de tensão na barra de carga. Uma sugestão de continuidade do presente trabalho é na avaliação da relação da impedância dos transformadores série com esse impacto gerado.

Como as análises da implementação da nova funcionalidade foram feitas somente em *software*, a próxima etapa do estudo se dá com a utilização do sistema *Hardware-in-the-Loop* (HIL), embarcando o controle em um microprocessador e conectando ao *hardware* da Typhoon HIL Inc. Esse estudo já está em desenvolvimento e tem o objetivo de gerar um artigo científico.

O circuito analisado foi do tipo trifásico a três fios. Um possível trabalho futuro é implementar a mesma melhoria em um dispositivo conectado em uma rede a quatro fios, isto é, com a presença do condutor neutro.

Uma interessante análise a ser feita é incluir a compensação de tensão na barra da fonte, de forma que o UPQC dual atue como compensador síncrono estático (do inglês, *Static Synchronous Compensator*) (STATCOM) e verificar como o equipamento se comporta na dinâmica de compensação em conjunto com a funcionalidade proposta no presente trabalho. Outro caso é avaliar o impacto da ocorrência de eventos de falta na rede para o sistema de controle do UPQC dual. Até então há poucos artigos publicados que relacionam curto-circuito com o equipamento.

Uma vez que o *software* Typhoon HIL possui suas peculiaridades e uma nova funcionalidade foi implementada, é válido fazer uma modelagem do mesmo sistema analisado de forma a comparar os resultados. Isso também contribuirá para a avaliação do impacto causado pela inserção de blocos de particionamento com circuitos de *snubber* na degradação da QEE da rede elétrica.

A nova funcionalidade implementada no UPQC foi feita através de controladores ressonantes. A partir daí, é intuitivo se pensar em uma modificação da etapa de controle dos sinais de referência para a modulação por largura de pulso (do inglês, *pulse width*

*modulation*) (PWM) de tensão e corrente que são feitos através de controladores do tipo proporcional-integral (PI) em coordenadas  $dq$  para serem executados através de controladores ressonantes, nas próprias coordenadas  $\alpha\beta$ , reduzindo a necessidade da utilização da Transformada de Park. Essa análise já foi iniciada e será transformada em um artigo científico. Além dos controladores ressonantes, outros tipos de controles podem ser explorados.

Conforme foi comentado, os ganhos dos controladores não foram otimizados. Dessa forma, para se obter melhores resultados é possível aprimorar o ajuste desses ganhos. Um exemplo seria definir valores para cada controlador separadamente. No presente trabalho, os controladores para as coordenadas  $d$  e  $q$ , por exemplo, tiveram os mesmos valores de ganhos proporcionais e integrais. Fazer a separação poderia levar a melhores resultados. Outra opção interessante é fazer um ajuste dinâmico dos controladores, através de técnicas conhecidas na literatura.

Nas simulações não foram considerados os transitórios das chaves de acionamento, assim como o controle do UPQC dual também não levou em conta o chaveamento de inicialização da conexão do equipamento na rede elétrica. Esses detalhes podem ser investigados em estudos posteriores.

Por fim, outra proposta para dar seguimento nas análises do UPQC dual é avaliar seu desempenho em um protótipo de média tensão aplicando, por exemplo, em uma microrrede.

# Referências

- [1] INC., T. H. *Home Page*. abr. 2022. Disponível em: <<https://www.typhoon-hil.com/>>.
- [2] AKAGI, H.; WATANABE, E. H.; AREDES, M. *Instantaneous Power Theory and Applications to Power Conditioning*. Hoboken, NJ, USA: John Wiley & Sons, Inc., 2017. ISBN 978-1-119-30718-1 978-1-118-36210-5. Disponível em: <<http://doi.wiley.com/10.1002/9781119307181>>.
- [3] MASOUM, M. A. S.; FUCHS, E. F. *Power quality in power systems and electrical machines*. Second edition. Amsterdam ; Waltham, MA: Academic Press, 2015. ISBN 978-0-12-800782-2.
- [4] R, M. B.; MN, D.; BM, R. Design of shunt hybrid active power filter (SHAPF) to reduce harmonics in AC side due to Non-linear loads. *International Journal of Power Electronics and Drive Systems (IJPEDS)*, v. 9, n. 4, p. 1926–1936, dez. 2018. ISSN 2722-256X. Number: 4. Disponível em: <<https://ijpeds.iaescore.com/index.php/IJPEDS/article/view/11634>>.
- [5] FERNANDES, R. M. *Condicionador Universal de Energia (UPQC) com Estratégia de Controle Invertida*. Tese (Tese de Doutorado) — Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ), Rio de Janeiro, 2008.
- [6] FRANÇA, B. W. *Desenvolvimento de um Condicionador Universal de Energia com Topologia Invertida (iUPQC)*. Tese (Dissertação de Mestrado) — Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ), Rio de Janeiro, 2012.
- [7] SASSO, E.; SOTELO, G.; FERREIRA, A.; WATANABE, E.; AREDES, M.; BARBOSA, P. G. Investigação dos Modelos de Circuitos de Sincronismo Trifásicos Baseados na Teoria das Potências Real e Imaginária Instantâneas (p-PLL e q-PLL). In: . [S.l.: s.n.], 2002.
- [8] FARUQUE, M. D. O.; STRASSER, T.; LAUSS, G.; JALILI-MARANDI, V.; FORSYTH, P.; DUFOUR, C.; DINAHAHI, V.; MONTI, A.; KOTSAMPOPOULOS, P.; MARTINEZ, J. A.; STRUNZ, K.; SAEEDIFARD, M.; WANG, X.; SHEARER, D.; PAOLONE, M. Real-Time Simulation Technologies for Power Systems Design, Testing, and Analysis. *IEEE Power and Energy Technology Systems Journal*, v. 2, n. 2, p. 63–73, jun. 2015. ISSN 2332-7707.
- [9] BÉLANGER, J.; VENNE, P.; PAQUIN, J.-N. The what, where, and why of real-time simulation. *Planet RT*, p. 37–49, jan. 2010.
- [10] MENGHAL, P. M.; LAXMI, A. J. Real time simulation: Recent progress & challenges. In: *Controls and Computation 2012 International Conference on Power, Signals*. [S.l.: s.n.], 2012. p. 1–6.

- [11] INC., T. H. *Typhoon HIL402 Brochure*. 2022. Disponível em: <<https://www.typhoon-hil.com/doc/products/Typhoon-HIL402-brochure.pdf>>.
- [12] AGENCY, I. E. World Energy Outlook 2022. p. 524, out. 2022.
- [13] UNFCCC. *Sharm el-Sheikh Implementation Plan of the 27th United Nations Climate Change conference*. Sharm el-Sheikh, Egito, nov. 2022. 10 p. Disponível em: <[https://unfccc.int/sites/default/files/resource/cop27\\_auv\\_2\\_cover%20decision.pdf](https://unfccc.int/sites/default/files/resource/cop27_auv_2_cover%20decision.pdf)>.
- [14] FERREIRA, T. V. B.; MACHADO, G. V.; REGO, E. E.; ESTEVES, H. B. B. Empresa de Pesquisa Energética – EPE Presidente / President. p. 264, 2022.
- [15] ABSOLAR. *Energia Solar Fotovoltaica no Brasil - Infográfico ABSOLAR nº 49*. nov. 2022. Disponível em: <<https://www.absolar.org.br/mercado/infografico/>>.
- [16] SINGH, B.; AL-HADDAD, K.; CHANDRA, A. A review of active filters for power quality improvement. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, v. 46, n. 5, p. 960–971, out. 1999. ISSN 1557-9948.
- [17] JIYA, I. N.; GOUWS, R. Overview of Power Electronic Switches: A Summary of the Past, State-of-the-Art and Illumination of the Future. *Micromachines*, v. 11, n. 12, p. 1116, dez. 2020. ISSN 2072-666X. Number: 12 Publisher: Multidisciplinary Digital Publishing Institute. Disponível em: <<https://www.mdpi.com/2072-666X/11/12/1116>>.
- [18] FUJITA, H.; AKAGI, H. The unified power quality conditioner: the integration of series- and shunt-active filters. *IEEE Transactions on Power Electronics*, v. 13, n. 2, p. 315–322, mar. 1998. ISSN 1941-0107.
- [19] HAN, B.; BAE, B.; KIM, H.; BAEK, S. Combined operation of unified power-quality conditioner with distributed generation. *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 21, n. 1, p. 330–338, jan. 2006. ISSN 1937-4208.
- [20] KOLHATKAR, Y. Y.; DAS, S. P. Experimental Investigation of a Single-Phase UPQC With Minimum VA Loading. *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 22, n. 1, p. 373–380, jan. 2007. ISSN 1937-4208.
- [21] AREDES, M.; FERNANDES, R. M. A dual topology of Unified Power Quality Conditioner: The iUPQC. In: *2009 13th European Conference on Power Electronics and Applications*. [S.l.: s.n.], 2009. p. 1–10.
- [22] KHADKIKAR, V.; CHANDRA, A. A Novel Structure for Three-Phase Four-Wire Distribution System Utilizing Unified Power Quality Conditioner (UPQC). *IEEE Transactions on Industry Applications*, v. 45, n. 5, p. 1897–1902, set. 2009. ISSN 1939-9367.
- [23] KHADKIKAR, V. Enhancing Electric Power Quality Using UPQC: A Comprehensive Overview. *IEEE Transactions on Power Electronics*, v. 27, n. 5, p. 2284–2297, maio 2012. ISSN 1941-0107.
- [24] KHADEM, M. S. K.; BASU, M.; CONLON, M. F. UPQC for Power Quality Improvement in DG Integrated Smart Grid Network - A Review. *International Journal of Emerging Electric Power Systems*, v. 13, n. 1, maio 2012. ISSN 1553-779X. Disponível em: <<https://www.degruyter.com/document/doi/10.1515/1553-779X.2878/html>>.

- [25] KARANKI, S. B.; GEDDADA, N.; MISHRA, M. K.; KUMAR, B. K. A Modified Three-Phase Four-Wire UPQC Topology With Reduced DC-Link Voltage Rating. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, v. 60, n. 9, p. 3555–3566, set. 2013. ISSN 1557-9948.
- [26] SANTOS, R. J. Millnitz dos; CUNHA, J. C. da; MEZARROBA, M. A Simplified Control Technique for a Dual Unified Power Quality Conditioner. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, v. 61, n. 11, p. 5851–5860, nov. 2014. ISSN 1557-9948.
- [27] FRANÇA, B. W.; SILVA, L. F. da; AREDES, M. A.; AREDES, M. An Improved iUPQC Controller to Provide Additional Grid-Voltage Regulation as a STATCOM. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, v. 62, n. 3, p. 1345–1352, mar. 2015. ISSN 1557-9948.
- [28] KHADEM, S. K.; BASU, M.; CONLON, M. F. Intelligent Islanding and Seamless Reconnection Technique for Microgrid With UPQC. *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, v. 3, n. 2, p. 483–492, jun. 2015. ISSN 2168-6785.
- [29] MODESTO, R. A.; SILVA, S. A. O. da; OLIVEIRA, A. A. de; BACON, V. D. A Versatile Unified Power Quality Conditioner Applied to Three-Phase Four-Wire Distribution Systems Using a Dual Control Strategy. *IEEE Transactions on Power Electronics*, v. 31, n. 8, p. 5503–5514, ago. 2016. ISSN 1941-0107.
- [30] CAMPANHOL, L. B. G.; SILVA, S. A. O. da; OLIVEIRA, A. A. de; BACON, V. D. Single-Stage Three-Phase Grid-Tied PV System With Universal Filtering Capability Applied to DG Systems and AC Microgrids. *IEEE Transactions on Power Electronics*, v. 32, n. 12, p. 9131–9142, dez. 2017. ISSN 1941-0107.
- [31] SILVA, S. A. O. da; NEGRÃO, F. A. Single-Phase to Three-Phase Unified Power Quality Conditioner Applied in Single-Wire Earth Return Electric Power Distribution Grids. *IEEE Transactions on Power Electronics*, v. 33, n. 5, p. 3950–3960, maio 2018. ISSN 1941-0107.
- [32] DEVASSY, S.; SINGH, B. Design and Performance Analysis of Three-Phase Solar PV Integrated UPQC. *IEEE Transactions on Industry Applications*, v. 54, n. 1, p. 73–81, jan. 2018. ISSN 1939-9367.
- [33] SILVA, S. A. O. da; CAMPANHOL, L. B. G.; PELZ, G. M.; SOUZA, V. de. Comparative Performance Analysis Involving a Three-Phase UPQC Operating With Conventional and Dual/Inverted Power-Line Conditioning Strategies. *IEEE Transactions on Power Electronics*, v. 35, n. 11, p. 11652–11665, nov. 2020. ISSN 1941-0107.
- [34] YANG, R. H.; JIN, J. X. Unified Power Quality Conditioner With Advanced Dual Control for Performance Improvement of DFIG-Based Wind Farm. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, v. 12, n. 1, p. 116–126, jan. 2021. ISSN 1949-3037.
- [35] FRANÇA, B. W.; AREDES, M. Comparisons between the UPQC and its dual topology (iUPQC) in dynamic response and steady-state. In: *IECON 2011 - 37th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*. [S.l.: s.n.], 2011. p. 1232–1237.

- [36] NASIRI, A.; EMADI, A. Different topologies for single-phase unified power quality conditioners. In: *38th IAS Annual Meeting on Conference Record of the Industry Applications Conference, 2003*. [S.l.: s.n.], 2003. v. 2, p. 976–981.
- [37] MONTEIRO, L.; AREDES, M.; NETO, J. M. A control strategy for unified power quality conditioner. In: *2003 IEEE International Symposium on Industrial Electronics (Cat. No.03TH8692)*. [S.l.: s.n.], 2003. v. 1, p. 391–396.
- [38] FRANÇA, B. W.; SILVA, L. F. da; AREDES, M. Comparison between alpha-beta and DQ-PI controller applied to IUPQC operation. In: *XI Brazilian Power Electronics Conference*. [S.l.: s.n.], 2011. p. 306–311.
- [39] MONTEIRO, V. S.; COSTA, M. C.; FRANÇA, B. W. Simulação no software Typhoon HIL para equipamentos de eletrônica de potência compostos por múltiplos conversores. *XXIV Congresso Brasileiro de Automática*, p. 8, out. 2022.
- [40] KAGAN, N.; OLIVEIRA, C. C. B. d.; ROBBA, E. J. *Introdução aos Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica*. [S.l.]: Editora Blucher, 2010. Google-Books-ID: cDjWDwAAQBAJ. ISBN 978-85-212-1689-6.
- [41] DUGAN, R. C.; MCGRANAGHAN, M. F.; SANTOSO, S.; BEATY, H. W. *Electrical power systems quality*. Third edition. New York: McGraw Hill, 2012. ISBN 978-0-07-176155-0.
- [42] IEEE Recommended Practice and Requirements for Harmonic Control in Electric Power Systems. *IEEE Std 519-2014 (Revision of IEEE Std 519-1992)*, p. 1–29, jun. 2014.
- [43] BELLO, J.; MALAGON-CARVAJAL, G.; ORDÓÑEZ-PLATA, G.; DUARTE, C. Comparison of results in the estimated Norton equivalent model with measurements within the limits of distortion on IEEE 519 and EN 50160. In: *2019 FISE-IEEE/CIGRE Conference - Living the energy Transition (FISE/CIGRE)*. [S.l.: s.n.], 2019. p. 1–5.
- [44] SAKTHIVEL, K.; DAS, S.; KINI, K. Importance of quality AC power distribution and understanding of EMC standards IEC 61000-3-2, IEC 61000-3-3 and IEC 61000-3-11. In: *8th International Conference on Electromagnetic Interference and Compatibility*. [S.l.: s.n.], 2003. p. 423–430.
- [45] ANEEL. *RESOLUÇÃO NORMATIVA ANEEL Nº 956 (PRODIST)*. 2022. Disponível em: <[https://www2.aneel.gov.br/cedoc/aren2021956\\_2\\_7.pdf](https://www2.aneel.gov.br/cedoc/aren2021956_2_7.pdf)>.
- [46] LOPEZ, R. A. *Qualidade na energia elétrica*. 2. ed. São Paulo: Artliber Editora, 2013.
- [47] MONTEIRO, V. d. S. *Estudo do Perfil de Tensão na Rede Elétrica de Distribuição com a Entrada de Unidades Monofásicas de Geração Fotovoltaica*. Tese (Trabalho de Conclusão de Curso) — Universidade Federal Fluminense, Niterói, 2018.
- [48] PAULILO, G. Capítulo III – Desequilíbrios de tensão. *O Setor Elétrico*, n. 86, p. 42–48, 2013. Disponível em: <[https://www.oseletrico.com.br/wp-content/uploads/2013/03/Ed86\\_fasc\\_qualidade\\_cap3.pdf](https://www.oseletrico.com.br/wp-content/uploads/2013/03/Ed86_fasc_qualidade_cap3.pdf)>.

- [49] MOHAN, N. *Electric machines and drives: a first course*. Hoboken, NJ: Wiley, 2012. OCLC: ocn712124934. ISBN 978-1-118-07481-7.
- [50] MOHAN, N. *Power electronics: a first course*. Hoboken, N.J: Wiley, 2012. OCLC: ocn726822530. ISBN 978-1-118-07480-0.
- [51] DARUSSALAM, R.; RAJANI, A.; ATMAJA, T. D.; JUNAEDI, A.; KUNCORO, M. Study of Harmonic Mitigation Techniques Based on Ranges Level Voltage Refer to IEEE 519-2014. In: *2020 International Conference on Sustainable Energy Engineering and Application (ICSEEA)*. [S.l.: s.n.], 2020. p. 1–8.
- [52] AKAGI, H. Active Harmonic Filters. *Proceedings of the IEEE*, v. 93, n. 12, p. 2128–2141, dez. 2005. ISSN 1558-2256.
- [53] WU, J.-C.; JOU, H.-L.; FENG, Y.-T.; HSU, W.-P.; HUANG, M.-S.; HOU, W.-J. Novel Circuit Topology for Three-Phase Active Power Filter. *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 22, n. 1, p. 444–449, jan. 2007. ISSN 1937-4208.
- [54] BHATTACHARYA, A.; CHAKRABORTY, C.; BHATTACHARYA, S. Parallel-Connected Shunt Hybrid Active Power Filters Operating at Different Switching Frequencies for Improved Performance. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, v. 59, n. 11, p. 4007–4019, nov. 2012. ISSN 1557-9948.
- [55] LIMONGI, L.; BRADASCHIA, F.; AZEVEDO, G.; GENU, L.; FILHO, L. S. Dual hybrid power filter based on a nine-switch inverter. *Electric Power Systems Research*, v. 117, p. 154–162, dez. 2014.
- [56] LIMONGI, L. R.; FILHO, L. R. da S.; GENU, L. G. B.; BRADASCHIA, F.; CAVALCANTI, M. C. Transformerless Hybrid Power Filter Based on a Six-Switch Two-Leg Inverter for Improved Harmonic Compensation Performance. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, v. 62, n. 1, p. 40–51, jan. 2015. ISSN 1557-9948.
- [57] PENG, F.; AKAGI, H.; NABAE, A. A novel harmonic power filter. In: *PESC '88 Record., 19th Annual IEEE Power Electronics Specialists Conference*. [S.l.: s.n.], 1988. p. 1151–1159 vol.2.
- [58] AREDES, M.; FERNANDES, R. M. A unified power quality conditioner with voltage SAG/SWELL compensation capability. In: *2009 Brazilian Power Electronics Conference*. [S.l.: s.n.], 2009. p. 218–224.
- [59] AREDES, M.; HEUMANN, K.; WATANABE, E. An universal active power line conditioner. *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 13, n. 2, p. 545–551, abr. 1998. ISSN 1937-4208.
- [60] DEVASSY, S.; SINGH, B. Discrete SOGI based control of solar photovoltaic integrated unified power quality conditioner. In: *2016 National Power Systems Conference (NPSC)*. [S.l.: s.n.], 2016. p. 1–6.
- [61] CORREA, J.; CHAKRABORTY, S.; SIMOES, M.; FARRET, F. A single phase high frequency AC microgrid with an unified power quality conditioner. In: *38th IAS Annual Meeting on Conference Record of the Industry Applications Conference, 2003*. [S.l.: s.n.], 2003. v. 2, p. 956–962.

- [62] NEGRÃO, F. A.; SILVA, S. A. O. da; MODESTO, R. A. A single-phase to three-phase UPQC topology with universal filtering capabilities. In: *2015 IEEE 13th Brazilian Power Electronics Conference and 1st Southern Power Electronics Conference (COBEP/SPEC)*. [S.l.: s.n.], 2015. p. 1–6.
- [63] SILVA, S. A. O. da; NEGRÃO, F. A. Condicionador Unificado de Qualidade de Energia Monofásico-Trifásico Aplicado em Redes de Distribuição de Energia Elétrica MRT. *Eletrônica de Potência*, v. 23, p. 8–19, 2018. Disponível em: <<https://sobraep.org.br/site/uploads/2018/06/rvol23no1p11.pdf>>.
- [64] AL-SHAMMA'A, A. A.; ADDOWEESH, K. E. Dual Unified Power Quality Conditioner Based on Open-Winding Transformers and Series Converters for Grid-Connected PV Systems. In: *2017 9th IEEE-GCC Conference and Exhibition (GCCCE)*. [S.l.: s.n.], 2017. p. 1–6.
- [65] PADIYAR, K. R. *FACTS controllers in power transmission and distribution*. Tunbridge Wells: Anshan, 2009. OCLC: 730232980. ISBN 978-1-84829-010-5.
- [66] UCHÔA, J. I. L.; LIMA, F. K. A.; BRANCO, C. G. C. FACTS applied to fixed speed wind turbines to meet grid code requirements. In: *2015 IEEE 24th International Symposium on Industrial Electronics (ISIE)*. [S.l.: s.n.], 2015. p. 1474–1479.
- [67] KHADKIKAR, V.; CHANDRA, A.; BARRY, A.; NGUYEN, T. Steady state power flow analysis of unified power quality conditioner (UPQC). In: *2005 International Conference on Industrial Electronics and Control Applications*. [S.l.: s.n.], 2005. p. 6.
- [68] KHADKIKAR, V.; CHANDRA, A.; BARRY, A. O.; NGUYEN, T. D. Conceptual Study of Unified Power Quality Conditioner (UPQC). In: *2006 IEEE International Symposium on Industrial Electronics*. [S.l.: s.n.], 2006. v. 2, p. 1088–1093.
- [69] FRANÇA, B. W.; ROLIM, L. G. B.; AREDES, M. Frequency switching analysis of an iUPQC with hardware-in-the-loop development tool. In: *Proceedings of the 2011 14th European Conference on Power Electronics and Applications*. [S.l.: s.n.], 2011. p. 1–6.
- [70] FAGUNDES, S. M.; MEZAROBA, M. Reactive power flow control of a Dual Unified Power Quality Conditioner. In: *IECON 2016 - 42nd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*. [S.l.: s.n.], 2016. p. 1156–1161.
- [71] SILVA, S. A. O. d.; CAMPANHOL, L. B. G.; SOUZA, V. d. Dynamic Performance Evaluation of a dual UPQC Operating Under Power Quality Disturbances. In: *PCIM Europe 2018; International Exhibition and Conference for Power Electronics, Intelligent Motion, Renewable Energy and Energy Management*. [S.l.: s.n.], 2018. p. 1–8.
- [72] STANGLER, E. V.; NEVES, F. A. S.; BRADASCHIA, F.; MEZAROBA, M.; ZIMANN, F. J.; BATSCHAUER, A. L. Implementation of a iUPQC control scheme for ensuring an improved compensation performance. In: *2019 IEEE 15th Brazilian Power Electronics Conference and 5th IEEE Southern Power Electronics Conference (COBEP/SPEC)*. [S.l.: s.n.], 2019. p. 1–7.

- [73] SANTOS, R. J. M. dos; MEZARROBA, M.; CUNHA, J. C. da. A dual unified power quality conditioner using a simplified control technique. In: *XI Brazilian Power Electronics Conference*. [S.l.: s.n.], 2011. p. 486–493.
- [74] AKAGI, H.; KANAZAWA, Y.; FUJITA, K.; NABAE, A. Generalized theory of instantaneous reactive power and its application. *Electrical Engineering in Japan*, v. 103, n. 4, p. 58–66, jul. 1983. ISSN 04247760, 15206416. Disponível em: <<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/eej.4391030409>>.
- [75] AKAGI, H.; KANAZAWA, Y.; NABAE, A. Instantaneous Reactive Power Compensators Comprising Switching Devices without Energy Storage Components. *IEEE Transactions on Industry Applications*, IA-20, n. 3, p. 625–630, maio 1984. ISSN 1939-9367.
- [76] WATANABE, E.; STEPHAN, R.; AREDES, M. New concepts of instantaneous active and reactive powers in electrical systems with generic loads. *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 8, n. 2, p. 697–703, abr. 1993. ISSN 08858977. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/document/216877/>>.
- [77] CLARKE, E. *Circuit Analysis of A-C Power Systems, Vol. I - Symmetrical and Related Components*. New York: John Wiley and Sons, Inc., 1943.
- [78] ROLIM, L. G. B.; COSTA, D. Rodrigues da; AREDES, M. Analysis and Software Implementation of a Robust Synchronizing PLL Circuit Based on the pq Theory. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, v. 53, n. 6, p. 1919–1926, dez. 2006. ISSN 1557-9948.
- [79] KARIMI-GHARTEMANI, M. A novel three-phase magnitude-phase-locked loop system. *IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers*, v. 53, n. 8, p. 1792–1802, ago. 2006. ISSN 1558-0806.
- [80] RODRÍGUEZ, P.; TEODORESCU, R.; CANDELA, I.; TIMBUS, A. V.; LISERRE, M.; BLAABJERG, F. New positive-sequence voltage detector for grid synchronization of power converters under faulty grid conditions. In: *2006 37th IEEE Power Electronics Specialists Conference*. [S.l.: s.n.], 2006. p. 1–7.
- [81] AREDES, M.; AKAGI, H.; WATANABE, E. H.; SALGADO, E. V.; ENCARNACÃO, L. F. Comparisons Between the p-q and p-q-r Theories in Three-Phase Four-Wire Systems. *IEEE Transactions on Power Electronics*, v. 24, n. 4, p. 924–933, abr. 2009. ISSN 1941-0107.
- [82] NETO, J. A. M.; LOVISOLO, L.; FRANÇA, B. W.; AREDES, M. Robust positive-sequence detector algorithm. In: *2009 35th Annual Conference of IEEE Industrial Electronics*. [S.l.: s.n.], 2009. p. 788–793.
- [83] SERRA, F. M.; FORCHETTI, D. G.; ANGELO, C. H. D. Comparison of positive sequence detectors for shunt active filter control. In: *2010 9th IEEE/IAS International Conference on Industry Applications - INDUSCON 2010*. [S.l.: s.n.], 2010. p. 1–6.
- [84] JAMARANI, M.; ABRISHAMIFAR, A.; PICHAN, M.; FAZELI, M. Evaluation of different positive sequence detection structures applied to grid-connected systems. In:

- The 5th Annual International Power Electronics, Drive Systems and Technologies Conference (PEDSTC 2014)*. [S.l.: s.n.], 2014. p. 126–130.
- [85] PARK, R. H. Two-reaction theory of synchronous machines generalized method of analysis-part I. *Transactions of the American Institute of Electrical Engineers*, v. 48, n. 3, p. 716–727, jul. 1929. ISSN 0096-3860. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/document/5055275/>>.
- [86] INC., T. H. *Typhoon HIL Software Manual*. 2022. Disponível em: <[https://www.typhoon-hil.com/documentation/typhoon-hil-software-manual/topics/software\\_manual\\_introduction.html](https://www.typhoon-hil.com/documentation/typhoon-hil-software-manual/topics/software_manual_introduction.html)>.
- [87] ALEKSANDROV, B.; ACAD, C.; RUMENIN, B.; MAGELE, C.; Stoyanov; SO-TIROVA, B.; Ritchie; Toepfer; BRAUER, H.; HRISTOV, M.; Repetto; ANTCHEV, B.; MIHAILOV, B.; ROMANSKY, B.; VASILEV, B.; TANAKA, J.; VALCHEV, V.; SHELYAGIN, V.; ACAD, U.; ANDONOVA, A. Review of hardware-in-the-loop -a hundred years progress in the pseudo-real testing. v. 54, p. 70–84, dez. 2019.
- [88] TECHNOLOGIES, O.-R. *Real-Time simulation Real-Time Solutions OPAL-RT*. 2022. Disponível em: <<https://www.opal-rt.com/home/>>.
- [89] AZIMIAN, B.; ADHIKARI, P. M.; VANFRETTI, L.; HOOSHYAR, H. Cross-Platform Comparison of Standard Power System Components used in Real Time Simulation. In: *2019 7th Workshop on Modeling and Simulation of Cyber-Physical Energy Systems (MSCPES)*. [S.l.: s.n.], 2019. p. 1–6.
- [90] JIA, X.; ADHIKARI, P. M.; VANFRETTI, L. Real-Time Simulation Models for Photovoltaic Cells and Arrays in Opal-RT and Typhoon-HIL. In: *2020 IEEE Power Energy Society General Meeting (PESGM)*. [S.l.: s.n.], 2020. p. 1–5.
- [91] JIA, X.; ADHIKARI, P. M.; VANFRETTI, L. Cross-Platform Real-Time Simulation Models for Li-ion Batteries in Opal-RT and Typhoon-HIL. In: *2021 IEEE Texas Power and Energy Conference (TPEC)*. [S.l.: s.n.], 2021. p. 1–6.
- [92] REN, W.; STEURER, M.; BALDWIN, T. L. Improve the Stability and the Accuracy of Power Hardware-in-the-Loop Simulation by Selecting Appropriate Interface Algorithms. *IEEE Transactions on Industry Applications*, v. 44, n. 4, p. 1286–1294, jul. 2008. ISSN 1939-9367.
- [93] CHANG, H. *Power Electronics Control Design & Testing in the 21st century*. 2016. Disponível em: <<https://info.typhoon-hil.com/blog/power-electronics-control-design-and-testing-in-the-21st-century>>.
- [94] WU, X.; MONTI, A. Methods for partitioning the system and performance evaluation in power-hardware-in-the-loop simulations. Part I. In: *31st Annual Conference of IEEE Industrial Electronics Society, 2005. IECON 2005*. [S.l.: s.n.], 2005. p. 6.
- [95] DARGAHI, M.; GHOSH, A.; LEDWICH, G.; ZARE, F. Studies in power hardware in the loop (PHIL) simulation using real-time digital simulator (RTDS). In: *2012 IEEE International Conference on Power Electronics, Drives and Energy Systems (PEDES)*. [S.l.: s.n.], 2012. p. 1–6.

- [96] LI, F.; WANG, Y.; WU, F.; HUANG, Y.; LIU, Y.; ZHANG, X.; MA, M. Review of Real-time Simulation of Power Electronics. *Journal of Modern Power Systems and Clean Energy*, v. 8, n. 4, p. 796–808, jul. 2020. ISSN 2196-5420.
- [97] FRANÇA, B. W.; AREDES, M.; SILVA, L. F. d.; GONTIJO, G. F.; TRICARICO, T. C.; POSADA, J. An Enhanced Shunt Active Filter Based on Synchronverter Concept. *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, v. 10, n. 1, p. 494–505, fev. 2022. ISSN 2168-6785.
- [98] TEODORESCU, R.; BLAABJERG, F.; LISERRE, M.; LOH, P. C. Proportional-resonant controllers and filters for grid-connected voltage-source converters. *IEEE Proceedings - Electric Power Applications*, v. 153, n. 5, p. 750–762, set. 2006. ISSN 1359-7043. Publisher: IET Digital Library. Disponível em: <[https://digital-library.theiet.org/content/journals/10.1049/ip-epa\\_20060008](https://digital-library.theiet.org/content/journals/10.1049/ip-epa_20060008)>.
- [99] MATHWORKS. *MATLAB - MathWorks*. 2022. Disponível em: <<https://www.mathworks.com/products/matlab.html>>.
- [100] EPRI. *OpenDSS*. 2022. Disponível em: <<https://www.epri.com/pages/sa/opendss>>.
- [101] SANDIA. *Xyce*. 2022. Disponível em: <<https://xyce.sandia.gov/>>.

## APÊNDICE A – Typhoon HIL

A empresa Typhoon HIL *Incorporated* (Inc.) foi fundada em 2008 com objetivo de criar produtos para simulações de circuitos elétricos em tempo real com fácil uso para os usuários e com alto desempenho. A companhia possui *software* e *hardwares* próprios, com integração para microcontroladores da Texas Instruments, para a formação do sistema *Hardware-in-the-Loop* (HIL). O destaque fica por conta da compilação, que ocorre na casa de segundos, da amostragem de entradas digitais, com resolução de 3,5 ns, e da simulação, com passo de tempo que pode chegar a 200 ns [1].

Aqui serão apresentados, na Seção A.1, os principais detalhes encontrados no *software* da empresa. Na Seção A.2, os principais blocos de elementos utilizados na modelagem são mostrados. Por fim, na Seção A.3, as imagens dos circuitos utilizados no presente trabalho e modelados no *software* são expostos.

### A.1 Software

O *software* da Typhoon HIL Inc., referenciado neste trabalho somente como *software* Typhoon HIL ou simplesmente Typhoon HIL, possui diversas ferramentas, conforme mostra a Figura A.1, para o usuário trabalhar e analisar sua modelagem com uma gama de opções, sendo que as três principais utilizadas no presente estudo são: o *Schematic Editor*, o *HIL SCADA* e o *Signal Analyzer*.

O programa está em constante aprimoramento, tendo atualizações a cada três meses, em média. Seu foco é realizar simulações para as áreas de eletrônica de potência, microrredes, e redes de distribuição, mas também é útil para outras áreas da engenharia elétrica. Sua linguagem básica de programação é o Python, mas em determinados recursos as linguagens C e C++ são utilizadas [1]. Além disso, é possível integrar o Typhoon HIL com outros *softwares*, como por exemplo o MATLAB [99], o OpenDSS [100] e o XYCE [101].

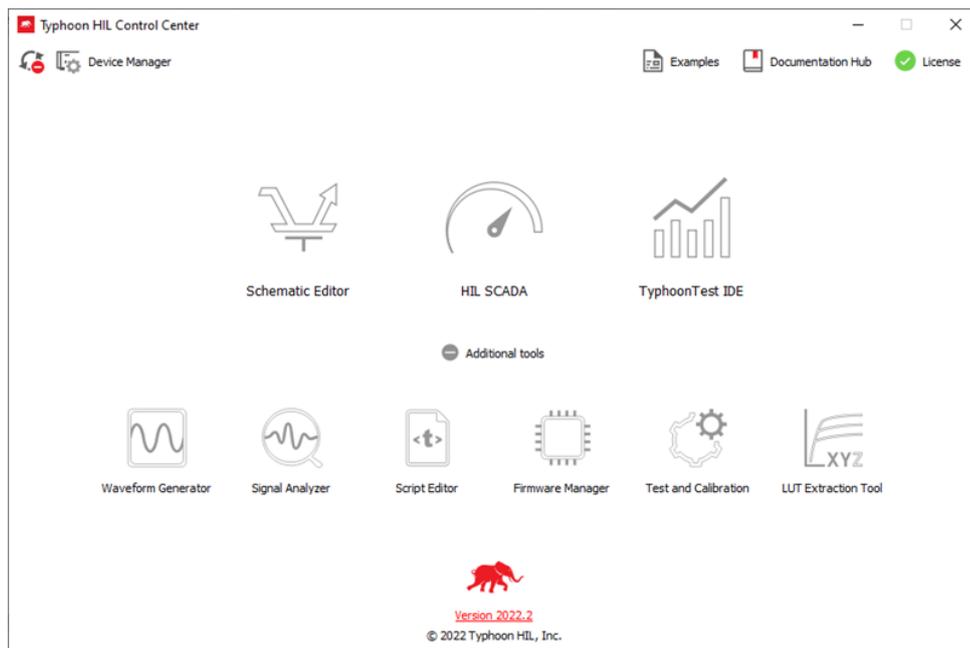


Figura A.1: Painel inicial do *software* Typhoon HIL [11].

### A.1.1 Editor

O *Schematic Editor* é onde são criados os circuitos. Sua área de trabalho é apresentada na Figura A.2. A modelagem é feita através de blocos, que podem ser relacionados a um elemento elétrico ou a um grupo de elementos. O usuário também pode criar seus próprios blocos, baseados nos mais de 370 presentes na biblioteca principal, livre para qualquer usuário do programa, além de suas próprias bibliotecas. Vale observar que há dois blocos onde é possível inserir um programa em linguagem C e C++ para executarem funções inexistentes em outros blocos.

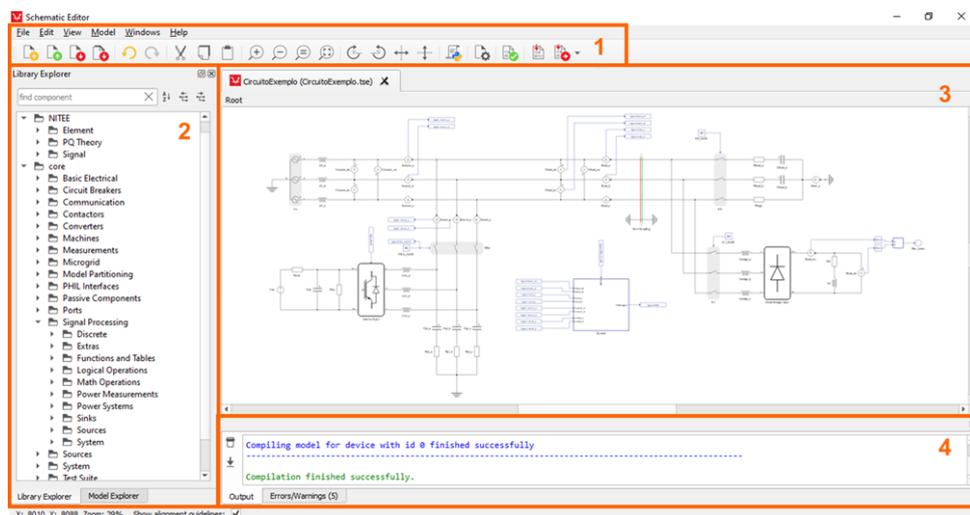
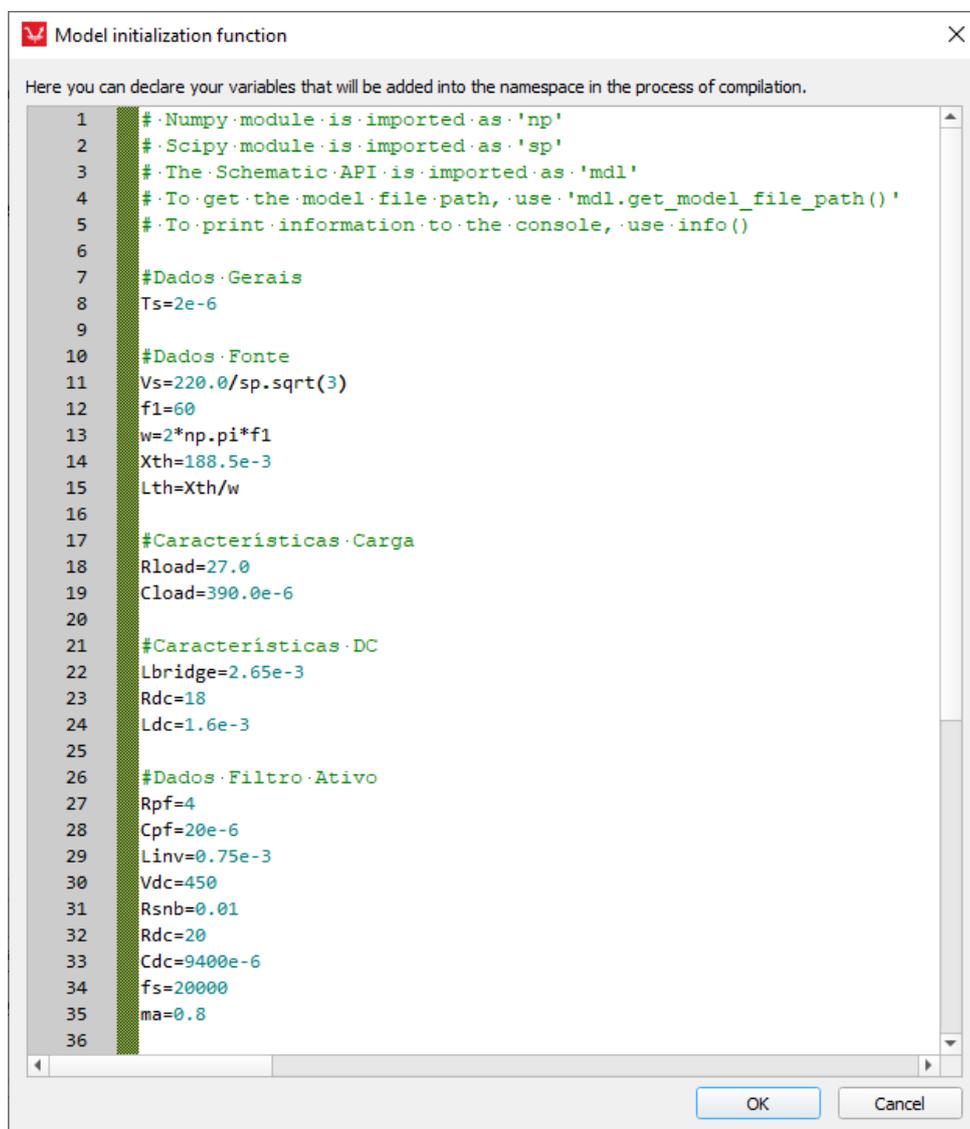


Figura A.2: Área de trabalho do *Schematic Editor* [11].

No retângulo indicado pelo número 1, na Figura A.2, estão as ferramentas principais, como abrir arquivo, salvar, rotacionar, copiar e colar, além de botões para editar configurações e compilar o sistema modelado. Uma das opções que o usuário tem ao fazer a modelagem é declarar variáveis através de um painel de programação, exemplificado na Figura A.3, que podem ser utilizadas nos blocos de elementos em vez de valores numéricos. Também é possível realizar cálculos e executar funções, utilizando a linguagem Python. Os blocos de elementos são acessados nas bibliotecas contidas no retângulo 2 da Figura A.2. A janela onde o usuário cria os circuitos é a indicada pelo número 3. E as informações relacionadas à compilação, o que inclui avisos de erros, aparecem no espaço demarcado pelo retângulo 4.



```
1 # Numpy module is imported as 'np'
2 # Scipy module is imported as 'sp'
3 # The Schematic API is imported as 'mdl'
4 # To get the model file path, use 'mdl.get_model_file_path()'
5 # To print information to the console, use 'info()'
6
7 #Dados Gerais
8 Ts=2e-6
9
10 #Dados Fonte
11 Vs=220.0/sp.sqrt(3)
12 f1=60
13 w=2*np.pi*f1
14 Xth=188.5e-3
15 Lth=Xth/w
16
17 #Características Carga
18 Rload=27.0
19 Cload=390.0e-6
20
21 #Características DC
22 Lbridge=2.65e-3
23 Rdc=18
24 Ldc=1.6e-3
25
26 #Dados Filtro Ativo
27 Rpf=4
28 Cpf=20e-6
29 Linv=0.75e-3
30 Vdc=450
31 Rsnb=0.01
32 Rdc=20
33 Cdc=9400e-6
34 fs=20000
35 ma=0.8
36
```

Figura A.3: Painel para declaração de variáveis [11].

### A.1.2 Painel Supervisório

O *HIL SCADA*, cuja área de trabalho é mostrada na Figura A.4, como o próprio nome sugere, é onde o usuário pode criar um painel supervisorio para controlar e observar variáveis do sistema modelado no *Schematic Editor*, seja para simulações em HIL ou somente no *software*. Semelhante ao painel do editor, o retângulo indicado pelo número 1 é a barra de ferramentas principais do *HIL SCADA*. No retângulo 2 fica a biblioteca de blocos para comandos e monitoramento de variáveis da planta modelada. Na janela do retângulo 3 é onde é criado o sistema supervisorio. Em 4, é possível alterar configurações de controles sem a necessidade de inserir blocos para essa funcionalidade no painel supervisorio. Em 5 fica o histórico de processos executados no *HIL SCADA* e em 6 fica o histórico de ações realizadas pelo usuário ao longo da modelagem do painel. Informações sobre erros relacionados à execução e à amostragem de dados da simulação aparecem no retângulo 7, bem como o tempo contínuo e o tipo de simulação (virtual ou tempo real).

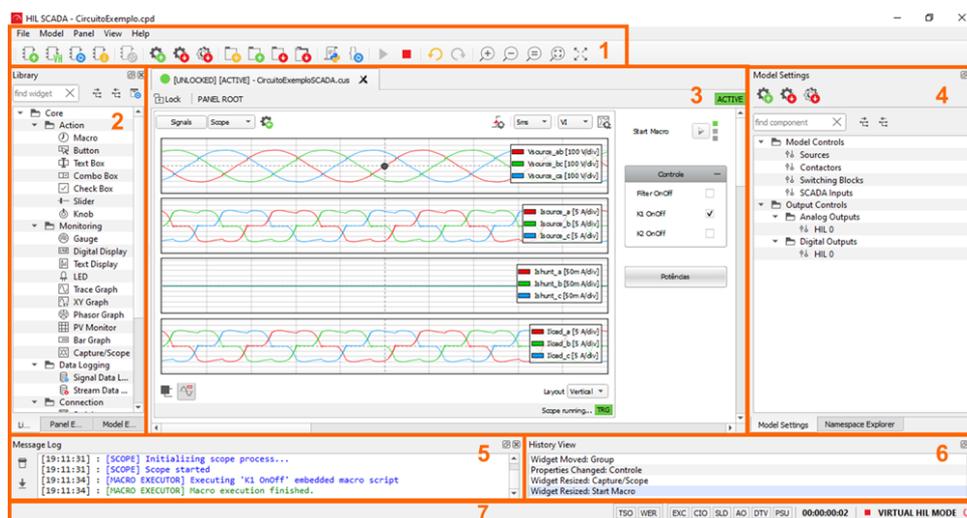


Figura A.4: Área de trabalho do *HIL SCADA* [11].

### A.1.3 Analisador de Sinais

Muito útil para fazer análises de formas de onda, o *Signal Analyzer* é uma ferramenta que geralmente é usada após uma captura de formas de onda observadas no osciloscópio presente no painel do *HIL SCADA*. Nela é possível salvar e carregar arquivos com valores separados por vírgula (CSV), permitindo ao usuário exportar dados para outros programas computacionais.

### A.1.4 Outras ferramentas

O *software* conta ainda com uma ferramenta para programação de testes automáticos (*Typhoon Test IDE*), um meio de criar arquivos de formas de onda que podem ser utilizadas em fontes de tensão e corrente ou em blocos de sistema fotovoltaico, chamado de *Waveform Generator*. Há também uma plataforma para criar e testar códigos em Python (*Script Editor*). O *Firmware Manager* tem o objetivo de fazer a atualização de *firmware* do *hardware* conectado ao computador. Outra ferramenta específica para o *hardware* é o *Test and Calibration*, onde é possível fazer a calibração do *hardware*, utilizando uma placa eletrônica especial, da própria empresa. E a nona e última ferramenta, o *LUT Extraction Tool*, é designada para gerenciar tabelas do tipo *Look-Up-Tables*. Mais informações podem ser encontradas em [11].

## A.2 Elementos utilizados

Essa seção apresenta brevemente os elementos utilizados na modelagem das redes simuladas. Vale observar que os blocos *Core Coupling* não serão abordados aqui pelo fato de que já foram apresentados no Capítulo 4.

### A.2.1 Fontes de tensão e corrente

Na Figura A.5 é possível ver o elemento que representa uma fonte de tensão trifásica, onde se parametriza o valor eficaz de fase, a frequência e o ângulo de referência da fase A, assim como os blocos de tensão e corrente que são controlados por sinais.

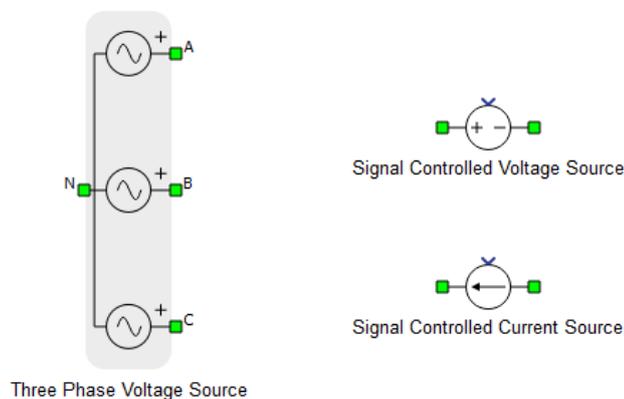


Figura A.5: Blocos de fontes de tensão e corrente [11].

### A.2.2 Elementos passivos

Os elementos passivos utilizados nas simulações foram resistores, indutores e capacitores e podem ser vistos na Figura A.6.

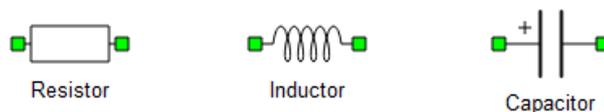


Figura A.6: Blocos de elementos passivos [11].

### A.2.3 Conversores de potência

Os conversores de potência utilizados no presente trabalho foram o retificador trifásico não controlado, como pode ser visto na Figura A.7, representado por uma ponte a diodos, mostrada na Figura A.8, e o inversor trifásico, como ilustra a Figura A.9. Esse elemento possui a topologia apresentada pela Figura A.10 e o usuário deve escolher o tipo da modulação entre: sinal digital proveniente dos pinos do *hardware* para cada chave; sinal digital proveniente dos pinos do *hardware* para cada perna de semicondutores; modulação interna ao bloco, onde o usuário define parâmetros como frequência de chaveamento, defasagem do sinal da onda portadora, amplitude da onda portadora e tempo morto; ou modulação externa ao bloco proveniente de um sistema de controle modelado no próprio *software*.

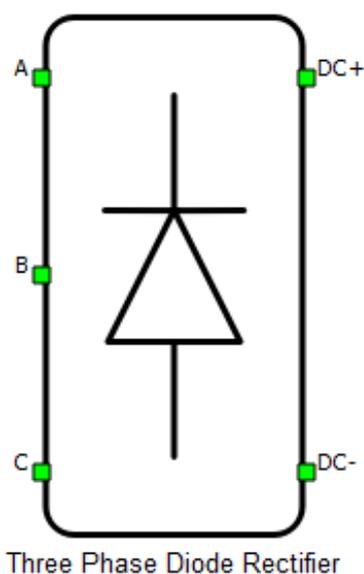


Figura A.7: Bloco de retificador trifásico [11].

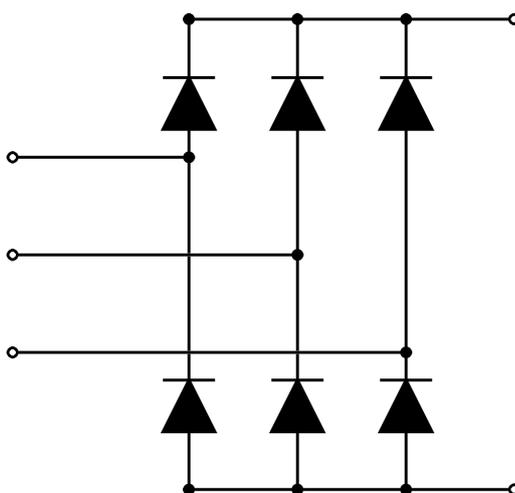


Figura A.8: Topologia de retificador trifásico [11].

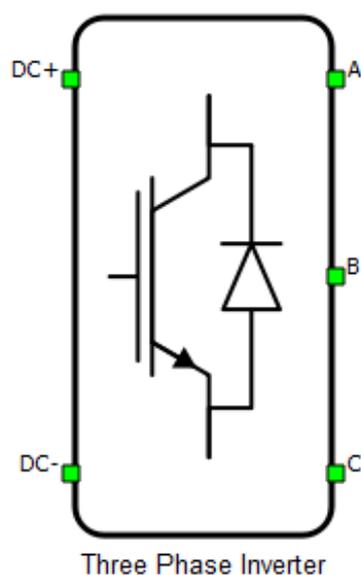


Figura A.9: Bloco de inversor trifásico [11].

#### A.2.4 Transformadores

O bloco de transformador monofásico pode ser visto na Figura A.11. Nele é necessário definir parâmetros, em grandezas do Sistema Internacional de Unidades (SI) ou em valores por unidade (pu), como tensão, resistência e indutância do lado primário e do lado secundário. Também é possível adotar a corrente inicial dos indutores. Com relação ao núcleo do transformador, deve-se escolher entre linear, não-linear ou desprezível. No modo linear, os valores de resistência do núcleo e indutância de magnetização devem ser inseridos. Esse elemento é representado por um circuito como o da Figura A.12

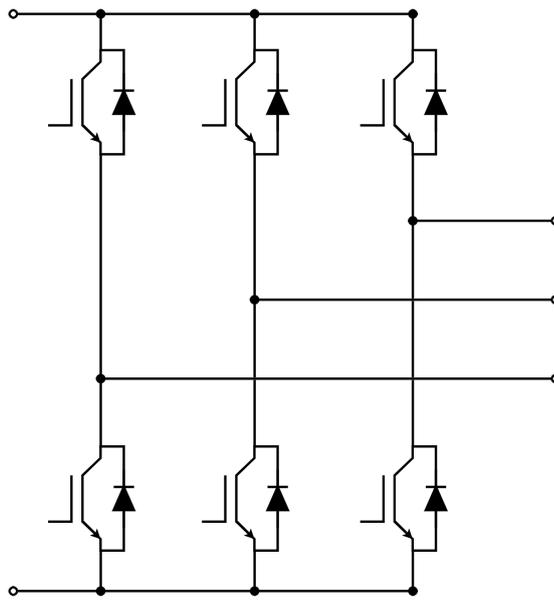


Figura A.10: Topologia de inversor trifásico [11].

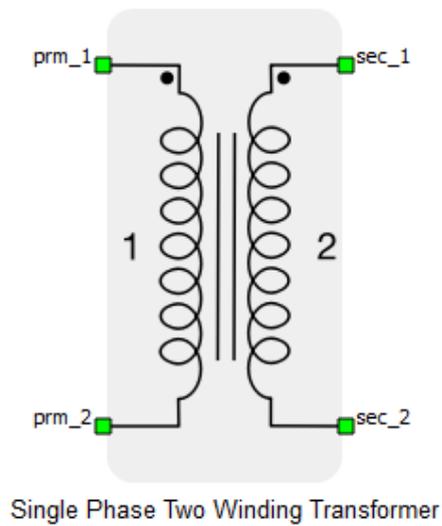


Figura A.11: Bloco de transformador [11].

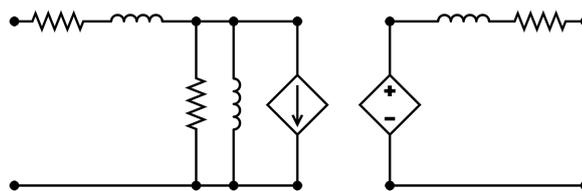


Figura A.12: Circuito do bloco de transformador [11].

### A.2.5 Medidores

Para fazer as medições de tensão e corrente na rede modelada foram utilizados os blocos de voltímetro e amperímetro, apresentados na Figura A.13.

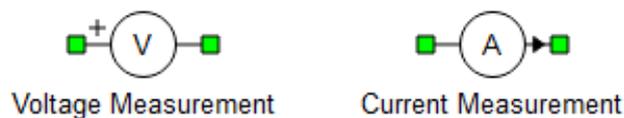


Figura A.13: Blocos de medidores [11].

### A.2.6 Outros elementos

Além dos blocos apresentados anteriormente, também foram usados blocos que representam chaves ideais, conforme ilustra a Figura A.14, podendo ser interpretados como contatores ou disjuntores.

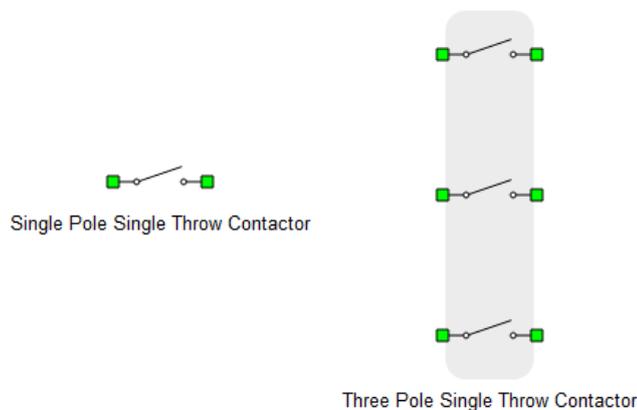


Figura A.14: Blocos de contatores [11].

Também foi criado um bloco utilizando um elemento de fonte de tensão onde é possível controlar separadamente o valor eficaz, a frequência e a fase. Esse elemento pode ser visto na Figura A.15. Ele é utilizado no bloco denominado “Imbalance Source” das Figuras A.16, A.17, A.18 e A.19 com o objetivo de representar um desequilíbrio na tensão da fonte de alimentação da rede, invertendo-se os ângulos das fases B e C. A porcentagem desse desequilíbrio é definida pelo usuário no sistema supervisor do programa (*HIL SCADA*).

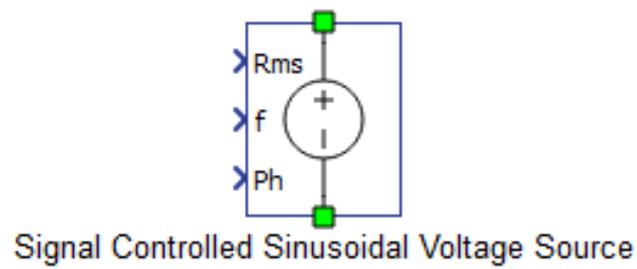


Figura A.15: Bloco de fonte de tensão senoidal controlada por sinal [11].

### A.3 Circuitos modelados

As Figuras A.16, A.17, A.18 e A.19 apresentam os circuitos modelados no *software* Typhoon HIL que foram utilizados nas simulações do presente trabalho, respectivamente para as Seções 5.1, 5.2 e 5.3 e para o Capítulo 6.

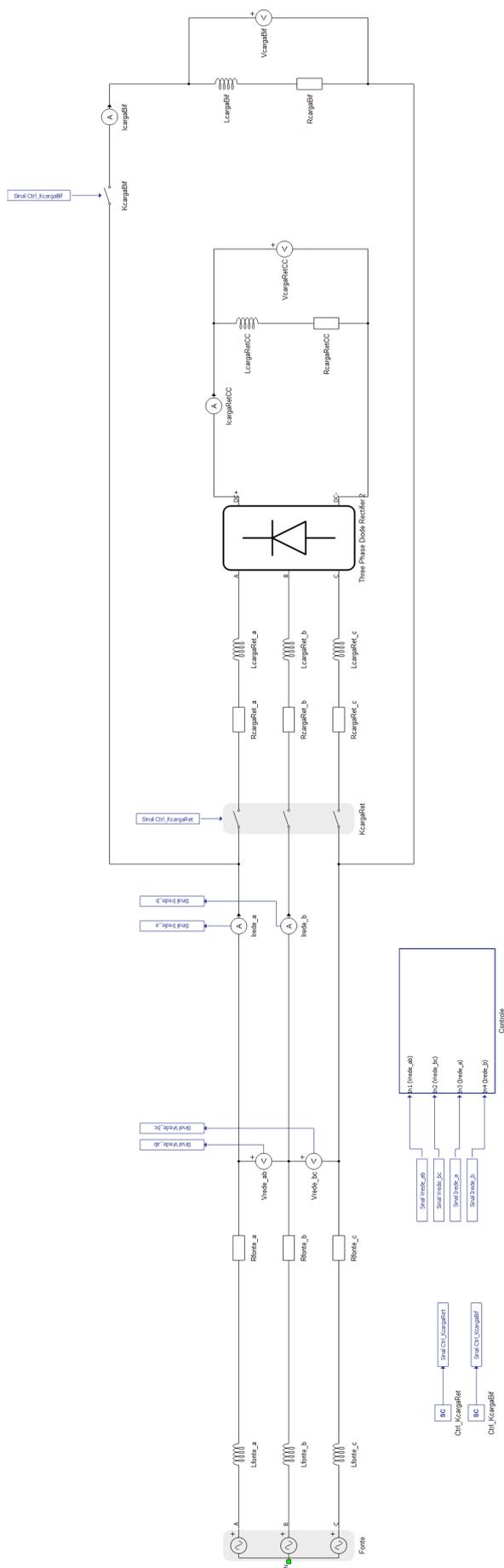


Figura A.16: Rede modelada sem UPQC no *software* Typhoon HIL.

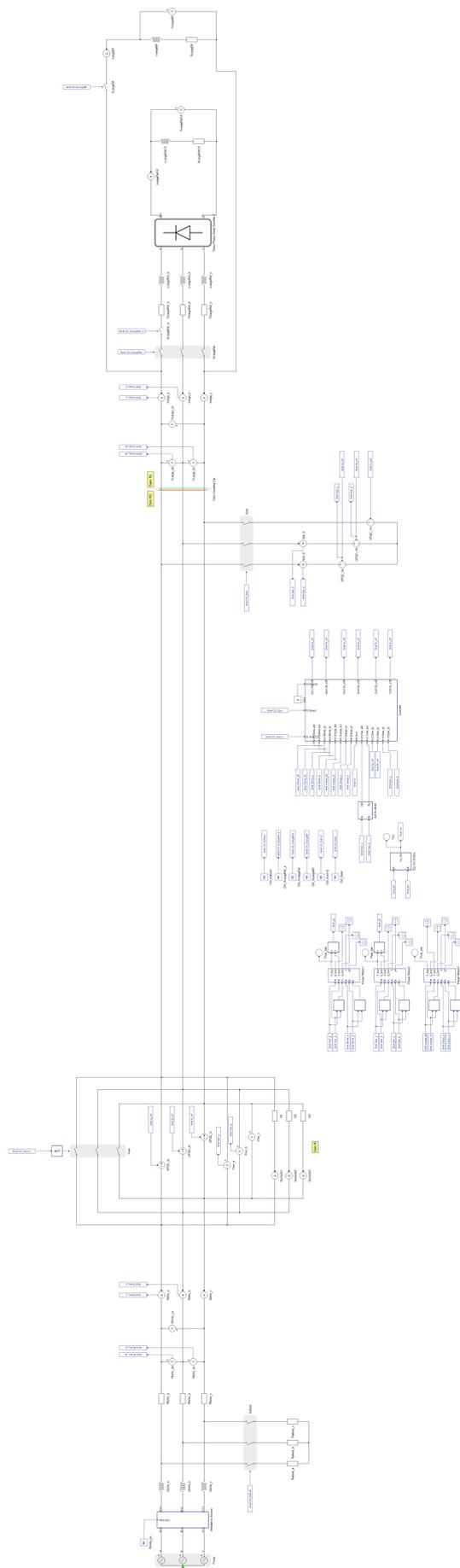


Figura A.17: Rede modelada com UPQC dual idealizado no *software* Typhoon HIL.

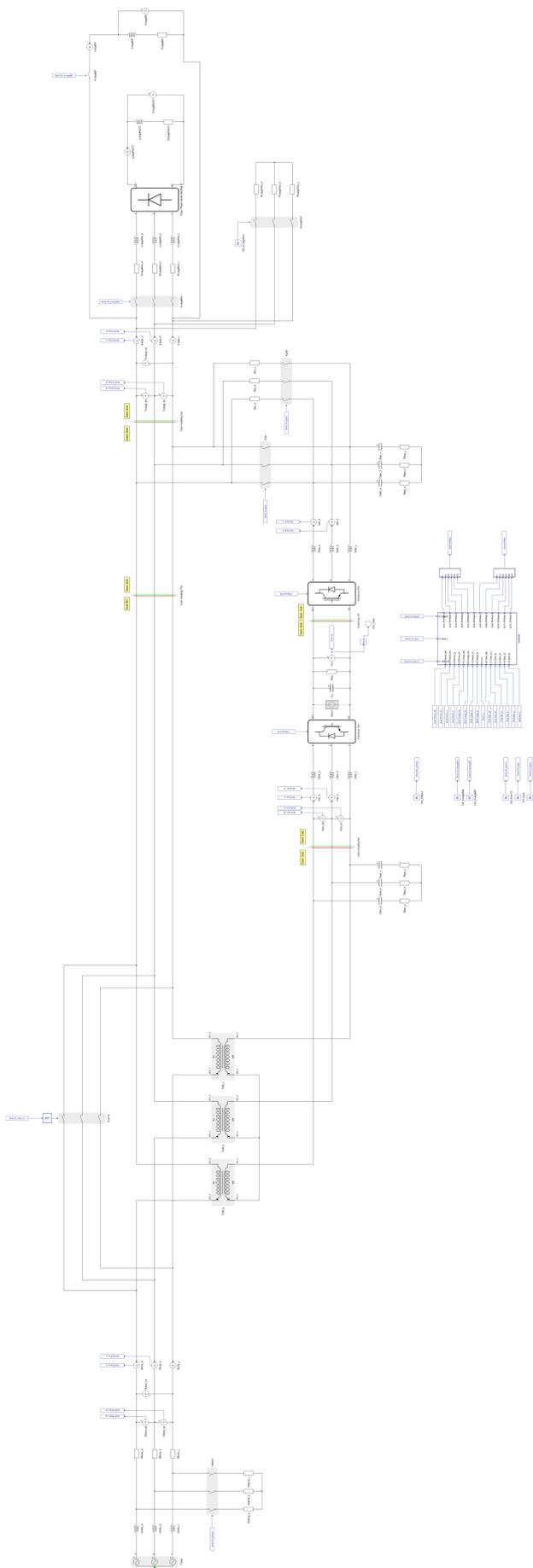


Figura A.18: Rede modelada com UPQC dual no *software* Typhoon HIL.

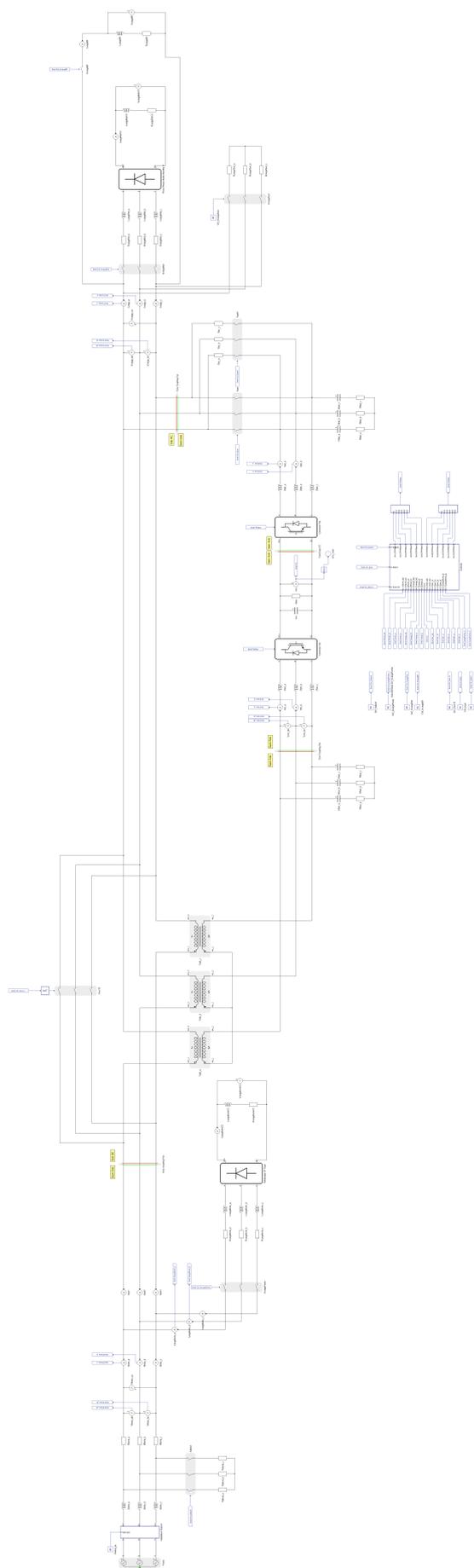


Figura A.19: Rede modelada com UPQC dual no *software* Typhoon HIL para a nova compensação.