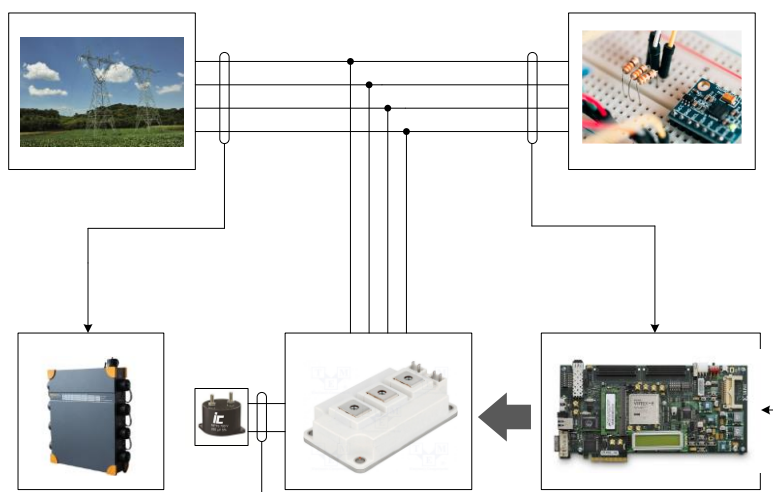




INSTITUTO SUPERIOR DE ENGENHARIA DE LISBOA
Departamento de Engenharia Eletrotécnica de Energia e Automação



Filtro ativo de potência aplicado à rede elétrica a quatro condutores

DARCY GONÇALVES D'APRESENTAÇÃO
(Licenciada em Engenharia Eletrotécnica)

Trabalho Final de Mestrado para obtenção de grau de Mestre em Engenharia
Eletrotécnica Ramo: Energia

Orientadores:

Doutor Ricardo Jorge Ferreira Luís
Doutor Paulo José Duarte Landeiro Gambôa

Júri:

Presidente: Doutor Filipe André de Sousa Figueira Barata

Vogais:

Doutor Miguel Cabral Ferreira Chaves
Doutor Paulo José Duarte Landeiro Gambôa

Dezembro 2023

Dissertação realizada sob orientação de:
Professor Ricardo Jorge Ferreira Luís
Professor Adjunto do Departamento
De Engenharia Eletrotécnica de Energia e Automação

Dissertação realizada sob orientação de:
Professor Paulo José Duarte Landeiro Gambôa
Professor Adjunto do Departamento
De Engenharia Eletrotécnica de Energia e Automação

RESUMO

Este trabalho apresenta o estudo e implementação de um filtro ativo de potência paralelo trifásico aplicado à rede elétrica a quatro condutores, com o objetivo de mitigar problemas de qualidade de energia elétrica associados à distorção harmônica de corrente.

A determinação das referências de corrente de compensação do filtro é realizada através da teoria das potências instantâneas e o controle da corrente do inversor de tensão de quatro braços é efetuada através da técnica de controle vetorial não linear das correntes trifásicas. Os detalhes das técnicas de controle são igualmente apresentados.

Os resultados obtidos com a metodologia empregada foram adquiridos através de simulações numéricas no Simulink® e experimentais utilizando um protótipo de 10kVA implementado no Laboratório de Máquinas Elétricas. A implementação do filtro ativo de potência paralelo possibilitou a redução do conteúdo harmônico das cargas não lineares (monofásicas ou trifásicas) utilizadas nos testes, bem como elevou o fator potência para valores praticamente unitários, reduziu a corrente no condutor neutro e o desequilíbrio das correntes.

PALAVRAS-CHAVE

Teoria de potências instantâneas; Teoria PQ; Filtro ativo de potência paralelo; Filtro ativo paralelo; Inversor de tensão a quatro condutores; Qualidade de energia elétrica; Normalização.

ABSTRACT

This work presents the study and implementation of a three-phase four-wire shunt active power filter applied to electrical grid, aiming to reduce power quality problems associated with current harmonic distortion.

The determination of the compensation currents reference is performed using the instantaneous powers theory and the current control of the filter uses the nonlinear vector control technique of three-phase currents. Details of the control techniques used are also presented in the document.

The results obtained with the methodology employed are proven through numerical simulations in Simulink® and experimental simulations using 10kVA prototype implemented in the Electrical Machines Laboratory. The use of the shunt active power filter provided the reduction of the harmonic content of the non-linear loads (single-phase or three-phase) employed in the tests, as well as increased the power factor to practically unity values, reduced current in the neutral wire, and unbalance of the currents.

KEYWORDS

Instantaneous power theory; PQ theory; Shunt active power filter; Four-legs voltage inverter; Electric power quality; Normalization.

AGRADECIMENTOS

À minha família, a quem dedico esta dissertação, agradeço a compressão, o apoio incondicional e o altruísmo com que suportaram todo o tempo que gastei a desenvolver e escrever esta dissertação.

Ao meu melhor amigo, Helder, por estar sempre ao meu lado com os melhores conselhos e por me dar a estabilidade necessária para conseguir manter-me à tona.

Aos meus orientadores por terem-me sugerido o tema desta dissertação, pela paciência que tiveram comigo durante todo o processo, pelas inúmeras ideias e por compartilharem comigo seus conhecimentos.

Ao Instituto Superior de Engenharia de Lisboa (ISEL), ao Departamento de Engenharia Eletrotécnica de Energia e Automação (DEEEA) e à Comissão Coordenadora de Curso de Licenciatura e Mestrado em Engenharia Eletrotécnica.

À Secção de Máquinas Elétricas do Departamento de Engenharia Eletrotécnica de Energia e Automação (DEEEA) pela utilização do laboratório e recursos materiais necessários para a realização desta dissertação.

Darcy d'Apresentação

Dezembro 2023

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolos

C	Capacidade do barramento DC, F
$e_{i\alpha}, e_{i\beta}, e_{i0}$	Erros das correntes de entrada do inversor de tensão a quatro condutores nas coordenadas $\alpha\beta 0$, A
h	Ordem do harmónico
i	Corrente instantânea, A
i_{abc}	Correntes elétricas trifásicas da carga na forma compacta, A
i_a, i_b, i_c, i_n	Correntes elétricas trifásicas e de neutro da carga, A
i_{Cabc}	Correntes elétricas trifásicas de compensação na forma compacta, A
$i_{Ca}, i_{Cb}, i_{Cc}, i_{Cn}$	Correntes elétricas trifásicas e de neutro de compensação, A
i_{Cabc}^*	Correntes elétricas trifásicas de referência em forma compacta, A
$i_{Ca}^*, i_{Cb}^*, i_{Cc}^*, i_{Cn}^*$	Correntes elétricas trifásicas e de neutro de referência do filtro ativo de potência paralelo, A
i_{Sabc}	Correntes elétricas trifásicas da rede elétrica na forma compacta, A
$i_{Sa}, i_{Sb}, i_{Sc}, i_{Sn}$	Correntes elétricas trifásicas e de neutro da rede de energia, A
I	Valor eficaz da corrente, A
I_1	Valor eficaz da componente fundamental ($h = 1$) da corrente, A
I_h	Valor eficaz do harmónico de corrente de ordem h , A
K	Ganho proporcional do controlador PI
L_F	Indutância do filtro L, mH
p	Potência ativa ou real instantânea, W
p_0	Potência de sequência homopolar instantânea, W
p_{reg}	Potência instantânea de regulação da tensão do barramento DC, W
q	Potência reativa ou imaginária instantânea, var
S_{1k}, S_{2k}	Estados de comutação dos semicondutores de potência superiores e inferiores do inversor de tensão a quatro condutores
u	Tensão instantânea, V
U	Valor eficaz de tensão, V

U_1	Valor eficaz da componente fundamental ($h = 1$) da tensão, A
U_h	Valor eficaz do harmónico da tensão de ordem h , A
γ_k	Estado de comutação dos braços do inversor de tensão a quatro condutores

Índices

a, b, c, n	Referente aos terminais de saída do filtro L ou de saída para a carga
A, B, C, N	Referente aos terminais de saída do inversor de tensão a quatro condutores
k	Índice de ordenação dos braços do inversor de tensão a quatro condutores
$\alpha, \beta, 0$	Referente ao sistema de eixos $\alpha\beta 0$
$+, -, 0$	Sequência de fases direta, inversa e homopolar

ABREVIATURAS

AC – Corrente alternada (de *alternated current*)

CSI – Conversor do tipo fonte de corrente (de *current source inverter*)

DAC – Conversor analógico para digital (de *Digital to Analog Converter*)

DC – Corrente contínua (de *direct current*)

DSP – Processamento digital de sinais (de *Digital Signal Processing*)

FAP – Filtro ativo de potência paralelo

FP – Fator de potência

FPGA – Dispositivo lógico programável (de *Field-Programmable Gate Array*)

FPP – Filtro passivo paralelo

FTT – Transformada rápida de Fourier (de *Fast Fourier Transform*)

HDL – Linguagem de descrição de *hardware* (de *Hardware Description Language*)

IGBT – Transístor bipolar de porta isolada (de *Insulated Gate Bipolar Transistor*)

IHD – Distorção harmónica individual (de *Individual harmonic distortion*)

ISEL – Instituto Superior de Engenharia de Lisboa

PI – Controlador proporcional e integral

QEE – Qualidade de energia eléctrica

REE – Rede de energia eléctrica

RMS – Valor eficaz (de *Root Mean Square*)

TDD – Taxa de Distorção de Demanda (de *Total demand distortion*)

VSI – Conversor do tipo fonte de tensão (de *voltage source inverter*)

CONVENÇÕES

1 – Bibliografia

Neste trabalho as referências bibliográficas são efetuadas de acordo com a norma portuguesa em vigor, NP 405-1:1994. De acordo com esta norma, optou-se pela utilização de citações entre parênteses com o número que lhe é atribuído na bibliografia.

A bibliografia contém as referências realizadas ao longo do texto, listadas em ordem da primeira invocação no texto.

É considerada a utilização de abreviaturas, nos seguintes casos: nomes próprios de autores e editores literários; títulos de publicação em série, de acordo com a NP 139:1964; palavras e termos utilizados nas referências bibliográficas de acordo com a NP 3680:1989.

2 – Sistema de unidades de medida

Neste documento é utilizado, salvo menção expressa em contrário, o Sistema Internacional (SI) de unidades de medida, bem como os símbolos e abreviaturas normalmente para os múltiplos e submúltiplos das diversas unidades. Por ser um sistema de unidades bem conhecido essas abreviaturas não são citadas na secção “Abreviaturas” contida nesta dissertação.

3 – Utilização de estrangeirismos

Ao longo desta dissertação utilizam-se alguns estrangeirismos fundamentalmente por dois motivos. O primeiro refere-se a palavras que ainda não se encontram definidas na língua portuguesa e o segundo refere-se a palavras em que a mera tradução linguística faça perder o significado técnico e científico atribuído às mesmas no original.

Assim, todos os estrangeirismos são realçados ao longo do texto em itálico.

4 – Acordo ortográfico

Este documento está escrito de acordo com o Acordo Ortográfico de 13 de maio de 2015.

ÍNDICE

Capítulo 1	1
Introdução	1
1.1 – Motivação do trabalho	1
1.1.1 – Potencialidades e limitações dos filtros passivos	2
1.1.2 – Filtros Ativos de Potência	3
1.2 – Enquadramento do trabalho	5
1.3 – Objetivos	6
1.4 – Estrutura do documento	7
Capítulo 2	9
Qualidade de Energia Elétrica	9
2.1 – Introdução	9
2.2 – Problemas de qualidade de energia	10
2.3 – Origens da poluição harmónica	12
2.4 – Harmónicas	13
2.5 – Efeitos da poluição harmónica	15
2.6 – Limites de distorção harmónica	16
2.6.1 – Recomendação IEEE 519	16
2.6.2 – Norma IEC 61000-3-2	18
2.6.3 – Norma NP EN 50160	19
2.7 – Fator de potência	20
2.8 – Desequilíbrios	22
2.9 – Conclusão	24
Capítulo 3	27
Filtro ativo de potência paralelo	27
3.1 – Introdução	27
3.2 – Teoria das potências instantâneas	27
3.3 – Modelo matemático do inversor de quatro braços	33
3.4 – Controlo vetorial não linear de correntes	35
3.5 – Conclusão	42

Capítulo 4.....	43
Simulação numérica.....	43
4.1 – Introdução.....	43
4.2 – Modelos de simulação numérica	43
4.3 – Resultados de simulação do filtro	46
4.4 – Análise dos parâmetros de qualidade de energia.....	50
4.5 – Conclusão	53
Capítulo 5.....	55
Resultados experimentais	55
5.1 – Introdução.....	55
5.2 – Protótipo laboratorial.....	55
5.2.1 – Sistema de energia	56
5.2.2 – Sistema de controlo.....	59
5.2.3 – Resultados experimentais	60
5.3 – Conclusão	65
Capítulo 6.....	67
Conclusões.....	67
6.1 – Considerações finais.....	67
6.2 – Perspetivas de desenvolvimento futuro	69
Bibliografia	71
Anexo.....	75

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 – Diagrama unifilar ilustrativo da conexão de um filtro ativo paralelo (FAP) à rede.	3
Figura 1.2 – Diagrama de blocos ilustrativo da ligação de um filtro ativo paralelo trifásico.	4
Figura 2.1 – Problemas de qualidade de energia. Extraído de [19].	12
Figura 2.2 – Retificador monofásico com filtro capacitivo: (a) formas de onda da tensão e da corrente de entrada; (b) harmônicos da corrente (valores normalizados). Extraído de [19].	13
Figura 3.1 – Parcelas das potências instantâneas da teoria PQ em coordenadas abc. Adaptado de [45].	29
Figura 3.2 – Parcelas das potências instantâneas da teoria PQ em coordenadas $\alpha\beta 0$. Adaptado de [45].	30
Figura 3.3 – Compensação das parcelas das potências instantâneas da teoria PQ em coordenadas abc. Adaptado de [45].	30
Figura 3.4 – Compensação das parcelas das potências instantâneas da teoria PQ em coordenadas $\alpha\beta 0$. Adaptado de [45].	31
Figura 3.5 – Cálculos da teoria PQ para uma potência instantânea da rede elétrica constante.	33
Figura 3.6 - Inversor de tensão a quatro condutores e filtro de saída L. Adaptado de [5].	33
Figura 3.7 – Estrutura em cascata dos controladores do inversor de quatro braços. Adaptado de [5].	36
Figura 3.8 – Vetores de tensão disponíveis no inversor de quatro braços em coordenadas $\alpha\beta 0$. Adaptado de [49].	37
Figura 3.9 – Esquema de princípio de controlador vetorial de correntes do inversor de quatro braços. Adaptado de [5].	38
Figura 4.1 – Modelo global do filtro ativo paralelo implementado em Matlab\Simulink®.	43
Figura 4.2 – Modelo dos controladores do filtro ativo paralelo implementado em Matlab\Simulink®.	44
Figura 4.3 – Modelo do controlador vetorial não linear de corrente implementado em ferramenta Matlab\Simulink®.	45
Figura 4.4 – Modelo do inversor de tensão a quatro condutores implementado em Matlab\Simulink®.	45
Figura 4.5 – Teste do controlador de tensão no barramento DC.	46
Figura 4.6 – Esquema elétrico da carga linear e não linear considerada: (a) Esquema elétrico da Carga RL em série; (b) Esquema elétrico do retificador trifásico a diodos com filtro capacitivo.	47
Figura 4.7 – Sinais de corrente da carga obtidos a partir da simulação numérica: (a) Carga RL em série; (b) Retificador trifásico.	47
Figura 4.8 – Resultado de simulação para carga RL série: (a) Correntes da rede elétrica; (b) Corrente de referência (a preto) e a corrente de compensação (a azul).	48

Figura 4.9 – Resultado de simulação para carga RL série: (a)Tensões (a preto) e correntes (a azul) da rede elétrica (correntes multiplicadas por 10); Potências instantâneas p, q e p ₀	48
Figura 4.10 – Resultado de simulação para o retificador trifásico: (a) Correntes da rede elétrica; (b) Corrente de referência (a preto) e a corrente de compensação (a azul).	49
Figura 4.11 – Resultado de simulação para retificador trifásico: (a)Tensões (a preto) e correntes (a azul) da rede elétrica (correntes multiplicadas por 20); Potências instantâneas p, q e p ₀	50
Figura 4.12 – Espectro harmónico da corrente da rede no teste do filtro com uma carga RL série: (a) antes da compensação de filtro; (b) depois da compensação do filtro.	51
Figura 4.13 – Espectro harmónico da corrente da rede no teste do filtro com um retificador: (a) antes da compensação do filtro; (b) depois da compensação do filtro.....	51
Figura 5.1 – Esquema de implementação do protótipo funcional do filtro.	56
Figura 5.2 –Fotos do protótipo do filtro implementado no laboratório de Máquinas Elétricas.	57
Figura 5.3 – Elementos passivos do protótipo funcional do filtro: (a) Bobinas de saída do inversor de tensão a quatro condutores; (b) Pormenor dos condensadores do barramento DC. Extraído de [5]......	57
Figura 5.4 –Módulo IGBT e placa de circuito de disparo utilizado no filtro ativo paralelo: (a) Representação esquemática; (b) módulo IGBT; (c) placa de circuito de disparo dupla. Extraído de [5]......	58
Figura 5.5 – Fotos das cargas utilizadas.	58
Figura 5.6 – Ligações da placa de desenvolvimento FPGA.....	59
Figura 5.7 – Fotos do sistema de controlo: (a) Sistema DAQ; (b) FPGA.	59
Figura 5.8 – Algoritmo implementado no “Sysgen” para obtenção dos resultados emulados.	61
Figura 5.9 – Sinais de corrente da carga obtidos no laboratório: (a) Carga RL em série; (b) Retificador trifásico.	62
Figura 5.10 – Resultado emulados para carga RL série: (a) Correntes da rede elétrica; (b) referência de corrente compensação e (c) Tensões e correntes da rede elétrica (correntes multiplicadas por 20).	63
Figura 5.11 – Resultado emulados para retificador trifásico: (a) Correntes da rede elétrica; (b) referência de corrente compensação e (c) Tensões e correntes da rede elétrica (correntes multiplicadas por 10).	64

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 2.1 – Limite de distorção harmónica da tensão conforme IEEE 519 [28].....	17
Tabela 2.2 – Limites de distorção harmónicas da corrente para diferentes níveis de tensão no PAC de acordo a recomendação IEEE 519 [28].....	18
Tabela 2.3 – Limites de harmónicos de corrente de acordo a norma IEC 61000-3-2 [29].	19
Tabela 2.4 – Limites de distorção harmónica individual de tensão de acordo a norma EN 50160 [30].....	20
Tabela 3.1 - Estados de comutação e vetores de tensão. Extraído de [5].....	34
Tabela 3.2 – Seleção dos vetores de tensão para $\delta_0 = 1$. Extraído de [5].....	38
Tabela 3.3 – Seleção dos vetores de tensão para $\delta_0 = 0$. Extraído de [5].....	39
Tabela 3.4 – Seleção dos vetores de tensão para $\delta_0 = -1$. Extraído de [5].	39
Tabela 3.5 – Seleção do vetor de tensão de acordo com as saídas dos comparadores de histerese de banda larga e estreita para número de combinações de 1 a 32. Extraído de [5]. ..	40
Tabela 3.6 – Seleção do vetor de tensão de acordo com as saídas dos comparadores de histerese de banda larga e estreita para número de combinações de 33 a 64. Extraído de [5].	41
Tabela 4.1 - Parâmetros de modelo de simulação do filtro ativo de potência paralelo.	46
Tabela 4.2 –resultados de simulação para carga RL série.....	52
Tabela 4.3 – Desequilíbrios na corrente da rede eléctrica para simulação da carga RL série....	52
Tabela 4.4 – Especificações para resultados de simulação para retificador trifásico com filtro capacitivo.....	52
Tabela 4.5 – Desequilíbrios na corrente da rede eléctrica para resultados de simulação para retificador trifásico com filtro capacitivo.	53

Capítulo 1

Introdução

1.1 – Motivação do trabalho

Os avanços na área de Eletrônica de Potência (EP) verificados nas últimas décadas possibilitou o desenvolvimento de semicondutores de potência com maiores frequências de comutação e com menores perdas de operação. O emprego destes componentes eletrônicos possibilitou a otimização de processos produtivos ao nível do rendimento e controlabilidade, permitindo inclusive a execução de tarefas anteriormente inexecutável.

Com a produção em massa dos semicondutores de potência e sua redução de preço, a proliferação destes componentes eletrônicos foi de tal forma acentuada que nos dias atuais estão presentes na maior parte dos equipamentos elétricos. Porém, esta evolução tecnológica não trouxe apenas vantagens, pelo que os conversores baseados em semicondutores de potência, com funcionamento discreto, são responsáveis por causar diversos problemas na rede de energia elétrica (REE) e conseqüentemente redução da eficiência energética.

Atendendo a essas questões, a Qualidade de Energia Elétrica (QEE) tornou-se uma importante área de estudo para a Engenharia Eletrotécnica. Existem diversas definições para um problema de QEE, de entre as quais pode-se destacar: “*Distúrbio que causa na tensão e/ou na corrente de uma REE, desvios em relação a sua referência considerada ideal*”[1].

Pesquisas realizadas por organizações internacionais confirmam que a qualidade e energia são um fator crucial para melhoria da produtividade das empresas, e isso torna-se mais verdadeiro quanto maior o grau de utilização de novas tecnologias nos processos produtivos. Conforme a *European COPPER Institute – Leonardo Energy Initiative* [2], o custo dos problemas de qualidade de energia elétrica na Europa é estimado em mais de 150 mil milhões de euros por ano, e de acordo o EPRI (*Electric Power Research Institute*) [3] os problemas relacionados com a qualidade de energia e interrupções de fornecimento custam à economia dos Estados Unidos mais de 100 mil milhões de euros por ano.

Entidades como o Instituto de Engenheiros Eletrotécnicos e Eletrónicos (IEEE – Institute of Electrical and Electronics Engineers), a Comissão Eletrotécnica Internacional (IEC – International Electrotechnical Commission) e a Norma Portuguesa NP EN50160, têm como objetivo estabelecer recomendações técnicas e normas estabelecendo limites para os problemas de qualidade de energia causados por estes equipamentos e outros de natureza não linear ou linear. Esses limites servem como guia para os consumidores da energia elétrica, operadores da rede elétrica e fabricantes, que ao serem cumpridos garantem o adequado funcionamento dos equipamentos nos sistemas elétricos.

1.1.1 – Potencialidades e limitações dos filtros passivos

Tradicionalmente, são utilizados filtros passivos para compensar problemas de QEE. Estes equipamentos são compostos por elementos resistivos, indutivos e/ou capacitivos e têm como grande vantagem serem robustos, económicos, apresentarem baixa manutenção e quando bem projetados, são capazes de reduzir distorção harmónica de tensão ou de corrente, corrigir fator de potência, compensar potência reativa e ainda reduzir quedas de tensão associadas a grandes cargas.

Porém, estes equipamentos também apresentam algumas limitações [4], podendo ser citadas:

- Compensação fixa e possível ressonância com a impedância da rede elétrica na frequência fundamental e/ou outras frequências harmónicas;
- Compensação limitada a algumas ordens de harmónicos;
- Uma vez instalado, a frequência sintonizada e/ou o tamanho do filtro não podem ser alterados facilmente;
- Ocorrência de desempenho insatisfatório por alteração de frequência sintonizada devido à variação dos parâmetros do filtro causado pelo envelhecimento, deterioração, efeitos de temperatura e características da carga;
- Mudança nas condições de operação do sistema como a entrada em serviço de condensadores e/ou outros filtros tem grande influência no projeto do filtro;
- A ressonância entre a rede e o filtro, pelo que existe uma escolha limitada na seleção de frequências sintonizadas e na garantia de largura de banda adequada entre frequências deslocadas e harmónicos inteiros (pares e ímpares);

- O controlo contínuo de potência reativa, correção do fator de potência não é possível, pois o filtro apenas pode ser ligado ou desligado.

1.1.2 – Filtros Ativos de Potência

Os filtros ativos de potência (FAP) são equipamentos constituídos por eletrónica de potência com capacidade de compensar problemas de qualidade de energia de forma dinâmica. Existem duas configurações básicas: a configuração série e a configuração paralela. A primeira destina-se essencialmente a resolver problemas de qualidade de energia relacionados com as tensões, enquanto a segunda se destina a resolver problemas relacionados com as correntes do sistema de energia. É também possível combinar em simultâneo as duas topologias básicas.

Como o nome sugere, a configuração em paralelo é conectada em paralelo com a REE, uma vez que este compensa problemas na corrente (em particular a distorção harmónica), o seu funcionamento, de forma resumida, consiste na aquisição das tensões e correntes da carga linear e não linear, sendo posteriormente efetuado o cálculo das correntes de compensação a serem introduzidas na rede elétrica de forma que a carga e filtro resulte em correntes equilibradas, sinusoidais e em fase com a tensão da rede elétrica.

A Figura 1.1 ilustra genericamente a conexão de um FAP numa instalação elétrica. O ponto de conexão no FAP pode representar o barramento principal de um quadro geral de baixa tensão ou de um quadro elétrico parcial de alimentação de carga(s) crítica(s).

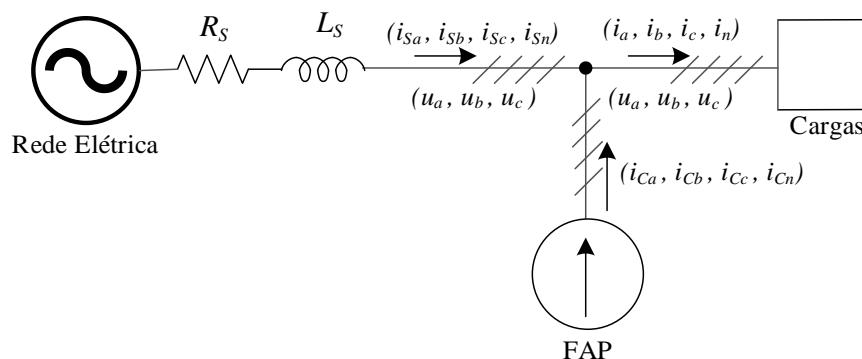


Figura 1.1 – Diagrama unifilar ilustrativo da conexão de um filtro ativo paralelo (FAP) à rede.

As correntes de compensação são obtidas através de um conversor DC-AC, vulgarmente denominado, neste documento, por inversor. Existem várias configurações possíveis para o

inversor, podendo ser classificadas quanto à topologia e ao número de níveis de tensão que conseguem produzir. Um filtro ativo paralelo pode também classificar-se quanto ao número de fases, podendo ser monofásico ou trifásico, sendo que este último pode ser a três condutores ou a quatro condutores (com neutro acessível).

Em relação à alimentação do barramento DC, o inversor pode ser classificado como fonte de tensão (*Voltage Source Inverter - VSI*), possuindo apenas um condensador, ou associações série e paralelo de condensadores, no barramento DC, ou fonte de corrente (*Current Source Inverter - CSI*), contendo uma bobina como armazenador de energia no barramento DC. Os VSI foram preferencialmente utilizados no desenvolvimento de um filtro a partir da década de 70, devido às vantagens de menores perdas, tamanho e ruídos [4],[5].

Um filtro ativo paralelo trifásico é constituído por um andar de potência, associado ao conversor DC-AC, e um andar de controlo, onde são adquiridas as amostragens de tensões e corrente e efetuadas as operações matemáticas necessárias à obtenção dos sinais de comando a aplicar ao inversor. Na Figura 1.2 encontram-se esquematizados os principais blocos de um filtro ativo paralelo trifásico, bem como a sua ligação à rede elétrica.

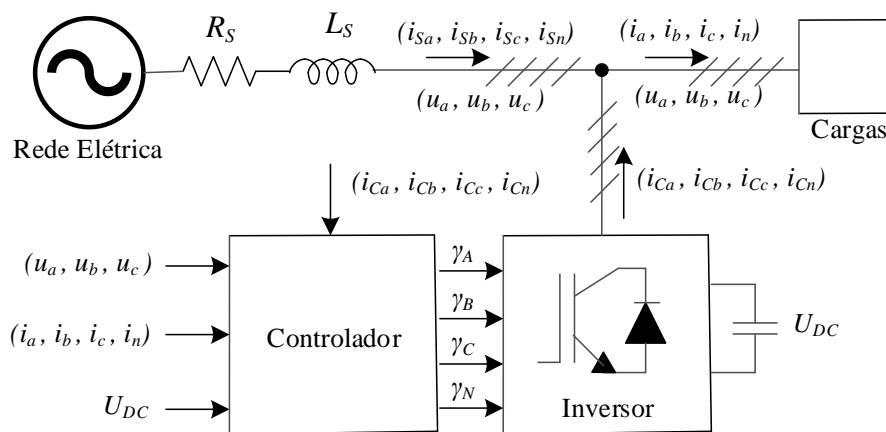


Figura 1.2 – Diagrama de blocos ilustrativo da ligação de um filtro ativo paralelo trifásico.

Assim sendo, o filtro ativo paralelo é responsável pela aquisição das tensões da rede elétrica (u_{an}, u_{bn}, u_{cn}) e das correntes consumidas pela carga ou conjunto de cargas (i_a, i_b, i_c, i_n). É também adquirida a tensão do barramento DC (U_{DC}) do conversor DC-AC, sendo necessário manter esta tensão constante e garantir que o seu valor seja suficientemente elevado para que o filtro ativo paralelo produza as correntes desejadas ($i_{ca}, i_{cb}, i_{cc}, i_{cn}$).

Adquiridas as grandezas referidas (tensão do barramento DC, tensões da rede elétrica e correntes nas cargas), o algoritmo de controlo do filtro ativo paralelo é responsável por calcular a corrente de compensação a injetar na rede elétrica ($i_{Ca}, i_{Cb}, i_{Cc}, i_{Cn}$). Esta corrente é obtida através da relação entre as correntes na carga (i_a, i_b, i_c, i_n) e a corrente que seria desejável obter-se na rede elétrica ($i_{Sa}, i_{Sb}, i_{Sc}, i_{Sn}$), sendo para tal aplicada a Lei dos Nós. Desta forma, o controlador aplica os sinais de comando nos semicondutores do conversor DC-AC ($\gamma_A, \gamma_B, \gamma_C, \gamma_N$) de modo a sintetizar a corrente pretendida.

Para além disso, é também necessário efetuar um controlo de corrente de modo a garantir que a corrente injetada na rede elétrica aproxima-se o mais possível da corrente calculada no controlador, pelo que a corrente de compensação ($i_{Ca}, i_{Cb}, i_{Cc}, i_{Cn}$) são também lidas no controlador.

1.2 – Enquadramento do trabalho

A Secção de Máquinas elétricas do Instituto Superior de Engenharia de Lisboa (ISEL) tem vindo a desenvolver trabalhos de investigação e desenvolvimento na área de qualidade de energia elétrica, tendo sido já implementado, no âmbito de uma tese de doutoramento [6], um protótipo de um gerador de velocidade variável para aumento da eficiência energética em grupos eletrogéneos autónomos, em sistema de multiprocessamento em tempo real do tipo FPGA. Esta dissertação admitiu, como hipótese de trabalho, utilizar a mesma linha de investigação e desenvolvimento, tendo como objetivo utilizar o protótipo já existente para aplicação do filtro ativo paralelo.

A vantagem de usar esta solução está no facto que sistema de multiprocessamento em tempo real do tipo FPGA possuir milhões de blocos lógicos reprogramáveis que podem ser usados para executar muitas ações ao mesmo tempo, proporcionando os benefícios do paralelismo e da concorrência. Contudo, a dificuldade na sua utilização está no tempo de espera de compilação, pelo que esta solução necessita de realizar conversões binárias e converter a linguagem de baixo nível para linguagem alto nível e vice-versa.

Diversas formas de obtenção das correntes de referência de compensação, a serem utilizados no filtro ativo paralelo, têm sido propostas na literatura [5], [7], [8], [9]. Neste trabalho, é utilizado o algoritmo baseado na teoria das potências instantâneas, teoria PQ. Esta

foi proposta por Watanabe *et al* [10] em 1995 para a compensação ativa de um filtro ativo paralelo a quatro condutores, O algoritmo baseado na teoria PQ propõe a mudança de coordenadas do sistema abc para $\alpha\beta 0$ da tensão e da corrente.

As topologias de filtro ativo paralelo empregues em sistemas trifásicos a quatro condutores mais referenciadas na literatura são o inversor de tensão trifásico a quatro condutores com balanceamento ativo da tensão dos condensadores no ponto intermédio do barramento DC [11] e o inversor de tensão de quatro braços [12], [13], [14]. A solução do inversor de tensão de quatro braços requer dois semicondutores de potência adicionais e um controlo mais complexo, mas tem as vantagens de permitir melhor utilização da tensão do barramento DC e possibilidade de melhor controlo de corrente do condutor neutro [14].

Como referido anteriormente, devido às perdas e erros de comutação do inversor, o condensador no barramento DC pode descarregar [15]. Desta forma, existe a necessidade do controlo da tensão do barramento CC. Este controlo pode ser realizado com a inclusão de um compensador (PI) no algoritmo de controlo. A tensão do barramento DC é comparada com valor de referência gerando um erro. Este erro passa pelo controlador PI gerando um sinal na saída do compensador. Este sinal é então adicionado ao algoritmo gerador das referências de compensação de modo que o filtro ativo consuma uma parcela da potência ativa da rede elétrica de forma a compensar as perdas.

Atendendo a todas as considerações anteriores, este trabalho consiste no estudo do filtro ativo paralelo aplicado a rede elétrica a quatro condutores, com objetivo de mitigar os problemas qualidade de energia causados por cargas não lineares equilibradas ou desequilibradas. A nível pessoal, pretendo aumentar os conhecimentos relativos ao filtro ativo paralelo, bem como todos os passos necessários para o desenvolvimento deste.

1.3 – Objetivos

Para avaliar a importância do trabalho, são realizados dois tipos de implementação: i) Obtenção dos modelos matemáticos e posterior simulação numérica no software Matlab/Simulink®; ii) Adaptar no laboratório de Máquinas Elétricas, o protótipo do inversor de tensão de quatro braços utilizado em [6], em sistema de multiprocessamento em tempo real do tipo FPGA, para funcionar como FAP.

Os objetivos específicos do estudo são divididos conforme as seguintes etapas:

- Estudar os problemas de qualidade de energia e realizar o respectivo enquadramento normativo;
- Desenvolver e implementar o modelo do filtro ativo paralelo aplicado à rede elétrica a quatro condutores no software Matlab\Simulink®;
- Desenvolver e implementar o algoritmo PQ do filtro ativo paralelo aplicado a rede elétrica a quatro condutores, em placa de desenvolvimento, baseado em sistema de multiprocessamento em tempo real do tipo FPGA;
- Comparar os resultados obtidos pela simulação numérica e com os resultados obtidos nos ensaios experimentais para diferentes tipos cargas de cargas não lineares;
- Analisar e avaliar o desempenho do filtro ativo paralelo desenvolvido através do enquadramento normativo realizado.

1.4 – Estrutura do documento

De modo a orientar o leitor, antes do desenvolvimento do trabalho, são listados os símbolos e abreviaturas, bem como as convenções adotadas ao longo do documento.

Por forma a alcançar os objetivos acima mencionados, este documento encontra-se dividido em cinco capítulos.

No Capítulo 1 foi feita uma abordagem à temática, enunciados os pontos cruciais que motivaram a realização deste trabalho, o seu enquadramento, bem como listados os objetivos do estudo implícito.

No Capítulo 2 são apresentados os problemas de qualidade de energia, dando ênfase àqueles que são compensados pelos filtros ativos paralelo, bem como apresentados valores limites estabelecidos pelas principais normalizações em vigor.

Por forma a dar seguimento a hipótese do trabalho, no Capítulo 3 é apresentada a metodologia utilizada. Neste são expostas as técnicas de controlo utilizadas no controlador do filtro e é detalhado o modelo do matemático do inversor de tensão a quatro condutores utilizado.

O Capítulo 4 apresenta os resultados de simulação do modelo do filtro ativo paralelo, bem como a avaliação do seu desempenho em regime dinâmico e permanente em relação as normas estudadas.

No Capítulo 5 são apresentados os resultados experimentais, onde é descrito o protótipo desenvolvido e implementado e de seguida expostos os resultados obtidos comparando-os com os resultados de simulação obtidos no capítulo anterior.

As conclusões finais sobre o trabalho realizado são apresentadas no Capítulo 6, sendo acompanhadas das perspetivas de desenvolvimento futuro.

No final, após a lista de referências bibliográficas, são apresentados alguns anexos com elementos complementares ao trabalho desenvolvido.

Capítulo 2

Qualidade de Energia Elétrica

2.1 – Introdução

Os problemas de qualidade de energia estão presentes desde o surgimento da energia elétrica AC. No entanto, recentemente, a conscientização dos consumidores em relação aos problemas de qualidade de energia aumentou severamente devido aos seguintes motivos [16], [17], [18], [19]:

- Os equipamentos dos consumidores tornaram-se mais sensíveis a problemas de qualidade de energia devido ao uso de controlo digital e conversores eletrónicos de potência com um controlo mais sofisticado, que são altamente sensíveis à qualidade da energia e outros distúrbios. Além disso, as indústrias também se tornaram mais conscientes da perda de produção;
- O aumento do uso de controladores eletrónicos de potência em vários equipamentos com benefício de diminuição das perdas, aumento da eficiência geral e redução do custo de produção, resultou no aumento dos níveis de distorção harmónica, baixo fator de potência e desequilíbrios;
- A consciência dos problemas de qualidade de energia tem aumentado nos consumidores devido às consequências diretas e indiretas, que são causadas por interrupções, perda de produção, falha de equipamentos e regulamentação;
- A geração distribuída usando energia renovável e outras fontes de energia locais aumentou os problemas de qualidade de energia, pois necessita, em muitas situações, de conversão eletrónica de potência e variações na energia primária adicionam novos problemas de qualidade de tensão, exemplos desse sistema são a geração solar fotovoltaica e sistemas de conversão de energia eólica.

- Muitas normas e recomendações foram desenvolvidos e aplicadas aos consumidores, fabricantes e estabelecimentos de serviços públicos, conforme as leis e regulamentação do país.

2.2 – Problemas de qualidade de energia

De todos os problemas de qualidade de energia, a interrupção no fornecimento de energia elétrica é, seguramente, o mais grave, pelo que afeta todos os equipamentos ligados à rede elétrica, à exceção daqueles que sejam alimentados por geradores de emergência ou por UPS (*Uninterruptable Power Supplies*).

Contudo, outros problemas de qualidade de energia, como os descritos em [20], [18], [21], [22], [1], [23] e apresentados na Figura 2.1, além de levarem à operação incorreta de alguns equipamentos, podem também danificá-los:

- Distorção harmónica – quando existem cargas não lineares ligadas à rede elétrica a corrente que circula nas linhas contém harmónicas e as quedas de tensão provocadas pelos harmónicos nas impedâncias das linhas resulta também em tensões de alimentação também distorcidas.
- Inter-harmónicos – surgem quando há componentes de corrente que não estão relacionadas com a componente fundamental (50Hz, em Portugal). Essas componentes de corrente podem ser produzidas por fornos a arco ou por ciclo conversores (equipamentos que, alimentados a 50 Hz, permitem sintetizar tensões e correntes de saída com uma frequência inferior).
- Ruído ou interferência eletromagnética – corresponde ao ruído eletromagnético de alta-frequência, que pode ser produzido pelas comutações rápidas dos conversores eletrónicos de potência.
- Interrupção momentânea – ocorre, por exemplo, quando o sistema elétrico dispõe de disjuntores com religador, que abrem na ocorrência de um curto-circuito, fechando-se automaticamente após alguns milissegundos (e mantendo-se ligados caso o curto-circuito já se tenha extinguido).
- Subtensão momentânea ou *voltage sag* – também conhecido por “cava de tensão”, pode ser provocada, por exemplo, por um curto-circuito momentâneo num outro alimentador

do mesmo sistema elétrico, que é eliminado após alguns milissegundos pela abertura do disjuntor do ramal em curto-circuito.

- Sobretensão momentânea ou *voltage swell* – pode ser provocada, entre outros casos, por situações de defeito ou operações de comutação de equipamentos ligados à rede elétrica.
- Flutuação da tensão ou *flicker* – acontece devido a variações intermitentes de certas cargas, causando flutuações nas tensões de alimentação (que se traduz, por exemplo, em oscilações na intensidade da iluminação elétrica).
- Micro-cortes de tensão ou *notches* – resultam de curto-circuitos momentâneos, que ocorrem durante intervalos de comutação dos semicondutores de potência dos retificadores.
- Transitórios – ocorrem como resultado de fenômenos transitórios, tais como a comutação de bancos de condensadores ou descargas atmosféricas.

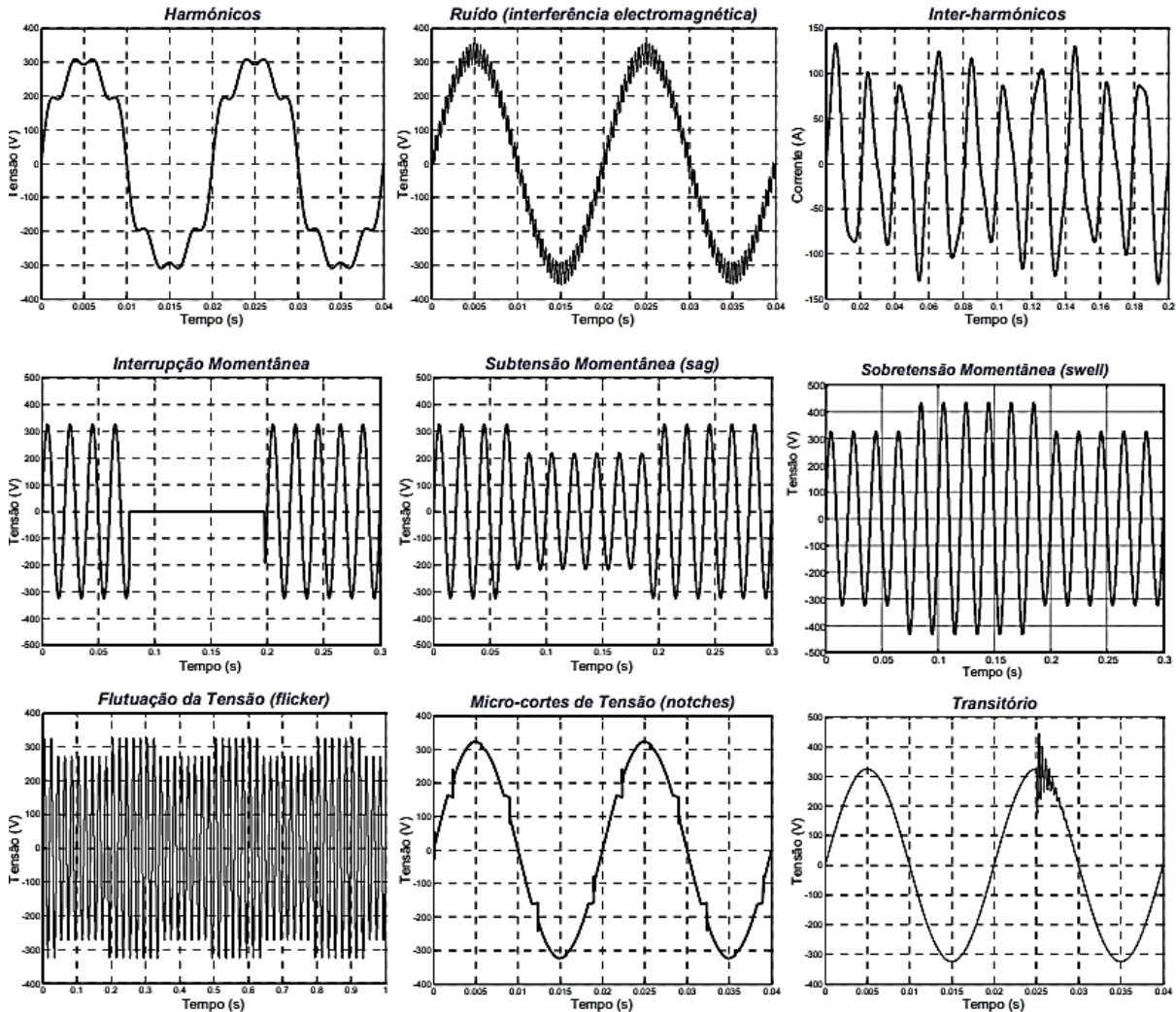


Figura 2.1 – Problemas de qualidade de energia. Extraído de [20].

2.3 – Origens da poluição harmónica

A maioria dos problemas que surgem nos sistemas elétricos é causada pela alta distorção harmónica das correntes ou tensões junto ao consumidor final. A principal causa deste fenómeno, que pode ser visto como uma forma de poluição do ambiente eletromagnético, é a crescente utilização dos equipamentos eletrónicos alimentados pela rede elétrica, podendo citar como exemplo computadores, aparelhos de televisão, balastos eletrónicos para lâmpadas de descarga e controladores eletrónicos para uma enorme variedade de cargas industriais, etc.

Uma carga bastante comum em equipamentos de baixa potência é o retificador monofásico de onda completa com filtro capacitivo. Este tipo de carga encontra-se em vários aparelhos domésticos cada vez mais utilizados, tais como computadores, impressoras,

televisores, aparelhos de áudio e vídeo, carregadores de baterias e também em tecnologias recentes de iluminação, nomeadamente em lâmpadas como a fluorescente compacta e por diodo emissor de luz (LED – *Light Emitting Diode*) [24][25][26]. Esta possui uma corrente de entrada altamente distorcida, tal como se mostra na Figura 2.2. O elevado conteúdo harmónico da corrente distorce a tensão de alimentação devido à queda de tensão na impedância das linhas. Analisando a Figura 2.2 (a), verifica-se que a corrente absorvida pela carga mencionada apresenta uma forma de onda consideravelmente diferente de uma senoide.

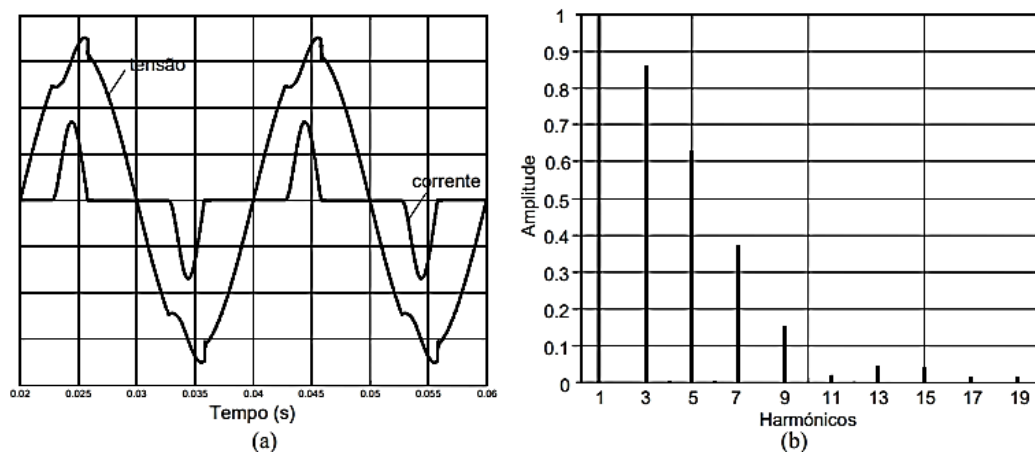


Figura 2.2 – Retificador monofásico com filtro capacitivo: (a) formas de onda da tensão e da corrente de entrada; (b) harmónicos da corrente (valores normalizados). Extraído de [20].

Os controladores de fase, amplamente utilizados para controlar a potência em sistemas de aquecimento, regular a intensidade luminosa de lâmpadas (*dimmers*) e regulação de velocidade em acionamentos com máquinas elétricas AC, também produzem formas de onda com conteúdo harmónico substancial e interferência eletromagnética de alta frequência. As lâmpadas fluorescentes convencionais também contribuem significativamente para a geração de distorção harmónica na rede, devido ao circuito magnético do balastro e comportamento não linear das descargas em meio gasoso, que pode operar na região de saturação.

2.4 – Harmónicas

Os harmónicos surgem quando se conectam as cargas referidas anteriormente à rede elétrica. A não linearidade dessas cargas é caracterizada quando a corrente não é proporcional à tensão aplicada. Além das distorções na corrente, a rede pode ainda apresentar distorções na

sua tensão, que são originadas pela corrente distorcida fluindo através da impedância da rede elétrica.

Utilizando a série de Fourier é possível estudar a influência de cada harmónico na distorção da tensão e da corrente. De acordo com a série, toda função periódica não sinusoidal e finita pode ser representada por uma série infinita de termos compostos por [27]:

- Um sinal senoide de frequência fundamental (50Hz, no caso da REE em Portugal);
- Sinais sinusoides cujas frequências são múltiplas da frequência fundamental, denominados por harmónicos;
- Eventualmente de um termo constante, denominado de componente contínua.

Portanto, um sinal de periódico e finito de tensão, pode ser expresso pela equação (2.1)

$$u = U_o + \sum_{h=1}^{\infty} \sqrt{2}U_h \text{sen}(h\omega t - \varphi_h) \quad (2.1)$$

E, similarmente, para corrente:

$$i = I_o + \sum_{h=1}^{\infty} \sqrt{2}I_h \text{sen}(h\omega t - \varphi_h) \quad (2.2)$$

As componentes harmónicas presentes num sinal podem ser calculadas recorrendo a um algoritmo denominado *Fast Fourier Transform* (FFT) [28]. É comum representar-se o espetro harmónico resultante da FFT de um dado sinal por intermédio de gráficos de barras. Assim, é possível aferir a contribuição individual de cada harmónico para a distorção do sinal. Na Figura 2.2 (b) está representado o espetro harmónico da corrente ilustrada na Figura 2.2 (a).

No espetro harmónico representado na Figura 2.2 (b) pode verificar-se que o harmónico mais significativo é o de ordem 3, apresentando uma amplitude bastante próxima da fundamental (86%). Os restantes harmónicos apresentam também amplitudes consideráveis. Constata-se também que apenas existem harmónicos de ordem ímpar.

Na posse dos valores das harmónicas presentes no sistema, utiliza-se de procedimentos quantitativos para expressar a influência do conteúdo harmónico em uma forma de onda. Para um sinal de tensão e de corrente contendo h harmónicos, o seu valor eficaz (*Root Mean Square* – RMS) pode ser calculado através do valor eficaz de cada frequência individual recorrendo à equação (2.3) e (2.4)., respetivamente [27].

- Valor eficaz da tensão (U) sem componente contínua U_o

$$U = \sqrt{\sum_{h=1}^{\infty} U_h^2} \quad (2.3)$$

- Valor eficaz da corrente (I) sem componente contínua I_o

$$I = \sqrt{\sum_{h=1}^{\infty} I_h^2} \quad (2.4)$$

Para obter o nível de distorção de cada harmónico em relação à sua componente fundamental, o indicador é denominado por *Distorção Harmónica Individual*, IHD , a qual pode ser empregada tanto para sinais de tensões como para correntes, conforme a equação (2.5) e (2.6), respetivamente [27].

- Distorção Harmónica Individual (IHD_u)

$$IHD_u = \frac{U_h}{U_1} \quad (2.5)$$

- Distorção Harmónica Individual (IHD_i)

$$IHD_i = \frac{I_h}{I_1} \quad (2.6)$$

2.5 – Efeitos da poluição harmónica

Além da distorção das formas de onda, a presença de harmónicos nas linhas de distribuição de energia origina problemas nos equipamentos e componentes do sistema elétrico, nomeadamente:

- Aumento das perdas (aquecimento), saturação, ressonâncias, vibrações nos enrolamentos e redução da vida útil de transformadores;
- Aquecimento, binários pulsantes, ruído audível e redução da vida útil das máquinas elétricas rotativas; disparo indevido dos semicondutores de potência em retificadores controlados e reguladores de tensão; problemas na operação de relés de proteção, disjuntores e fusíveis;
- Aumento nas perdas dos condutores elétricos;
- Aumento do valor eficaz da corrente da rede elétrica;

- Aumento considerável na dissipação térmica dos condensadores, levando à deterioração do dielétrico; redução da vida útil das lâmpadas e flutuação da intensidade luminosa (flicker – para o caso de ocorrência de subarmónicos);
- Erros nos medidores de energia elétrica e instrumentos de medida;
- Interferência eletromagnética em equipamentos de comunicação;
- Mau funcionamento ou falhas de operação em equipamentos eletrónicos ligados à rede elétrica, tais como computadores, controladores lógicos programáveis (PLCs), sistemas de controlo comandados por microcontroladores, etc. (De recordar que estes controlam frequentemente processos de fabrico).

2.6 – Limites de distorção harmónica

2.6.1 – Recomendação IEEE 519

A recomendação IEEE-519 [29] elaborada pelo Instituto de Engenheiros Eletrotécnicos, é um documento largamente adotado para o controlo da distorção harmónica. Neste são apresentados os limites de distorção harmónica de tensão e de corrente no Ponto de Acoplamento Comum, PAC, que se traduz como o ponto na rede elétrica, eletricamente mais próximo a uma determinada carga, onde o proprietário da carga ou o operador da REE de distribuição pode oferecer serviço a outro cliente. Esta recomendação tem como filosofia não se focar com o que ocorre no interior da instalação e sim com o que a instalação pode introduzir na rede elétrica e, portanto, atingir outros consumidores.

Além do *IDH*, o conceito de *Taxa de Distorção da Demanda, TDD*, é aplicado no cálculo da distorção harmónica da tensão e da corrente na recomendação. A Tabela 2.1 apresenta os limites de *IDH* e a *TDD* da tensão para diferentes níveis de tensão da REE no *PAC* [29]. A *TDD* da tensão é definida pela equação (2.7), onde U_h representa o valor das componentes harmónicas h e o U a tensão nominal do sistema, ambos em valor eficaz.

$$TDD_U = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} U_h^2}}{U} \quad (2.7)$$

Tabela 2.1 – Limite de distorção harmónica da tensão conforme IEEE 519 [29].

Nível de tensão no PAC	$IHD_{U\%}$	$TDD_{U\%}$
$U \leq 1 \text{ kV}$	5,0	8,0
$1 \text{ kV} \leq U \leq 69 \text{ kV}$	3,0	5,0
$69 \text{ kV} \leq U \leq 161 \text{ kV}$	1,5	2,5
$U \geq 161 \text{ kV}$	1,0	1,5

De uma forma geral, observa-se que os limites de distorção harmónica de tensão são mais restritos para níveis de tensão superiores, uma vez que existe um elevado potencial da distorção harmónica de tensão afetar um maior número consumidores. E, que $IHD_{U\%}$ e $TDD_{U\%}$ para tensões abaixo de 1 kV são limitadas em 5% e 8%, respetivamente.

Na recomendação os limites de distorção harmónica de corrente da carga são estabelecidos conforme a sua localização, refletida no valor da corrente de curto-circuito, I_{cc} , e no nível de tensão a qual a carga está sujeita, bem como no valor de corrente consumida, I_L .

A *Taxa de Distorção da Demanda* da corrente, é estabelecida em percentagem da máxima da corrente de carga em período entre 15 ou 30 minutos, indicando que a medição da TDD deve ser realizada no pico de consumo. O TDD da corrente pode ser calculada através da equação (2.8), onde I_h apresenta a amplitude das componentes harmónicas individuais em valor eficaz e I_L o máximo valor eficaz corrente da carga durante 15 ou 30 minutos;

$$TDD_I = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} I_h^2}}{I_L} \quad (2.8)$$

Apresenta-se na Tabela 2.1 os limites de distorção harmónica individual e total da corrente para diferentes níveis no PAC de acordo com a IEEE 519 [29].

Tabela 2.2 – Limites de distorção harmónicas da corrente para diferentes níveis de tensão no PAC de acordo a recomendação IEEE 519 [29].

120 V ≤ U < 69 kV						
I_{cc} / I_L	$3 \leq h \leq 11$	$11 \leq h \leq 17$	$17 \leq h \leq 23$	$23 \leq h \leq 35$	$35 \leq h \leq 50$	$TDD_{T\%}$
<20	4,00	2,00	1,50	0,60	0,30	5,00
20<50	7,00	3,50	2,50	1,00	0,50	8,00
500<100	10,00	4,50	4,00	1,50	0,70	12,00
100<1000	12,00	5,50	5,00	2,00	1,00	15,00
>1000	15,00	7,00	6,00	2,50	1,40	20,00
69 kV ≤ U < 161 kV						
<20	2,00	1,00	0,75	0,30	0,15	2,50
20<50	3,50	1,75	1,25	0,50	0,25	4,00
500<100	5,00	2,25	2,00	0,75	0,35	6,00
100<1000	6,00	2,75	2,50	1,00	0,50	7,50
>1000	7,50	3,50	3,0	1,25	0,70	10,00
U ≥ 161 kV						
<20	2,00	1,00	0,75	0,30	0,15	2,50
20<50	3,50	1,75	1,25	0,50	0,25	4,00
500<100	5,00	2,25	2,00	0,75	0,35	6,00
100<1000	6,00	2,75	2,50	1,00	0,50	7,50
>1000	7,50	3,50	3,00	1,25	0,70	10,00
Harmónicos pares são limitados em 25% dos limites dos harmónicos ímpares acima mencionados.						
I_{cc} – Máxima corrente de curto-circuito no PAC						
I_L – Máxima corrente de demanda da carga (frequência fundamental) no PAC						

Observa-se que os limites de distorção harmónica são mais restritos para níveis de tensão superiores, uma vez que existe um elevado potencial da distorção harmónica de tensão afetar um maior número consumidores. À medida que relação entre a corrente de curto-circuito e a corrente da carga (I_{cc} / I_L) aumenta, é possível ao consumidor introduzir um maior conteúdo harmónico na RE de distribuição.

2.6.2 – Norma IEC 61000-3-2

A norma IEC 61000-3-2 [30] elaborada pelo Comissão Eletrotécnica Internacional, define limites dos harmónicos de corrente para cargas inferiores a 16A. Os limites estabelecidos na norma são apresentados com base na categorização das cargas em quatro classes:

- Classe A, estão incluídas cargas trifásicas equilibradas e todos os outras cargas, exceto aquelas listadas nas outras classes seguintes;

- Classe B, estão incluídas ferramentas portáteis e equipamentos de soldagem a arco que não sejam equipamentos profissionais;
- Classe C, estão incluídos equipamento de iluminação;
- Classe D, estão incluídas computadores e monitores pessoais de potência menor que 600 W.

Na Tabela 2.3 são apresentados os limites máximo de harmónico de corrente permissível de acordo com a norma IEC 61000-3-2 [30].

Tabela 2.3 – Limites de harmónicos de corrente de acordo a norma IEC 61000-3-2 [30].

Harmónicos ímpares				
Harmónicos [h]	Classe A [A]	Classe B [A]	Classe C [% da fundamental]	Classe D [mA/W]
3	2,300	3,450	30 x FP	3,400
5	1,140	1,710	10	1,900
7	0,770	1,155	7	1,000
9	0,400	0,600	5	0,500
11	0,330	0,495	3	0,350
13	0,210	0,315	3	0,296
$15 \leq h \leq 39$	$0,150 \times \frac{15}{h}$	$0,255 \times \frac{15}{h}$	3	$\frac{3,850}{h}$
Harmónicos pares				
2	1,080	1,620	2	-
4	0,430	0,645	-	-
6	0,500	0,450	-	-
$8 \leq h \leq 40$	$0,230 \times \frac{8}{h}$	$0,345 \times \frac{8}{h}$	-	-

FP – Fator de potência do circuito

2.6.3 – Norma NP EN 50160

A NP EN 50160 [31] é a versão portuguesa da Norma Europeia EN50160. A sua tradução é da responsabilidade do Instituto Português da Qualidade, IPQ, e ratificada pelo Comitê Europeu de Normalização Eletrotécnica, CENELEC, em 2010.

Esta norma estabelece que em condições normais de operação, durante cada período de 1 semana, 95% dos valores eficazes médios de cada tensão harmónica individual deve ser menor ou igual aos valores indicado na Tabela 2.4. Além disso, o TDD da tensão de alimentação, incluindo todos os harmónicos até 40, não deve exceder 8%.

Tabela 2.4 – Limites de distorção harmônica individual de tensão de acordo a norma EN 50160 [31].

Harmônicos ímpares		Harmônicos pares	
Harmônicos [<i>h</i>]	<i>IHD</i> _{<i>u</i>%}	Harmônicos [<i>h</i>]	<i>IHD</i> _{<i>u</i>%}
3	5,0	2	2
5	6,0	4	1
7	5,0	6 ≤ <i>h</i> ≤ 24	0,5
9	1,5	-	-
11	3,5	-	-
13	3,0	-	-
15	0,5	-	-
17	2,0	-	-
19	1,5	-	-
21	0,5	-	-
23	1,5	-	-
25	1,5	-	-

2.7 – Fator de potência

O conceito de fator de potência, *FP*, foi definido inicialmente em uma época em que a REE era utilizada somente por cargas lineares. Esta grandeza representava o desfasamento entre a tensão de alimentação e a corrente consumida pelas cargas de um sistema elétrico e era expressa por $\cos(\varphi)$, refletindo-se no quociente entre a potência ativa, isto é, a potência efetivamente é utilizada pelas cargas para produzir energia, e a potência aparente, conforme a equação (2.9).

$$FP = \cos(\varphi) = \frac{P}{S} \quad (2.9)$$

Desta forma, o fator de potência pode variar entre 0 e 1, sendo que valor de unitário significa que toda a potência aparente representa a potência ativa, com a tensão e corrente em fase, enquanto um valor nulo significa que toda a potência aparente é potência reativa, com a tensão e corrente desfasados de 90°. No entanto, este conceito assume que tanto que a tensão como a corrente são sinusoidais.

Atualmente, devido ao surgimento de cargas não-lineares nos sistemas elétricos, a quantificação do fator de potência, em contexto não sinusoidal, requereu a adaptação de conceitos já conhecidos, bem como a introdução de novos conceitos que relacionam as potências e a distorção harmônica. A definição inicial passou a ser denominada de fator de

deslocamento, DPF , representando o desfasamento entre o primeiro harmónico da tensão e da corrente, como indicado na equação (2.10).

$$DPF = \cos(\varphi_1) = \frac{P_1}{S_1} \quad (2.10)$$

Além disso, foi estabelecida uma componente do fator de potência relacionada à distorção harmónica, denominada de Fator de Distorção, DF . Esta componente expressa a relação entre os valores eficazes da corrente fundamental e da corrente total, como é evidenciado na equação (2.11).

$$DF = \frac{I_1}{I} \quad (2.11)$$

Assim como o DPF , o DF pode assumir valores entre 0 e 1, sendo o valor nulo correspondente a uma corrente que contém apenas harmónicos, enquanto o valor unitário representa uma corrente puramente sinusoidal.

Desta forma, a definição de fator de potência total, TFP , traduz-se no quociente entre a potência ativa e potência aparente, conforme a equação (2.12).

$$TFP = \frac{P}{S} \quad (2.12)$$

Levando em consideração, que apenas a componente fundamental contribui para a potência ativa, a equação (2.12) pode ser reescrita na equação (2.13).

$$TFP = \frac{P_1}{S} = \frac{UI_1 \cos(\varphi_1)}{UI} = \frac{I_1 \cos(\varphi_1)}{I} \quad (2.13)$$

A mesma equação (2.12) pode ser reescrita, recorrendo às definições de DPF e DF presentes nas equações (2.10) e (2.11), respetivamente, concluindo-se que o TFP está dependente tanto do DPF como do DF .

$$TFP = \frac{I_1 \cos(\varphi_1)}{I} = DF DPF \quad (2.14)$$

Considerando que apenas a tensão de alimentação é sinusoidal, é possível relacionar o fator de potência e distorção harmónica de corrente, conforme indicado na equação (2.15), concluindo-se que há um decréscimo de fator de potência com o aumento do TDD_1 .

$$TFP = \frac{1}{\sqrt{1 + TDD_i^2}} DPF \quad (2.15)$$

Em uma instalação elétrica, é necessário tem em conta o fator de potência. O excesso de corrente disponível ou fluxo de potência reativa nas RE de distribuição de energia elétrica resulta em sobrecargas de transformadores, quedas de tensão nas linhas, aumento de temperatura nos cabos de alimentação e, portanto, nas perdas de energia ativa e sobredimensionamento de dispositivos de proteção. Desta forma, é conveniente que a instalação elétrica possua um fator de potência elevado [32], [33], [34].

2.8 – Desequilíbrios

É dito que um sistema elétrico trifásico é desequilibrado quando as tensões sistema módulos e/ou defasagens angulares diferentes de 120° entre si [22].

Geralmente, em sistemas de alta tensão não existem grandes desequilíbrios, exceto quando alimentam instalações com cargas monofásicas de grande porte. Outro fator que causa o surgimento do desequilíbrio de tensões é a existência de linhas de transporte áreas mal transpostas, originando em capacitâncias intrínsecas diferentes entre os condutores [22], [17].

Sabe-se que a presença de cargas trifásicas desequilibradas ou cargas monofásicas distribuídas de forma assimétrica ou ligadas a um sistema de distribuição causam um desequilíbrio de tensão, uma vez que as correntes consumidas nas três fases não têm módulo iguais e não estão desfasadas de 120° entre si.

Um dos métodos para a caracterização do desequilíbrio consiste na decomposição das grandezas elétricas em sistema de componentes simétricas [22], [35], [36]. Desta forma, o sistema assimétrico das tensões ou correntes é representado por uma soma vetorial de três sistemas trifásicos de tensão ou corrente com as sequências direta, inversa e homopolar.

Conforme descrito em [37], cada uma dessas sequências possui características específicas que permitem analisar e quantificar o desequilíbrio presente no sistema elétrico, sendo:

- Sistema de sequência direta, (+), composto por componentes de igual magnitude em cada fase, mas deslocado em 120°, a componente da fase b

atrasado em relação ao componente da fase a em 120° , e a componente da fase c adiantado em relação ao componente da fase a em 120° .

- Sistema de sequência inversa (-), composto por componentes também de igual magnitude em cada fase, mas deslocado em 120° , a componente da fase c atrasado em relação ao componente da fase a em 120° , e a componente da fase b adiantado em relação a componente da fase a em 120° .
- Sistema de sequência homopolar (0), composto por componentes de igual amplitude e em fase.

Portanto, a avaliação da qualidade de um sinal, o desequilíbrio das tensões ou corrente em regime permanente, pode ser realizada através de dois índices, V_{inv} e V_{hom} para as tensões e, I_{inv} e I_{hom} , para as correntes [38], conforme a equação(2.16). Estes índices relacionam as componentes das tensões e correntes de sequência inversa, V_- e I_- , e as componentes de sequência homopolar, V_0 e I_0 , respectivamente, com as componentes de sequência direta, V_+ e I_+ da tensão e da corrente.

$$\left\{ \begin{array}{l} V_{inv} = \frac{V_-}{V_+} \times 100 \\ V_{hom} = \frac{V_0}{V_+} \times 100 \end{array} \right. \quad \left\{ \begin{array}{l} I_{inv} = \frac{I_-}{I_+} \times 100 \\ I_{hom} = \frac{I_0}{I_+} \times 100 \end{array} \right. \quad (2.16)$$

De acordo com a NP EN 50160 [31], em condições de operação, durante cada período de 1 semana, em média ao longo de 10 minutos, 95% dos valores eficazes das tensões de sequência negativa devem estar entre 0% e 2% da sequência direta. Em algumas áreas onde existem linhas parcialmente monofásicas ou bifásicas, podem admitir desequilíbrios até 3% no PAC. Esta norma portuguesa apenas indica valores para a componente inversa das tensões, por ter esta componente relevante para as possíveis perturbações provocados pelos aparelhos ligados ao sistema elétrico. Contudo, é importante salientar que as componentes de sequência homopolar se e circulam somam no condutor neutro, exigindo adicionalmente do sistema um dimensionamento adequado do condutor neutro.

Diferentemente do desequilíbrio de tensão, as normas não abordam os desequilíbrios de corrente de forma direta, deixando ao critério dos fabricantes de equipamentos definirem os limites.

O desequilíbrio no sistema de elétrico está relacionado ao problema de estabilidade do sistema de potência. Alguns dos principais elementos do sistema elétrico a serem prejudicados pelo desequilíbrio de tensão são as máquinas elétricas. Quando a componente de sequência negativa está presente, é gerada uma componente de fluxo magnético que gira no sentido oposto ao fluxo principal, o que provoca aumento de temperatura, redução da eficiência e diminuição da vida útil da máquina [39], [40].

Para além disso, a presença do desequilíbrio na rede elétrica incluir perdas adicionais de energia, redução da capacidade de transporte de energia através da componente de sequência direta, aquecimento adicional de equipamentos, consumo excessivo de energia reativa, mau funcionamento dos instrumentos de medição, dificultar a operação precisa de relés e disjuntores e redução da vida útil de diferentes equipamentos [22].

2.9 – Conclusão

O uso de semicondutores de potência permite melhorar a controlabilidade e eficiência dos sistemas produtivos, contudo a sua proliferação tem provocado a degradação das formas de onda das tensões e das correntes nos sistemas elétricos, originando um conjunto de problemas que se alastram desde o ponto de produção de energia até ao ponto de consumo, afetando inclusivamente o próprio sistema de transporte e distribuição de energia.

Neste capítulo são analisados alguns desses problemas, dando ênfase nos que podem ser compensados pelos filtros ativos paralelo.

Observou-se que a técnica de tratar a distorção harmónica da onda das correntes e tensões como um conjunto de harmónicos, permite facilitar a análise desses fenómenos, bem como mensurá-los e realizar cálculos. Evidenciou-se as diferenças entre os limites da distorção harmónica estabelecidos na IEC e IEEE, a norma IEC61000-3-2 não estabelece limites para a circulação de harmónicos de corrente na rede, mas sim níveis de harmónicos que as diferentes classes de cargas podem injetar nesta. Enquanto a recomendação IEEE 519, além de estabelecer limites para circulação de harmónicos de corrente na rede, esses limites são afetados pela localização e a tensão aos quais estão submetidos.

Em seguida, foi explicado o conceito de fator de potência, que inicialmente apenas dizia respeito ao desfasamento entre a tensão e a corrente, mas com a proliferação de cargas não-

lineares adquiriu uma dimensão mais alargada, podendo dividir-se o fator de potência total (*TPF*) em fator de deslocamento (*DPF*) e em fator de distorção (*DF*).

Para os limites de desequilíbrio foi apresentado o método das componentes simétricas. apenas o valor para o desequilíbrio da componente inversa da tensão é apresentado na norma NP EN 50160.

No capítulo seguinte será abordado os algoritmos de controlo usados nos controladores do filtro ativo implementado neste trabalho por forma a mitigar os problemas apresentados neste capítulo.

Capítulo 3

Filtro ativo de potência paralelo

3.1 – Introdução

No estudo e implementação de um filtro é indispensável um perfeito entendimento da sua estrutura e das técnicas aplicadas no seu controle. Desta forma, neste capítulo será apresentado o algoritmo de geração das referências de corrente do filtro baseado na teoria das potências instantâneas, analisado o modelo matemático do inversor de tensão de quatro braços, bem como o algoritmo de controle vetorial não linear de corrente utilizado nesta dissertação.

3.2 – Teoria das potências instantâneas

A teoria das potências instantâneas, também conhecida como teoria PQ, teve a sua primeira versão [41] publicada na língua japonesa, em uma conferência local do Japão em 1982, pelos autores Akagi, Kanazawa e Nabae. No mesmo ano, a teoria foi publicada em *Transactions of the Institute of Electrical Engineers of Japan* [42]. Em 1983, foi publicado em inglês em uma conferência internacional [43], mostrando a possibilidade de compensar a potência reativa sem elementos de armazenamento de energia. Um artigo mais completo incluindo verificações experimentais foi publicado no *IEEE Transactions on Industry Applications* em 1984 [44].

Os cálculos desta teoria são relativamente simples, consistindo na transformação algébrica das tensões e correntes trifásicas da coordenada abc para a coordenada $\alpha\beta 0$ e posterior cálculo das componentes das potências instantâneas. A teoria PQ é válida tanto para operação em regime permanente como em regime transitório. A transformação de Clarke [45] para as tensões e para as correntes são representadas na forma matricial na equação (3.1).

$$\begin{bmatrix} u_\alpha \\ u_\beta \\ u_0 \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & -\frac{\sqrt{3}}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_a \\ u_b \\ u_c \end{bmatrix} \quad \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \\ i_0 \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & -\frac{\sqrt{3}}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} \quad (3.1)$$

O termo $\sqrt{2/3}$, na equação (3.1), é denominado por constante de invariância de potência, permitindo que potência trifásica calculada tanto nas coordenadas abc quanto na coordenada $\alpha\beta 0$ apresentem o mesmo valor.

Uma das vantagens da teoria PQ, está na facilidade de eliminar os termos da coordenada homopolar, em caso do sistema ser trifásico a três condutores, ou em caso do sistema ser trifásico a quatro condutores e não apresentar desequilíbrios de correntes ou tensões, nem harmônicos múltiplos de três, podendo as matrizes em (3.1) ser reescrita de acordo com (3.2).

$$\begin{bmatrix} u_\alpha \\ u_\beta \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_{an} \\ u_{bn} \\ u_{cn} \end{bmatrix} \quad \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} \quad (3.2)$$

As potências instantâneas apresentadas na teoria PQ, são denominadas por potência instantânea real, p , potência instantânea imaginária, q , e potência instantânea homopolar, p_0 e expressas através na forma matricial na equação (3.3) e expressas isoladamente na equação (3.4), equação (3.5) e equação (3.6).

$$\begin{bmatrix} p \\ q \\ p_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_\alpha & v_\beta & 0 \\ v_\beta & -v_\alpha & 0 \\ 0 & 0 & v_0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \\ i_0 \end{bmatrix} \quad (3.3)$$

$$p = v_\alpha i_\alpha + v_\beta i_\beta \quad (3.4)$$

$$q = v_\beta i_\alpha - v_\alpha i_\beta \quad (3.5)$$

$$p_0 = v_0 i_0 \quad (3.6)$$

Na teoria, a potência real, imaginária, e homopolar quando decompostas em série de Fourier, apresentam uma parcela média e outra alternada, conforme as equações (3.7), (3.8), (3.9).

$$p = \bar{p} + \tilde{p} \quad (3.7)$$

$$q = \bar{q} + \tilde{q} \quad (3.8)$$

$$p_0 = \bar{p}_0 + \tilde{p}_0 \quad (3.9)$$

As parcelas de potências acima expostas, estão representadas na Figura 3.1 e Figura 3.2 para coordenadas abc e coordenadas $\alpha\beta 0$, respectivamente, e traduzem-se em:

\bar{p} = Valor médio da potência real instantânea – corresponde à energia por unidade de tempo que é transferida da rede elétrica para a carga, através das coordenadas $\alpha\beta$ e coordenadas abc, de forma equilibrada, sendo esta potência uma componente de potência desejada na REE.

\tilde{p} = Valor alternado da potência real instantânea – corresponde à energia por unidade de tempo que é trocada entre a rede elétrica e a carga através das coordenadas $\alpha\beta$ e das coordenadas abc.

q = Potência instantânea imaginária – corresponde à potência que é trocada entre as coordenadas $\alpha\beta$. Esta potência não implica transferência de energia entre a rede elétrica e a carga, mas é responsável pela existência de correntes indesejáveis, que circulam entre as fases do sistema, pelo que dever ser totalmente compensada.

Em caso de uma alimentação de tensão sinusoidal equilibrada e uma carga equilibrada, com ou sem harmônicas, o valor médio da potência imaginária instantânea, \bar{q} , corresponde à potência reativa convencional ($\bar{q} = 3UI_1 \sin\phi_1$).

\bar{p}_0 = Valor médio da potência real instantânea – corresponde à energia por unidade de tempo que é transferida da rede elétrica para a carga através da coordenada homopolar, esta é uma componente de potência desejada na REE.

\tilde{p}_0 = Valor alternado da potência homopolar instantânea – corresponde a energia por unidade de tempo que é trocada entre a rede elétrica e a carga através da coordenada homopolar.

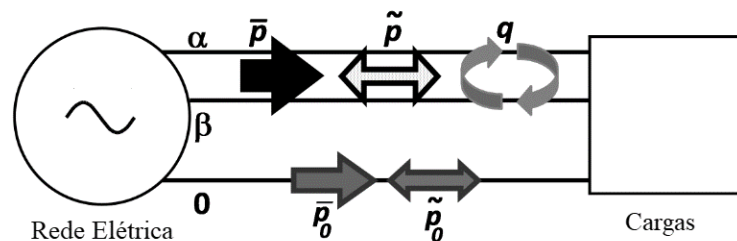


Figura 3.1 – Parcelas das potências instantâneas da teoria PQ em coordenadas abc. Adaptado de [46].

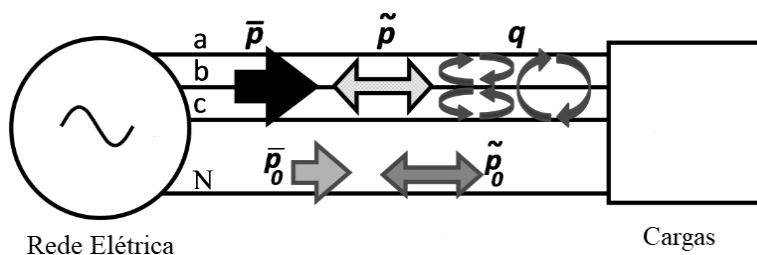


Figura 3.2 – Parcelas das potências instantâneas da teoria PQ em coordenadas $\alpha\beta 0$. Adaptado de [46].

Como visto anteriormente, p é geralmente o único componente de potência da teoria p-q desejável. As outras potências podem ser compensadas utilizando o filtro (Figura 3.3 e Figura 3.4). Conforme demonstrado por Watanabe et al. [47], [48], p_0 pode ser compensado sem a necessidade de qualquer fonte de alimentação no filtro. Esta potência é entregue da rede elétrica para a carga através do filtro (Figura 3.3 e Figura 3.4). Pelo que a energia anteriormente transferida da rede elétrica para a carga através dos componentes de sequência homopolar da tensão e da corrente, agora é fornecida de maneira equilibrada pelas fases da rede elétrica.

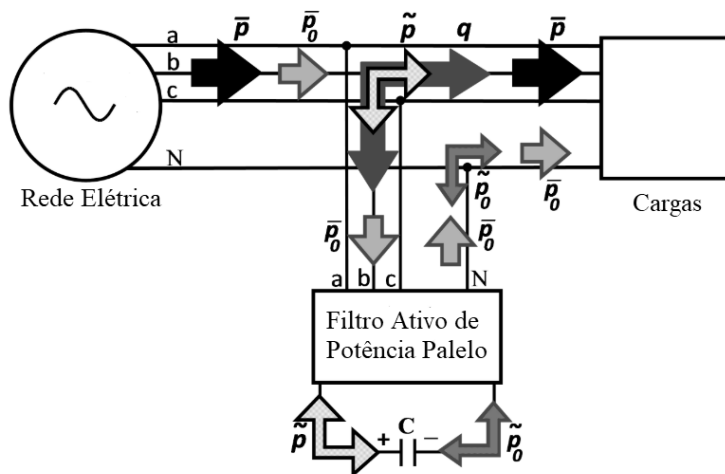


Figura 3.3 – Compensação das parcelas das potências instantâneas da teoria PQ em coordenadas abc. Adaptado de [46].

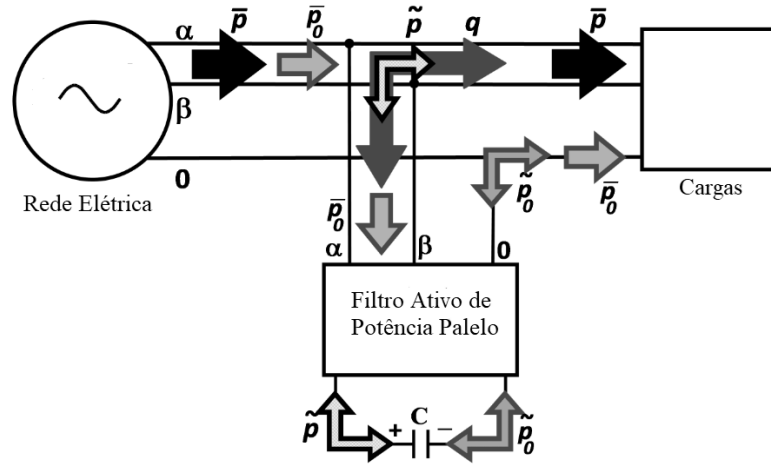


Figura 3.4 – Compensação das parcelas das potências instantâneas da teoria PQ em coordenadas $\alpha\beta 0$.
Adaptado de [46].

Também é possível concluir pela Figura 3.3 e Figura 3.4 que o condensador do filtro é necessário apenas para compensar \tilde{p} e \tilde{p}_0 , pois essas grandezas devem ser armazenadas neste componente um momento para serem, posteriormente, entregues à carga. A potência imaginária instantânea (q), que inclui a potência reativa convencional, é compensada sem a contribuição do condensador. Pelo que o tamanho do condensador não depende da quantidade de potência reativa a ser compensada.

Conhecendo as potências instantâneas e das suas parcelas, o cálculo das referências das correntes de compensação das fases $\alpha\beta$ e da fase 0 , é dada em forma matricial pela equação (3.10) e a equação (3.11), respectivamente.

$$\begin{bmatrix} i_{C\alpha}^* \\ i_{C\beta}^* \end{bmatrix} = \frac{1}{v_\alpha^2 + v_\beta^2} \begin{bmatrix} v_\alpha & -v_\beta \\ v_\beta & v_\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p_c \\ q_c \end{bmatrix} \quad (3.10)$$

$$i_{C0}^* = i_0 \quad (3.11)$$

As componentes, p_c e q_c apresentadas na equação (3.10), correspondem a potência de compensação real e imaginária fornecidas pelo filtro e são calculadas através das equações (3.12) e (3.13), respectivamente.

$$p_c = \tilde{p} - \bar{p}_0 \quad (3.12)$$

$$q_c = q \quad (3.13)$$

Para o correto funcionamento do filtro, na teoria PQ é definida a componente de potência de regulação, p_{reg} , que como o próprio nome indica, é responsável por regular a tensão no barramento DC, por forma a manter este dentro de níveis adequados de funcionamento. A potência de regulação, p_{reg} , é calculada através da equação (3.14), onde K corresponde ao ganho proporcional, e está incluída no valor de potência real de compensação, conforme a equação (3.15).

$$p_{reg} = K(u_{DC}^* - u_{DC}) \quad (3.14)$$

$$p_c = \tilde{p} - \bar{p}_0 - p_{reg} \quad (3.15)$$

Desta forma,

- Se $u_{DC}^* < u_{DC}$, o filtro fornece energia para a rede elétrica e u_{DC} diminui.
- Se $u_{DC}^* > u_{DC}$, o filtro absorve a energia da rede elétrica e u_{DC} aumenta.

As referências das correntes de compensação em sistema de coordenados abc é obtida através do inverso da transformação de Clarke conforme a equação (3.16) e aplicando a primeira lei de *Kirchhoff* a referência da corrente do condutor neutro é através da equação (3.17).

$$\begin{bmatrix} i_{ca}^* \\ i_{cb}^* \\ i_{cc}^* \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} & 1 & 0 \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{c\alpha}^* \\ i_{c\beta}^* \\ i_{c0}^* \end{bmatrix} \quad (3.16)$$

$$i_{cn}^* = -(i_{ca}^* + i_{cb}^* + i_{cc}^*) \quad (3.17)$$

Na Figura 3.4 estão resumidos os cálculos apresentados nesta seção. Estes cálculos correspondem a estratégia de controlo de filtro baseado na teoria PQ para uma potência instantânea da rede elétrica constante. Esta abordagem quando aplicada a um sistema trifásico com tensões sinusoidais equilibradas, traduz-se nos seguintes resultados:

- As correntes de fases tornam-se sinusoidais, equilibradas e em fase com as tensões da rede;
- A corrente de neutro é anulada;
- A potência trifásica instantânea, $p_{3\phi} = v_a i_a + v_b i_b + v_c i_c$, torna-se constante.

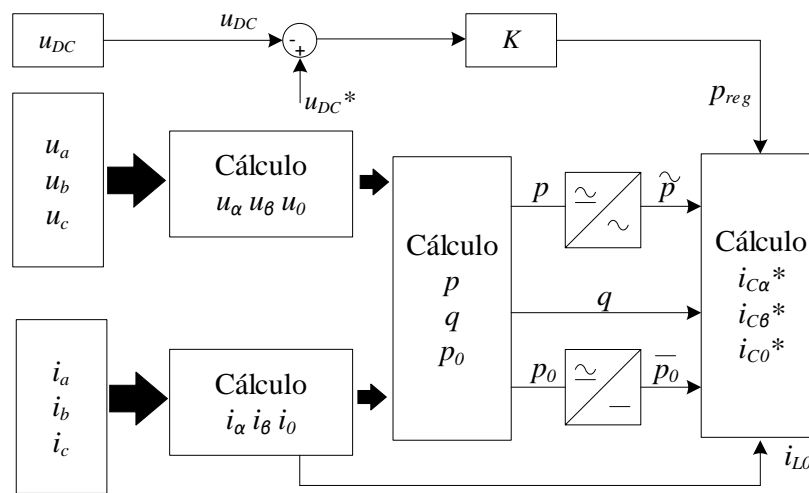


Figura 3.5 – Cálculos da teoria PQ para uma potência instantânea da rede elétrica constante.

3.3 – Modelo matemático do inversor de quatro braços

Apresenta-se na Figura 3.6 o modelo matemático do inversor de quatro braços utilizado neste trabalho. O inversor é alimentado por uma tensão DC constante, u_{DC} , e a sua saída identificada pelas fases a, b, c e pelo terminal neutro n . O r_f e L_f representam a resistência parasita e a indutância do filtro trifásico indutivo L e as suas saídas são identificadas pelas fases A, B, C e pelo terminal neutro N . O filtro trifásico indutivo L permite obter correntes de compensação, $i_{ca}, i_{cb}, i_{cc}, i_{cn}$, com baixa distorção harmônica.

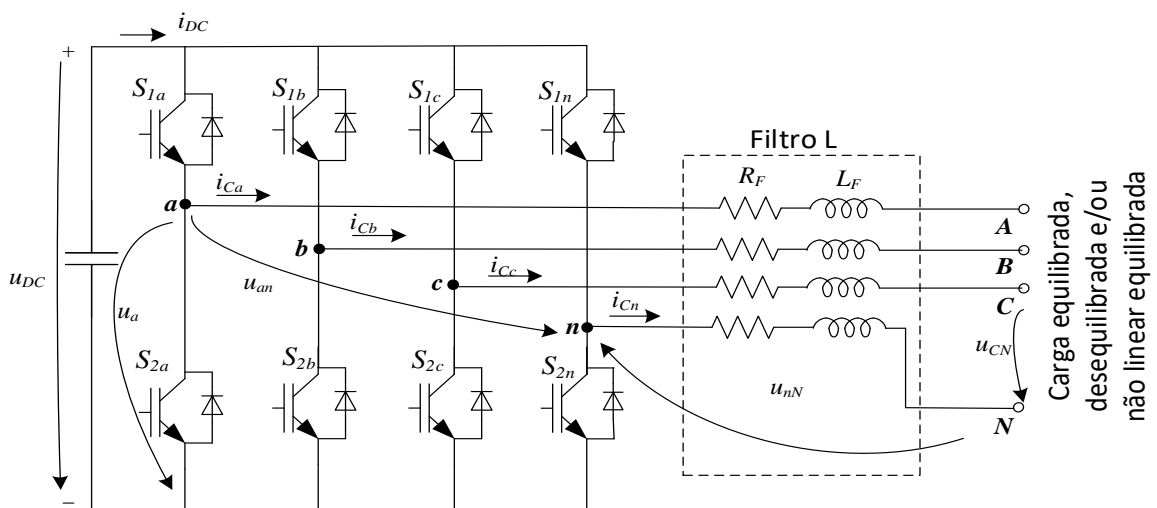


Figura 3.6 - Inversor de tensão a quatro condutores e filtro de saída L . Adaptado de [6].

Na Figura 3.6, os dispositivos semicondutores S_{1k} e S_{2k} , em que $k = \{a, b, c, n\}$, são ideais e seu estado de comutação é obtida através da variável de comutação, γ_k , relativa a cada braço do inversor de quatro braços, conforme a equação (3.18). Pela restrição da topológica, isto é, necessidade de prevenir o curto-circuito no lado contínuo, os dois grupos de dispositivos semicondutores do mesmo braço de potência devem estar em estados complementares [49].

$$\gamma_k = \begin{cases} 1 \rightarrow S_{1k} = 0 \text{ e } S_{2k} = 1 \\ 0 \rightarrow S_{1k} = 1 \text{ e } S_{2k} = 0 \end{cases}, k = \{a, b, c, n\} \quad (3.18)$$

As tensões u_k , medidas entre os terminais a, b, c, n e o terminal negativo do barramento DC, podem ser expressas em função de γ_k através da equação (3.19).

$$u_k = \gamma_k \times u_{DC}, k = \{a, b, c, n\} \quad (3.19)$$

Enquanto as tensões simples na saída do inversor de quatro braços são obtidas através de equação (3.20).

$$\begin{aligned} u_{an} &= (\gamma_a - \gamma_n) u_{DC} \\ u_{bn} &= (\gamma_b - \gamma_n) u_{DC} \\ u_{cn} &= (\gamma_c - \gamma_n) u_{DC} \end{aligned} \quad (3.20)$$

Dependendo da variável de estados de comutação, γ_k , o inversor de quatro braços apresenta 16 (2^4) estados possíveis. Apresenta-se na Tabela 3.1 todos os estados de comutação e as tensões instantâneas resultantes e o respetivo vetor a seleccionar.

Tabela 3.1 - Estados de comutação e vetores de tensão. Extraído de [6].

γ_a	γ_b	γ_c	γ_n	vetor	u_a	u_b	u_c	u_n	u_{an}	u_{bn}	u_{cn}
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1	0	0	0	1	u_{DC}	0	0	0	u_{DC}	0	0
0	1	0	0	2	0	u_{DC}	0	0	0	u_{DC}	0
1	1	0	0	3	u_{DC}	u_{DC}	0	0	u_{DC}	u_{DC}	0
0	0	1	0	4	0	0	u_{DC}	0	0	0	u_{DC}
1	0	1	0	5	u_{DC}	0	u_{DC}	0	u_{DC}	0	u_{DC}
0	1	1	0	6	0	u_{DC}	u_{DC}	0	0	u_{DC}	u_{DC}
1	1	1	0	7	u_{DC}	u_{DC}	u_{DC}	0	u_{DC}	u_{DC}	u_{DC}

0	0	0	1	8	0	0	0	u_{DC}	$-u_{DC}$	$-u_{DC}$	$-u_{DC}$
1	0	0	1	9	u_{DC}	0	0	u_{DC}	0	$-u_{DC}$	$-u_{DC}$
0	1	0	1	10	0	u_{DC}	0	u_{DC}	$-u_{DC}$	0	$-u_{DC}$
1	1	0	1	11	u_{DC}	u_{DC}	0	u_{DC}	0	0	$-u_{DC}$
0	0	1	1	12	0	0	u_{DC}	u_{DC}	$-u_{DC}$	$-u_{DC}$	0
1	0	1	1	13	u_{DC}	0	u_{DC}	u_{DC}	0	$-u_{DC}$	0
0	1	1	1	14	0	u_{DC}	u_{DC}	u_{DC}	$-u_{DC}$	0	0
1	1	1	1	15	u_{DC}	u_{DC}	u_{DC}	u_{DC}	0	0	0

A corrente no barramento DC , i_{DC} , depende dos estados de comutação de cada braço do inversor, γ_k , e das correntes de compensação, i_{Ck} , conforme a equação (3.21).

$$i_{DC} = \gamma_a i_{Ca} + \gamma_b i_{Cb} + \gamma_c i_{Cc} + \gamma_n i_{Cn} \quad (3.21)$$

Utilizando a primeira lei de *Kirchhoff*, a corrente de neutro é descrita por (3.22).

$$i_{Cn} = - (i_{Ca} + i_{Cb} + i_{Cc}) \quad (3.22)$$

Utilizando a segunda lei de *Kirchhoff*, as equações das tensões são representadas na forma matricial na equação (3.6).

$$r_f \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{Ca} \\ i_{Cb} \\ i_{Cc} \end{bmatrix} + L_f \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_{Ca} \\ i_{Cb} \\ i_{Cc} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} u_{an} - u_{nN} - u_{AN} \\ u_{bn} - u_{nN} - u_{BN} \\ u_{cn} - u_{nN} - u_{CN} \end{bmatrix} = 0 \quad (3.23)$$

3.4 – Controle vetorial não linear de correntes

Na Figura 4.3 apresentam-se os blocos de controle do inversor de quatro braços. Por forma a realizar este controle, são utilizadas as correntes de referência, obtidas a partir do algoritmo de geração de referências baseado na teoria PQ [50], [46], i_{Ca}^* , i_{Cb}^* e i_{C0}^* , e as correntes de compensação fornecida pelo inversor de quatro braços, i_{Ca} , i_{Cb} e i_{C0} em coordenadas $\alpha\beta 0$.

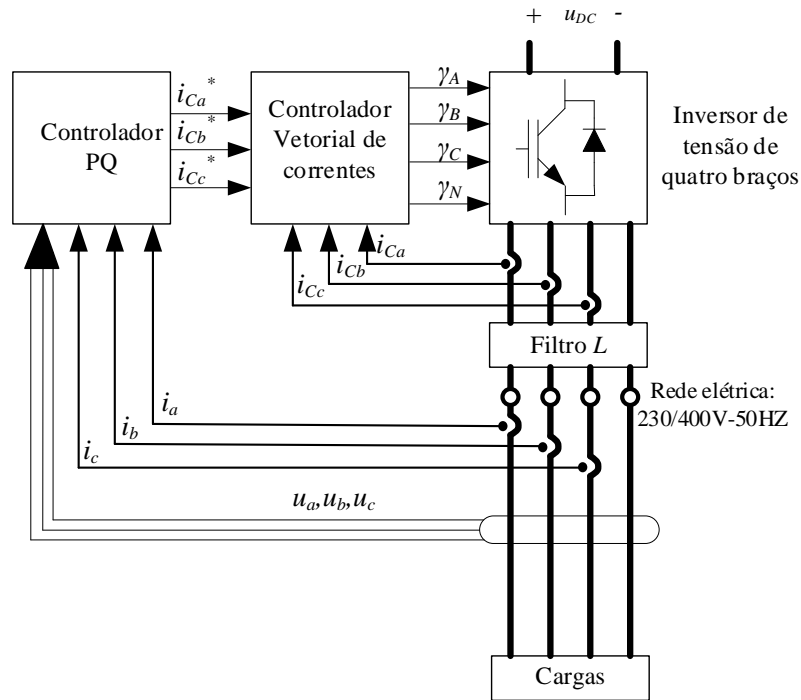


Figura 3.7 – Estrutura em cascata dos controladores do inversor de quatro braços. Adaptado de [6].

De modo a definir a estratégia de controle do controlador vetorial não linear de correntes, a equação (3.23) pode ser escrita na forma compacta utilizando o sistema de coordenadas $\alpha\beta 0$, em função do vetor de tensão u_j , através da matriz de transformação de Clarke apresentado na equação 3.1.

$$u_j = ri_{Cj} + L \frac{di_{Cj}}{dt} - v_j, j = \{\alpha, \beta, 0\} \quad (3.24)$$

A expressão (3.24) define a dinâmica das correntes do inversor de quatro braços em coordenadas $\alpha\beta 0$, em que u_j corresponde ao vetor de tensão a ser escolhido de modo obter-se o controle desejado das correntes i_{Cj} . Em (3.24), v_j representa, consecutivamente, as tensões entre os terminais a , b e c da carga e o terminal n do inversor, no sistema de coordenadas $\alpha\beta 0$. A resistência parasita e indutância do filtro L estão representadas por r e L , respectivamente.

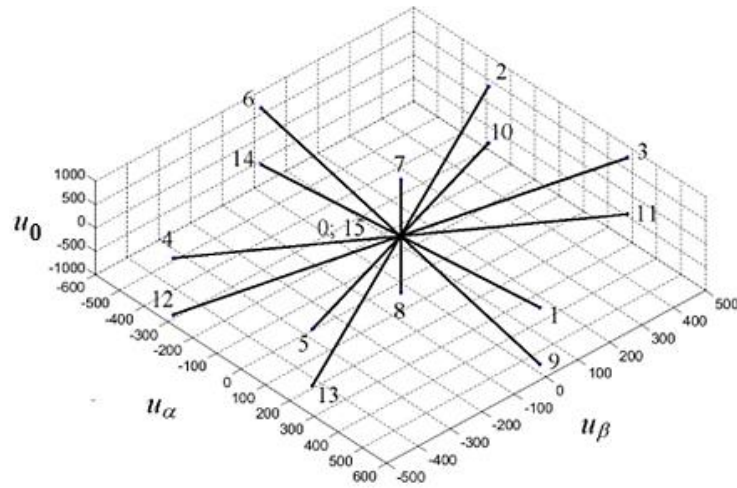


Figura 3.8 – Vetores de tensão disponíveis no inversor de quatro braços em coordenadas $\alpha\beta 0$.

Adaptado de [51].

Comparando as correntes de referência com as correntes de saída obtêm-se os erros das correntes em componentes $\alpha\beta 0$, isto é, e_{i_α} , e_{i_β} , e_{i_0} , de acordo com (3.25).

$$e_{i_{\alpha\beta 0}} = i_{C\alpha\beta 0}^* - i_{C\alpha\beta 0} \quad (3.25)$$

A avaliação dos erros resultantes, $e_{i_{\alpha\beta 0}}$, realiza-se através de três comparadores de histerese que avaliam os erros de seguimentos das correntes em três níveis: negativo, nulo e positivo, de acordo com (3.26).

$$\begin{cases} e_{i_{\alpha\beta 0}} > +\Delta & \Rightarrow \delta_{\alpha\beta 0} = 1 \\ -\Delta < e_{i_{\alpha\beta 0}} < +\Delta & \Rightarrow \delta_{\alpha\beta 0} = 0 \\ e_{i_{\alpha\beta 0}} < -\Delta & \Rightarrow \delta_{\alpha\beta 0} = -1 \end{cases} \quad (3.26)$$

Em (3.26), Δ representa a banda de histerese e $\delta_{\alpha\beta 0}$ os valores de saída dos comparadores de histerese de três níveis.

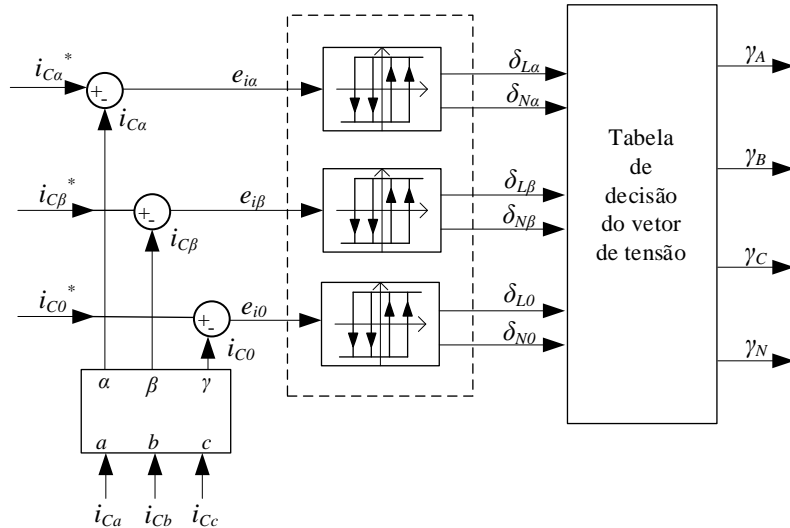


Figura 3.9 – Esquema de princípio de controlador vetorial de correntes do inversor de quatro braços. Adaptado de [6].

A estratégia de controle no sistema de coordenadas $\alpha\beta 0$ é descrita na equação (3.27). A seleção do vetor de tensão é obtida, avaliando a saída dos comparadores de histerese de modo a impor-se as dinâmicas necessárias às correntes em $\alpha\beta 0$ que, conforme a equação (3.27), permitam fazer o seguimento das correntes de referência anulando os erros.

$$\begin{cases} \delta_{\alpha\beta 0} = 1 \Rightarrow i_{C\alpha\beta 0}^* > i_{C\alpha\beta 0} \Rightarrow \frac{di_{C\alpha\beta 0}}{dt} > 0 \Rightarrow u_{\alpha\beta 0} > 0 \\ \delta_{\alpha\beta 0} = 0 \Rightarrow i_{C\alpha\beta 0}^* \approx i_{C\alpha\beta 0} \Rightarrow \frac{di_{C\alpha\beta 0}}{dt} \approx 0 \Rightarrow u_{\alpha\beta 0} = 0 \\ \delta_{\alpha\beta 0} = -1 \Rightarrow i_{C\alpha\beta 0}^* < i_{C\alpha\beta 0} \Rightarrow \frac{di_{C\alpha\beta 0}}{dt} < 0 \Rightarrow u_{\alpha\beta 0} < 0 \end{cases} \quad (3.27)$$

A Tabela 3.2 à Tabela 3.4 apresentam a seleção dos vetores de tensão baseadas na análise das correntes. Em diversos casos existe mais do que uma possibilidade de escolha de vetores de tensão para o controle do inversor de quatro braços.

Tabela 3.2 – Seleção dos vetores de tensão para $\delta_0 = 1$. Extraído de [6].

$e_{i0} (\delta_0=1)$		$e_{i\alpha}$		
		$\delta_\alpha = 1$	$\delta_\alpha = 0$	$\delta_\alpha = -1$
$e_{i\beta}$	$\delta_\beta = 1$	3	2; 3	2
	$\delta_\beta = 0$	1	7	6

$\delta_\beta = -1$	5	4; 5	4
---------------------	---	------	---

Tabela 3.3 – Seleção dos vetores de tensão para $\delta_0 = 0$. Extraído de [6].

$e_{i0} (\delta_0=0)$		$e_{i\alpha}$		
		$\delta_\alpha = 1$	$\delta_\alpha = 0$	$\delta_\alpha = -1$
$e_{i\beta}$	$\delta_\beta = 1$	3; 11	2; 11; 3; 10	2; 10
	$\delta_\beta = 0$	0; 15; 1; 9	0; 15	0; 15; 6; 14
	$\delta_\beta = -1$	5; 13	5; 2; 4; 13	4; 12

Tabela 3.4 – Seleção dos vetores de tensão para $\delta_0 = -1$. Extraído de [6].

$e_{i0} (\delta_0=-1)$		$e_{i\alpha}$		
		$\delta_\alpha = 1$	$\delta_\alpha = 0$	$\delta_\alpha = -1$
$e_{i\beta}$	$\delta_\beta = 1$	11	10; 11	10
	$\delta_\beta = 0$	9	8	14
	$\delta_\beta = -1$	13	12; 13	12

$$\begin{cases} \delta_\alpha = \delta_{L\alpha} + \delta_{N\alpha} \\ \delta_\beta = \delta_{L\beta} + \delta_{N\beta} \\ \delta_0 = \delta_{L0} + \delta_{N0} \end{cases} \quad (3.28)$$

A decisão dos vetores de tensão, nos casos em que se tem mais do que um vetor disponível é resolvida considerando que a saída de cada comparador de três níveis corresponde à soma dos estados de dois comparadores de dois níveis, cada um com bandas de histerese diferentes, larga e estreita, $\delta_{L\alpha\beta 0}$ e $\delta_{N\alpha\beta 0}$, respectivamente, conforme a Figura 3.9 e a equação (3.28).

Os erros das correntes admissíveis e a frequência de comutação dos dispositivos semicondutores dependem da largura das janelas dos comparadores de histerese. A redução da largura da janela de histerese leva a uma redução do tremor da corrente, mas eleva a frequência de comutação dos semicondutores e por conseguinte, aumenta as perdas por comutação.

Assim, o valor ideal para definir a largura de cada janela dos comparadores de histerese deve ser ajustado de modo a obter-se um tremor aceitável no seguimento das correntes de

referência, mas também deve limitar as perdas por comutação dos semicondutores do inversor de quatro braços [6].

Apresenta-se na Tabela 3.5 e na Tabela 3.6 a seleção dos vetores de tensão considerando os estados dos comparadores de dois e três níveis para combinações de 1 a 32 e 33 a 64, respectivamente.

Tabela 3.5 – Seleção do vetor de tensão de acordo com as saídas dos comparadores de histerese de banda larga e estreita para número de combinações de 1 a 32. Extraído de [6].

Nº de combinação	$\delta_{L\alpha}$	$\delta_{N\alpha}$	$\delta_{L\beta}$	$\delta_{N\beta}$	δ_{L0}	δ_{N0}	δ_{α}	δ_{β}	δ_0	vetor
1	-0,5	-0,5	-0,5	-0,5	-0,5	-0,5	-1	-1	-1	12
2	-0,5	-0,5	-0,5	-0,5	-0,5	0,5	-1	-1	0	4
3	-0,5	-0,5	-0,5	-0,5	0,5	-0,5	-1	-1	0	12
4	-0,5	-0,5	-0,5	-0,5	0,5	0,5	-1	-1	1	4
5	-0,5	-0,5	-0,5	0,5	-0,5	-0,5	-1	0	-1	14
6	-0,5	-0,5	-0,5	0,5	-0,5	0,5	-1	0	0	6
7	-0,5	-0,5	-0,5	0,5	0,5	-0,5	-1	0	0	14
8	-0,5	-0,5	-0,5	0,5	0,5	0,5	-1	0	1	6
9	-0,5	-0,5	0,5	-0,5	-0,5	-0,5	-1	0	-1	14
10	-0,5	-0,5	0,5	-0,5	-0,5	0,5	-1	0	0	6
11	-0,5	-0,5	0,5	-0,5	0,5	-0,5	-1	0	0	14
12	-0,5	-0,5	0,5	-0,5	0,5	0,5	-1	0	1	6
13	-0,5	-0,5	0,5	0,5	-0,5	-0,5	-1	1	-1	10
14	-0,5	-0,5	0,5	0,5	-0,5	0,5	-1	1	0	2
15	-0,5	-0,5	0,5	0,5	0,5	-0,5	-1	1	0	10
16	-0,5	-0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	-1	1	1	2
17	-0,5	0,5	-0,5	-0,5	-0,5	-0,5	0	-1	-1	13
18	-0,5	0,5	-0,5	-0,5	-0,5	0,5	0	-1	0	5
19	-0,5	0,5	-0,5	-0,5	0,5	-0,5	0	-1	0	13
20	-0,5	0,5	-0,5	-0,5	0,5	0,5	0	-1	1	5
21	-0,5	0,5	-0,5	0,5	-0,5	-0,5	0	0	-1	8
22	-0,5	0,5	-0,5	0,5	-0,5	0,5	0	0	0	0; 15
23	-0,5	0,5	-0,5	0,5	0,5	-0,5	0	0	0	0; 15
24	-0,5	0,5	-0,5	0,5	0,5	0,5	0	0	1	7
25	-0,5	0,5	0,5	-0,5	-0,5	-0,5	0	0	-1	8
26	-0,5	0,5	0,5	-0,5	-0,5	0,5	0	0	0	0; 15
27	-0,5	0,5	0,5	-0,5	0,5	-0,5	0	0	0	0; 15
28	-0,5	0,5	0,5	-0,5	0,5	0,5	0	0	1	7
29	-0,5	0,5	0,5	0,5	-0,5	-0,5	0	1	-1	11
30	-0,5	0,5	0,5	0,5	-0,5	0,5	0	1	0	3
31	-0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	-0,5	0	1	0	11
32	-0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0	1	1	3

Tabela 3.6 – Seleção do vetor de tensão de acordo com as saídas dos comparadores de histerese de banda larga e estreita para número de combinações de 33 a 64. Extraído de [6].

Nº de combinação	$\delta_{L\alpha}$	$\delta_{N\alpha}$	$\delta_{L\beta}$	$\delta_{N\beta}$	δ_{L0}	δ_{N0}	δ_{α}	δ_{β}	δ_0	vetor
33	0,5	-0,5	-0,5	-0,5	-0,5	-0,5	0	-1	-1	12
34	0,5	-0,5	-0,5	-0,5	-0,5	0,5	0	-1	0	4
35	0,5	-0,5	-0,5	-0,5	0,5	-0,5	0	-1	0	12
36	0,5	-0,5	-0,5	-0,5	0,5	0,5	0	-1	1	4
37	0,5	-0,5	-0,5	0,5	-0,5	-0,5	0	0	-1	8
38	0,5	-0,5	-0,5	0,5	-0,5	0,5	0	0	0	0; 15
39	0,5	-0,5	-0,5	0,5	0,5	-0,5	0	0	0	0; 15
40	0,5	-0,5	-0,5	0,5	0,5	0,5	0	0	1	7
41	0,5	-0,5	0,5	-0,5	-0,5	-0,5	0	0	-1	8
42	0,5	-0,5	0,5	-0,5	-0,5	0,5	0	0	0	0; 15
43	0,5	-0,5	0,5	-0,5	0,5	-0,5	0	0	0	0; 15
44	0,5	-0,5	0,5	-0,5	0,5	0,5	0	0	1	7
45	0,5	-0,5	0,5	0,5	-0,5	-0,5	0	1	-1	10
46	0,5	-0,5	0,5	0,5	-0,5	0,5	0	1	0	2
47	0,5	-0,5	0,5	0,5	0,5	-0,5	0	1	0	10
48	0,5	-0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0	1	1	2
49	0,5	0,5	-0,5	-0,5	-0,5	-0,5	1	-1	-1	13
50	0,5	0,5	-0,5	-0,5	-0,5	0,5	1	-1	0	5
51	0,5	0,5	-0,5	-0,5	0,5	-0,5	1	-1	0	13
52	0,5	0,5	-0,5	-0,5	0,5	0,5	1	-1	1	5
53	0,5	0,5	-0,5	0,5	-0,5	-0,5	1	0	-1	9
54	0,5	0,5	-0,5	0,5	-0,5	0,5	1	0	0	1
55	0,5	0,5	-0,5	0,5	0,5	-0,5	1	0	0	9
56	0,5	0,5	-0,5	0,5	0,5	0,5	1	0	1	1
57	0,5	0,5	0,5	-0,5	-0,5	-0,5	1	0	-1	9
58	0,5	0,5	0,5	-0,5	-0,5	0,5	1	0	0	1
59	0,5	0,5	0,5	-0,5	0,5	-0,5	1	0	0	9
60	0,5	0,5	0,5	-0,5	0,5	0,5	1	0	1	1
61	0,5	0,5	0,5	0,5	-0,5	-0,5	1	1	-1	11
62	0,5	0,5	0,5	0,5	-0,5	0,5	1	1	0	3
63	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	-0,5	1	1	0	11
64	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	1	1	1	3

3.5 – Conclusão

Neste capítulo, a teoria das potências foi apresentada. Esta teoria permite a separação das potências ativa e reativas em suas parcelas médias e alternada de maneira eficiente. É enfatizada a questão de seu significado físico das potências instantâneas. Apresentada a maneira de se fazer o controle da tensão do barramento DC segundo a teoria, de forma que o FAP introduza somente energia ativa da rede não contribuindo para a degradação das correntes do sistema.

De seguida, apresentado o modelo matemático do inversor de quatro condutores e o controle vetorial não linear de correntes vetoriais. A utilização de comparadores histeréticos de 3 níveis, neste último, como uma soma de comparadores histeréticos de 2 níveis, largo e estreitos, permite resolver a decisão de múltiplos vetores de tensão.

Capítulo 4

Simulação numérica

4.1 – Introdução

Neste capítulo serão apresentados os modelos de simulação numéricas implementados no programa de simulação numérica, Simulink® integrado em ambiente de programação e desenvolvimento, Matlab® ambos da Mathworks®.

4.2 – Modelos de simulação numérica

Na Figura 4.1 apresenta-se o modelo global do filtro implementado no programa de simulação numérica. Neste, a rede elétrica é constituída por fontes de tensão ideal de 230/400V 50Hz e um analisador de qualidade de energia onde encontram-se situados os medidores de qualidade de energia responsáveis por avaliar o desempenho do filtro.

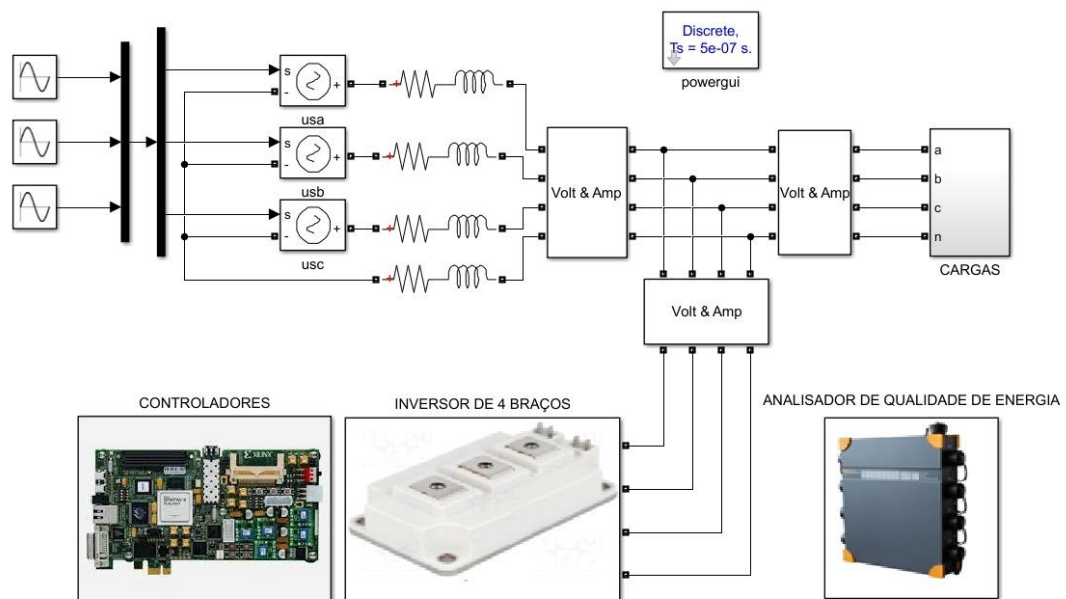


Figura 4.1 – Modelo global do filtro ativo paralelo implementado em Matlab\Simulink®.

Na Figura 4.2 é apresentado o algoritmo de controlo do filtro baseado na teoria PQ. O programa de simulação numérica utilizado possibilitou a utilização da biblioteca *User-Defined Functions* que permitiu estender a funcionalidade de modelagem do Simulink®, possibilitando implementação em código MATLAB algumas equações da teoria.

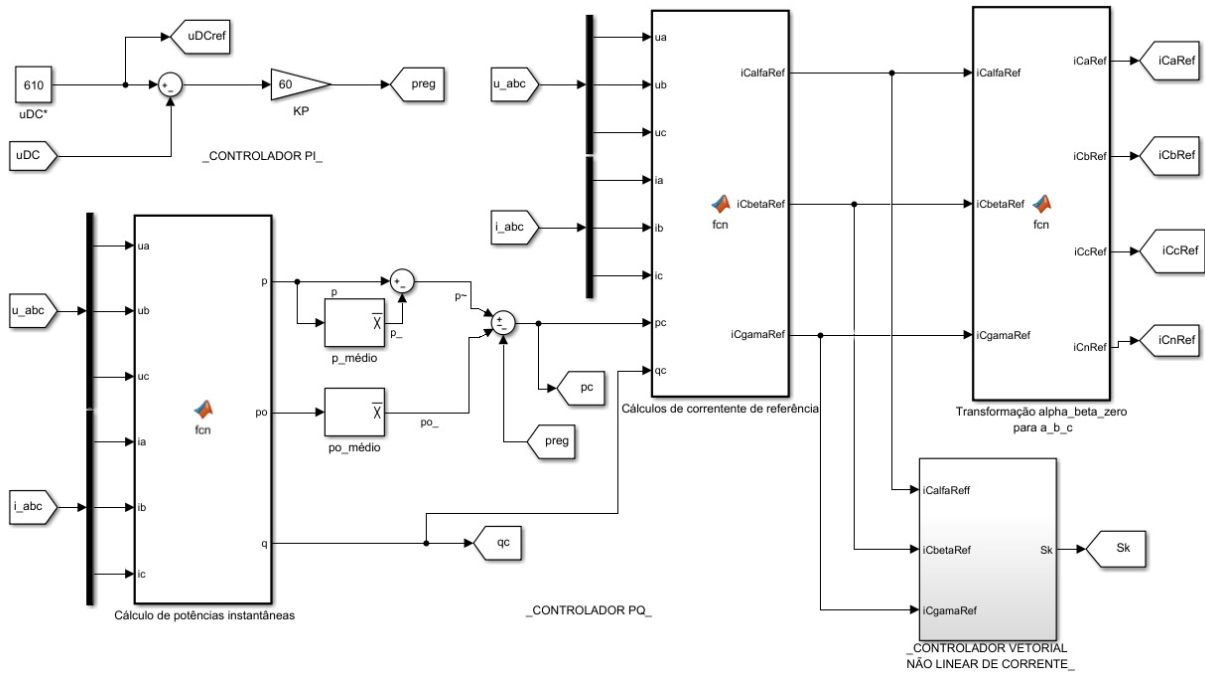


Figura 4.2 – Modelo dos controladores do filtro ativo paralelo implementado em Matlab\Simulink®.

A Figura 4.3 apresenta o modelo de simulação do controlador vetorial não linear de corrente que permitiu o controlo das correntes de compensação introduzidas pelo filtro no sistema. Os vetores de tensão e os estados de comutação de cada braço do inversor encontram-se definidos em “Vetores de tensão” e em “Estados de comutação” de acordo com a Tabela 3.5 e a Tabela 3.6, respetivamente.

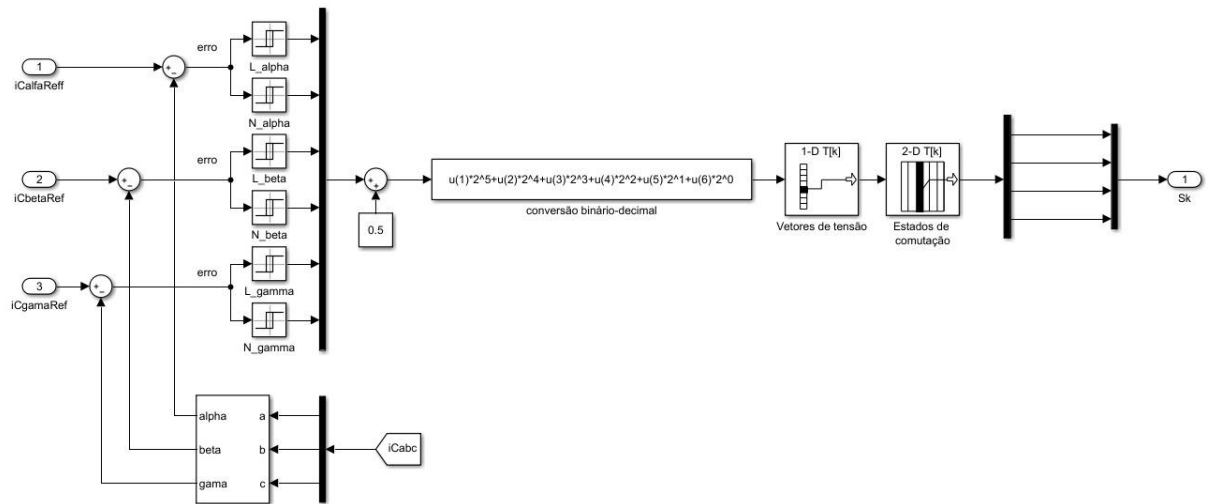


Figura 4.3 – Modelo do controlador vetorial não linear de corrente implementado em ferramenta Matlab\Simulink®.

O modelo de simulação do inversor de tensão a quatro condutores, responsável pelo fornecimento das correntes de compensação encontra-se representado na Figura 4.4. De modo a obter resultados de simulação confiáveis, antes da aquisição dos resultados, foi realizado um teste ao inversor de tensão de quatro braços, por forma a definir o início do seu funcionamento, apenas quando o condensador do barramento DC se encontra totalmente carregado.

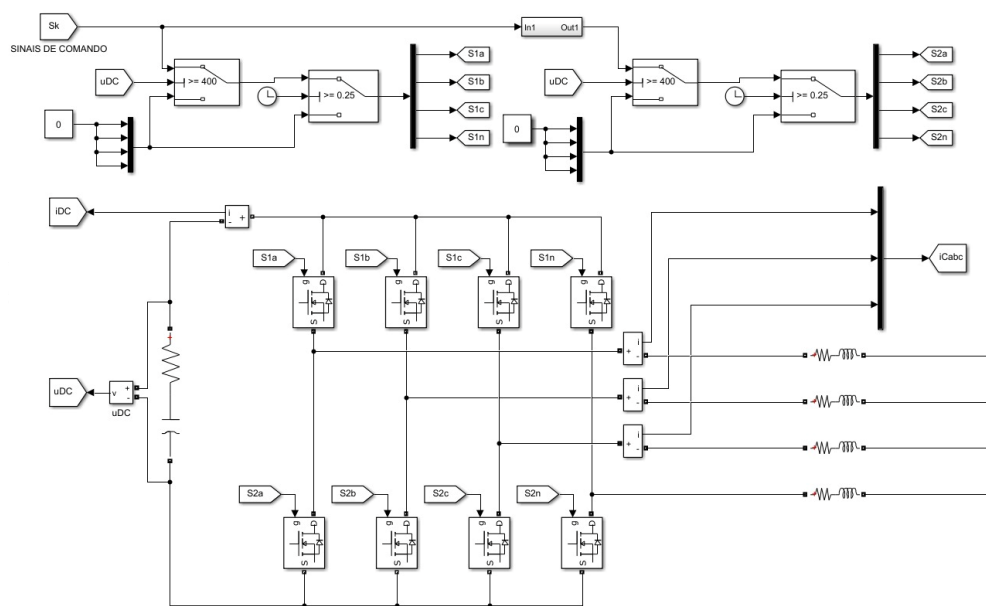


Figura 4.4 – Modelo do inversor de tensão a quatro condutores implementado em Matlab\Simulink®.

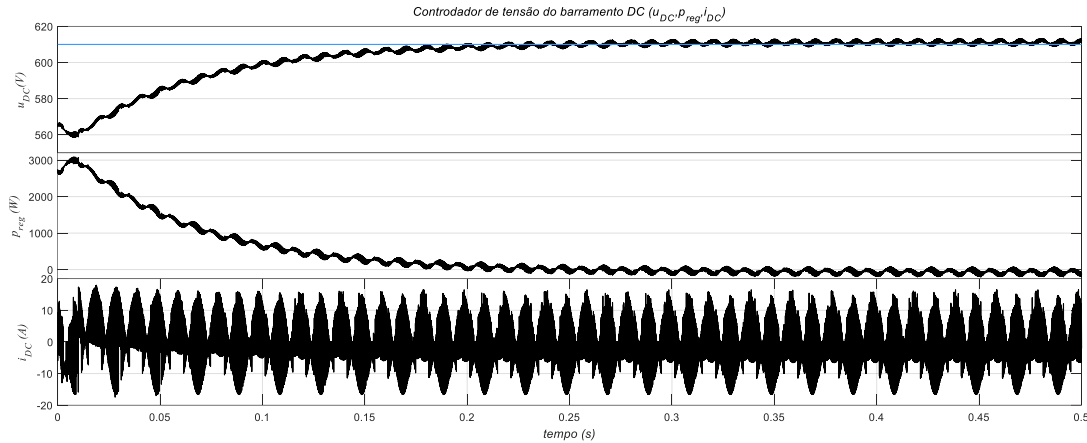


Figura 4.5 – Teste do controlador de tensão no barramento DC.

A Figura 4.5 apresenta o resultado deste teste, analisando a figura verifica-se que para uma tensão de referência no barramento DC de 610V, o filtro deverá iniciar o seu funcionamento após os 0,25 s.

Desta forma, os principais parâmetros utilizados no modelo do filtro ativo encontram-se listados na Tabela 4.1. A lista completa de parâmetros da implementação dos blocos do modelo de simulação numérica na ferramenta de Matlab\Simulink® é apresentada no Anexo A.

Tabela 4.1 - Parâmetros de modelo de simulação do filtro ativo de potência paralelo.

Parâmetros	Valores
Potência de curto-circuito	0,5 MVA
Tensão de referência do barramento DC;	610 V
Capacidade total do barramento DC	6,6 mF
Indutância do filtro de saída	3,6 mH
Resistência do filtro de saída	0,02 Ω
Tempo de início de funcionamento do filtro ativo paralelo	0,25 s

4.3 – Resultados de simulação do filtro

Nesta secção são apresentados os resultados de simulação do filtro na compensação de duas cargas distintas. Os esquemas elétricos das cargas são apresentados na Figura 4.6 (a) e Figura 4.6 (b), os sinais das suas correntes são apresentados na Figura 4.7 (a) e Figura 4.7 (b), respetivamente.

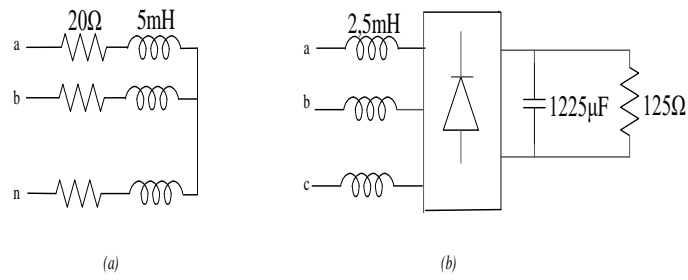


Figura 4.6 – Esquema elétrico da carga linear e não linear considerada: (a) Esquema elétrico da Carga RL em série; (b) Esquema elétrico do retificador trifásico a díodos com filtro capacitivo.

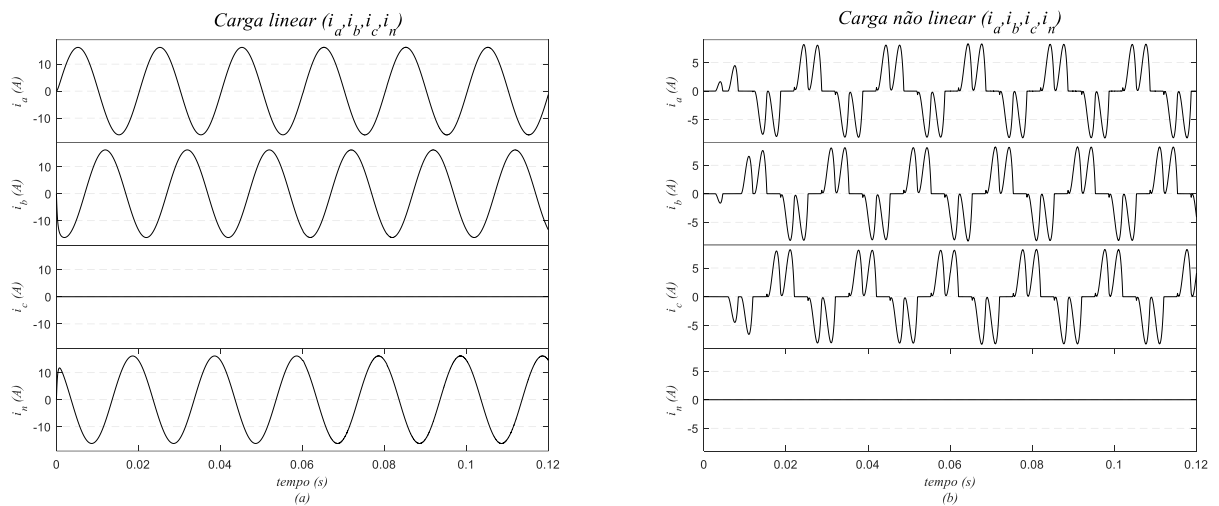


Figura 4.7 – Sinais de corrente da carga obtidos a partir da simulação numérica: (a) Carga RL em série; (b) Retificador trifásico.

Carga RL em série

A carga RL série escolhida permite avaliar o comportamento do perante o consumo da potência reativa, baixo fator de potência, o desequilíbrio de correntes e a corrente no condutor neutro causada pela ausência de uma das fases.

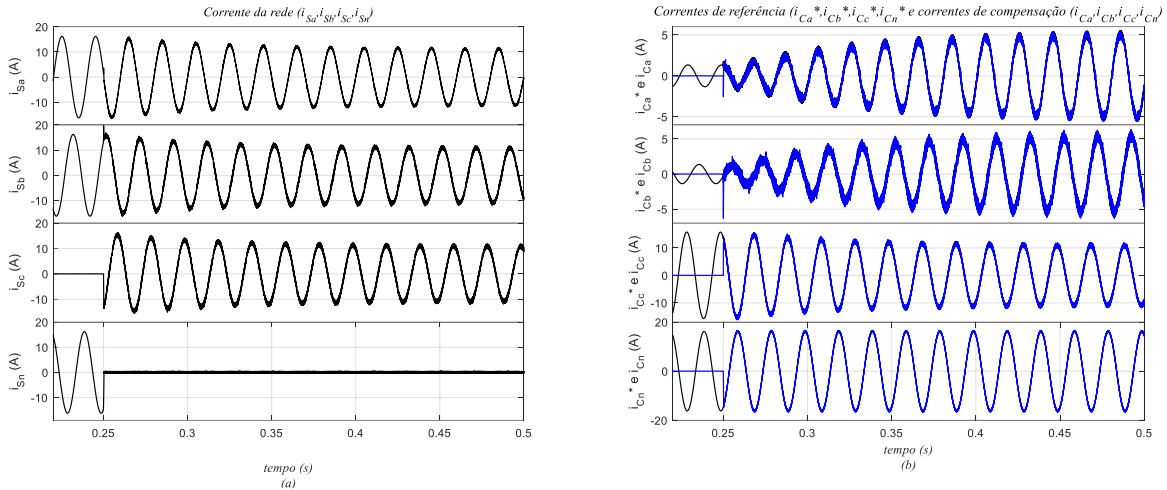


Figura 4.8 – Resultado de simulação para carga RL série: (a) Correntes da rede elétrica; (b) Corrente de referência (a preto) e a corrente de compensação (a azul).

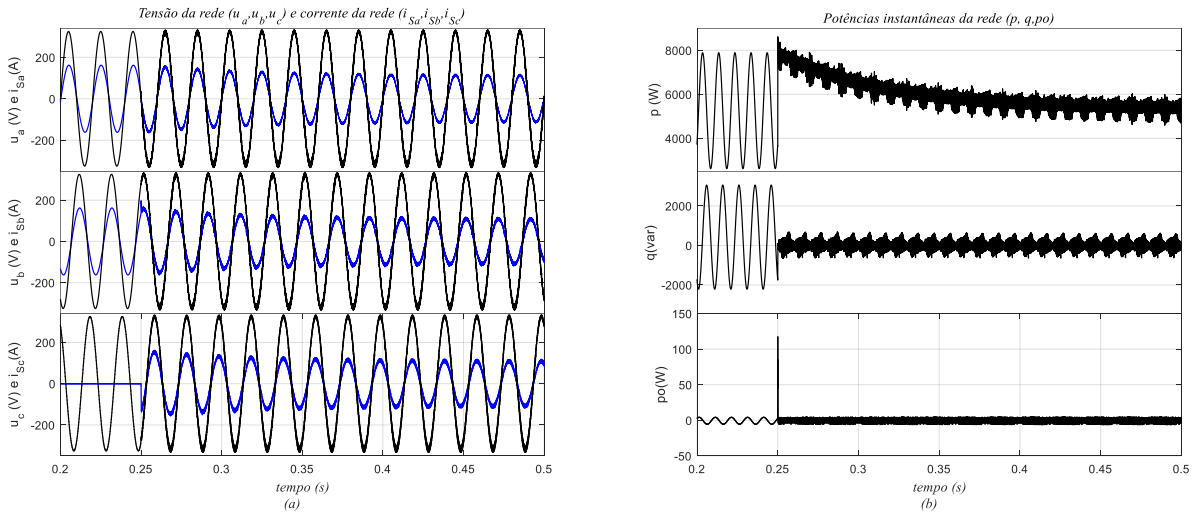


Figura 4.9 – Resultado de simulação para carga RL série: (a) Tensões (a preto) e correntes (a azul) da rede elétrica (correntes multiplicadas por 10); Potências instantâneas p , q e p_0 .

Na Figura 4.8 (a) podem ser vistas os sinais de correntes da rede elétrica (i_{Sa} , i_{Sb} , i_{Sc} , i_{Sn}). Verifica-se que após o início do filtro, o sinal da corrente apresenta uma forma de onda sinusoidal e equilibrada.

Para melhor visualização das etapas de compensação do filtro, foi representado em simultâneo os sinais das correntes de referência (i_{Ca}^* , i_{Cb}^* , i_{Cc}^* , i_{Cn}^*) e da corrente de compensação (i_{Ca} , i_{Cb} , i_{Cc} , i_{Cn}) na Figura 4.8 (b). Pela análise da figura, verifica-se filtro implementado é capaz produzir correntes de compensação que seguem corretamente as correntes de referência.

A Figura 4.9 (a) apresenta os sinais das tensões da rede elétrica (u_a, u_b, u_c) e a da corrente consumida pela carga ($i_{Sa}, i_{Sb}, i_{Sc}, i_{Sn}$). Verifica-se que a corrente da rede elétrica se apresenta em fase com as tensões da rede elétrica. Desta forma, para o sistema elétrico, o conjunto da carga mais o filtro tornou-se equivalente a uma resistência. Os harmônicos de alta frequência presentes nas tensões da rede elétrica após o funcionamento do filtro deve-se à frequência de comutação dos semicondutores do inversor de tensão de quatro braços.

Na Figura 4.9 (b) são apresentadas as potências instantâneas real (p), imaginária (q) e homopolar (p_0). Da análise desses sinais, verifica-se que após a atuação do filtro ativo as potências vistas da rede elétrica passam de alternadas para constantes.

Retificador trifásico a diodos com filtro capacitivo

Analisada a performance do filtro na presença de uma carga RL série, segue-se a validação perante uma carga não-linear, nomeadamente, um retificador trifásico a diodos com filtro capacitivo em paralelo. A escolha desta carga permite avaliar o comportamento do perante distorção harmônica do sinal de corrente e o baixo fator de potência.

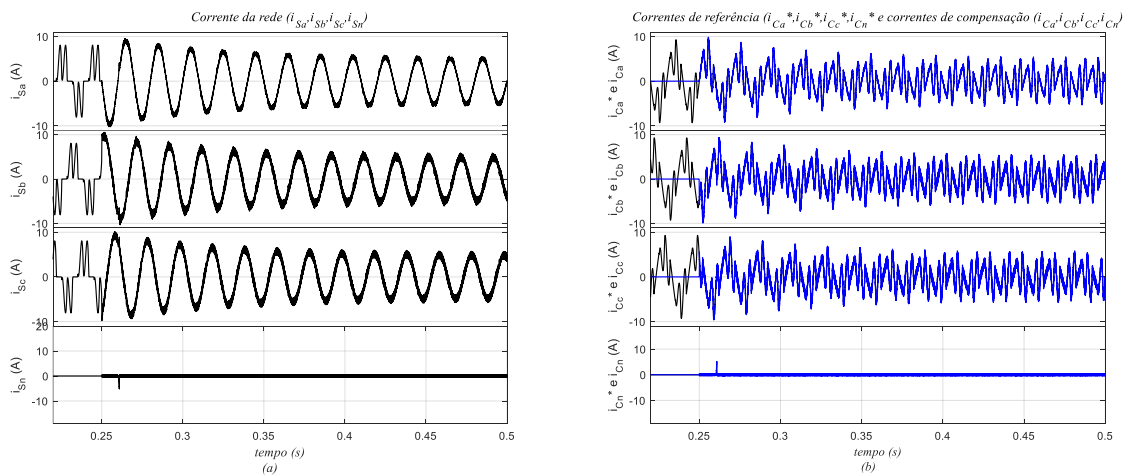


Figura 4.10 – Resultado de simulação para o retificador trifásico: (a) Correntes da rede elétrica; (b) Corrente de referência (a preto) e a corrente de compensação (a azul).

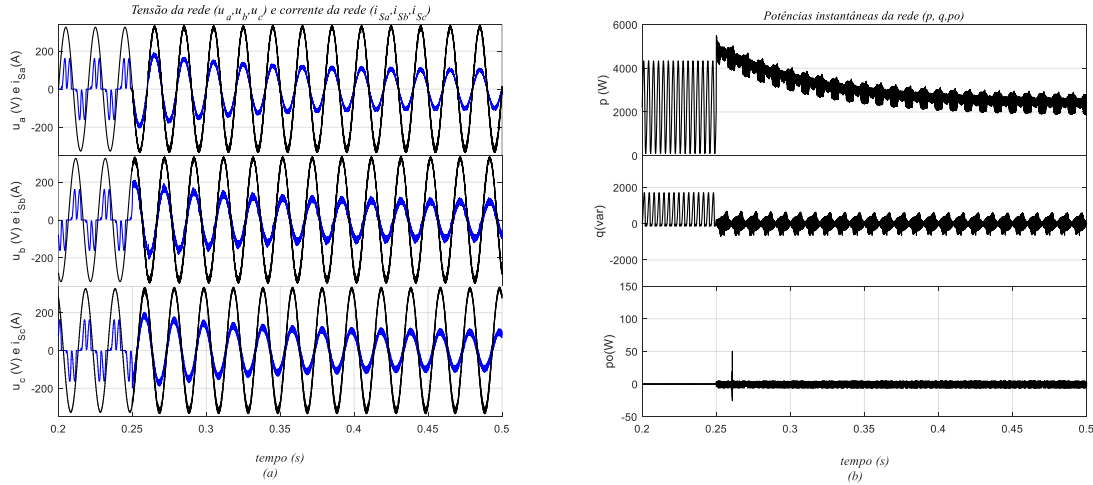


Figura 4.11 – Resultado de simulação para retificador trifásico: (a) Tensões (a preto) e correntes (a azul) da rede elétrica (correntes multiplicadas por 20); Potências instantâneas p , q e p_0 .

Na Figura 4.10 (a) são representados os sinais de correntes da rede elétrica (i_{Sa} , i_{Sb} , i_{Sc} , i_{Sn}) para o retificador trifásico, apresentando-se esta sinusoidal e equilibrada após do início de funcionamento do filtro.

Na Figura 4.10 (b) são representados, em simultâneo os sinais das correntes de referência (i_{Ca}^* , i_{Cb}^* , i_{Cc}^* , i_{Cn}^*) e da corrente de compensação (i_{Ca} , i_{Cb} , i_{Cc} , i_{Cn}). Da análise dos sinais, verifica-se que filtro implementado também é capaz produzir correntes de compensação que seguem corretamente as correntes de referência para o retificador trifásico.

Na Figura 4.9 (a) também são representados, em simultâneo os sinais das tensões da rede elétrica (u_a , u_b , u_c) e a da corrente da rede (i_{Sa} , i_{Sb} , i_{Sc} , i_{Sn}). Verifica-se que a corrente da rede elétrica apresenta-se em fase com as tensões da rede elétrica.

Na Figura 4.11 (b) são apresentadas as potências instantâneas real (p), imaginária (q) e homopolar (P_0), que a semelhança do teste para carga RL série, também se apresentam constante no tempo após início de funcionamento do filtro.

4.4 – Análise dos parâmetros de qualidade de energia

Por forma a obter o espectro dos harmónicos em função da ordem dos harmónicos utilizou-se uma ferramenta para análise da transformada rápida de Fourier (FFT), “FFT Analysis”, existente no programa de simulação numérica Matlab/Simulink®.

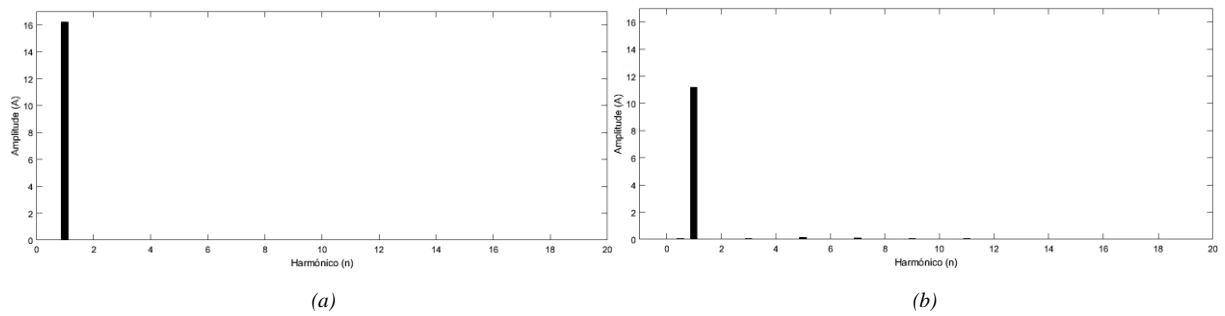


Figura 4.12 – Espectro harmónico da corrente da rede no teste do filtro com uma carga RL série: (a) antes da compensação de filtro; (b) depois da compensação do filtro.

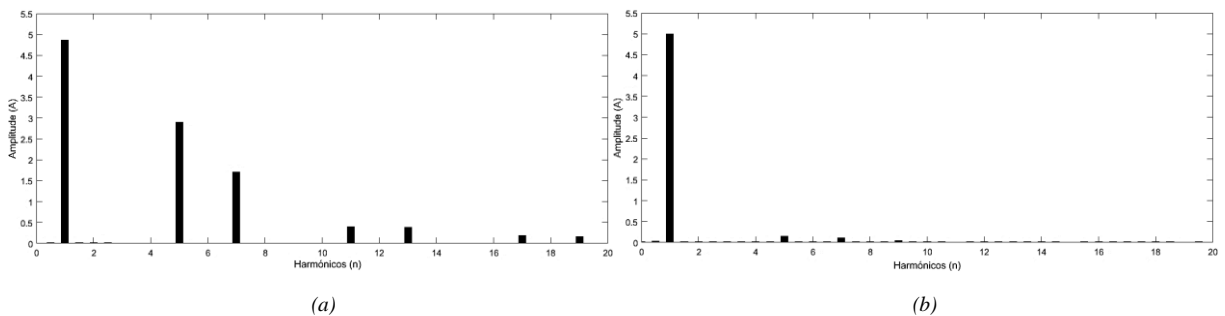


Figura 4.13 – Espectro harmónico da corrente da rede no teste do filtro com um retificador: (a) antes da compensação do filtro; (b) depois da compensação do filtro.

A Figura 4.12 (a) e a Figura 4.12 (b) apresenta o resultado dos espectros os harmónicos da corrente da rede elétrica da fase c, pior caso, antes e depois do início de funcionamento do filtro para a carga RL série, respetivamente. Desta análise, conclui-se que o filtro reduziu o valor de amplitude da corrente da rede elétrica de 16,26 A para 11,17 A, reduzindo consequentemente as perdas na rede elétrica, contudo houve um ligeiro aumento de distorção causado pela frequência de comutação do inversor de tensão a quatro condutores.

Para o retificador trifásico com filtro capacitivo, verifica-se que o filtro corrigiu praticamente todas os harmónicos de corrente da rede elétrica da fase a, como observado nas Figura 4.12 (a) e Figura 4.12 (b).

Tabela 4.2 – resultados de simulação para carga RL série.

Especificações	a	b	c	n
Taxa de distorção da corrente da carga	0,05%	0,07%	--	--
Taxa de distorção da corrente da rede elétrica corrigida	2,95%	5,50%	5,58%	--
Corrente eficaz da carga	11,5 A	11,5 A	--	11,5 A
Corrente eficaz da rede elétrica	7,9 A	7,7 A	7,7 A	0,2 A
Fator de potência da carga	0,996	0,996	--	--
Fator de potência da rede elétrica	0,999	0,997	0,997	--

Tabela 4.3 – Desequilíbrios na corrente da rede elétrica para simulação da carga RL série.

	antes da compensação do filtro			Depois da compensação do filtro		
	a	b	c	a	b	c
I_{inv}	50,0%	50,0%	50,0%	1,5%	1,5%	1,5%
I_{hom}	50,0%	50,0%	50,0%	0,0%	0,0%	0,0%

Embora exista, um aumento do TDD_I de aproximadamente 5% para a simulação da carga RL série, os resultados apresentados na Tabela 4.3, estão de acordo com a norma de IEEE 519, sendo o limite de TDD_I estipulado para esta carga 15% para a respectiva carga, este resultado está em conformidade com a norma em vigor. Desta simulação, verifica-se o que filtro realizou compensação quase total dos desequilíbrios das correntes da rede elétrica nas três fases e da corrente do condutor neutro.

Tabela 4.4 – Especificações para resultados de simulação para retificador trifásico com filtro capacitivo.

Especificações	a	b	c	n
Taxa de distorção da corrente da carga	72,29%	72,41%	72,16%	--
Taxa de distorção da corrente da rede elétrica corrigida	7,02%	13,07%	12,64%	--
Corrente eficaz da carga	4,2 A	4,2 A	4,2 A	--
Corrente eficaz da rede elétrica	3,5 A	3,4 A	3,4 A	0,2 A
Fator de potência da carga	0,784	0,784	0,785	--
Fator de potência da rede elétrica	0,996	0,991	0,991	--

Tabela 4.5 – Desequilíbrios na corrente da rede elétrica para resultados de simulação para retificador trifásico com filtro capacitivo.

	Antes da compensação do filtro ativo paralelo			Depois da compensação do filtro ativo paralelo		
	a	b	c	a	b	c
I_{inv}	0,2	0,2	0,2	3,1	3,1	3,1
I_{hom}	--	--	--	--	--	--

Para o retificador trifásico houve significativa redução de distorção harmónica como esperado, apresentando um TDD_i inferior a 13,5% nas 3 fases, sendo 20% o valor estipulado pela norma de IEEE 519, estes valores apresentam-se em conformidade. O TFP da instalação foi corrigido de 0,78 para a unidade.

4.5 – Conclusão

Neste capítulo foi apresentado o modelo de simulação do filtro implementados com auxílio da ferramenta Simulink® integrado em ambiente de programação e desenvolvimento, Matlab® ambos da Mathworks®. No decorrer do capítulo foram apresentadas as características relevantes do modelo e justificada as cargas utilizadas em simulação.

Os resultados obtidos através de simulação numérica foram bastante satisfatórios e conclusivos. Na situação onde o filtro compensou a carga RL série desequilibrada, verificase um TDD_i inferior a 5,58%, índices de desequilíbrio das tensões, I_{inv} e I_{hom} , igual a 1,5% e 0%, respetivamente. Enquanto na situação do filtro compensou retificador trifásico a díodos com filtro capacitivo, verifica-se um TDD_i , inferior a 13,07% e os índices de desequilíbrio das tensões, I_{inv} e I_{hom} , igual a 3,1% e 0,1%, respetivamente. Esta análise permite concluir que este sistema cumpre as normas de qualidade de energia.

Da simulação verificou-se ainda, que o modelo de simulação numérica implementado representou uma ferramenta importante de análise do funcionamento do filtro, uma vez que permitiu a conceção de todo o sistema, bem como verificar quais os seus limites de funcionamento para os ensaios experimentais.

Capítulo 5

Resultados experimentais

5.1 – Introdução

Para comprovação prática de toda a metodologia apresentada nos capítulos antecedentes, foi adaptado no laboratório de Máquinas Elétricas, o protótipo do inversor de tensão de quatro braços implementado no âmbito da tese de doutoramento “Gerador de velocidade variável para aumento da eficiência energética em grupos eletrogêneos autônomos” [6], para funcionar como FAP. Os resultados experimentais são apresentados e analisados neste capítulo, bem como alguns aspectos relevantes da implementação prática do FAP.

5.2 – Protótipo laboratorial

Na Figura 5.1 é representado o esquema de ligação entre os vários elementos que constituem o protótipo do FAP de 10kVA adaptado em laboratório. O protótipo do FAP na sua estrutura está dividido em três partes: sistema de energia, sistema de controlo e sistema de monitorização.

O sistema de monitorização é constituído por um computador pessoal que inclui a ferramenta de desenvolvimento e programação de alto nível para FPGA, System Generator for DSP™ da Xilinx Inc., que operacionalmente integra as ferramentas do Simulink®, integrado em ambiente de programação e desenvolvimento, Matlab® versão R2012a da Mathworks®.

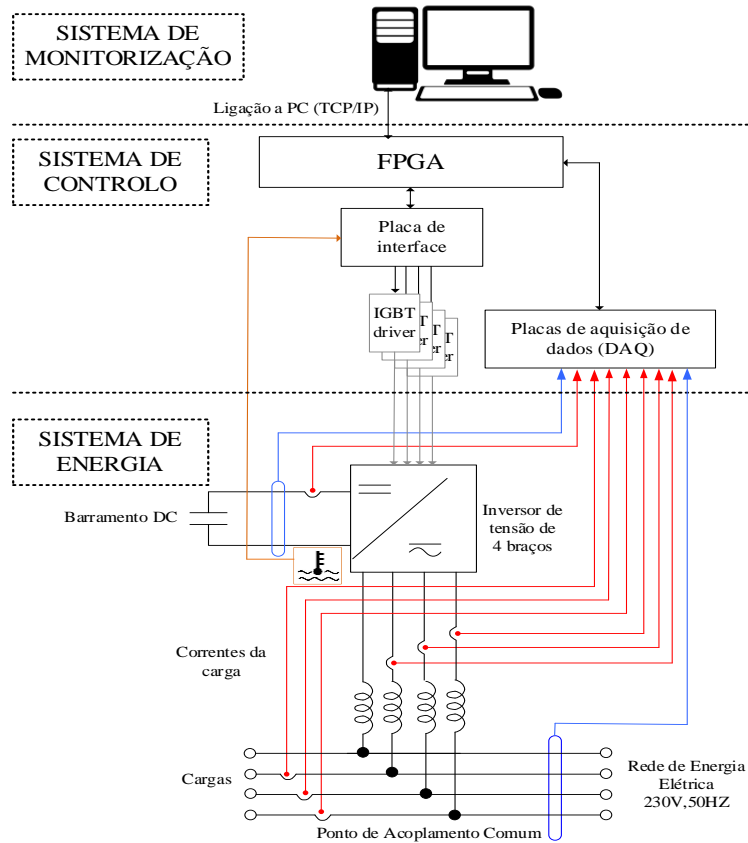


Figura 5.1 – Esquema de implementação do protótipo funcional do filtro.

5.2.1 – Sistema de energia

A vista pormenorizada do protótipo adaptado no laboratório é apresentada na Figura 5.2. A Figura 5.3 (a) apresenta as bobinas de entrada toroidais de 1,1mH e resistência interna de 27mΩ. Na Figura 5.3 (b) são apresentados os condensadores do barramento DC utilizado, constituído por um conjunto de condensadores da EPCOS, B43456-A5228-M, 2200uF, 450Vdc e da KEMET, ALS30A 472 NJ 450, 4700uF, 450Vdc combinados em associação série e paralelo, obtendo-se uma capacidade de 13,5 mF.

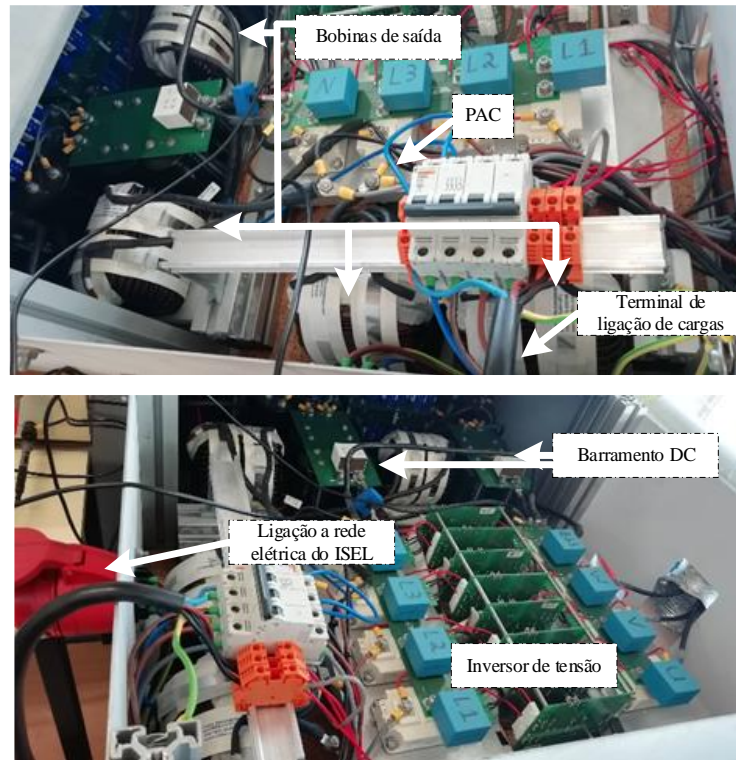


Figura 5.2 –Fotos do protótipo do filtro implementado no laboratório de Máquinas Elétricas.

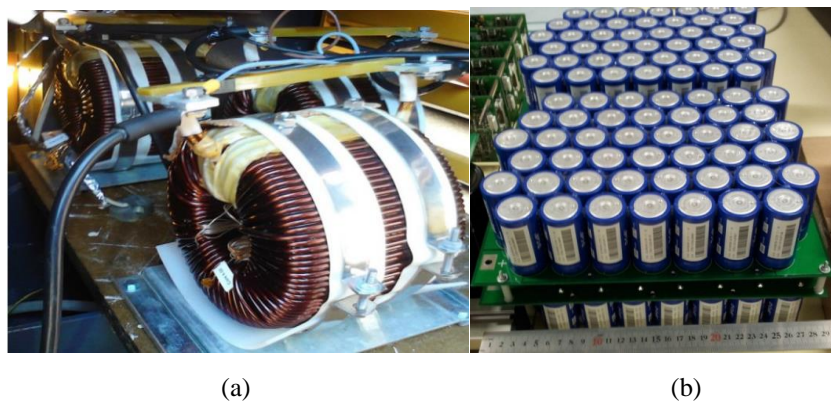


Figura 5.3 – Elementos passivos do protótipo funcional do filtro: (a) Bobinas de saída do inversor de tensão a quatro condutores; (b) Pormenor dos condensadores do barramento DC. Extraído de [6].

O inversor de quatro braços do protótipo utiliza os módulos IGBT, SKM200GB12T4, e placas de circuito de disparo dos semicondutores SKHI 23/12 R, ambos da SEMIKRON.

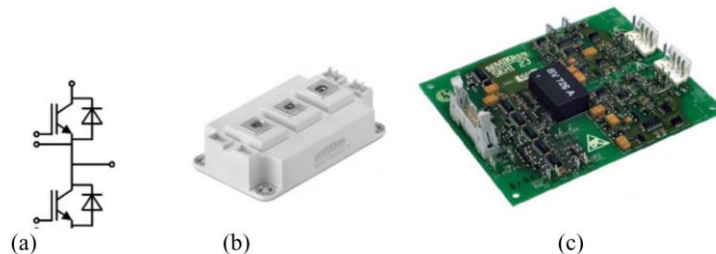


Figura 5.4 –Módulo IGBT e placa de circuito de disparo utilizado no filtro ativo paralelo: (a) Representação esquemática; (b) módulo IGBT; (c) placa de circuito de disparo dupla. Extraído de [6].

À semelhança da simulação numérica, no laboratório foi utilizada uma carga RL série e um retificador trifásico para a obtenção dos resultados experimentais. Na Figura 5.5 apresentam-se as fotos dos equipamentos utilizados. Onde em (a) é apresentada a bobina de 2,5mH, 30 Amps DC do fabricante Hammond Reactor utilizada. Em (b), o conjunto de condensadores da S+M, B43507-S5687-M3, 680uF, 450 Vdc, obtendo-se de uma capacidade total de 1225 uF. Em (c) a ponte retificadora trifásica fabricado pela Oficel, de 400V AC na entrada e 40A DC na saída e em (d) um conjunto de caixas de resistências 250 V de 50 Ohms e de 125 Ohms do fabricante Alesan.



Figura 5.5 – Fotos das cargas utilizadas.

5.2.2 – Sistema de controlo

O sistema de controlo do protótipo de [6] é baseado na programação de uma placa de desenvolvimento FPGA, modelo Virtex-6 FPGA ML605 [52], da Xilinx Inc., que comunica com placas de aquisição de dados (DAQ).

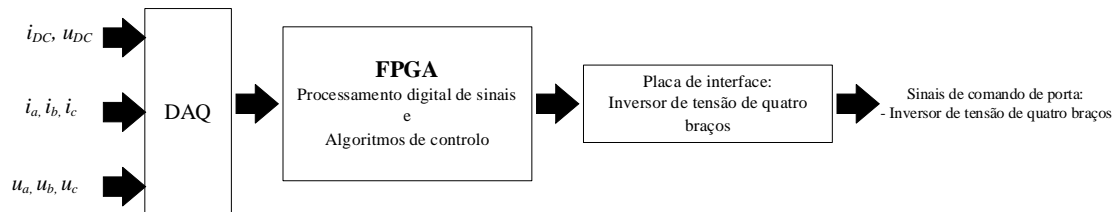


Figura 5.6 – Ligações da placa de desenvolvimento FPGA.

A Figura 5.6 apresenta as ligações da placa de desenvolvimento FPGA realizadas em laboratório. O sistema DAQ é baseado num conversor analógico-digital, modelo ADC7609 da Analog Devices Inc., com amostragem de 8 canais simultâneos em modo diferencial e 18bit de resolução por canal. A medição dos valores instantâneos de tensões e correntes do sistema DAQ utiliza os transdutores de efeito de Hall da LEM®, modelos LA100-P/SP5 e LV25-P/SP3, respetivamente.

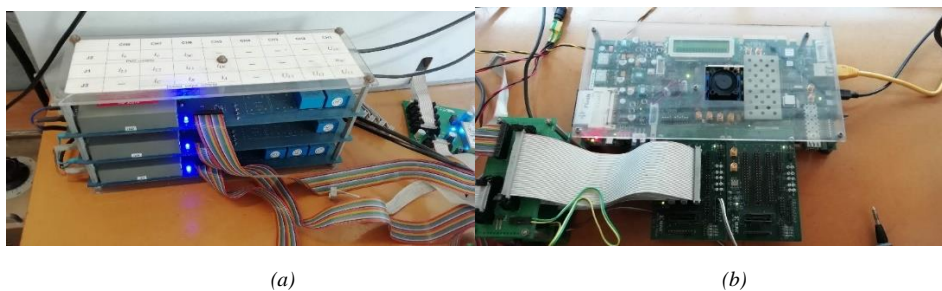


Figura 5.7 – Fotos do sistema de controlo: (a) Sistema DAQ; (b) FPGA.

A placa de interface permite a adequação dos níveis de sinal entre a placa de desenvolvimento FPGA e as placas dos circuitos de disparo dos módulos IGBT, através da utilização de conversores de nível de tensão.

Os algoritmos de controlo do FAP foram desenvolvidos em linguagem de programa designada “System Generator for DSPTM” [53][54][53], abreviadamente “Sysgen”, da Xilinx, Inc. O “Sysgen” constitui uma ferramenta de programação integrada no Matlab\Simulink®. Este permite desenvolver e depurar sistemas de processamento digital de sinais (DSP) e

implementar algoritmos de controlo de alto desempenho, devido à capacidade de processamento paralelo das FPGAs.

Em síntese apresentam-se os processos que foram desenvolvidos, implementados e testados em *FPGA* ao longo da realização laboratorial:

- Testou-se o sistema de aquisição de dados, DAC, na aquisição de tensões e correntes;
- Desenvolveram-se e testaram-se os algoritmos que permitem o cálculo das tensões da REE e correntes da carga em coordenadas $\alpha\beta 0$ e a suas transformadas inversa em coordenadas *abc*;
- Desenvolveram-se e testaram-se os algoritmos que permitem o cálculo das potências de compensação em coordenadas $\alpha\beta 0$.
- Desenvolveram-se e testaram-se os algoritmos que permitem o cálculo das correntes de referência em coordenadas $\alpha\beta 0$ e *abc*;
- Testou-se o algoritmo do controlador vetorial não linear de correntes para analisar se as correntes de compensação do inversor seguiam as correntes de referência com diferentes formas de onda;
- Foram realizados testes ao controlador PI do barramento DC para obtenção dos seus ganhos;
- Foram realizados ensaios de modo a ligar o filtro ativo paralelo à rede do ISEL;

5.2.3 – Resultados experimentais

Nesta secção são apresentados os resultados experimentais emulados do FAP. Os resultados apresentados foram obtidos com a ligação das cargas, mencionadas na secção 5.2.1, à REE, com a saída do inversor de tensão de quatro braços desligada da REE.

Deste modo, foram adquiridos pelo sistema DAQ os sinais das tensões da REE e das correntes da carga. Estes sinais são enviados para FPGA que os utiliza na síntese do algoritmo de controlo baseado na teoria PQ, através do software “Sysgen”, Figura 5.8. Como saída de algoritmo de controlo baseado na teoria PQ resultam os sinais das correntes de referência para o inversor de tensão de quatro braços.

De modo a verificar o funcionamento do sistema de controlo do FAP, são emuladas as correntes da REE, que seriam obtidas com a ligação do inversor de tensão de quatro braços à REE, através da soma dos valores instantâneos das correntes da carga com as correntes de referência de saída do FAP.

Este procedimento de emulação das correntes da REE por ação do FAP permitiu contornar as dificuldades laboratoriais verificadas na ligação do inversor de tensão de quatro braços à REE, pois a sua aplicação inicial fazia parte de um sistema de energia isolado da REE.

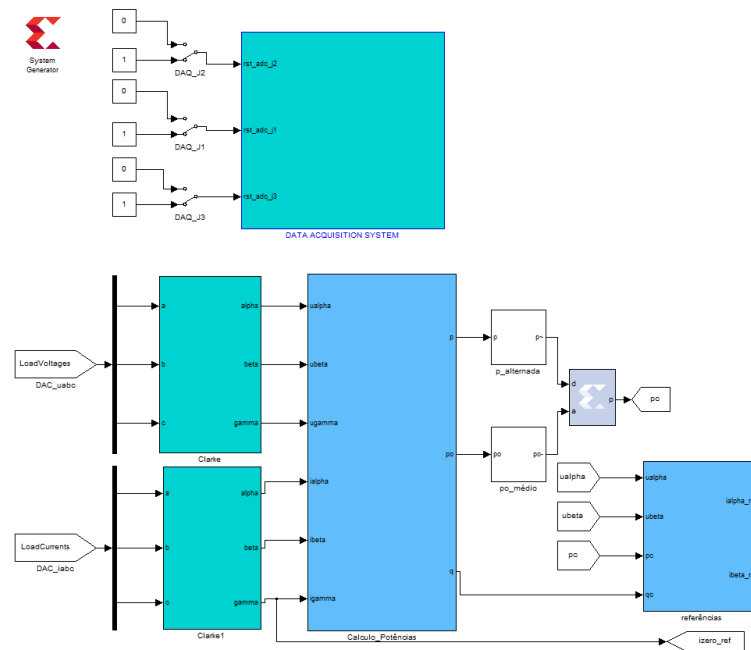


Figura 5.8 – Algoritmo implementado no “Sysgen” para obtenção dos resultados emulados.

Uma vez que a versão da FPGA [52] utilizada neste trabalho dá maior prioridade ao processo de cálculo do que a amostragem, de modo a obter uma eficiência na utilização dos seus recursos, os sinais expostos neste seção apresentam possíveis falhas de amostragem. Na Figura 5.9 (a) e Figura 5.9 (b) apresentam-se os sinais de corrente da carga RL série e do retificador trifásico, respetivamente.

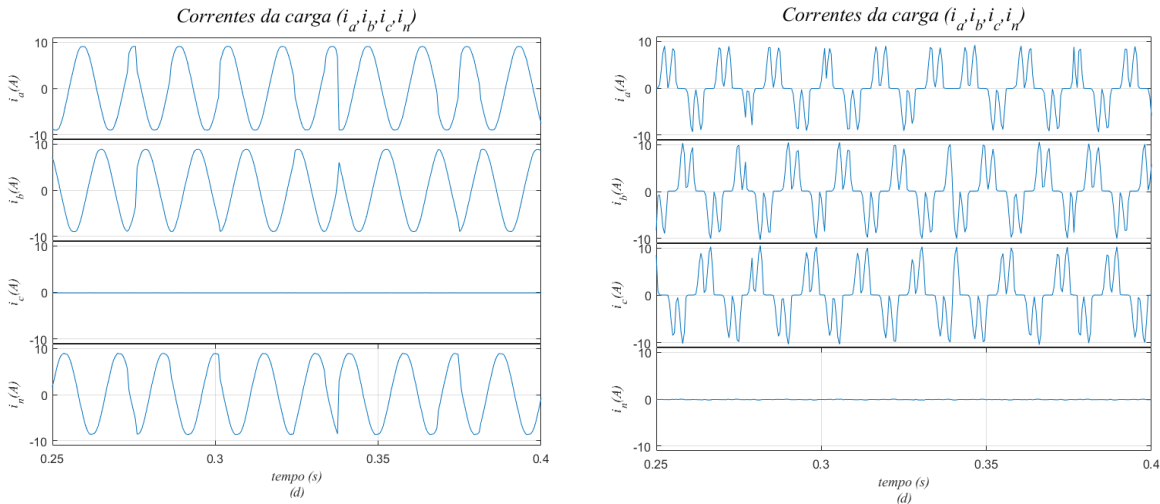
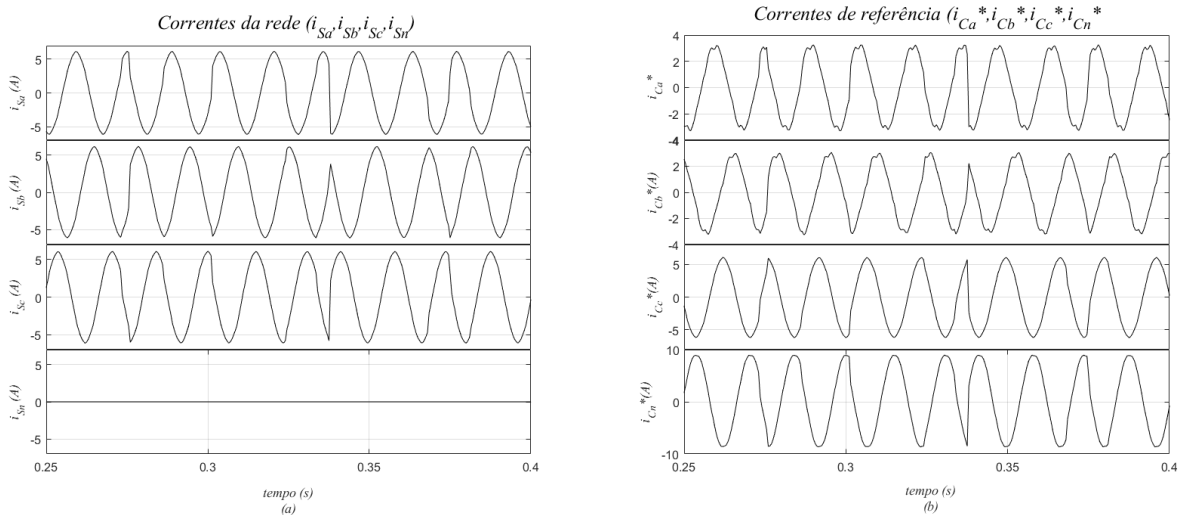


Figura 5.9 – Sinais de corrente da carga obtidos no laboratório: (a) Carga RL em série; (b) Retificador trifásico.

Carga RL em série

A semelhança da simulação numérica, no primeiro teste foi aferido o comportamento do modelo do filtro perante uma carga RL série. Os sinais da corrente da rede elétrica e referência de corrente de compensação são apresentadas a tensão da rede elétrica são expostas na Figura 5.10 (a), Figura 5.10 (b) e Figura 5.10 (c).



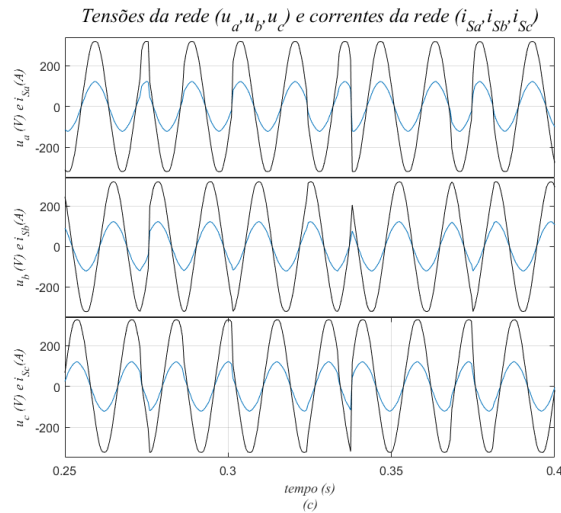


Figura 5.10 – Resultado emulados para carga RL série: (a) Correntes da rede elétrica; (b) referência de corrente compensação e (c) Tensões e correntes da rede elétrica (correntes multiplicadas por 20).

Na Figura 5.10 (a) podem ser vistos os sinais de correntes da rede elétrica (i_{Sa} , i_{Sb} , i_{Sc} , i_{Sn}). Verifica-se com a implementação o sinal da corrente apresenta uma forma de onda sinusoidal e equilibrada.

Na Figura 5.10 (b) apresentam-se os sinais das correntes de referência (i_{Ca}^* , i_{Cb}^* , i_{Cc}^* , i_{Cn}^*) que ao somar-se com as correntes de carga (i_a , i_b , i_c , i_n) obteve-se os sinais das correntes da rede (i_{Sa} , i_{Sb} , i_{Sc} , i_{Sn}). Na Figura 5.10 (c) apresentam-se os sinais das tensões da rede elétrica (u_a , u_b , u_c) e a da corrente consumida da rede (i_{Sa} , i_{Sb} , i_{Sc} , i_{Sn}). Da análise, verifica-se que a corrente da rede elétrica está em fase com as tensões da rede elétrica. Desta forma, para o sistema elétrico, o conjunto da carga mais o filtro tornou-se equivalente a uma resistência.

Retificador trifásico a diodos com filtro capacitivo

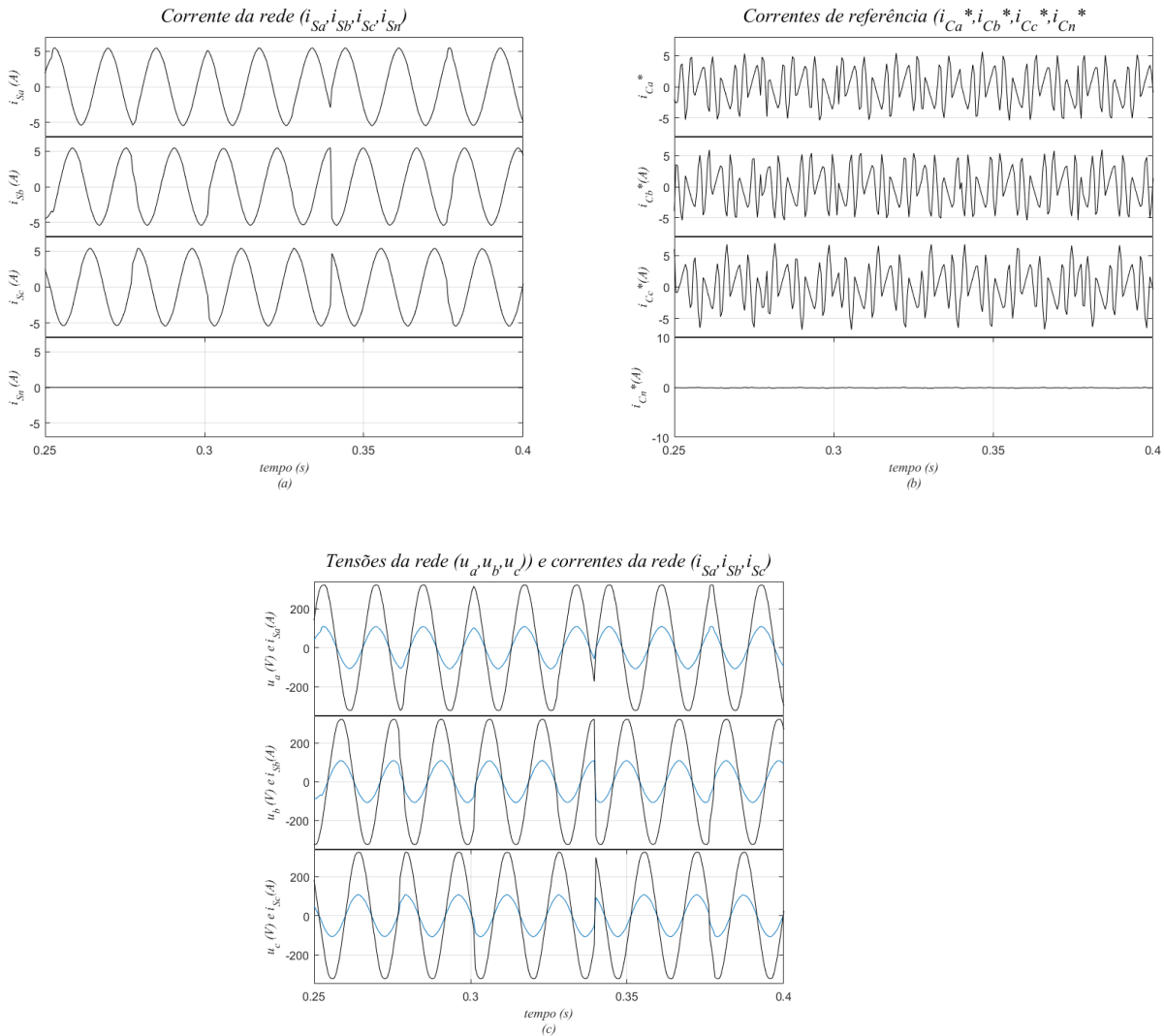


Figura 5.11 – Resultado emulados para retificador trifásico: (a) Correntes da rede elétrica; (b) referência de corrente compensação e (c) Tensões e correntes da rede elétrica (correntes multiplicadas por 10).

Na Figura 5.11 (a) são representados os sinais de correntes da rede elétrica (i_{Sa} , i_{Sb} , i_{Sc} , i_{Sn}) para os ensaio com o retificador trifásico, apresentando-se esta sinusoidal e equilibrada.

Na Figura 5.11 (b) apresenta-se os sinais das correntes de referência (i_{Ca}^* , i_{Cb}^* , i_{Cc}^* , i_{Cn}^*) cujo a soma com as correntes de carga (i_a , i_b , i_c , i_n) obteve-se os sinais das correntes da rede (i_{Sa} , i_{Sb} , i_{Sc} , i_{Sn}). Na Figura 5.11 (c) também são representados, em simultâneo os sinais das tensões da rede elétrica (u_a , u_b , u_c) e a da corrente da carga retificador trifásico (i_{Sa} , i_{Sb} ,

i_{Sc}, i_{Sn}). Verifica-se que a corrente da rede elétrica se apresenta em fase com as tensões da rede elétrica.

Dos ensaios realizados foi possível validar o desempenho do filtro implementado em laboratório, através da similitude das formas de onda dos resultados obtidos em laboratório e obtidos em simulação numérica.

5.3 – Conclusão

Neste capítulo apresentou-se uma visão geral da implementação laboratorial do filtro com ênfase no seu sistema de energia, sistema de controlo e de monitorização.

As cargas utilizadas no laboratório são iguais aos usados na simulação numérica. A comparação dos resultados experimentais emulados e da simulação numérica, leva a crer que o método implementado neste capítulo e os resultados reproduzidos por ele são confiáveis, uma vez os resultados laboratoriais e de simulação numérica são concordantes entre si.

Capítulo 6

Conclusões

6.1 – Considerações finais

Este trabalho apresentou o estudo e implementação de um filtro ativo paralelo a quatro condutores, com o objetivo de mitigar os problemas de qualidade de energia associados à corrente elétrica e melhorar eficiência energética. No capítulo 1 enunciou-se os pontos cruciais que motivaram a realização deste trabalho.

No capítulo 2 foram identificados os problemas de qualidade de energia elétrica associados às correntes e capazes de serem compensados pelo filtro ativo paralelo, nomeadamente harmônicos de corrente, fator de potência e desequilíbrios de corrente.

No capítulo 3 foi apresentada a metodologia do trabalho. Neste apresentou-se a estratégia baseada na Teoria das Potências Instantâneas que foi adotada para o controlo do filtro ativo paralelo. O modelo matemático do inversor de tensão a quatro condutores e o controlo vetorial não linear de correntes.

O capítulo 4 é dedicado à simulação numérica em Matlab/Simulink® do filtro. Para a verificação e comprovação da metodologia, a carga RL série desequilibrada e o retificador trifásico a díodos com filtro capacitivo equilibrada foram considerados nos ensaios. Estas cargas permitiram avaliar o desempenho o filtro quanto à distorção harmónica de corrente, desequilíbrio, fator de potência e corrente no condutor de neutro. Em todos os casos o filtro atuou de forma satisfatória, propiciando uma grande redução do desequilíbrio, redução da corrente no condutor neutro, redução da distorção harmónica da corrente da rede elétrica e elevando conseqüentemente o fator de potência.

Por fim, no capítulo 5 foram apresentados e analisados os resultados experimentais emulados obtidos a partir do protótipo de 10kVA implementado em laboratório para a validação prática do estudo realizado. As cargas utilizadas para os testes do protótipo foram as mesmas usadas em simulação numérica, com a diferença que estas foram ligadas a rede elétrica pelo laboratório de máquinas elétrica. Os resultados obtidos em laboratório foram bastante

semelhantes aos obtidos pela simulação numérica, o que indica que a implementação do controle do filtro em FPGA foi adequada.

Em síntese apresentam-se os processos que foram desenvolvidos, implementados e testados em ao longo da realização deste trabalho:

- Desenvolveram-se e testaram-se em simulação numérica os algoritmos de geração referência de corrente baseado na teoria PQ;
- Desenvolveram-se e testaram-se em simulação numérica os cálculos para o monitoramento da qualidade de elétrica da rede;
- Foram realizados em simulação numérica ensaios a inversor de tensão a quatro condutores e o controlador PI da tensão no barramento DC;
- Desenvolveram-se e testaram-se em simulação numérica os algoritmos de geração referência de corrente baseado na teoria PQ;
- Foram realizados em simulação ensaios utilizando carga RL série e retificador trifásico com filtro capacitivo;
- Testou-se em laboratório o sistema de aquisição de dados, DAC, na aquisição de tensões e correntes;
- Desenvolveram-se e testaram-se em laboratório os algoritmos que permitem o cálculo das tensões da rede e correntes da carga em coordenadas $\alpha\beta 0$ e a suas transformadas inversa em coordenadas abc ;
- Desenvolveram-se e testaram-se em laboratório os algoritmos que permitem o cálculo das potências das potências instantâneas da teoria PQ em coordenadas $\alpha\beta 0$.
- Desenvolveram-se e testaram-se em laboratório os algoritmos que permitem o cálculo das correntes de referência em coordenadas $\alpha\beta 0$ e abc ;
- Testou-se em laboratório o algoritmo do controlador vetorial não linear de correntes para analisar se as correntes de compensação do inversor seguiam as correntes de referência com diferentes formas de onda;
- Foram realizados em laboratório testes ao controlador PI do barramento DC para obtenção dos seus ganhos;
- Foram realizados ensaios de modo a ligar o filtro à rede do ISEL;
- Foram realizados em laboratório ensaios utilizando carga RL série e retificador trifásico com filtro capacitivo.

6.2 – Perspetivas de desenvolvimento futuro

O trabalho de dissertação desenvolvido e presentemente documentado permitiu a validação de um filtro ativo paralelo aplicado a rede elétrica a quatro condutores. Todavia, existem aspetos que devem ser melhorados de modo a aumentar o desempenho do sistema, bem como torná-lo eficiente. São propostas de continuidade do trabalho:

- Utilizar outros algoritmos para a geração de referências de corrente de compensação, de forma a verificar o desempenho do FAP e o impacto da qualidade das correntes;
- Ligar o filtro implementado em laboratório a rede elétrica do ISEL;
- Utilizar outras versões de FPGA mais eficientes e recentes;
- Testar o comportamento do FAP para aplicações em potências mais elevadas.
- Ensaiai o comportamento do FAP em variações dinâmicas de cargas lineares e não lineares;

BIBLIOGRAFIA

- [1] P. S. Revuelta, S. P. Litrán, and J. P. Thomas, “Introduction to Power Quality from Power Conditioning,” in *Active Power Line Conditioners*, N. Welford, Ed., 1st Editio. Joe Hayton, 2016, pp. 1–21. doi: 10.1016/C2014-0-02915-2.
- [2] Available in: <https://copperalliance.org/regional-hubs/europe/>
- [3] Available in: <https://www.epri.com/>
- [4] M. A. S. Masoum and E. F. Fuchs, “The Roles of Filters in Power Systems and Unified Power Quality Conditioners,” in *Power Quality in Power Systems and Electrical Machines*, Academic Press, Ed., 2nd Editio. Academic Press, 2015, pp. 782–885. doi: 10.1016/b978-0-12-800782-2.00009-9.
- [5] P. Salmerón Revuelta, S. Pérez Litrán, and J. Prieto Thomas, “Shunt Active Power Filters,” in *Active Power Line Conditioners*, N. Welford, Ed., 1st Editio. Joe Hayton, 2016, pp. 108–146. doi: 10.1016/b978-0-12-803216-9.00004-3.
- [6] R. J. F. Luís, “GERADOR DE VELOCIDADE VARIÁVEL PARA AUMENTO DA EFICIÊNCIA ENERGÉTICA EM GRUPOS ELETROGÊNEOS AUTÔNOMOS,” 2015, pp. 61–20.
- [7] Y. Hoon, M. A. Radzi, M. khair Hassan, and F. M. Nashiren, “Control Algorithms of Shunt Active Power Filter for Harmonics Mitigation: A Review,” *Energies from MDPI*, vol. 10, no. 12, pp. 1–29, Dec. 2017, doi: 10.3390/en10122038.
- [8] P. S. Revuelta, S. P. Litrán, and J. P. Thomas, “Instantaneous Reactive Power Theory,” in *Active Power Line Conditioners*, N. Welford, Ed., 1st Editio. Joe Hayton, 2016, pp. 51–105. doi: 10.1016/b978-0-12-803216-9.00003-1.
- [9] B. Singh, A. Chandra, and K. Al-Haddad, “Active Shunt Compensation,” in *Power Quality Problems and Mitigation Techniques*, John Wiley & Sons Ltd, Ed., 1st editio. Chichester, United Kingdom: Wiley, 2014, pp. 96–169. doi: <https://doi.org/10.1002/9781118922064.ch04>.
- [10] M. Aredes and E. H. Watanabe, “New control algorithms for series and shunt three-phase four-wire active power filters,” *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 10, no. 3, pp. 1649–1656, 1995, doi: 10.1109/61.400952.
- [11] Q. C. Zhong, J. Liang, G. Weiss, C. Feng, and T. C. Green, “ H_∞ control of the neutral point in four-wire three-phase DC-AC converters,” *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 53, no. 5, pp. 1594–1602, 2006, doi: 10.1109/TIE.2006.882014.
- [12] A. Bellini and S. Bifaretti, “A simple control technique for three-phase four-leg inverters,” *Int. Symp. Power Electron. Electr. Drives, Autom. Motion*, pp. 18–23, 2006, doi: 10.1109/SPEEDAM.2006.1649940.
- [13] A. Belini; S. Bifaretti, “Modulation Techniques for Three-Phase Four-Leg Inverters,” *Proc 6th WSEAS Int. Conf. Power Syst.*, pp. 398–403, 2006.
- [14] M. Ucar, S. Ozdemir, and E. Ozdemir, “A four-leg unified series-parallel active filter system for periodic and non-periodic disturbance compensation,” *Electr. Power Syst. Res.*, vol. 81, no. 5, pp. 1132–1143, 2011, doi: 10.1016/j.epsr.2011.01.001.

- [15] E. Watanabe and M. Aredes, “Teoria de potência ativa e reativa instantânea e aplicações—filtros ativos e FACTS,” *XII Congr. Bras. Automática, Uberlândia*, pp. 1–21, 1998, [Online]. Available: <http://scholar.google.com/scholar?hl=en&btnG=Search&q=intitle:Teoria+de+Potência+Ativa+e+Reativa+Instantânea+e+Aplicações+—+Filtros+Ativos+e+FACTS+—#0>
- [16] M. A. S. Masoum and E. F. Fuchs, “Introduction to power quality,” in *Power Quality in Power Systems and Electrical Machines*, Elsevier Inc., Ed., 2nd editio.Academic Press, 2015, pp. 4–104. doi: 0.1016/B978-0-12-800782-2.00001-4.
- [17] P. S. Revuelta, S. P. Litrán, and J. P. Thomas, “Distributed Generation,” in *Active Power Line Conditioners*, N. Welford, Ed., 1st Editio.Joe Hayton, 2016, pp. 285–322. doi: 10.1016/B978-0-12-803216-9.00008-0.
- [18] B. Singh, A. Chandra, and K. Al-Haddad, “Quality Standards and Monitoring,” in *Power Quality Problems and Mitigation Techniques*, John Wiley and Sons Ltd, Ed., 1st editio.Chichester, United Kingdom: Wiley, 2014, pp. 11–47. doi: <https://doi.org/10.1002/9781118922064.ch02>.
- [19] M. A. S. Masoum and E. F. Fuchs, “Impact of Poor Power Quality on Reliability, Relaying and Security,” in *Power Quality in Power Systems and Electrical Machines*, Elsevier Inc., Ed., 2nd editio.Academic Press, 2015, pp. 684–778. doi: 10.1016/b978-0-12-800782-2.00008-7.
- [20] J. L. Afonso and J. S. Martins, “Qualidade de energia eléctrica na indústria,” *Ciclo Semin. – As Oportunidades das Ameaças A Qual. da Energ. Eléctrica*, pp. 1–17, 2003, [Online]. Available: <http://hdl.handle.net/1822/1499>
- [21] A. A. Sallam and O. P. Malik, “Voltage variations,” in *Electric distribution systems*, IEEE Press Editorial Board, Ed., 2nd editio.Hoboken, New Jersey, United State, and Canada: John Wiley & Sons, Inc., 2019, pp. 321–360.
- [22] S. Chattopadhyay; M. Mitra; S. Sengupta, *Electric Power Quality*. 2011.
- [23] A. A. Sallam and O. P. Malik, “Electric power quality,” in *Electric distribution systems*, IEEE Press Editorial Board, Ed., 2nd editio.Hoboken, New Jersey, United State, and Canada: John Wiley & Sons, Inc., 2019, pp. 297–320.
- [24] A. Tokic, A. Jukan, and J. Smajic, “Parameter estimation of single-phase rectifier-based loads: Analytical approach,” *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 31, no. 2, pp. 532–540, 2016, doi: 10.1109/TPWRD.2015.2424914.
- [25] R. B. Timens, F. J. K. Buesink, V. Čuk, J. F. G. Cobben, W. L. Kling, and F. B. J. Leferink, “High harmonic distortion in a new building due to a multitude of electronic equipment,” *IEEE Int. Symp. Electromagn. Compat.*, pp. 393–398, 2011, doi: 10.1109/ISEMC.2011.6038343.
- [26] A. M. Blanco, R. Stiegler, and J. Meyer, “Power quality disturbances caused by modern lighting equipment (CFL and LED),” *2013 IEEE Grenoble Conf. PowerTech, POWERTECH 2013*, 2013, doi: 10.1109/PTC.2013.6652431.
- [27] A. A. Sallam and O. P. Malik, “Harmonics in electric distribution systems,” in *Electric distribution systems*, IEEE Press Editorial Board, Ed., 2nd editio.Hoboken, New Jersey, United State,and Canada: John Wiley & Sons, Inc, 2019, pp. 379–402.
- [28] R. D. Henderson and P. J. Rose, “Harmonics: The Effects on Power Quality and Transformers,” *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 30, no. 3, pp. 528–532, 1994, doi: 10.1109/28.293695.

- [29] Institute of Electrical and Electronics Engineers, *IEEE Recommended Practice and Requirements for Harmonic Control in Electric Power Systems Society*. U.S.A, 2014, p. 29.
- [30] International Electrotechnical Commission, *Electromagnetic compatibility (EMC) - Part 3-2: Limits - Limits for harmonic current emissions*. Switzerland, 2009.
- [31] Instituto Português da Qualidade, “Características de tensão fornecida pelas redes de distribuição pública de energia eléctrica,,” *NP EN 50160*. Comité Europeu de Normalização Electrotécnica, Portugal, Nov. 23, 2010.
- [32] J. E. Mitchell, “Distortion factor: The ‘new’ problem of power factor,,” *INTELEC, 14th Int. Telecommun. Energy Conf.*, pp. 514–516, 1992, doi: 10.1109/INTLEC.1992.268394.
- [33] R. Arseneau *et al.*, “Practical definitions for powers in systems with nonsinusoidal waveforms and unbalanced loads: A discussion,,” *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 11, no. 1, pp. 79–101, 1996, doi: 10.1109/61.484004.
- [34] L. Cividino, “Power factor, harmonic distortion; Causes, effects and considerations,,” *INTELEC, Int. Telecommun. Energy Conf.*, pp. 506–513, 1992, doi: 10.1109/INTLEC.1992.268395.
- [35] C. L. Fortescue, *Method of symmetrical co-ordinates applied of the solution of polyphase networks*. U.S.A., 1918.
- [36] P. S. I. and M. Comm., “IEEE Std. 1459 Trial-Use Standard Definitions for the Measurement of Electric Power Quantities Under Sinusoidal, NonSinusoidal, Balanced, or Unbalanced Conditions,,” 2000.
- [37] J. Wiley, “UNDERSTANDING SYMMETRICAL COMPONENTS FOR POWER SYSTEM MODELING,,” 2017.
- [38] B. M. B. R. L. D. T. V. L. Vandeveld, “Three-phase inverter-connected DG-units and voltage unbalance,,” *Electr. Power Syst. Res.*, vol. vol.81, no, pp. 899–906, 2011.
- [39] H. R. Reed and R. J. W. Koopman, “Induction Motors on Unbalanced Voltages,,” *Trans. Am. Inst. Electr. Eng.*, vol. 55, no. 11, pp. 1206–1213, 1936, doi: 10.1109/T-AIEE.1936.5057189.
- [40] P. H. O. Rezende and M. I. Samesima, “Efeitos Do Desequilíbrio De Tensões De Suprimentos Nos Motores De Indução Trifásico,,” pp. 1–30, 2013, [Online]. Available: <http://www.seer.ufu.br/index.php/index/search/search?query=tensão&searchJournal=&authors=rezende&title=&abstract=&galleyFullText=&suppFiles=&dateFromMonth=&dateFromDay=&dateFromYear=&dateToMonth=&dateToDay=&dateToYear=&dateToHour=23&dateToMinute=59&dateTo>
- [41] H. Akagi; Y. Kanazawa; A. Nabae, “Principles and Compensation Effectiveness of Instantaneous Reactive Power Compensator Devices,,” *Meet. Power Semicond. Convert. Reseachr - IEE-Japan, SPC-82-16*, 1982.
- [42] “Generalized theory of instantaneous reactive power and it applications,,” *Trans. IEE-Japan*, vol. Part B, vo, pp. 483-490 (in Japanese), 1983.
- [43] H. Akagi; Y. Kanazawa; A. Nabae, “Generalized Theory of instantaneous Re-active Power in Three-Phase Circuits,,” *IPEC’83 - Int. Power Electron. Conf.*, pp. 1375–1386, 1983.
- [44] H. Akagi; Y. Kanazawa; A. Nabae, “Instantaneous reactive power compensator comprising switching devices without energy storage components,,” *IEEE Trans. Ind.*

- Appl.*, vol. 20, n, pp. 625–630, 1984.
- [45] E. Clarke, *Circuit Analysis of A-C Power System: Symmetrical and Related Components*. New York: John Wiley & Sons, Inc, 1943.
- [46] J. L. Afonso, J. G. Pinto, and H. Gonçalves, “Active Power Conditioners to Mitigate Power Quality Problems in Industrial Facilities,” *Power Qual. Issues*, pp. 105–138, 2013, doi: 10.5772/53189.
- [47] E.H.Watanabe; R.M. Stephan; M. Aredes, “New Concepts of Instantaneous Active and Reactive Powers in Electrical System with Generic Load,” *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. vol 8, no., pp. 697–703.
- [48] E. H. W. M. Aredes, “New Control Algorithms for Series and Shunt Three-Phase Four Wire Active Power Filters,” *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. vol 10, no, pp. 1649–1656.
- [49] J. F. Silva, *Electrónica Industrial - Semicondutores e Conversores de Potência*, 2nd ed., . 2nd ed., Lisbon, 2013.
- [50] H. Akagi, E. H. Warababe, and M. Aredes, *INSTANTANEOUS POWER THEORY AND APPLICATIONS TO POWER CONDITIONING*, 2nd. 2nd. New Jersey: John Wiley & Sons, Inc., 2017.
- [51] R. Luís, J. F. Silva, and J. C. Quadrado, “Output voltage quality evaluation of stand-alone four-leg inverters using linear & non-linear controllers,” *Energies*, vol. 10, no. 4, Apr. 2017, doi: 10.3390/en10040504.
- [52] Xilinx, “Getting Started with the Xilinx Virtex-6 FPGA ML605 Evaluation Kit.” pp. 1–72, 2010.
- [53] Xilinx, “Xilinx System Generator for DSP Reference Guide.” p. 35, 2012.
- [54] Xilinx, “Xilinx System Generator for DSP User Guide,” vol. 640. pp. 1–415, 2012.

ANEXO

Parâmetros do modelo de simulação numérica

Programa de inicialização de parâmetros do modelo de simulação numérica do filtro ativo de potência paralelo

```

%Programação dos parâmetros iniciais do modelo de simulação
%numérica do filtro ativo de potência

%Darcy d' Apresentação, 2023
clear; clc;

%% IMPEDÂNCIA DE LINHA
Sn=0.5e6;      %Potência nominal de um transformador trifásico,
Un=400;       %tensão nominal do secundário do transformador,
Ucc=5/100;    %tensão de curto-circuito do transformador,
relXR=7;      %relação X/R do transformador,
%cálculo:
Zlinha=(sqrt(3)*Un^2)*Ucc/Sn;      %Impedância de linha,
Rlinha=Zlinha/sqrt(1+(relXR^2));   %Resistancia de linha,
Xlinha=Zlinha/sqrt(1+1/(relXR^2)); %Reatância de linha,
Llinha=Xlinha/(2*pi*50);          %Indutância de linha.

%% FILTRO LC
P=20000;      %potência nominal,W,
U=230;        % tensão fase-neutro,
Rcarga=3*U^2/P; %Resistência de carga do filtro/fase, Ohm,
ff=500;       %frequência de corte,
wf=2*pi*ff;   %frequência angular, rad/s,
dzeta=sqrt(2)/2; %factor de amortecimento,
Z=dzeta*2*Rcarga; %impedância de cálculo do filro LC, Ohm,
relLC=2*Rcarga^2; % resistância de cálculo do filro LC, Ohm,
%Cf=sqrt(1/(wf^2*relLC)); %capacidade fase neutro, F,
Cf=50e-6;
%Lf=relLC*Cf;      %indutância de linha, H,
Lf=3.6e-3;

%% DC-bus
uDCini=650;      %Tensão inicial do DC-bus
uDCref=650;     %Tensão de referência do DC-bus
%Rcbus=24e-3;   %Resistência dos condensadores utilizados
%Cbus_cada     %Capacidade de cada condensador utilizado
%NumCond_S=    %Número do conjunto dos condensadores em série
%NumCond_p=    %Número do conjunto dos condensadores em paralelo

```

```

%CbusTotal= 5e-6; %1e-3 5,10,10,15, no total 40e-6 %Capacidade total
do DC-bus

%% Inversor de tensão a quatro condutores ou four legs
%controlo vetorial não linear das correntes
cvc4Leg=[12 4 12 4 14 6 14 6 14 6 14 6 10 2 10 2 13 13 13 5 8 0 15 7
8 0 15 7 11 3 11 3 12 4 12 4 8 0 15 7 8 0 15 7 10 2 10 2 13 5 13 5 9
1 9 1 9 1 9 1 11 3 11 3];

%INVERSOR 3~4w: INV3ph4w=[Sn, Sc, Sb, Sa]
INV0=[0 0 0 0]; INV3=[0 0 1 1]; INV6=[0 1 1 0]; INV9=[1 0 0 1];
INV12=[1 1 0 0];
INV1=[0 0 0 1]; INV4=[0 1 0 0]; INV7=[0 1 1 1]; INV10=[1 0 1 0];
INV13=[1 1 0 1];
INV2=[0 0 1 0]; INV5=[0 1 0 1]; INV8=[1 0 0 0]; INV11=[1 0 1 1];
INV14=[1 1 1 0]; INV15=[1 1 1 1];
%Tabela de estados de comutação
INV3ph4leg=cat(1, INV0, INV1, INV2, INV3, INV4, INV5, INV6, INV7, INV8, INV9, I
NV10, INV11, INV12, INV13, INV14, INV15);
%Largura da janela de histerese
LwI1=0.2*2 ; %Janela de histerese larga
NwI1=0.025*2 ; %Janela de histerese estreita
LwI2=0.4*2 ; %Janela de histerese larga
NwI2=0.025*2; %Janela de histerese estreit
LwI3=0.4*2 ; %Janela de histerese larga
NwI3=0.025*2; %Janela de histerese estreit
C=sqrt(2/3)*[1 0 1/sqrt(2); -.5 sqrt(3)/2 1/sqrt(2); -.5 -sqrt(3)/2
1/sqrt(2)]; %matriz Concordia
C'; % Transposta da matriz C

%% Carga Linear
Pcarga=20000; %A carga pode ir no máximo 40kW
Qcarga=5000;
RCargaLinear=15;
LCargaLinear=20e-3;

%% Carga Não Linear
%Rede
Ts=1e-6;
Vn=400;
In=70;
Sn=Vn*In;
f=50;
Cs=(Sn/(1000*2*pi*f*Vn^2)); %5.5704e-07
%Csnb<Cs
Rs=(2*Ts)/Cs; %3.5904
%Rsnb>Rs
%snubbers da ponte de díodos
Csnb=5e-07;
Rsnb=5;

%% QUALIDADE DE ENERGIA
% Para o cálculo de componentes directas e homopolares
j=sqrt(-1);
a=exp(j*2*pi/3);
a2=exp(-j*2*pi/3);

```