

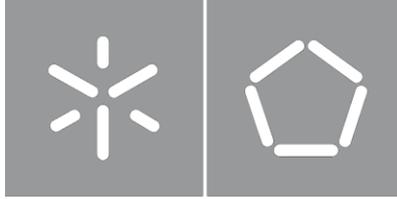


**Universidade do Minho**  
Escola de Engenharia

João Paulo Almeida Martins

**Estudo da Qualidade de Energia Elétrica  
nas Instalações da Universidade do Minho**

Dezembro de 2021



**Universidade do Minho**

Escola de Engenharia

João Paulo Almeida Martins

**Estudo da Qualidade de Energia Elétrica  
nas Instalações da Universidade do Minho**

Dissertação de Mestrado

Ciclo de Estudos Integrados Conducentes ao Grau Mestre em  
Engenharia Eletrónica Industrial e Computadores

Trabalho realizado sob orientação do

**Professor Doutor José Gabriel Oliveira Pinto**

Dezembro de 2021

## **DIREITOS DE AUTOR E CONDIÇÕES DE UTILIZAÇÃO DO TRABALHO POR TERCEIROS**

Este é um trabalho académico que pode ser utilizado por terceiros desde que respeitadas as regras e boas práticas internacionalmente aceites, no que concerne aos direitos de autor e direitos conexos.

Assim, o presente trabalho pode ser utilizado nos termos previstos na licença abaixo indicada.

Caso o utilizador necessite de permissão para poder fazer um uso do trabalho em condições não previstas no licenciamento indicado, deverá contactar o autor, através do RepositóriUM da Universidade do Minho.

### ***Licença concedida aos utilizadores deste trabalho***



**Atribuição-NãoComercial-SemDerivações**  
**CC BY-NC-ND**

<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>

# Agradecimentos

Em primeiro lugar, quero agradecer ao meu orientador Doutor José Gabriel Oliveira Pinto, pelo seu auxílio, disponibilidade, sábios conselhos e paciência, estando sempre disposto a ajudar mesmo quando nem sempre o merecesse.

Um agradecimento gigante à minha família, principalmente os meus pais que mesmo perante as minhas diversas falhas e erros, tudo fizeram para me ajudar a conquistar os meus objetivos e que todo este percurso fosse possível. Um agradecimento também ao meu irmão Zé que mesmo longe esteve sempre perto e à Rose que sem perceber foi vital na realização desta dissertação.

À Rafaela, por tudo e mais alguma coisa, agradeço por ser o maior apoio em todos os momentos, por toda a ajuda incansável, por sempre acreditar em mim e por todo este caminho que a gente têm trilhado.

A todos os meus colegas e grandes amigos da universidade que pude criar fortes laços ao longo do meu percurso académico, podendo partilhar inúmeros momentos e também eles tiveram papel importante na realização desta dissertação.

A todos os integrantes do meu grupo de amigo MBK (Ferreira, Piolho, Joel, Asdrúbal, Martins Joaquim, Henrique e Pinhão) obrigado por todo o apoio e amizade.

Por fim, ao Ali Babá, ao Fátima e ao Gayvotas, por estarem sempre lá.

Este trabalho de dissertação está enquadrado no projeto IC&DT “Quality4Power – Enhancing the Power Quality for Industry 4.0 in the era of Microgrids”, financiado pela Fundação para a Ciência e Tecnologia, com a referência PTDC/EEI-EEE/28813/2017.

## **DECLARAÇÃO DE INTEGRIDADE**

Declaro ter atuado com integridade na elaboração do presente trabalho académico e confirmo que não recorri à prática de plágio nem a qualquer forma de utilização indevida ou falsificação de informações ou resultados em nenhuma das etapas conducente à sua elaboração.

Mais declaro que conheço e que respeitei o Código de Conduta Ética da Universidade do Minho.

# Resumo

A proliferação das cargas não-lineares nas redes elétricas contribuiu para um aumento dos problemas de qualidade de energia elétrica (QEE). Os problemas de QEE podem causar perdas económicas elevadas ao consumidor, pois afetam o bom funcionamento nos equipamentos ligados à rede elétrica. Posto isto, é essencial a realização de monitorizações de qualidade de energia elétrica com os objetivos de fazer uma análise de qualidade do serviço prestado, identificando eventuais medidas de melhoria. Neste sentido, a Universidade do Minho adota políticas e medidas procurando alcançar uma maior sustentabilidade energética e daqui advém o principal incentivo para esta dissertação.

De forma a eliminar ou mitigar os diversos problemas que possam existir na rede elétrica foram estudadas diversas soluções de compensação de QEE, desde filtros passivos, mais facilmente implementáveis, aos filtros ativos de potência, mais completos e com mais funcionalidades, com uma implementação mais dispendiosa.

Nesta dissertação, o principal objetivo é recolher e analisar os parâmetros de qualidade de energia elétrica nas instalações da Universidade do Minho, mais concretamente no laboratório do grupo de eletrónica de potência e energia localizado no Departamento de Eletrónica Industrial, no Campus de Azurém. Para a concretização da monitorização usou-se um analisador de qualidade de energia elétrica que oferece um vasto leque de funcionalidades e que permite o acesso a um conjunto de medições e indicadores que permitem avaliar a qualidade de um sistema elétrico.

Com base nos dados recolhidos, foram estudadas e validadas em ambiente de simulação possíveis soluções a adotar com o intuito de melhorar a qualidade de energia nas instalações. Com base nos resultados obtidos foi feita uma prospeção de mercado e foram identificados equipamentos que melhor se adequam às instalações em estudo.

**Palavras-Chave:** Qualidade de Energia Elétrica, Eficiência Energética, Monitorização Energética

# Abstract

The proliferation of non-linear loads in electrical power grids has contributed to an increase in electrical power quality (PQ) problems. PQ problems can cause high economic losses to the consumer, as they affect the proper functioning of equipment connected to the power grid. That said, it is essential to carry out monitoring of the power quality in order to carry out an analysis of the quality of the service provided, identifying the required actions for improvement. In this sense, the University of Minho adopts policies and actions seeking to achieve greater energy sustainability and hence the main incentive for this dissertation.

In order to eliminate or mitigate the various problems that may exist in the power grid, several mitigation solutions were studied, from passive filters, more easily implementable, to active power filters, more complete and with more functionalities, with a more expensive implementation.

In this dissertation, the main objective is to acquire and analyze the parameters of power quality in the University of Minho facilities, more specifically in the laboratory of the energy and power electronics group located in the Department of Industrial Electronics, in the Campus of Azurém. In order to carry out the monitoring, a power quality analyzer was used, which offers a wide range of features and allows access to a set of measurements and indicators that allow evaluating the power quality of an electrical system.

Based on the data collected, possible solutions to be adopted in order to improve the power quality in the facilities were studied and validated in a simulation environment. Based on the results obtained, a market survey was carried out and equipment that best suits the facilities under study was identified.

**Keywords:** Power Quality, Energy Efficiency, Energy Monitoring.

# ÍNDICE

Agradecimentos.....	iv
Resumo.....	vi
Abstract.....	vii
Lista de Figuras.....	x
Lista de Tabelas.....	xii
Acrónimos e Siglas.....	xiii
Nomenclatura.....	xv
Capítulo 1      Introdução.....	16
1.1    Enquadramento.....	16
1.2    Universidade do Minho e o Laboratório do GEPE.....	17
1.3    Motivação.....	18
1.4    Objetivos.....	18
1.5    Estrutura da dissertação.....	19
Capítulo 2      Qualidade de Energia Elétrica.....	20
2.1    Introdução.....	20
2.1.1    Interrupção de Energia.....	21
2.1.2    Cava de Tensão.....	22
2.1.3    Sobretensão Momentânea.....	23
2.1.4    Variação da Amplitude da Tensão de Alimentação.....	23
2.1.5    Variação da Frequência da Tensão de Alimentação.....	24
2.1.6    Desequilíbrio da Tensão de Alimentação.....	24
2.1.7    Micro-Cortes na Tensão de Alimentação.....	25
2.1.8    Flutuação da Tensão.....	26
2.1.9    Baixo Fator de Potência.....	27
2.1.10    Interferência Eletromagnética (Ruído).....	28
2.1.11    Fenómenos Transitórios.....	28
2.1.12    Distorção Harmónica.....	29
2.2    Monitorização de Qualidade de Energia Elétrica.....	31
2.2.1    Vantagens da Monitorização da Energia.....	32
2.2.2    Características do Monitorizador de Energia Elétrica Utilizado.....	32
2.2.3    Características do Programa de Análise dos Dados Obtidos na Monitorização de Energia Elétrica.....	35
2.3    Conclusões.....	36
Capítulo 3      Soluções de Problemas de Qualidade de Energia Elétrica.....	38
3.1    Introdução.....	38
3.2    Filtros Passivos.....	38
3.3    Filtros Ativos de Potência.....	39
3.3.1    Filtro Ativo Paralelo.....	40
3.3.2    Filtro Ativo Série.....	41
3.3.3    Condicionador Unificado de Qualidade de Energia (UPQC).....	42

---

3.4	Fontes de Alimentação Ininterrupta (UPS) .....	42
3.5	Outras Soluções e Equipamentos de Compensação de Problemas de Qualidade de Energia Elétrica .....	45
3.6	Conclusões.....	47
Capítulo 4	Monitorização da Qualidade de Energia Elétrica no Laboratório GEPE .....	48
4.1	Introdução .....	48
4.2	Caso de Estudo – Laboratório do GEPE.....	48
4.3	Qualidade de Energia Elétrica no Quadro Elétrico .....	49
4.3.1	Registos e Análise das Tensões e Correntes .....	51
4.3.2	Registo e Análise das Potência e do Fator de Potência .....	55
4.3.3	Registo e Análise dos Harmónicos e da Taxa de Distorção Harmónica das Tensões e das Correntes ....	58
4.3.4	Registo e Análise da Frequência Fundamental da Tensão .....	61
4.3.5	Registo e Análise da Tremulação da Tensão .....	62
4.3.6	Registo e Análise do Desequilíbrio da Tensão.....	63
4.3.7	Registo e Análise de outras ocorrências.....	64
4.4	Conclusões.....	64
Capítulo 5	Validação das Melhorias de Qualidade de Energia Elétrica .....	66
5.1	Introdução .....	66
5.2	Simulações do Filtro Ativo de Potência Paralelo Trifásico .....	66
5.2.1	Modelo de Simulação do Filtro Ativo de Potência Paralelo Trifásico .....	67
5.2.2	Controlo de Corrente por <i>Periodic Sampling</i> .....	69
5.2.3	Teoria <i>p-q</i> .....	70
5.2.4	Resultados da Simulação do Filtro Ativo Paralelo .....	72
5.3	Sugestão de Filtro Ativos de Potência a aplicar .....	81
5.4	Conclusões.....	82
Capítulo 6	Conclusões e Trabalho Futuro .....	84
6.1	Conclusões.....	84
6.2	Sugestões para o futuro .....	87
Lista de Referências	.....	88

# Lista de Figuras

Figura 2.1 – Forma de onda da tensão de alimentação a 50 Hz. ....	21
Figura 2.2 – Interrupção breve da tensão de alimentação.....	22
Figura 2.3 – Cava de tensão. ....	23
Figura 2.4 – Sobretensão momentânea da rede elétrica. ....	23
Figura 2.5 - Desequilíbrios nas tensões da rede elétrica.....	25
Figura 2.6 - Micro-cortes na tensão de alimentação. ....	25
Figura 2.7 - Flutuação da tensão da rede elétrica. ....	26
Figura 2.8 – Exemplo de um transitório do tipo impulsivo.....	29
Figura 2.9 - Monitorizador de qualidade de energia <i>Dranetz Power Guide 4400</i> (Fonte: Dranetz) [52]. ....	33
Figura 2.10 - Pinça Amperimétrica TR2021 utilizada na monitorização. ....	35
Figura 3.1 - Exemplo de um diagrama de blocos de um filtro passivo. ....	39
Figura 3.2 - Exemplo de um diagrama de blocos de Filtro Ativo Paralelo. ....	40
Figura 3.3 - Exemplo de um diagrama de blocos de Filtro Ativo Série.....	41
Figura 3.4 - Exemplo de um diagrama de blocos de um Condicionador Unificado de Qualidade de Energia. ....	42
Figura 3.5 - Diagrama de blocos de uma UPS <i>offline</i> .....	43
Figura 3.6 - Diagrama de blocos de uma UPS <i>line-interactive</i> .....	44
Figura 3.7 - Diagrama de blocos de uma UPS <i>double-conversion</i> .....	45
Figura 4.1 – Montagem do monitorizador no quadro elétrico. ....	49
Figura 4.2 - Evolução dos valores eficazes das tensões no quadro elétrico. ....	51
Figura 4.3 - Evolução dos valores eficazes das tensões no quadro elétrico: (a) desde o início da monitorização até ao fim da sexta-feira dia 24 de Julho. (b) período de fim-de-semana; (c) desde o início da segunda-feira dia 26 de Julho até à manhã de quinta-feira .....	52
Figura 4.4 - Evolução dos valores eficazes das correntes no quadro elétrico.....	53
Figura 4.5 - Evolução dos valores eficazes das correntes no quadro elétrico: (a) desde o início da monitorização até ao fim da sexta-feira dia 24 de Julho; (b) período de fim-de-semana; (c) desde o início da segunda-feira dia 26 de Julho até à manhã de quinta-feira.....	54
Figura 4.6 - Formas de onda das tensões e correntes no quadro elétrico. ....	55
Figura 4.7 - Evolução temporal das potências médias no quadro elétrico. ....	56
Figura 4.8 - Evolução temporal do fator de potência no quadro elétrico.....	57
Figura 4.9 - Evolução temporal das potências médias no quadro elétrico desde o início da monitorização até ao fim da sexta-feira dia 24 de Julho.....	57
Figura 4.10 - Evolução temporal das potências médias no quadro elétrico: (a) período de fim-de-semana; (b) desde o início da segunda-feira dia 26 de Julho até à manhã de quinta-feira dia 29 de Julho.....	58
Figura 4.11 - Evolução da frequência fundamental da tensão no quadro elétrico. ....	62
Figura 4.12 - Evolução da tremulação da tensão no quadro elétrico.....	63
Figura 4.13 - Evolução da percentagem de desequilíbrio da tensão no quadro elétrico. ....	63

Figura 5.1 - Andar de potência do modelo de simulação em PSIM do FAP trifásico .....	67
Figura 5.2 - Sistema de controlo do modelo de simulação em PSIM do FAP trifásico.....	68
Figura 5.3 - Cargas utilizadas, no modelo de simulação PSIM, do FAP.....	69
Figura 5.4 - Simulação de uma carga RL equilibrada .....	73
Figura 5.5 - Formas de onda da simulação das correntes da rede elétrica do Filtro Ativo Paralelo ligado a uma carga RL. ..	73
Figura 5.6 - Formas de onda da simulação da corrente e tensão da fase A do Filtro Ativo Paralelo ligado a uma carga RL. .	73
Figura 5.7 - Formas de onda da tensão e corrente após compensação pelo Filtro Ativo Paralelo com carga RL: (a) da fase A; (b) da fase B; (c) da fase C. ....	74
Figura 5.8 - Simulação de retificador trifásico com carga RL.....	75
Figura 5.9 - Formas de onda da simulação das correntes da rede elétrica do Filtro Ativo Paralelo ligado a um retificador trifásico com carga RL.....	75
Figura 5.10 - Formas de onda da simulação da corrente e tensão A da fase do Filtro Ativo Paralelo ligado a um retificador trifásico com carga RL.....	75
Figura 5.11 - Formas de onda da tensão e corrente após compensação do Filtro Ativo Paralelo ligado a um retificador trifásico com carga RL: (a) da fase A; (b) da fase B (c) da fase C. ....	76
Figura 5.12 - Simulação de retificador monofásico com filtro capacitivo.....	77
Figura 5.13 - Formas de onda da simulação das correntes da rede elétrica do Filtro Ativo Paralelo ligado a três retificadores monofásicos com filtro capacitivo. ....	77
Figura 5.14 - Formas de onda da simulação da corrente e tensão da fase A do Filtro Ativo Paralelo ligado a três retificadores monofásicos com filtro capacitiva. ....	77
Figura 5.15 – Formas de onda da tensão e corrente após compensação na simulação do Filtro Ativo Paralelo ligado a três retificadores monofásicos ligados com filtro capacitivo: (a) da fase <i>a</i> ; (b) da fase <i>b</i> ; (c) da fase <i>c</i> . ....	78
Figura 5.16 - Formas de onda da corrente após compensação do Filtro Ativo Paralelo ligado a três retificadores monofásicos com filtro capacitivo. ....	79
Figura 5.17 - Formas de onda da simulação das correntes da rede elétrica do Filtro Ativo Paralelo ligado a diversas cargas. ....	79
Figura 5.18 - Formas de onda da simulação da corrente e tensão da fase <i>a</i> da rede elétrica do Filtro Ativo Paralelo ligado a diversas cargas. ....	80
Figura 5.19 - Formas de onda da tensão e corrente após compensação do Filtro Ativo Paralelo ligado a diversas cargas: (a) da fase A; (b) da fase B; (c) da fase C. ....	80
Figura 5.20 – Forma de onda da corrente no neutro após compensação do Filtro Ativo Paralelo ligado a diversas cargas. .	81

# Lista de Tabelas

Tabela 1 - Limites dos Harmónicos de Tensão da Rede Elétrica.....	30
Tabela 2 - Taxa de Distorção Harmónica da Tensão no Quadro Elétrico.....	59
Tabela 3 - Harmónicos Individuais da Tensão no Quadro Elétrico.....	60
Tabela 4 - Taxa de Distorção Harmónica da Corrente no Quadro Elétrico.....	60
Tabela 5 - Harmónicos Individuais de Corrente no Quadro Elétrico.....	61

# Acrónimos e Siglas

<b>Acrónimo / Sigla</b>	<b>Significado</b>
DEI	Departamento de Eletrónica Industrial
DPF	<i>Displacement Power Factor</i>
DSTATCOM	<i>Distribution STATCOM</i>
DVR	<i>Dynamic Voltage Restorer</i>
FAP	Filtro Ativo Paralelo
FAS	Filtro Ativo Série
FCTCR	<i>Fixed Capacitor Thyristor Controlled Reactor</i>
GCSC	<i>GTO Controlled Series Capacitor</i>
GEPE	Grupo de Eletrónica de Potência e Energia
GTO	<i>Gate Turn-Off Thyristor</i>
IEC	<i>International Electrotechnical Commission</i>
IGBT	<i>Insulated Gate Bipolar Transistor</i>
LCD	<i>Liquid Crystal Display</i>
QEE	Qualidade de Energia Elétrica
QGBT	Quadro Geral de Baixa Tensão
SASUM	Serviços de Acção Social da Universidade do Minho
SSSC	<i>Synchronous Static Series Compensator</i>
STATCOM	<i>Static Compensator</i>
SVC	<i>Series VAr Compensator</i>
TCR	<i>Thyristor Controlled Reactor</i>
TCSC	<i>Thyristor Controlled Series Capacitor</i>
THD	<i>Total Harmonic Distortion</i>

TIHD	<i>Total Interharmonic Distortion</i>
TPF	<i>Total Power Factor</i>
TSC	<i>Thyristor Switched Capacitor</i>
TSCTCR	<i>Thyristor Switched Capacitor Thyristor Controlled Reactor</i>
TSSC	<i>Thyristor Switched Series Capacitor</i>
UE	União Europeia
UPFC	<i>Unifies Power Flow Controller</i>
UM	Universidade do Minho
UPQC	<i>Unified Power Quality Conditioner</i>
UPS	<i>Uninterruptible Power Supply</i>
ZOH	<i>Zero-Order Hold</i>

## Nomenclatura

$i_a, i_b, i_c$	Correntes instantâneas no sistema de coordenadas $a-b-c$	A
$i_\alpha, i_\beta, i_0$	Correntes instantâneas no sistema de coordenadas $\alpha-\beta-0$	A
$i_a^*, i_b^*, i_c^*$	Correntes de referência geradas pela teoria $p-q$	A
$p$	Potência real instantânea	W
$\bar{p}$	Valor médio da potência real instantânea	W
$\tilde{p}$	Valor alternado da potência real instantânea	W
$q$	Potência imaginária instantânea	VA
$\bar{q}$	Valor médio da potência imaginária instantânea	VA
$\tilde{q}$	Valor alternado da potência real instantânea	VA
$p_0$	Potência instantânea de sequência zero	VA
$\bar{p}_0$	Valor médio da potência instantânea de sequência zero	VA
$\tilde{p}_0$	Valor alternado da potência instantânea de sequência zero	VA
$P_{st}$	Severidade da tremulação de curta duração	-
$P_{lt}$	Severidade da tremulação de longa duração	-
$P_{Méd}$	Potência ativa média	W
$Q_{Méd}$	Potência reativa média	VAr
$S_{Méd}$	Potência aparente média	VA
$v_a, v_b, v_c$	Tensões instantâneas no sistema de coordenadas $a-b-c$	V
$v_\alpha, v_\beta, v_0$	Tensões instantâneas no sistema de coordenadas $\alpha-\beta-0$	V
$THD$	Distorção harmónica total calculada com base nas primeiras 40 harmónicas do sinal	V/A
$THD_{\%}$	Distorção harmónica total calculada em percentagem da amplitude da fundamental com base nas primeiras 40 harmónicas do sinal	%
$TIHD_{\%}$	Distorção inter-harmónica total calculada em percentagem da amplitude da fundamental	%

# Capítulo 1

## Introdução

### 1.1 Enquadramento

O acesso à energia elétrica tornou-se um suporte fundamental para toda a atividade económica, bem como para o bem-estar da população em geral [1]. O que torna impensável possíveis falhas deste sistema, pois pode resultar em perdas económicas significativas [2]. Deste modo, cada vez mais, o conceito de Qualidade de Energia Elétrica (QEE) está em voga na comunidade científica.

A definição de QEE foi evoluindo ao longo do tempo, pois inicialmente a principal preocupação consistia em manter os valores das tensões e frequência dentro de limites pré-definidos e que não existissem interrupções de energia [3].

Com o desenvolvimento tecnológico, ocorreu uma evolução dos equipamentos ligados ao sistema elétrico, melhorando o rendimento, controlabilidade e custo dos processos. Contudo, esses novos equipamentos apresentam uma característica tensão/corrente não linear que, ao contrário das cargas lineares (que eram as cargas maioritariamente usadas), originam correntes não sinusoidais e, dessa forma, “poluem” a rede elétrica com harmónicos. Harmónicos esses que provocam distorções nas formas de onda da corrente e da tensão, afastando-as do perfil de onda da referência sinusoidal ideal. Qualquer equipamento eletrónico ligado á rede elétrica pode ser responsável por criar distorções nas formas de onda das correntes e das tensões [4].

Porém, existem outros problemas de qualidade de energia, para além da distorção harmónica e interrupções de energia, como subtensões momentâneas ou cavas de tensão (*sags*), sobretensões momentâneas (*swells*), flutuações de tensão (*flicker*), micro-cortes de tensão (*notches*), transitórios, ruídos de alta frequência, variações de frequência, entre outros.

Estes fenómenos elétricos provocar inúmeras consequências ao utilizador da rede elétrica pois podem levar a danos nos equipamentos e componentes da instalação elétrica, bem como, a avarias ou a uma redução da vida útil. Estes problemas podem também provocar um aumento das perdas nas instalações refletindo num maior consumo de energia e podem mesmo causar interrupções dos processos produtivos. Tudo o que for referido tem consequências que podem implicar prejuízos financeiros avultados, para além disto, existem limites legais que devem ser cumpridos para a melhor

distribuição de energia entregue ao consumidor, daí resultando a importância de uma boa qualidade de energia elétrica.

Para que se garanta essa qualidade de serviço é extremamente importante a monitorização contínua da rede elétrica, através de monitorizadores de QEE, pois estes equipamentos permitem a recolha dos dados necessários para detetar possíveis problemas e sua origem, levando a um melhor entendimento de como esses problemas podem ser evitados no futuro, ou de como os seus efeitos podem ser mitigados, ou seja, oferece ao utilizador as informações necessárias para que este adote possíveis soluções e comportamentos para melhoria da QEE [5].

Com aumento gradual do consumo de energia elétrica e do uso de cargas não-lineares levou a uma preocupação da União Europeia (UE) em adotar normas e regras de eficiência energética, promovendo uma racionalização do consumo de energia, beneficiando não só o ambiente como a redução de custos das diversas organizações e setores de atividade. A monitorização da rede também pode assumir um papel importante nesta questão pois, possibilita ao utilizador obter conhecimento dos consumos energéticos das suas instalações, permitindo com isso, se possível, adotar medidas e comportamentos de redução de perdas energéticas.

## **1.2 Universidade do Minho e o Laboratório do GEPE**

A Universidade do Minho (UM) é uma instituição pública de ensino superior fundada em 1973 na cidade de Braga e que apenas recebeu os primeiros estudantes em 1975/76. A Universidade é reconhecida pela competência e qualidade dos professores, pela excelência da investigação, pela ampla oferta formativa graduada e pós-graduada e pelo seu alto nível de interação com outras instituições [6].

A UM é uma universidade comprometida com a investigação, desenvolvimento e inovação possuindo cursos e projetos de investigação com um forte reconhecimento internacional.

Atualmente as instalações da UM estão distribuídas pelas cidades de Braga e Guimarães com três campus instalados nessas cidades: um em Braga, o campus de Gualtar, e dois em Guimarães, o campus de Azurém e o campus de Couros. Enquanto que na cidade de Braga são lecionados a maior parte dos cursos, em Guimarães concentra-se os estudos de Arquitetura, Geografia, Estatística Aplicada e a maior parte dos cursos de Engenharia. É em Guimarães que se encontra o laboratório do GEPE (*Group of Energy and Power Electronics*), grupo de investigação integrado no campo da Eletrónica Industrial do Centro Algoritmi que constitui uma unidade de investigação ligada à Escola de Engenharia da Universidade do Minho. Os principais campos de investigação do grupo estão focados na aplicação

de eletrônica de potência para sistemas de energia e é majoritariamente constituído por alunos de mestrado e doutoramento e investigadores do Departamento de Eletrónica Industrial (DEI). O GEPE, apresenta, desde a sua fundação, muito trabalho desenvolvido com o seu apoio, desde dissertações de mestrado e teses de doutoramento a projetos de investigação sendo, portanto, um grupo com muita experiência e fortes competências no desenvolvimento de filtros ativos, sistemas de carregamento de baterias, interface de sistemas de energia renovável com a rede elétrica, eletrônica de potência para veículos elétricos e híbridos e sistemas de monitorização da qualidade da energia [7].

### **1.3 Motivação**

Tendo sido aprovado em setembro de 2015 pela Organização das Nações Unidas, os Objetivos para o Desenvolvimento Sustentável definem as prioridades e aspirações do desenvolvimento sustentável global para 2030 e procuram mobilizar esforços globais à volta de um conjunto de objetivos e metas comuns. A Universidade do Minho, através dos seus Serviços de Ação Social (SASUM), redigiu em 2018 um Plano Estratégico de Sustentabilidade que têm vindo a orientar as suas atividades e os seus processos de maneira a terem um papel ativo na resposta a estes desafios globais, contribuindo para um desenvolvimento equilibrado de toda a comunidade académica e região envolvente [8]. Uma das principais preocupações presentes no Plano Estratégico de Sustentabilidade tem a ver com uma redução do consumo de energia e água e para isso os SASUM tem implementando programas que promovam uma gestão de energia mais eficiente.

Juntando a estas preocupações por parte da UM e sendo o GEPE, como já referido, um grupo em que o seu principal foco está centrado nos sistemas de energia, e existindo já analisadores desenvolvidos e monitorizações realizadas em indústrias com o apoio do GEPE, revelou-se oportuno efetuar uma monitorização de QEE nas instalações da Universidade com o objetivo de, se necessário, implementar as medidas adequadas para uma otimização do consumo de energia, podendo diminuir custos e também salvaguardar o meio ambiente.

### **1.4 Objetivos**

O principal objetivo da presente dissertação consistiu na análise pormenorizada dos índices de qualidade de energia elétrica nas instalações da Universidade do Minho, com especial foco no Laboratório do GEPE. Para tal definiram-se os seguintes objetivos específicos:

- Pesquisa bibliográfica sobre problemas de qualidade de energia e como estas afetam as instalações e equipamentos, bem como, normas e indicadores de QEE;

- Análise das características do monitorizador de qualidade de energia utilizado, e de alguns monitorizadores presentes no mercado;
- Instalação do monitorizador de qualidade de energia e registo dos dados;
- Análise dos dados recolhidos e identificação de potenciais problemas;
- Proposta de medidas para os problemas encontrados, tendo em vista a melhoria da eficiência energética;
- Validação das soluções propostas por recurso a simulações com *software* PSIM.

## **1.5 Estrutura da dissertação**

O trabalho desenvolvido nesta dissertação encontra-se organizado em 6 capítulos, iniciando-se com um enquadramento ao tema, apresentando a motivação, os objetivos e a estrutura do documento. No Capítulo 1, também, faz-se uma breve introdução à Universidade do Minho e ao GEPE mostrando as suas preocupações quanto a uma gestão de energia mais eficiente.

No Capítulo 2 são apresentados os principais problemas de qualidade de energia elétrica com as diversas normas definidoras dos limites da qualidade explicitadas ao longo do capítulo. Apresenta-se, ainda, o monitorizador de qualidade de energia utilizado no trabalho.

No Capítulo 3 são apresentadas as principais soluções de compensação de problemas de qualidade de energia elétrica, principalmente os filtros ativos de potência e as fontes de alimentação ininterrupta, apresentando as suas principais características e aplicações.

No Capítulo 4 são apresentados os resultados da monitorização, a sua análise e as devidas sugestões a aplicar, de forma a melhor a qualidade da energia.

No Capítulo 5 é feita a validação das soluções de compensação de QEE apresentadas no capítulo anterior, através de simulações computacionais, com o objetivo de mostrar efetivamente as vantagens das possíveis implementações para a rede elétrica. É, também, apresentada a solução de mercado com as devidas características e o respetivo orçamento cedido por uma empresa.

No último e sexto capítulo são apresentadas as conclusões relativas ao trabalho efetuado nesta dissertação e sugestões de trabalho futuro.

No último e sexto capítulo são apresentadas as conclusões relativas ao trabalho efetuado nesta dissertação e sugestões de trabalho futuro.

# Capítulo 2

## Qualidade de Energia Elétrica

### 2.1 Introdução

Com a necessidade de modernização da indústria e da sociedade em geral, testemunhou-se a um forte desenvolvimento tecnológico, onde se verificou no mercado, para os seus diversos usos e fins, um aumento do uso de equipamentos eletrónicos mais sofisticados. Atualmente equipamentos automatizados e conversores de potência estão cada vez mais presentes na indústria pois permitem a otimização de processos produtivos não só ao nível de rendimento, como ao nível de custos. No entanto, a proliferação deste tipo de equipamentos não trouxe só vantagens, pois estes consomem corrente com alto conteúdo harmónico, provocando problemas de qualidade de energia elétrica que, conseqüentemente, podem ser responsáveis por provocar diversos problemas nos sistemas elétricos.

As cargas não-lineares são as principais responsáveis por provocar uma degradação da qualidade de energia da rede. Posto isto, torna-se importante definir o que é uma carga linear e uma carga não-linear. Cargas elétricas diferentes apresentam diferentes gráficos tensão/corrente. Em cargas puramente resistivas, esta relação tensão/corrente é linear, sendo o gráfico uma reta que passa pela origem com uma inclinação igual á resistência da carga, o mesmo se aplica em cargas indutivas e capacitivas em que o gráfico tensão/corrente deve-se a integrais, posto isto cargas RLC podem ser consideradas carga lineares. As cargas não-lineares possuem semicondutores de potência como díodos e transistores em que os gráficos tensão/corrente apresentam formas de onda não-lineares, equipamentos como computadores portáteis, televisões ou impressoras são alguns dos aparelhos eletrónicos presentes em qualquer habitação que são não-lineares, sendo responsáveis por provocar uma degradação da qualidade de energia da rede.

Contudo, acrescentando aos problemas relacionados com harmónicos, existem outros problemas de QEE que estão associados a desperdícios quer monetários quer ao nível da eficiência energética. Fenómenos como interrupções, subtensões e sobretensões, desequilíbrios de tensão e corrente em sistemas trifásicos são alguns dos problemas presentes que colocam em causa uma boa QEE. A Figura 2.1 mostra a forma de onda da tensão ideal.

A principal consequência relacionada aos problemas de qualidade de energia é essencialmente as falhas de equipamentos, que leva à diminuição das suas vidas úteis, interrupções de execuções de processos e eficiência energética reduzida, que conduz a desperdícios de energia e a custos monetários avultados [9].

Portanto é necessário garantir uma uniformidade ao nível da distribuição elétrica, isto é, os distribuidores de energia tem de cumprir certos parâmetros relativamente à onda de tensão e Portugal rege-se legalmente pela norma NP EN 50160, que define, em detalhe, as características da rede elétrica, portanto ao longo deste trabalho ter-se-á sempre em conta esta norma.

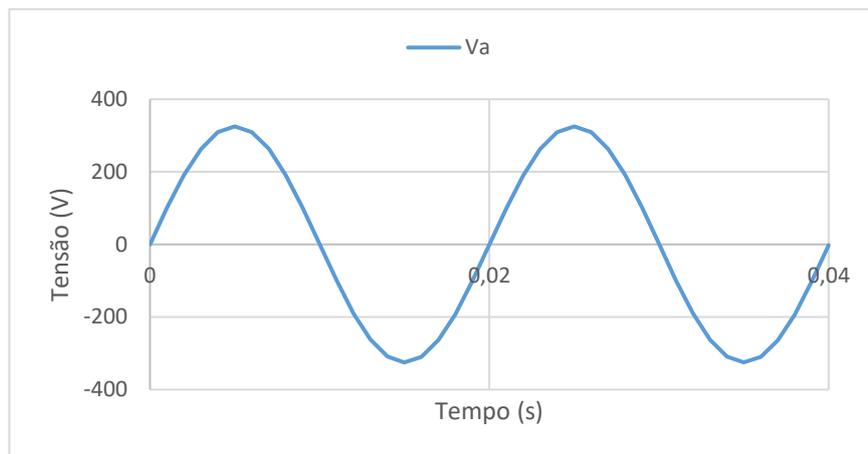


Figura 2.1 – Forma de onda da tensão de alimentação a 50 Hz.

### 2.1.1 Interrupção de Energia

A interrupção da alimentação é definida, pela norma NP EN 50160, quando o valor da tensão de alimentação no ponto de entrega atinge valores inferiores a 1% da tensão nominal.

As interrupções de alimentação podem ser classificadas de duas maneiras distintas:

- Interrupção prevista: a distribuidora de energia elétrica informa previamente os clientes e normalmente destinam-se à execução de trabalhos de manutenção da rede;
- Interrupção acidental: quando a interrupção não é prevista pela distribuidora de energia elétrica.

As interrupções de alimentação acidentais podem ser classificadas ainda quanto à duração:

- Interrupção breve: duração inferior a 3 minutos;
- Interrupção longa: duração superior a 3 minutos.

As interrupções de energia, normalmente, devem-se a danos na rede de distribuição. Danos esses que podem ser causados por interferências externas como condições climatéricas adversas, interferências

humanas como acidentes rodoviários em postes de distribuição, interferência de animais, entre outros, ou interferências internas como degradação do isolamento de linhas, cabos ou outros elementos do sistema elétrico. Na Figura 2.2 mostra-se um exemplo de interrupção de energia. As interrupções de energia podem causar enormes prejuízos, pois podem interromper processos de produção essenciais às indústrias, podendo resultar em danos nos equipamentos eletrônicos, possíveis perdas de dados importantes nos computadores e servidores das empresas, bem como, colocar em causa processos vitais que possam afetar o bom funcionamento da sociedade.

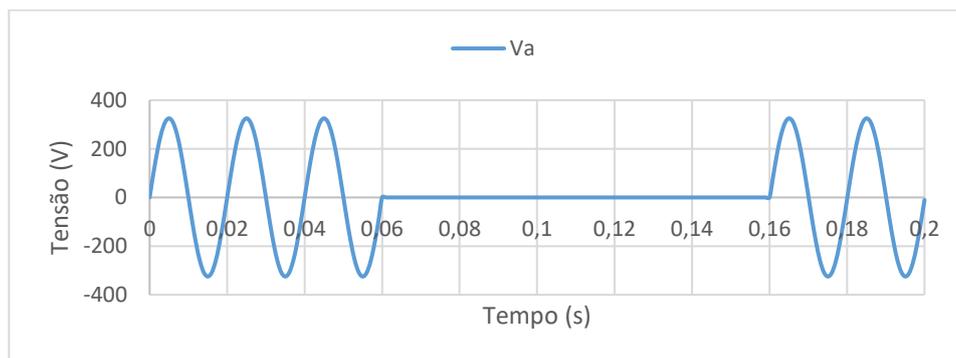


Figura 2.2 – Interrupção breve da tensão de alimentação.

### 2.1.2 Cava de Tensão

Uma cava de tensão, também denominada por subtensão momentânea, é definida, segundo a norma NP EN 50160, como um abaixamento brusco da tensão de alimentação durante 10ms a 1 min com uma amplitude compreendida entre 90% e 1% da tensão declarada. Após o acontecimento da cava, a tensão de alimentação é reestabelecida para o valor da tensão declarada. O valor de uma cava de tensão é definido como sendo a diferença entre o valor da tensão eficaz durante a cava de tensão e a tensão declarada [10].

Falhas de isolamento na rede de transmissão/distribuição de energia e nas instalações dos consumidores, estão normalmente associadas às principais causas das cavas de tensão. A ligação de cargas ou arranque de motores de potência elevada, também, pode provocar este problema [11].

As cavas de tensão podem provocar a perturbação ou interrupção do funcionamento de equipamentos sensíveis como computadores e controladores lógicos programáveis, podendo levar a uma avaria total, diminuição de vida útil ou a um mau funcionamento desses equipamentos. As cavas de tensão podem também, causar o acionamento indevido de dispositivos de proteção [11]. Deste modo, é apresentado na Figura 2.3 o momento de uma cava de tensão na rede elétrica. Estes problemas, por consequência, podem levar a prejuízos económicos e à perda de dados e informação importante.

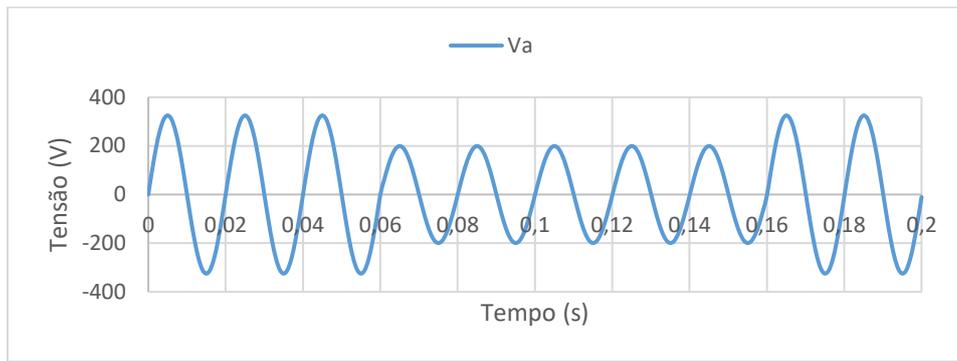


Figura 2.3 – Cava de tensão.

### 2.1.3 Sobretensão Momentânea

As sobretensões momentâneas, como se observa na Figura 2.4 são a antítese das cavas de tensão pois correspondem a um aumento momentâneo do valor eficaz da tensão em relação ao valor nominal da tensão de alimentação. Uma sobretensão momentânea, segundo a norma NP EN 50160, é definida, como um aumento superior a 10% da tensão de alimentação com uma duração compreendida entre meio ciclo da rede e 1 min [10].

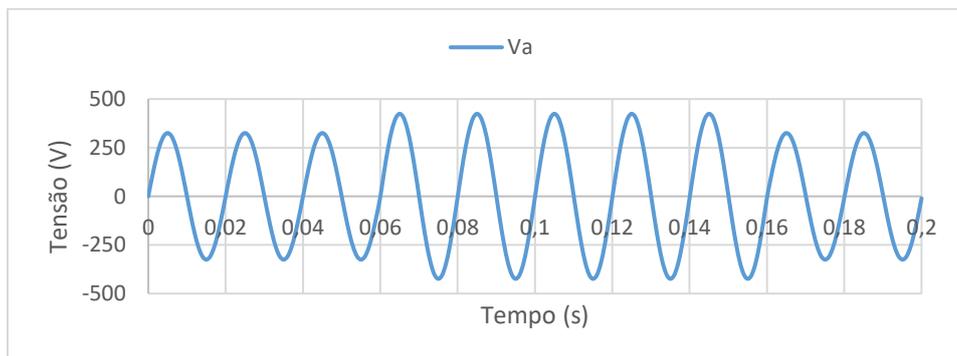


Figura 2.4 – Sobretensão momentânea da rede elétrica.

Este problema normalmente está associado ao desligamento de grandes cargas do sistema elétrico, pois com essa interrupção abrupta da corrente o sistema demora a corrigir o efeito, provocando a sobretensão [12]. As principais consequências das sobretensões são a possibilidade de avaria ou mau funcionamento de equipamentos sensíveis, como equipamentos de medição e controlo, podendo resultar com isso numa diminuição da vida útil desses mesmos equipamentos e na perda de dados resultado de uma possível avaria [4], [11].

### 2.1.4 Variação da Amplitude da Tensão de Alimentação

A tensão de alimentação nominal em Portugal para redes de baixa tensão é  $V_n = 230V$ .

A norma NP EN 50160, estabelece que são permitidas, em condições normais de funcionamento, as seguintes flutuações de tensão durante um período semanal[10]:

- 95% dos valores eficazes médios de 10 minutos devem situar-se no intervalo  $V_n \pm 10\%$ ;
- 100% dos valores eficazes médios de 10 minutos devem situar-se entre  $V_n - 15\%$  e  $+10\%$

### 2.1.5 Variação da Frequência da Tensão de Alimentação

A frequência nominal da tensão de alimentação em Portugal é igual a 50 Hz. A norma NP EN 50160, estabelece que, em condições normais de exploração, o valor médio da frequência fundamental medido em intervalos de 10 s deve ser [10]:

Em redes com ligação síncrona a redes interligadas:

- 50 Hz  $\pm 1\%$  (49,5 Hz – 50,5 Hz) durante 99,5% durante um ano;
- 50 Hz -6 % e +4 % (47Hz – 52 Hz) durante 100% do tempo.

Em redes sem ligação síncrona a redes interligadas:

- 50 Hz  $\pm 2\%$  (49 Hz – 51 Hz) durante 99,5% durante um ano;
- 50 Hz  $\pm 15\%$  (42,5 Hz – 57,5 Hz) durante 100% do tempo.

### 2.1.6 Desequilíbrio da Tensão de Alimentação

Um sistema trifásico equilibrado é caracterizado por três tensões sinusoidais com amplitudes iguais com um desfasamento de  $120^\circ$  entre si. O desequilíbrio das tensões de alimentação ocorre quando os valores eficazes ou os ângulos de desfasamento entre fases são diferentes. Estes desequilíbrios estão normalmente associados a uma incorreta distribuição de grandes cargas monofásicas, como fornos de indução, pelas três fases, no entanto, mesmo quando bem distribuídas, essas cargas raramente funcionam todas em simultâneo, provocando desequilíbrios na circulação de corrente nas fases do sistema, que por sua vez, provocam o desequilíbrio dos sistemas de tensão [13].

O desequilíbrio dos sistemas trifásicos de tensões é prejudicial ao bom desempenho de equipamentos trifásicos provocando perdas acrescidas e o aparecimento de componentes harmónicas não características em alguns conversores ligados à rede elétrica [14].

Na Figura 2.5 está representado um desequilíbrio das tensões de alimentação de um sistema de alimentação trifásico. É possível visualizar um aumento no valor eficaz das tensões da fase A e C, e, por conseguinte, uma diminuição na fase B.

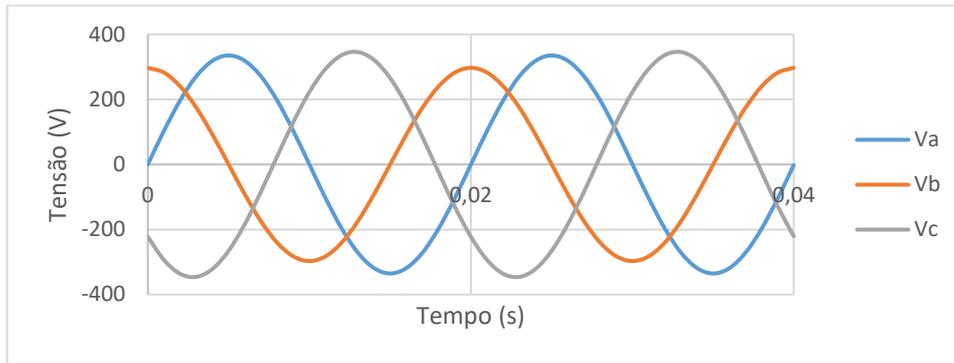


Figura 2.5 - Desequilíbrios nas tensões da rede elétrica.

O cálculo dos desequilíbrios nas tensões de alimentação é feito através do teorema de Fortescue [15]. A partir deste teorema é possível decompor um sistema elétrico trifásico em três sistemas equilibrados denominados: componentes de sequência positiva, componentes de sequência negativa e componentes de sequência zero.

A norma NP EN 50160 estabelece que em condições normais de exploração, para cada período de uma semana, 95% dos valores eficazes médios de 10 minutos da componente inversa (componente de sequência negativa) das tensões não deve ultrapassar 2% da correspondente componente direta (componente de sequência positiva). Esse fator de desequilíbrio ( $FD$ ) pode ser obtido através da fração do módulo da tensão de sequência negativa ( $V^-$ ) com o módulo da tensão de sequência positiva ( $V^+$ ) [16].

### 2.1.7 Micro-Cortes na Tensão de Alimentação

Os micro-cortes (ou *notches* na literatura inglesa) consistem, tal como o nome indica, em pequenos cortes na forma de onda da tensão normalmente com uma duração inferior a 1 ms [17]. Os micro-cortes, geralmente, ocorrem devido a cargas que consomem correntes com variações bruscas periódicas, como é o caso dos retificadores que com a comutação dos seus semicondutores provocam o aparecimento deste problema [11]. Na Figura 2.6 está representada a forma de onda tensão com micro-cortes.

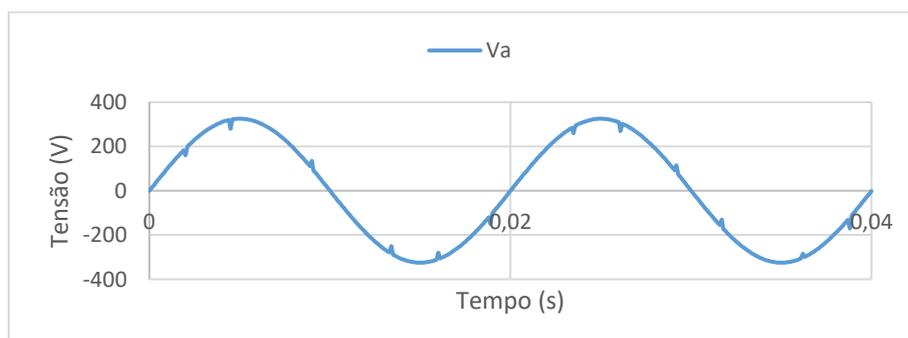


Figura 2.6 - Micro-cortes na tensão de alimentação.

Os micro-cortes podem ser responsáveis pela criação de frequências bastante elevadas às normalmente encontradas em sistemas de alta tensão que causam falhas, como interferência eletromagnética, a equipamentos ligados à rede elétrica. Para mitigar este problema podem ser adotadas estratégias como o isolamento eletromagnético ou até mesmo o uso de filtros de interferência eletromagnética [18].

### 2.1.8 Flutuação da Tensão

A flutuação na tensão de alimentação corresponde a variações periódicas do valor eficaz da tensão. As flutuações de tensão acontecem, normalmente, devido a regimes de funcionamento intermitentes de cargas de grande potência, como fornos de arco e equipamentos de soldar [3].

Normalmente as flutuações de tensão não apresentam grandes problemas ao nível dos equipamentos elétricos, no entanto é possível observar um dos principais impactos deste problema de QEE nas fontes de iluminação, pois uma flutuação da tensão nos sistemas de iluminação provoca variações da intensidade luminosa, este fenómeno denomina-se de tremulação luminosa, no entanto, a norma NP EN 50160 adotou o termo inglês *Flicker* como denominação oficial deste problema. As variações da intensidade luminosa, acima de um certo limite, podem ser facilmente perceptíveis a olho nu, o que prejudica as condições normais e ideais do ambiente de trabalho, causando um maior desconforto visual e uma diminuição dos níveis de concentração. A principal estratégia de mitigação das flutuações de tensão é tentar diminuir as variações de potência (principalmente a potência reativa) das cargas elétrica [14], outra possível estratégia é operar, se possível, estas cargas perturbadoras em horários que não existam pessoas no espaço perturbado, ou seja, o problema continua a existir, no entanto, não afetará a produção. Na Figura 2.7 está representada uma forma de onda de tensão com uma flutuação.

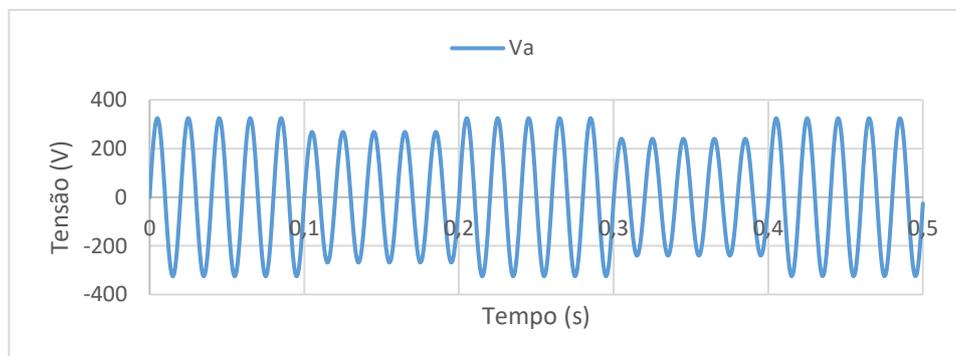


Figura 2.7 - Flutuação da tensão da rede elétrica.

A norma NP EN 50160 estabelece que em condições normais de exploração, para qualquer período de uma semana, a severidade de longa duração ( $P_{lt}$ ) causada por flutuações de tensão deve ser  $P_{lt} \leq 1$

durante 95% do tempo. De maneira a obter o valor de  $P_{It}$  utiliza-se a norma IEC 61000-4-15 que estabelece que o  $P_{It}$  é calculado sobre uma sequência de 12 valores da severidade de curta duração ( $P_{st}$ ), sendo  $P_{st}$  um valor medido através de um medidor de tremulação em intervalos de 10 minutos[10].

### 2.1.9 Baixo Fator de Potência

Como já referido anteriormente, com o avanço tecnológico dos diversos semicondutores, a rede elétrica passou a lidar com cargas não-lineares e um dos principais problemas que surgiu foi o desfasamento entre as correntes e as tensões. Assim, o fator de potência de uma instalação, representado por  $\cos \varphi$ , é resultado desse desfasamento entre a tensão e corrente consumida. O fator de potência é resultado da relação entre a potência ativa ( $P$ ) e a potência aparente ( $S$ ) da instalação como mostra a equação (2.1):

$$FP = \frac{P}{S} \quad (2.1)$$

Tratando-se de um cosseno, o fator de potência assume valores entre 0 e 1, sendo que valores baixos do fator de potência apontam a um maior desfasamento entre as correntes e as tensões e consequentemente a uma ineficiente utilização de energia elétrica provocando um aumento da fatura energética entre outras consequências, enquanto valores altos apontam a um menor desfasamento e a um melhor aproveitamento de energia.

Soluções de compensação do fator de potência, para além de contribuírem para a redução da fatura elétrica, permitem reduzir perdas na rede interna da instalação melhorando com isso o tempo de vida útil dos equipamentos. A solução de compensação do fator de potência mais comum são os bancos de condensadores, existindo no mercado diversos tipos com diferentes formas de funcionamento.

Com as mudanças de paradigma no mundo energético, surgiu a necessidade de adotar novas normas para o cálculo das grandezas dos sistemas elétricos. Assim foram introduzidas duas definições: o fator de potência de deslocamento (DPF – *Displacement Power Factor*) e o fator de potência total (TPF – *Total Power Factor*).

Para o cálculo do DPF apenas são consideradas as componentes fundamentais das tensões e correntes e pode ser calculado da seguinte maneira, o índice “1” corresponde á componente fundamental das tensões [19]:

$$DPF = \frac{P_1}{S_1} = \frac{U_1 I_1 \cos \varphi_1}{U_1 I_1} \quad (2.2)$$

Para o cálculo do TPF, para além da componente fundamental, são consideradas as componentes harmónicas das tensões e correntes. Sendo  $P_H$  a potência ativa harmónica e  $S_N$  a potência aparente não fundamental, o TPF pode ser calculado através equação seguinte [19]:

$$TPF = \frac{P}{S} = \frac{P_1 + P_H}{\sqrt{S_1^2 + S_N^2}} \quad (2.3)$$

### 2.1.10 Interferência Eletromagnética (Ruído)

O ruído de alta frequência é um problema de Qualidade de Energia Elétrica (QEE) em que a forma de onda da tensão ou corrente é sobreposta por sinais de alta frequência, normalmente inferiores a 200 kHz.

A interferência eletromagnética provocada pelas comutações dos conversores eletrónicos de potência presentes nos diversos equipamentos eletrónicos é a principal causa deste fenómeno. Este problema normalmente cria perturbações em equipamentos eletrónicos sensíveis, como microcontroladores, causando perdas e/ou erros de processamento de dados[11]. Filtros de interferência eletromagnética, ou filtros passa-baixo acoplados nas linhas de distribuição são possíveis soluções de mitigação deste problema [3], no entanto, a solução mais usual são os bancos de condensadores, visto que a maior parte das cargas que originam este problema são do tipo indutivo.

### 2.1.11 Fenómenos Transitórios

Um transitório é uma variação muito rápida (pode variar entre um valor menor que um microssegundo a alguns milissegundos) do valor tensão podendo atingir valores de amplitude da ordem dos milhares de volt, mesmo em baixa tensão. Estes eventos, pelo facto de serem muito rápidos dificulta a perceção e recolha de dados por partes dos monitorizadores de QEE, colocando um entrave a uma possível correção. Os transitórios podem ser de dois tipos: do tipo impulsivo ou do tipo oscilatório.

Os transitórios do tipo impulsivo, vulgarmente conhecidos como surtos de tensão, são eventos mais rápidos e atingem um pico superior em comparação com os transitórios oscilatórios. Estes surtos acontecem em intervalos na ordem dos microssegundos e provocam um pico que pode chegar aos milhares de volts. Estes tipos de irregularidades ocorrem devido a mudanças repentinas no sistema elétrico causadas, normalmente, por descargas atmosféricas ou comutação de cargas indutivas [20]. Na Figura 2.8 observa-se um exemplo de um transitório do tipo impulsivo.

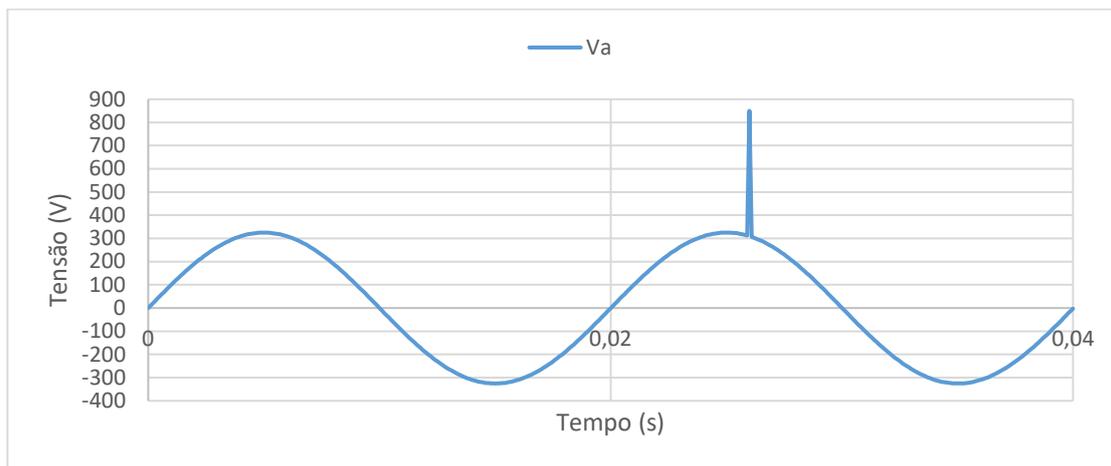


Figura 2.8 – Exemplo de um transiente do tipo impulsivo.

Os transientes do tipo oscilatório, ao contrário dos transientes impulsivos, são mais longos, apresentam picos mais curtos e sua polaridade oscila nos dois sentidos. Estes transientes sucedem normalmente em intervalos de tempo na ordem dos milissegundos apresentando frequências muito elevadas podendo chegar aos megahertz. Estes eventos também podem dever-se a descargas atmosféricas, mas, maioritariamente, devem-se à ativação de bancos de condensadores [21].

Os transientes por serem acontecimentos tão rápidos, os sistemas de proteção podem não atuar, causando danos sérios nalgumas cargas, como destruição de semicondutores e de materiais de isolamento. Interferência eletromagnética, perda e/ou erros de processamento de dados são também outras possíveis consequências deste evento de QEE.

### 2.1.12 Distorção Harmónica

Se as formas de onda da tensão e/ou da corrente assumem uma forma não sinusoidal, provavelmente essas ondas apresentam componentes harmónicas, ou seja, a forma de onda corresponde à soma de diferentes ondas sinusoidais com diferentes amplitudes e fases. Essas ondas sinusoidais apresentam frequências que são múltiplos da frequência fundamental da rede elétrica. Podem existir diversos motivos para o acontecimento deste problema, mas a principal causa está relacionada com as cargas não-lineares ligadas à rede elétrica. As cargas não-lineares não consomem correntes com a mesma forma de onda da tensão de alimentação, ou seja, consomem correntes não sinusoidais que ao circularem pelas impedâncias de linha da rede elétrica originam tensões harmónicas, resultando em distorções na forma de onda da tensão nas cargas.

Os harmónicos podem causar diversos problemas nos equipamentos e componentes do sistema elétrico, tais como [3] [11] [22]:

- Sobreaquecimento de cabos e equipamento;

- Interferência eletromagnética nos equipamentos de comunicação;
- Atuação indevida de aparelhos de proteção;
- Diminuição da vida útil de equipamentos;
- Probabilidade de ocorrência de ressonância;
- Aumento de perdas energéticas;
- Aumento de probabilidade de erros nos medidores de energia elétrica e outros instrumentos de medida;
- Mau funcionamento, ou até mesmo, falhas totais de operação em equipamentos eletrônicos ligados à rede elétrica.

Todas estas consequências podem provocar uma fraca eficiência energética nas diversas máquinas elétricas e a um aumento nas despesas na manutenção de equipamentos e dispositivos, afetando diretamente a parte mais vital, a vida das pessoas, por isso, a distorção harmónica é provavelmente o problema mais mencionado no mundo da qualidade de energia. Assim, a norma NP EN 50160, apresenta um especial foco a este problema de QEE, estabelecendo que a distorção harmónica não deve ultrapassar 8% e que em condições normais de exploração, para cada período de uma semana, 95% dos valores eficazes médios de 10 minutos de cada tensão harmónica não deve exceder os valores apresentados na tabela “1”.

Tabela 1 - Limites dos Harmónicos de Tensão da Rede Elétrica.

Harmónicas Ímpares				Harmónicas Pares	
Não múltiplas de 3		Múltiplas de 3			
Ordem h	Tensão relativa (%)	Ordem h	Tensão relativa (%)	Ordem h	Tensão Relativa (%)
5	6,0	3	5,0	2	2,0
7	5,0	9	1,5	4	1,0
11	3,5	15	0,5	6 ... 24	0,5
13	3,0	21	0,5		
17	2,0				
19	1,5				
23	1,5				
25	1,5				

**Nota:** Os valores correspondentes às harmónicas de ordem superior a 25, por serem geralmente baixas e muito imprevisíveis (devido aos efeitos de ressonância), não são indicadas nesta tabela

Os harmónicos, tanto de tensão como de corrente, podem ser avaliadas tanto individualmente, pelo valor da amplitude de um harmónico individual ( $U_h$ ), ou globalmente pelo valor da distorção harmónica total (THD – *Total Harmonic Distortion*).

A distorção harmónica total da tensão pode ser obtida por duas formas diferentes [23]: em termos absolutos e em termos relativos. Em termos absolutos, por definição é calculada através da soma dos valores eficazes das componentes harmónicas com a exceção da componente fundamental (referencia norma):

$$THD = \sqrt{\sum_{h=2}^{40} U_h^2} \quad (1.3)$$

De notar que este método de calculo da THD apenas compreende as componentes harmónicas até à quadragésima ordem.

Posto isto, a forma de cálculo mais utilizada é a distorção harmónica total percentual, que expressa a relação entre as componentes harmónicas e a componente fundamental:

$$THD_{\%} = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{40} U_h^2}}{U_1} 100\% \quad (2.4)$$

Também existem certos equipamentos que consomem harmónicos com frequências que não são múltiplas da fundamental, designando-se inter-harmónicos. Conversores estáticos de frequência, motores de indução e todas as cargas que não atuam de forma síncrona com a fundamental da frequência do sistema elétrico são possíveis causadores deste problema [24][25].

Os inter-harmónicos também podem ser quantificados através da distorção inter-harmónica (TIHD – *Total Interharmonic Distortion*), onde  $Q_i$  é o valor eficaz da componente inter-harmónica e  $Q_1$  o valor eficaz da componente fundamental:

$$TIHD_{\%} = \frac{\sqrt{\sum_{i=2}^{i=n} Q_i^2}}{Q_1} 100\% \quad (2.5)$$

## 2.2 Monitorização de Qualidade de Energia Elétrica

A monitorização da rede elétrica, é possível através de diversos instrumentos, como medidores, monitorizadores e contadores de energia que permitem entender ao pormenor o consumo energético de uma determinada instalação, tanto de uma forma mais geral como de uma maneira mais minuciosa, podendo detetar possíveis anomalias que afetem a qualidade de energia elétrica permitindo com isso ao utilizador adotar comportamentos para a sua melhoria[5].

Este tipo de equipamentos tem beneficiado ao longo dos anos de inúmeras melhorias. Inicialmente eram equipamentos analógicos muito simples, normalmente desempenhavam apenas uma tarefa como medir a potência, por exemplo. No entanto, com a evolução tecnológica e a chegada do mundo digital os monitorizadores começaram a adotar-se das mais variadas funcionalidades permitindo não só medições de correntes e tensões bem como uma análise ao conteúdo harmónico e a eventos anormais ao bom funcionamento da rede elétrica como por exemplo um surto de tensão. Têm também atualmente a capacidade de gerar automaticamente relatórios sobre os mais variados eventos, com grande capacidade de armazenamento de dados e permitindo enviar informação do equipamento para um PC. De seguida será apresentado as vantagens da monitorização e descrito o monitorizador de QEE utilizado realçando as suas características.

### **2.2.1 Vantagens da Monitorização da Energia**

A monitorização pode levar à consciencialização do utilizador a modificar comportamentos e a adotar ações que alterem de uma forma positiva o seu consumo de eletricidade, isso por si só já uma vantagem, no entanto a monitorização de energia tem associado outras vantagens tais como:

- A gestão do consumo de energia é uma atividade relativamente simples se apoiada em dados concretos;
- Gestão dos consumos energéticos através da medição detalhada de vários parâmetros ao mesmo tempo permitindo ao utilizado ter um conhecimento detalhado de todo o tipo de informação energética possível, alguns equipamentos já permitem a visualização dessas informações em tempo real;
- Conhecimento de como e onde a energia é consumida, podendo levar, se necessário, a uma redução da utilização de recursos energéticos e, conseqüentemente, a uma diminuição da fatura com a eletricidade;
- Detecção de possíveis problemas de QEE, podendo, com isso, adotar de medidas que visem uma melhor Eficiência Energética e QEE;
- Detecção de anomalias nos equipamentos permitindo a sua otimização;
- Possível redução do impacto ambiental mediante alterações no perfil energético;
- Capacidade de validação de medidas implementadas.

### **2.2.2 Características do Monitorizador de Energia Elétrica Utilizado**

Como dito anteriormente, a evolução tecnológica permitiu a criação e implementação de monitorizadores capazes das mais variadas funcionalidades permitindo não só medir, como analisar e

visualizar em tempo real os diversos parâmetros e consumos de energia elétrica. Neste trabalho, foi utilizado o monitorizador de energia *Dranetz Power Guide 4400* [52], apresentado na Figura 2.9. As medições da corrente são realizadas recorrendo a pinças amperimétricas e as medições de tensão através de pinças tipo crocodilo. Os dados gravados foram depois passados para o computador, sendo visualizados e analisados usando o programa *Dran-View 6* [26].



Figura 2.9 - Monitorizador de qualidade de energia *Dranetz Power Guide 4400* (Fonte: Dranetz) [52].

O *Dranetz Power Guide 4400* é um monitorizador de qualidade de energia, portátil, com oito canais de ADC, 4 de tensão e 4 de corrente, podendo monitorizar, registar e exibir dados nos oito canais simultaneamente. Outra característica que se evidencia neste monitorizador é o seu ecrã tátil *LCD (Liquid Crystal Display)* a cores, onde todas as funcionalidades são acedidas de forma simples, derivado a um menu bastante intuitivo. Este aparelho contém uma bateria que permite a monitorização em caso de uma falha no sistema e em locais onde não exista a capacidade de alimentação elétrica do aparelho, ficando, obviamente, limitado ao estado da carga da bateria. O equipamento possui, também, um cartão de memória com 32 MB.

Este monitorizador foi projetado para se enquadrar nas normas IEEE 1159 e IEC 61000-4-30, pertencendo à Classe A dos sistemas de monitorização. Pode também monitorizar em conformidade com a norma europeia EN 50160.

Depois das definições iniciais e as habituais configurações de funcionamento do equipamento, como o selecionamento do tipo de ligação e o seu modo de leitura, o monitorizador disponibiliza várias funcionalidades para monitorização, tais como:

- **Scope:** A opção *Scope* mostra em tempo real as formas de onda, em simultâneo, da tensão e da corrente. É possível, também, visualizar os valores eficazes das ondas e selecionar um canal em específico.
- **Meter:** A opção *Meter* mostra, em tempo real, medições de tensão e corrente, juntamente com outros parâmetros calculados como potências, entre outro.

- **Harmonics:** A opção *Harmonics* mostra a distorção harmónica e inter-harmónica em gráfico ou tabela, apresentando a amplitude e fase de cada harmónico de tensão e corrente até ao 63º harmónico.
- **Phasor:** A opção *Phasor* mostra os diagramas fasoriais que indicam as relações entre a tensão e a corrente para cada canal.
- **Trends:** A opção *Trends* mostra as tendências estatísticas ao longo do período de monitorização, para um ou mais parâmetros.
- **Events:** A opção *Events* é a deteção e visualização de eventos que surgem num sistema elétrico, como subtensões e sobretensões.
- **Reports:** A opção *Reports* permite visualizar relatórios em dois formatos distintos: *Status* e o formato *EN50160*.
- **Preferences:** A opção *Preferences* permite aos utilizadores definir algumas configurações ao monitorizador, como data e hora, seleção de idioma, comunicações, operação do cartão de memória, etc.

### 2.2.2.1 Pinça Amperimétrica

Dos diversos tipos de sondas de corrente presentes no mercado que são frequentemente utilizados são, entre outras, as pinças amperimétricas. As pinças amperimétricas são aparelhos de teste eletrónico que combinam um voltímetro com um medidor de corrente tipo pinça.

Como qualquer aparelho, beneficiou de inúmeras evoluções com os avanços tecnológicos, pois originalmente foi criada essencialmente como uma ferramenta de teste com um único objetivo para eletricistas, no entanto, os modelos atuais são mais precisos e dispõem de outras funções de medição incorporadas com a funcionalidade adicional de um transformador de corrente incorporado no produto. A capacidade das pinças amperimétricas de medir grandes correntes AC baseia-se numa ação como transformador. A quantidade reduzida de corrente que chega à entrada da pinça, deve-se à relação do número de enrolamentos secundários com o número de enrolamentos principais enrolados à volta do núcleo.

Existem no catálogo da *Dranetz* muitas opções de sondas de corrente, de forma a atender às diversas necessidades, posto isto, utilizou-se a pinça amperimétrica TR2021 como mostra na Figura 2.10. De seguida apresenta-se algumas características da pinça amperimétrica utilizada na monitorização:

- **Gama de corrente:** 1 A a 30 A;
- **Precisão:** 1 %;

- **Gama de frequência:** 40 Hz até 10 KHz.



Figura 2.10 - Pinça Amperimétrica TR2021 utilizada na monitorização.

### 2.2.3 Características do Programa de Análise dos Dados Obtidos na Monitorização de Energia Elétrica

Como dito anteriormente, a monitorização foi feita através do monitorizador de energia portátil *Dranetz Power Guide 4400*. Os dados obtidos, através da monitorização feita, foram posteriormente visualizados e analisados no computador através programa *Dran-View 6* [26].

O *Dran-View 6* é um *software* de análise detalhada de dados de qualidade de energia obtidos pela a maior parte dos produtos da *Dranetz*. Este programa permite não só capturas de ecrã, mas, também, uma análise detalhada e avançada, nas variadíssimas formas, dos diversos pontos de amostra guardados pelo monitorizador *Dranetz*, incluindo formas de onda, listas dos diversos eventos e mostragem detalhada desses mesmos eventos, essencialmente, devido a opções avançadas no *software* que permite ampliar os diversos gráficos.

Este programa tem disponível duas versões: a versão *Professional* e a versão *Enterprise*, uma focada na simplicidade (*Professional*) e outra focada na flexibilidade e com mais possibilidades e opções de análise essencialmente destinada a profissionais avançados na área da energia (*Enterprise*). Em suma, trata-se de um programa que foi otimizado de forma a ser mais rápido, flexível e para acomodar grandes conjuntos de dados.

De seguida, apresenta-se algumas características presentes no *Dran-View 6*, que não se encontravam em versões anteriores do programa, tais como [26]:

- **Velocidade:** carregamento de ficheiros e cálculos das diversas formas de onda significativamente mais rápidos;
- **Nova interface de utilizador:** aprimoração das diversas funções do programa;
- **Flexibilidade:** apresentação de relatórios personalizáveis e funções matemáticas numa ampla variedade de situações;
- **Undo/Redo:** *Undo/Redo* ilimitado;
- **Escala de harmónicos melhorada:** uso de escala harmónica separada para diferentes parâmetros como tensão, corrente ou potência;

A versão *Enterprise* apresenta ainda mais melhoramentos, contudo, como não foi utilizada nesta dissertação, não será descrita.

## 2.3 Conclusões

Ao longo deste capítulo apresentaram-se os diversos problemas de qualidade de energia elétrica, caracterizando-os com recurso a imagens com o principal objetivo de explicar a origem dos diversos problemas. Foi também realizada uma explicação sobre o tipo de consequências que os problemas de QEE tem nas instalações e prejuízos inerentes, sendo também apresentadas possíveis soluções de mitigação para os problemas descritos. Concluiu-se que existem diversos problemas que podem criar bastantes constrangimentos aos consumidores de energia, desde possíveis avarias em máquinas elétricas a falhas gerais da entrega da energia ao consumidor.

Posto isto chegou-se à conclusão que existiu uma evolução temporal das cargas na rede elétrica passando maioritariamente de cargas lineares para cargas não-lineares. Sendo as cargas não-lineares as principais causadoras de distorção harmónica na rede elétrica, assumindo, portanto, um papel de destaque nos problemas de qualidade de energia, pois grande parte dos problemas que surgem nos sistemas elétricos tem origem na excessiva distorção harmónica das correntes e tensão junto ao consumidor. No entanto, existem outros problemas igualmente graves, que merecem destaque da comunidade científica e dos consumidores em geral. Problemas como cavas de tensão e subtensões momentâneas podem acarretar igualmente prejuízos económicos elevados. Daí a necessidade de criação de normas como a NP EN 50160 de forma a garantir uma uniformidade da qualidade mínima ao nível da distribuição da energia elétrica, sendo necessário cumprir certos parâmetros e limites.

Por fim apresentou-se e explicitou-se as diversas funcionalidades do equipamento de monitorização utilizado nesta dissertação o *Dranetz Power Guide 4400*, concluindo-se que se trata de um aparelho bastante completo com bastantes funcionalidades.

## Capítulo 3

# Soluções de Problemas de Qualidade de Energia Elétrica

### 3.1 Introdução

Neste capítulo são apresentadas as principais soluções para compensação de problemas de qualidade de energia elétrica (QEE) utilizados nos sistemas elétricos, desde o ponto de produção até ao ponto de consumo da energia elétrica, dando especial atenção a soluções com aplicação nas instalações elétricas em baixa tensão no lado dos consumidores, apresentando os seus princípios de funcionamento, as suas principais características e as suas vantagens e desvantagens.

O capítulo começa com uma muito breve introdução aos filtros passivos, de seguida, serão introduzidos os Filtros Ativos de Potência, sendo apresentadas as topologias do Filtro Ativo Paralelo (FAP) e do Filtro Ativo Série (FAS), falar-se-á brevemente, também, do Condicionador de Qualidade de Energia Unificado (UPQC – *Unified Power Quality Conditioner*). Também será abordadas, neste capítulo, as Fontes de Alimentação Ininterruptas (UPS - *Uninterruptible Power Supply*) e suas topologias. Este capítulo é concluído com um apanhado mais geral de outras soluções e equipamentos que possam ser úteis para problemas mais específicos na rede elétrica.

### 3.2 Filtros Passivos

Os filtros passivos são uma das possíveis soluções utilizadas para reduzir o impacto dos harmónicos no sistema elétrico, sendo, normalmente, instaladas em paralelo entre os barramentos de tensão e as cargas com o objetivo de criar um caminho de baixa impedância para evitar que determinadas harmónicas sejam injetadas no sistema [27].

Existem diversas topologias de filtros passivos, mas o mais utilizado, por se tratar de um modelo simples e de baixo custo, é o filtro passivo RLC em série [28]. Na Figura 3.1 mostra-se um exemplo de um diagrama de blocos com um filtro passivo

A grande vantagem dos filtros passivos, em comparação com os filtros ativos é o preço, no entanto, apresentam outras limitações, tais como: apenas filtram as frequências para as quais foram

previamente sintonizadas, a sua operação não pode ser limitada a uma carga específica e a sua interação com as cargas podem resultar em ressonâncias com resultados imprevisíveis [29].

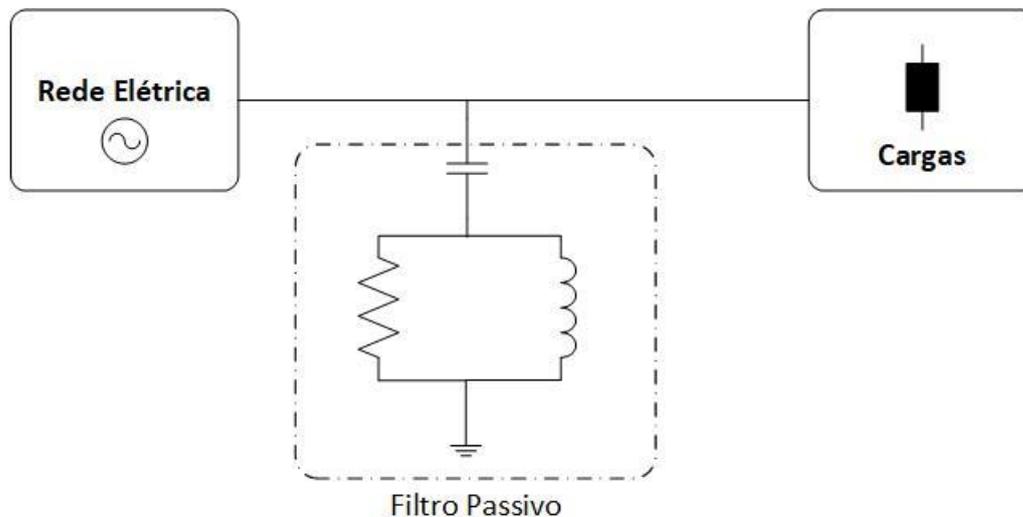


Figura 3.1 - Exemplo de um diagrama de blocos de um filtro passivo.

Este tipo de filtros quando integrado com filtros ativos de potência podem melhorar o desempenho destes, filtrando as correntes com frequências específicas, esta combinação denomina-se de filtro híbrido.

### 3.3 Filtros Ativos de Potência

Os filtros ativos de potência são os equipamentos de eletrônica de potência mais eficientes na compensação de sistemas elétricos, pois colmatam grande parte das desvantagens das soluções mais tradicionais, como os filtros passivos [29]. Os filtros ativos de potência são equipamentos que permitem compensar problemas de QEE de forma dinâmica, pois ajustam o seu funcionamento à entrada e saída de cargas conectadas à rede elétrica. A versatilidade e eficiência que estes equipamentos oferecem faz com que, ao longo dos anos, tenha ocorrido um aumento da procura no mercado das soluções de QEE. Estes equipamentos apesar de a sua principal função ser a compensação de problemas de QEE, podem também realizar a interface entre fontes de energia renováveis e a rede elétrica [30].

Os filtros ativos de potência, dependendo da forma como se conectam à rede e ao tipo de problemas de QEE que podem compensar, podem ser classificados como: Filtro Ativo Paralelo (FAP) ou Filtro Ativo Série (FAS). Através da conjugação dos dois filtros ativos de potência surge uma nova topologia, o Condicionador Unificado de Qualidade de Energia (UPQC).

De seguida, falar-se-á mais detalhadamente das topologias de filtros ativos de potência acima referidas.

### 3.3.1 Filtro Ativo Paralelo

O Filtro Ativo Paralelo (FAP) é uma das mais importantes topologias de filtros ativos de potência com uma grande investigação e utilização [31].

Um FAP é um equipamento que está associado à compensação de problemas de QEE ao nível das correntes, comportando-se como uma fonte de corrente controlada [32]. Este filtro é capaz de compensar simultaneamente e dinamicamente a potência reativa corrigindo o fator de potência, harmónicos de corrente causados por cargas não lineares, desequilíbrios de corrente, no caso de sistemas trifásicos e correntes no neutro, caso exista [33]. Na figura 3.2 apresenta-se o diagrama de blocos de um FAP.

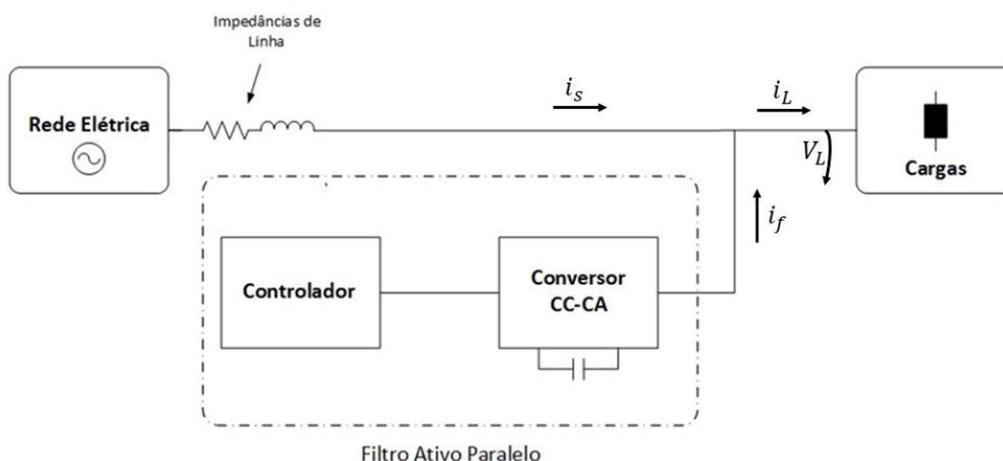


Figura 3.2 - Exemplo de um diagrama de blocos de Filtro Ativo Paralelo.

Um FAP é constituído por um inversor do tipo fonte de tensão controlado por corrente e pelo respetivo controlador e, como o próprio nome indica, é ligado em paralelo com a rede elétrica. Este dispositivo através de uma placa de aquisição de dados obtém os valores das tensões no sistema e das correntes nas linhas, através de sensores de tensão e corrente. O controlador, através de teorias de potência, interpreta esses valores de maneira a que seja possível realizar um controlo digital, em tempo real, e mitigando os problemas de QEE [1]. Assim, o resultado da soma das correntes à saída do FAP com as correntes na carga resulta em três sinusóides, no caso de ser trifásico, em fase com as tensões na rede.

Este dispositivo pode, também, assumir a função de interface entre a rede elétrica e fontes de energia renováveis, pois um dos problemas mais comuns aquando da conexão da energia proveniente de uma fonte de energia renovável na rede elétrica é a injeção de componentes harmónicos deteriorando a qualidade da energia, assim o FAP garante a injeção da energia na rede elétrica de forma equilibrada com um baixo valor de distorção harmónica, sendo capaz de simultaneamente operar com a sua normal função, isto é, compensar problemas de QEE [30].

### 3.3.2 Filtro Ativo Série

O Filtro Ativo Série (FAS) comporta-se de maneira dual ao Filtro Ativo Paralelo, ou seja, efetua as suas compensações ao nível das tensões do sistema elétrico comportando-se com uma fonte de tensão controlada [32]. Este filtro é capaz de compensar dinamicamente não só os harmónicos de tensão e os desequilíbrios de tensão como todo e qualquer perturbação na tensão como sobretensões e subtensões, entre outros, todavia, a capacidade do FAS mitigar este tipo de problemas depende da duração do acontecimento e da energia que o FAS consegue disponibilizar [3][34].

Existem várias topologias de Filtros Ativos Série, no entanto um FAS é normalmente constituído por um inversor fonte de tensão a IGBTs com um condensador no barramento CC e pelo respetivo controlador sendo ligado à rede elétrica a partir de um transformador de acoplamento, com cada secundário ligado em série com a respetiva fase [35]. O controlador desempenha uma tarefa parecida no Filtro Ativo Paralelo, só que em vez de calcular correntes calcula tensões de referência para o inversor sintetizar. O filtro é conectado à rede através de transformadores de acoplamento. A Figura 3.3 mostra o exemplo de um diagrama de blocos de um filtro ativo série.

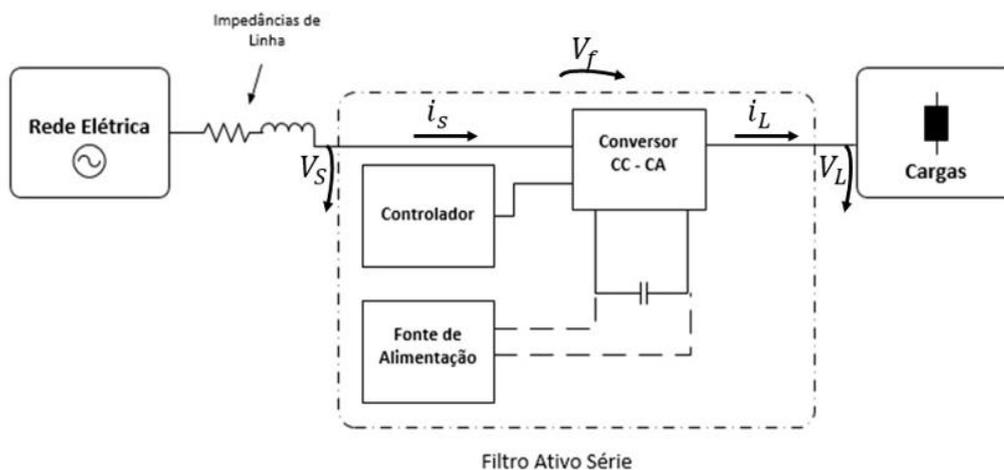


Figura 3.3 - Exemplo de um diagrama de blocos de Filtro Ativo Série.

Assim, ao compensar as tensões da fonte, as cargas passam a ser alimentadas por uma tensão de alimentação sinusoidal e equilibrada.

O Filtro Ativo Série pode também ser utilizado com filtros passivos do tipo paralelo. Esta combinação para além de permitir um melhor desempenho do FAS, também reduz problemas de ressonância [32][36].

### 3.3.3 Condicionador Unificado de Qualidade de Energia (UPQC)

Um Condicionador Unificado de Qualidade de Energia é um equipamento capaz de compensar problemas de QEE na tensão e na corrente, pois trata-se da combinação de um Filtro Ativo Paralelo com um Filtro Ativo Série, ou seja, combina num único equipamento as características de compensação de corrente de um filtro ativo paralelo e as características de compensação de tensão de um filtro ativo série [37][38].

Os UPQCs possuem diferentes topologias, em que a mais usual consiste em dois inversores trifásicos, um ligado em paralelo e outro ligado em série com a rede, partilhando o mesmo barramento de corrente contínua, composto por um condensador[39] e um circuito de controlo que mede correntes e tensões do sistema, gerando os sinais de controlo para os conversores de potência dos dois filtros. Na Figura 3.4 mostra-se o exemplo de um diagrama de blocos de um condicionador unificado de qualidade de energia.

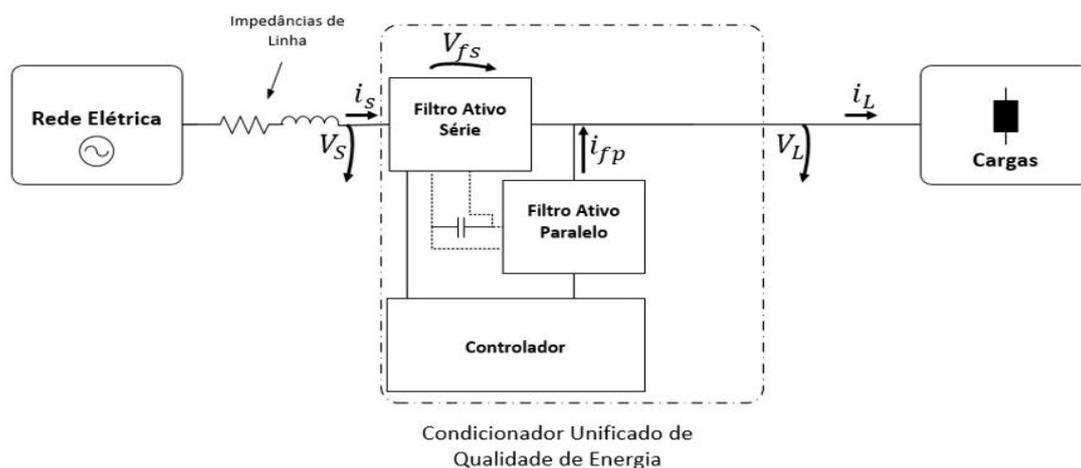


Figura 3.4 - Exemplo de um diagrama de blocos de um Condicionador Unificado de Qualidade de Energia.

A grande vantagem do UPQC é o facto de conseguir, num só equipamento, compensar problemas de qualidade de energia presentes tanto na tensão como na corrente da instalação elétrica garantindo uma boa qualidade do fornecimento de energia, podendo minimizar o número de conversores de potência e componentes passivos. As grandes desvantagens deste equipamento são o elevado custo e a sua complexidade de controlo [40].

## 3.4 Fontes de Alimentação Ininterrupta (UPS)

Uma fonte de alimentação ininterrupta (*Uninterruptible Power Supply* – UPS) é um dispositivo usado para manter qualquer equipamento ou carga segura quando há uma falha total ou uma redução significativa na fonte de alimentação principal. Algumas UPS, dependendo da sua topologia, podem não só operar quando existe uma falha total no fornecimento de energia como alimentar, de forma

contínua, as cargas com uma tensão regulada e sinusoidal no caso de ocorrência de qualquer tipo de distúrbio na tensão, tais como, de sobretensões, subtensões e distorção harmónica na tensão da rede elétrica [41]. O tempo que uma UPS pode sustentar o sistema varia de modelo para modelo, no entanto, nesse tempo de operação da UPS pode permitir ao utilizador resolver o problema ocorrido ou desligar os computadores ou outros equipamentos sem que existam perdas de dados ou avarias dispendiosas.

Existem diversos modelos de UPS presentes no mercado, uns mais simples e outros mais complexos, e mesmo a UPS mais simples é composta por uma série de módulos padrão sendo eles um conjunto de baterias, um conversor CA-CC que permite o carregamento das baterias, um conversor CC-CA para alimentar as cargas a partir da bateria e um comutador que seleciona se deve ser a fonte principal ou a energia proveniente da baterias a alimentar as cargas

A Comissão Eletrotécnica Internacional (*International Electrotechnical Commission* – IEC) estabeleceu normas para os diferentes tipos de UPS, bem como métodos para determinar o seu desempenho. Assim a norma internacional IEC 62040-3 define três topologias diferentes, designadas de: *passive standby*, *line-interactive* e *double conversion* [42].

As UPSs *passive standby*, ou *offline*, é a topologia mais comum, simples e económica, normalmente é usada em sistemas menores, como por exemplo num computador pessoal. Esta UPS, no seu modo normal, permite que as cargas sejam alimentadas diretamente pela rede elétrica, estando o comutador fechado, enquanto isso, o conversor CA-CC vai carregando as baterias, e o conversor CC-CA encontra-se inativo.

No caso de deteção de algum problema, como uma interrupção de energia, o comutador abre, passando as cargas a ser alimentadas através das baterias. Na Figura 3.5 encontra-se representado um diagrama de blocos de uma UPS *offline*.

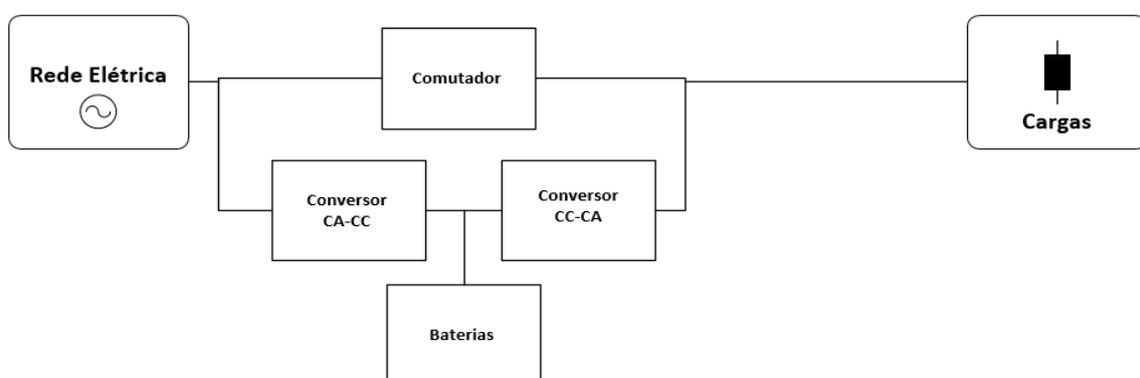


Figura 3.5 - Diagrama de blocos de uma UPS *offline*

As UPSs *line-interactive* podem ser encontradas em infraestruturas de pequenas empresas e apresentam um modo de operação muito semelhante às UPSs *passive standby*. O ponto diferenciador entre estes dois tipos de UPSs é o facto de as UPSs *line-interactive* permitirem a regulação automática da tensão entregue á carga, ou seja, monitoriza a fonte de alimentação principal, e se deteta alguma irregularidade no valor eficaz da tensão a UPS atua no sentido de manter a tensão na carga mais próxima do nominal.

Em suma, este tipo de UPS é particularmente útil para situações de interrupção de energia, sobretensões e subtensões. A Figura 3.6 representa um diagrama de blocos da topologia descrita.

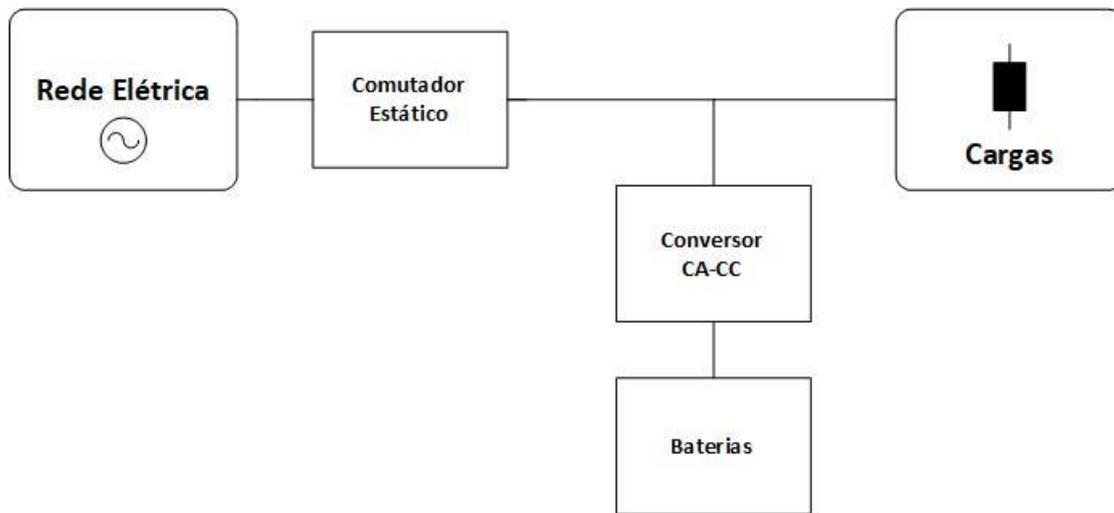
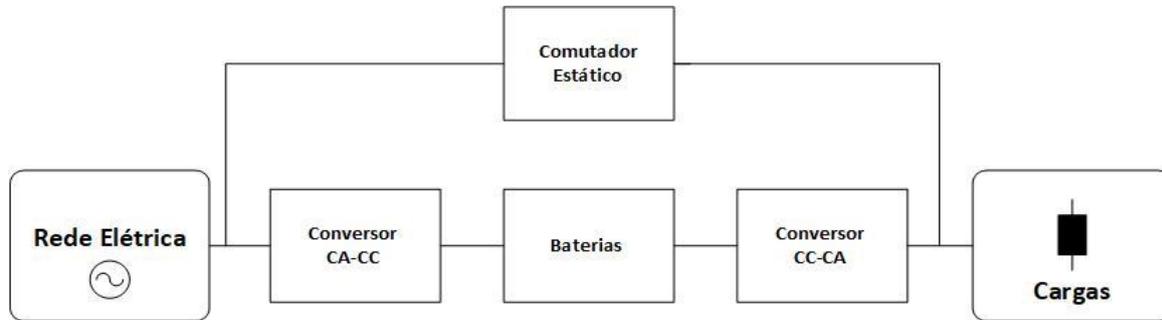


Figura 3.6 - Diagrama de blocos de uma UPS *line-interactive*

Por último, temos as UPSs *double conversion* que conseguem ser tão eficazes como a fonte primária de energia, e ao contrário das UPSs *offline* que geralmente destinam-se a proteger cargas mais pequenas, este tipo de UPSs são aplicadas em sistemas de maior potência.

Este tipo de UPSs opera de forma diferente dos outros dois tipos porque não apresenta um comutador que altera os modos de operação de acordo com a existência ou não de perturbações, esta UPS apenas tem o conversor CA-CC, as baterias e o conversor CC-CA em série entre a rede elétrica e as cargas, ou seja, estas UPSs operam em modo contínuo, isto é, as cargas não são alimentadas diretamente pela rede elétrica, mas sim pelo inversor CC-CA.

Este tipo de UPSs para além de permitir a regulação da frequência e da tensão do sinal de saída, em geral, apresentam um grau muito maior de isolamento entre a rede elétrica e as cargas em comparação com os outros tipos de UPSs descritos em cima. Em contrapartida apresentam como desvantagens o seu elevado custo e eficiência energética inferior. A Figura 3.7 representa um diagrama de blocos de um UPS *double-conversion*.

Figura 3.7 - Diagrama de blocos de uma UPS *double-conversion*

### 3.5 Outras Soluções e Equipamentos de Compensação de Problemas de Qualidade de Energia Elétrica

Além dos equipamentos acima referidos, existem outros com características de compensação da qualidade de energia.

Um desses equipamentos é o compensador estático de reativos (*Static Var Compensator – SVC*), que como o próprio nome indica permite a correção do fator de potência, injetando energia reativa capacitiva no caso do condensador comutado a tiristor (*Thyristor Switched Capacitor – TSC*) ou injetar energia reativa indutiva no caso do reator comutado a tiristor (*Thyristor Controlled Reactor – TCR*) [43]. Existem, também, topologias de compensadores estáticos de reativos que combinam elementos indutivos e capacitivos para poderem injetar energia reativa indutiva ou capacitiva de forma controlada, como o compensador combinado FCTCR (*Fixed Capacitor Thyristor Controlled Reactor*), que é constituído por um condensador fixo e um reator controlado a tiristor, e o compensador TSCTCR (*Thyristor Switched Capacitor Thyristor Controlled Reactor*) que se trata de um compensador combinado de condensador comutado a tiristor e reator controlado a tiristor [43].

O principal fator que limita a potência e a distância das linhas de transporte de energia elétrica é a impedância de linha e recorre-se a compensadores estáticos série para a anular, quer se tratam de condensadores em série com a linha de transporte [44]. Existem três tipos de compensadores estáticos série:

- Condensador Série Comutado a Tiristor (*Thyristor Switched Series Capacitor – TSSC*) que permite regular o fluxo de energia e o amortecimento de oscilações de potência;
- Condensador Série Controlado a Tiristor (*Thyristor Controlled Series Capacitor – TCSC*);
- Condensador Série Controlado a GTO (*GTO Controlled Series Capacitor – GCSC*).

Tanto o TCSC e o GCSC permitem controlar de forma progressiva a impedância de linha, simplesmente utilizam modos de operação diferentes, enquanto que um controla o ângulo de disparo aplicado aos tiristores o outro é controlado o tempo de condução dos GTOs [44].

Existem ainda um compensador estático de reativos e um compensador estático série que não foram referidos, que são:

- Compensador Síncrono Estático (*Static Synchronous Compensator – STATCOM*);
- Compensador Síncrono Estático Série (*Static Synchronous Series Compensator – SSSC*).

O SSSC é um equipamento composto por um inversor fonte de tensão com um condensador no barramento CC, no entanto, é ligado em série com a rede elétrica [45]. As características de compensação do SSSC tornam-no muito atrativo para aplicações de transporte de energia elétrica, pois oferece proteção contra subtensões, sobretensões, desequilíbrios de tensão, efetua um controlo de potência ativa e reativa, injetando ou absorvendo durante períodos de instabilidade e permite ainda uma compensação de harmónicas de tensão [46].

O STATCOM, tal como SSSC, é um equipamento composto por um inversor fonte de tensão com um condensador no barramento CC e normalmente é utilizado para correção do fator de potência, injetando energia reativa de forma variável, e para regulação da tensão no ponto de entrega, permitindo que a estabilidade de todo o sistema elétrico possa ser melhorada [47]. Este dispositivo pode, também, permitir a compensação de desequilíbrios de corrente [48].

Existe um STATCOM de distribuição (*Distribution STATCOM – DSTATCOM*) que difere do STATCOM, pois é composto por um inversor fonte de tensão a IGBTs com um condensador no barramento CC, e tem a vantagem de conseguir compensar harmónicos, no entanto, apresenta a desvantagem de apresentar dois modos, o modo de controlo de corrente e o modo de controlo de tensão, que são independentes um do outro, ou seja, não conseguem compensar problemas de corrente e tensão simultaneamente [49]. Para proteção de cargas sensíveis contra cavas e desequilíbrios de tensão pode ser utilizado nas linhas de distribuição um Restaurador Dinâmico de Tensão (*Dynamic Voltage Restorer – DVR*)[50].

Por fim, temos o Controlador Unificado de Fluxo de Potência (*Unified Power Flow Controller – UPFC*) que tal como o UPQC é um condicionador ativo do tipo série-paralelo, pois é composto por dois inversores fonte de tensão que partilham o condensador do barramento CC, com um dos inversores ligado em série e outro em paralelo com a rede elétrica. Um UPFC é capaz de controlar, simultaneamente ou individualmente, todos os parâmetros que afetam o fluxo de energia nas linhas de transporte de energia elétrica, ou seja, tensão, impedância e ângulo de fase. O UPFC pode também

controlar de forma independente o fluxo da potência ativa e potência reativa. Trata-se, portanto, de um dispositivo que foi desenvolvido para o controlo dinâmico e em tempo real de sistemas de transmissão, oferecendo uma flexibilidade multifuncional capaz de resolver a maior parte dos problemas no transporte de energia elétrica [44].

### 3.6 Conclusões

Neste capítulo foram descritos os principais equipamentos de compensação de problemas de qualidade de energia elétrica utilizados nos sistemas elétricos, apresentando os seus princípios de funcionamento, as suas principais características e as suas vantagens e desvantagens. Começou-se por fazer uma distinção entre filtros passivos e filtros ativos chegando-se à conclusão que filtros passivos de potência são mais simples de implementar e com um custo de produção baixo, no entanto não conseguem resolver todos os problemas associados à corrente, em contrapartida, os filtros ativos de potência apresentam uma capacidade de mitigação de problemas das correntes superior, apresentando um custo mais elevado.

Observou-se que o filtro ativo paralelo permite mitigar problemas de qualidade de energia associados às correntes da rede elétrica, tais como harmónicos de corrente, desequilíbrios de corrente e fator de potência, comportando-se como uma fonte de corrente. Observou-se, também, que o filtro ativo série permite mitigar problemas de qualidade de energia associados às tensões da rede elétrica, tais como harmónicos de tensão, desequilíbrios de tensão, sobretensões e subtensões, comportando-se como uma fonte de tensão. Viu-se, também, que os filtros ativos de potência quando integrado com filtros passivos podem melhorar o seu desempenho. Fez-se uma caracterização dos UPQC que pode compensar problemas da qualidade de energia na tensão e na corrente, em simultâneo, pois trata-se na combinação de um filtro ativo paralelo com um filtro ativo série.

Foram introduzidas as UPSs, equipamentos de resolução de interrupções na rede elétrica, apresentando-se os três tipos de UPS correspondentes à norma internacional IEC 62040-3: as UPSs *passive standby*, *line-interactive* e *double conversion*. Concluiu-se que a UPS *double conversion* é a que apresenta mais vantagens, no entanto apresenta um elevado custo com uma eficiência energética reduzida.

Por último, foi apresentado, muito resumidamente, um conjunto de outras soluções e equipamentos com características de compensação de problemas da qualidade de energia que não apresentam tantas vantagens como os equipamentos descritos mais pormenorizadamente ou são aplicados para outro tipo de funções.

## **Capítulo 4**

# **Monitorização da Qualidade de Energia Elétrica no Laboratório GEPE**

### **4.1 Introdução**

Neste capítulo apresenta-se a componente prática da dissertação apresentando todos os resultados da monitorização da qualidade de energia elétrica no laboratório GEPE.

Começa-se com uma breve caracterização do caso de estudo, o laboratório de GEPE, localizado no edifício principal do campus de Azurém da Universidade do Minho, apresentando-se fotos da montagem, bem como, todas as normas de segurança seguidas para uma boa montagem do equipamento de monitorização.

Neste capítulo, regista-se e analisa-se todos as componentes necessárias para uma boa monitorização da qualidade de energia.

### **4.2 Caso de Estudo – Laboratório do GEPE**

O caso de estudo desta dissertação foi o laboratório do GEPE, como já dito anteriormente o GEPE é grupo de investigação ligada ao centro ALGORITMI da Escola de Engenharia da Universidade do Minho integrado na linha de Eletrónica Industrial, participando, desde a sua fundação, em inúmeros projetos, sejam projetos de investigação a dissertações de mestrado e teses de doutoramento, constituído por um grupo de pessoas, desde alunos, investigadores e professores com experiência e competências na investigação e desenvolvimento de aplicações de eletrónica de potência para sistemas de energia como desenvolvimento de filtros ativos, sistema de carregamento de baterias, entre outros.

Como tal, é usual ver-se, no laboratório GEPE, alunos e investigadores a fazerem os seus experimentos laboratoriais, de toda a espécie, estando por vezes a ocorrer múltiplos experimentos ao mesmo tempo utilizando todo o tipo de cargas, como semicondutores a comutar e diversos computadores fixos e portáteis ligados ao mesmo tempo, portanto, é essencial uma boa qualidade da rede elétrica para garantir o melhor fornecimento de energia possível ao trabalho efetuado no laboratório.

### 4.3 Qualidade de Energia Elétrica no Quadro Elétrico

As medições da qualidade de energia foram realizadas durante uma semana e dois dias, isto é, iniciou-se no fim da tarde de terça-feira dia 20 de Julho de 2021 e monitorizou-se até ao início do dia de quinta-feira dia 29 de Julho de 2021 no Quadro Geral de Baixa Tensão (QGBT) do laboratório GEPE. Na Figura 4.1 são apresentadas duas fotografias da montagem do equipamento de monitorização no quadro elétrico.



Figura 4.1 – Montagem do monitorizador no quadro elétrico.

Na colocação e na recolha do monitorizador *Dranetz Power Guide 4400*, no quadro elétrico do laboratório, para além de estar sempre acompanhado, tentou-se tomar o máximo de medidas de segurança e cuidado necessários para a correta instalação do equipamento, sem riscos para o instalador.

Numa primeira fase, verificou-se o estado do monitorizador antes de o utilizar no quadro elétrico, para isso, o laboratório GEPE possui uma mesa de teste que simula uma rede elétrica, e fez-se uma monitorização de 24 horas, com o objetivo de comprovar, não só o bom funcionamento do equipamento, como certificar o bom estado de todos os cabos e pinças amperimétricas a utilizar e, também, para garantir um melhor manuseamento na hora da monitorização.

Sendo assim, estavam garantidas todas as condições para a fase de instalação do equipamento no quadro elétrico. Posto isto, procurou-se cumprir, ao máximo as instruções de segurança do equipamento, assim, durante a instalação [51]:

- Utilizou-se equipamento de proteção pessoal, tais como, luvas isolantes e óculos de proteção;
- Certificou-se que mãos, sapatos e chão estavam secos;
- Certificou-se que o monitorizador estava sempre desligado em todo o processo de instalação;
- Conectou-se os cabos e pinças amperimétricas primeiro ao monitorizador e só depois se ligou ao quadro.

Foi necessário, também, um especial cuidado na instalação de cada pinça amperimétrica e cabo, às respetivas fases, de forma a respeitar a ordem dos canais do monitorizador com a ordem correta das fases de forma a facilitar a leitura dos dados gerados da monitorização.

Depois da instalação, torna-se importante saber quais os parâmetros mais importantes para uma boa análise da qualidade de energia.

Assim, registou-se os valores:

- Das tensões simples nas três fases;
- Das correntes nas três fases e no neutro;
- Da potência ativa total, da potência reativa total e da potência aparente total;
- Do fator de potência;
- Da frequência fundamental da tensão;
- Do desequilíbrio da tensão;
- Da tremulação da tensão;
- Da taxa de distorção harmónica, tanto de corrente como de tensão.

Cada um destes parâmetros foi analisado, essencialmente, de forma a respeitar os limites da norma NP EN 50160. Sendo assim, para as tensões e correntes, verificou-se a existência de valores exageradamente altos ou baixos, a existência de distorção e se se ocorreu algum evento que coloque a qualidade de energia em causa, como interrupções, cavas, transitórios, entre outros. Para as potências verificou-se se existiam medições anormais, e fez-se uma análise mais cuidada da potência reativa, vendo se esta acompanhava a potência ativa e a potência aparente. No fator de potência observou-se a variação de valores que toma ao longo do dia, e em que períodos do dia ocorrem essas variações, estando o laboratório aberto ou fechado. No desequilíbrio, na tremulação e na frequência fundamental da tensão verificou-se a evolução temporal desses parâmetros e se se estavam dentro dos limites da

norma NP EN 50160. As taxas de distorção harmónica serviram para verificar o quão distorcidas as ondas estão, com tudo o que isso implica merecendo uma especial atenção.

### 4.3.1 Registos e Análise das Tensões e Correntes

Na Figura 4.2 mostra-se a evolução temporal dos valores eficazes da tensão nas três fases, fase A, fase B e fase C, e neutro-terra. Destacar, que pela observação do gráfico, nota-se, que ao longo da monitorização, ocorreram diversos fenómenos transitórios, podendo ser prejudiciais às cargas e diversos equipamentos.

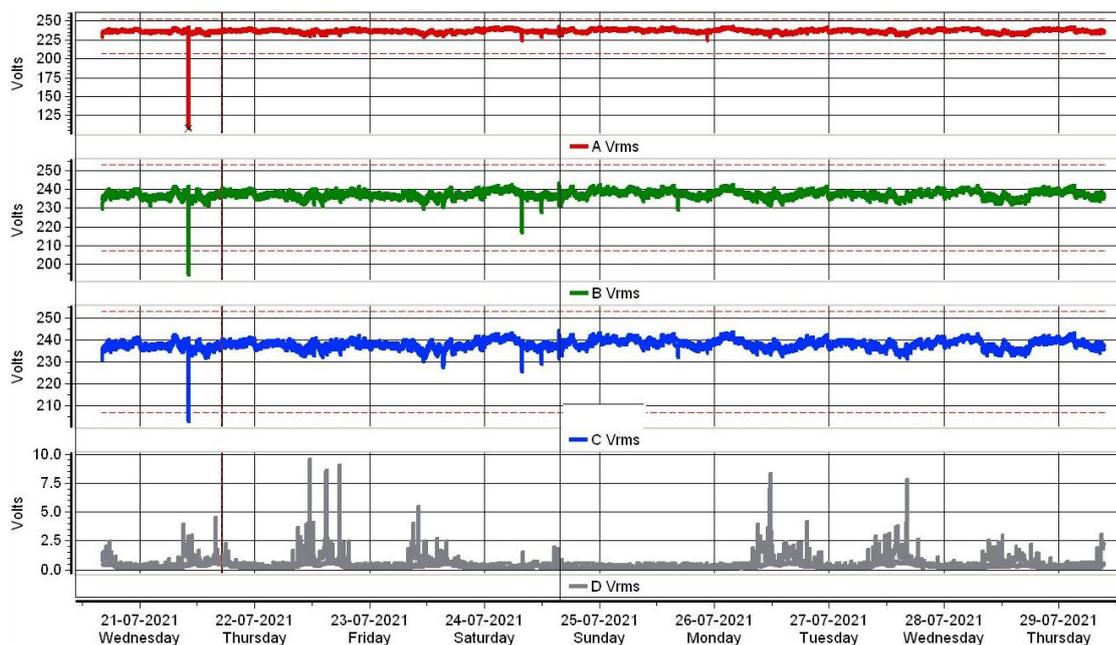
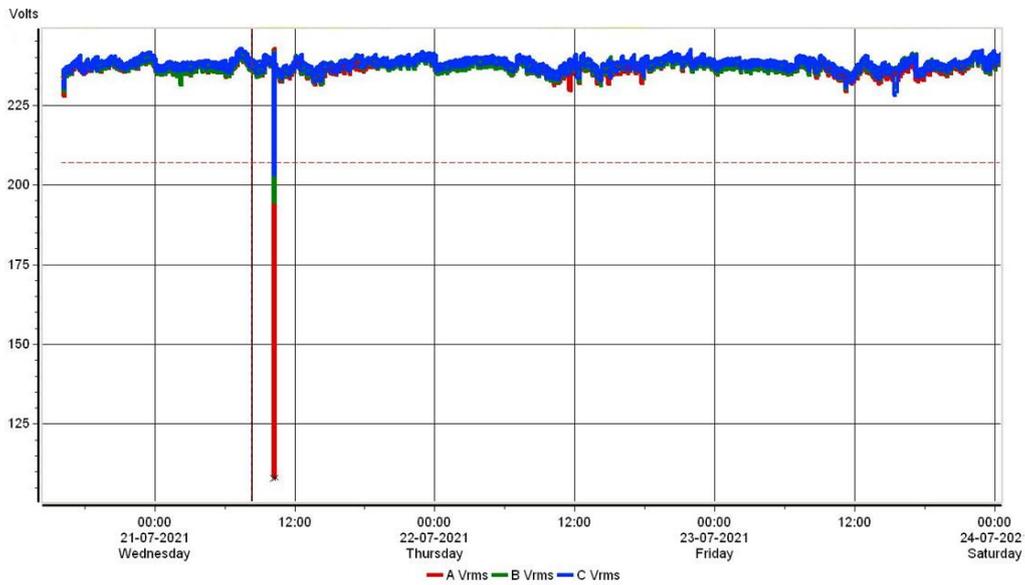
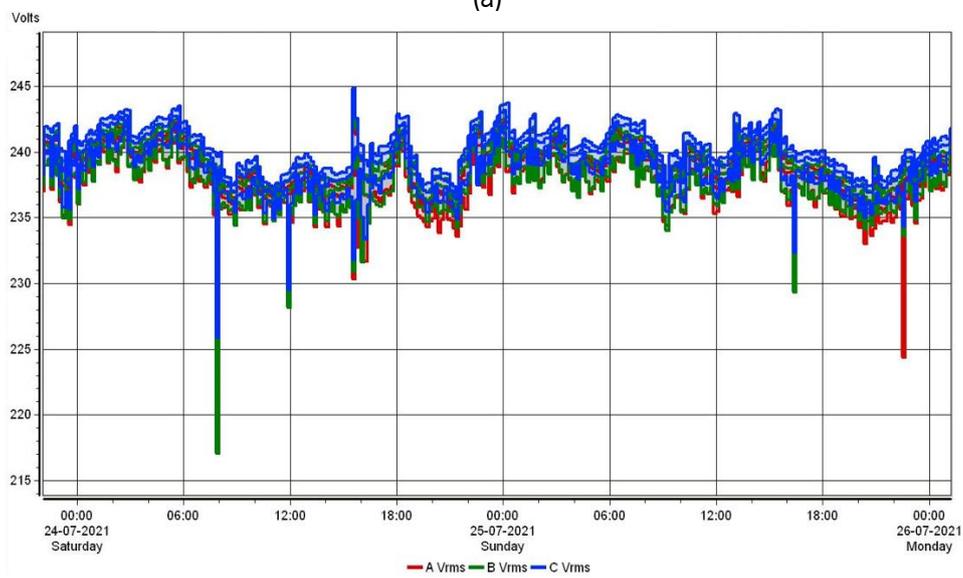


Figura 4.2 - Evolução dos valores eficazes das tensões no quadro elétrico.

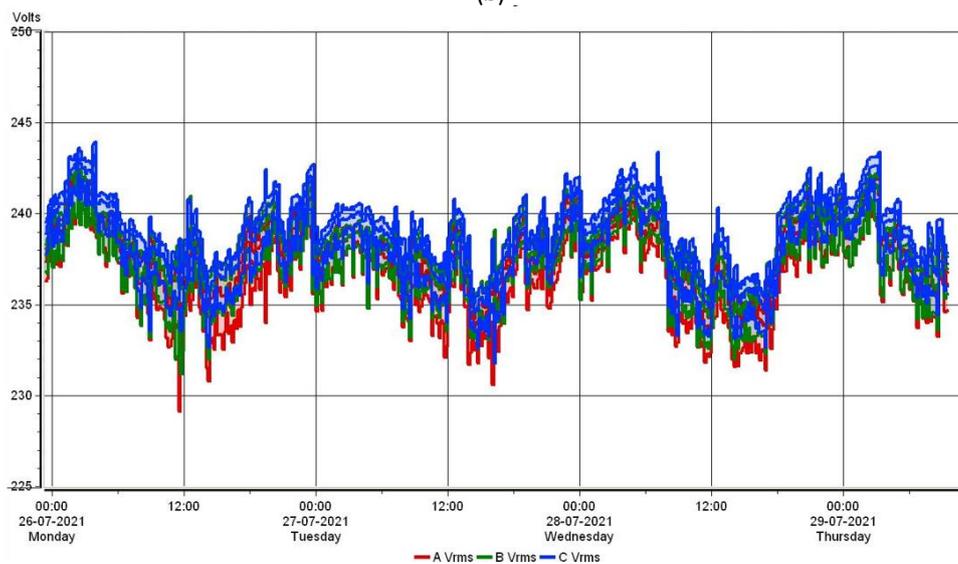
Com o objetivo de se obter uma observação mais minuciosa das formas de onda, na Figura 4.3 mostra-se a evolução temporal das tensões eficazes nas três fases divididas em três períodos diferentes da monitorização, isto é, Figura 4.3(a) mostra-se a evolução temporal das tensões eficazes desde o início da monitorização até ao fim da sexta-feira dia 24 de Julho, na Figura 4.3(b) mostra-se a evolução temporal no período de fim-de-semana e por fim na Figura 4.3(c) mostra-se o resto da monitorização, desde o início da segunda-feira dia 26 de Julho até à manhã de quinta-feira dia 29 de Julho.



(a)



(b)



(c)

Figura 4.3 - Evolução dos valores eficazes das tensões no quadro elétrico: (a) desde o início da monitorização até ao fim da sexta-feira dia 24 de Julho. (b) período de fim-de-semana; (c) desde o início da segunda-feira dia 26 de Julho até à manhã de quinta-feira

A norma NP EN 50160 estabelece que flutuações de tensão são possíveis desde que 100% dos valores eficazes médios de 10 minutos se situam entre  $V_n - 15\%$  e  $V_n + 10\%$ , portanto, entre 195,5 V e 253 V, o que se sucedeu, e também, que 95% dos valores eficazes médios de 10 minutos devem situar-se no intervalo  $V_n \pm 10\%$ , portanto entre 207 V e 253 V, o que também sucedeu, portanto ambas as condições foram cumpridas.

Neste período de monitorização a fase A atingiu o valor máximo de 242,1 V, a fase B de 243,7 V e a fase C de 245,1 V. Quanto aos valores mínimos, foram registados exatamente no mesmo instante da cava de tensão ocorrida na quarta-feira, dia 21 de Julho, e foram de 108,1 V na fase A, de 194,6 V na fase B e de 203 V na fase C.

Na Figura 4.4 observa-se os registos dos valores eficazes das correntes de cada fase, fase A, fase B e fase C, e neutro. De destacar, que o período de tempo em que as correntes nas fases permanecem constantes aproximadamente zero, correspondem aos períodos do dia em que o laboratório se encontra fechado, normalmente apresenta um horário entre as 9h00 e as 19h00. Portanto nas horas em que o laboratório se encontra fora do período de funcionamento, juntamente com os fins de semana observa-se valores constantes próximos de zero.

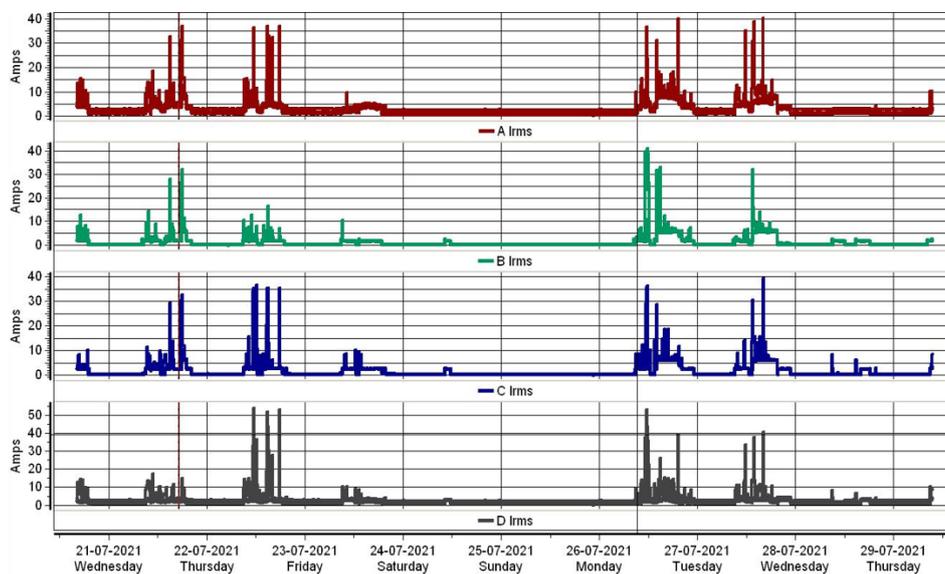
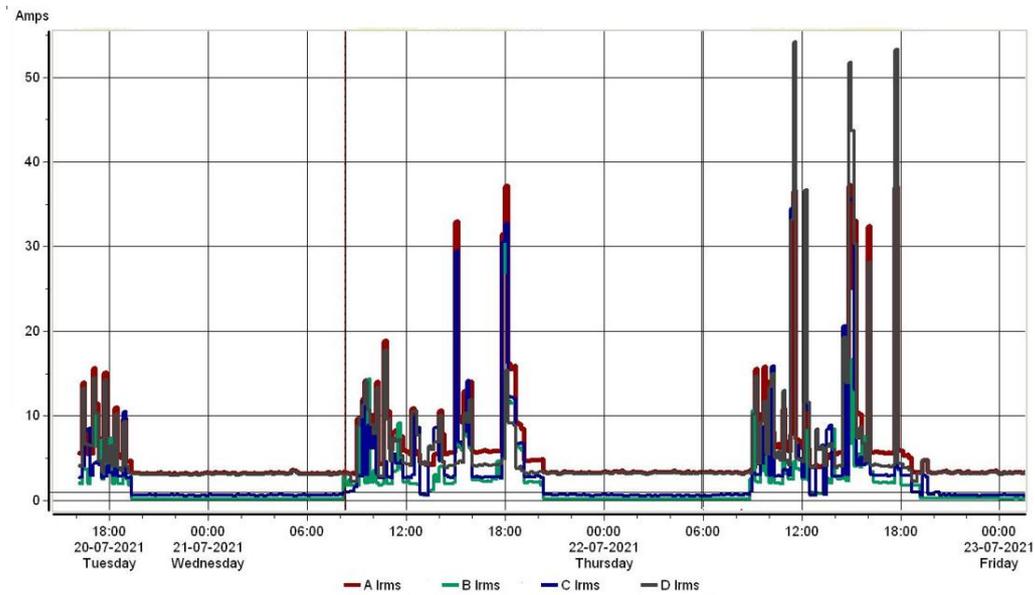
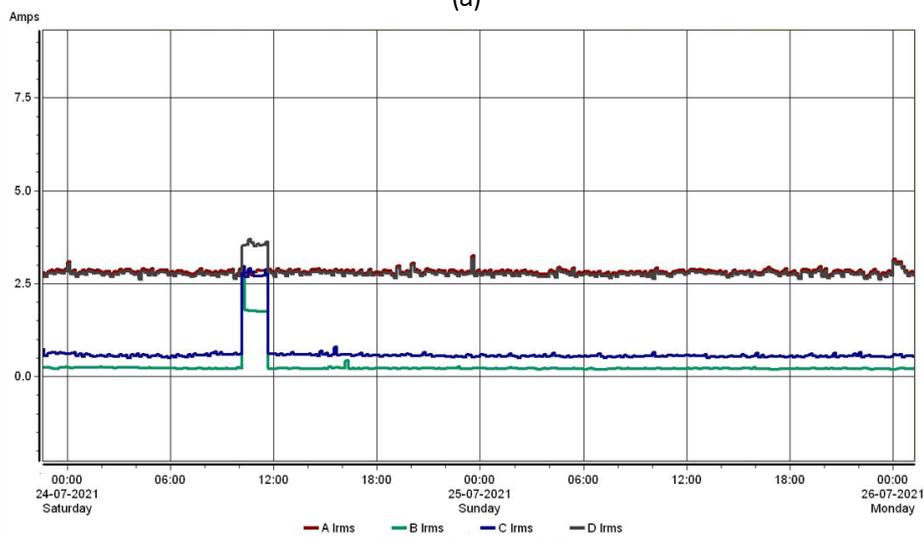


Figura 4.4 - Evolução dos valores eficazes das correntes no quadro elétrico.

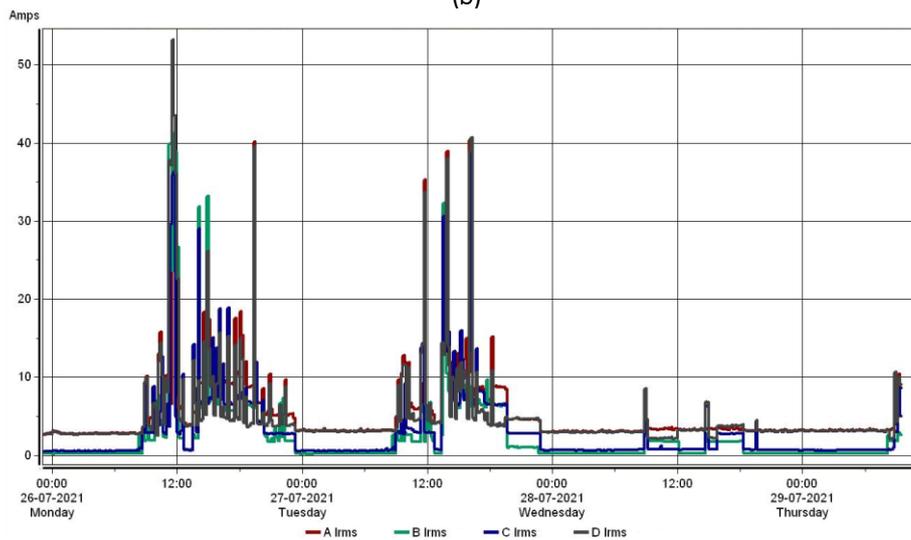
Tal como nas tensões, mostrou-se as correntes eficazes divididas em três períodos, como se mostra na Figura 4.5



(a)



(b)



(c)

Figura 4.5 - Evolução dos valores eficazes das correntes no quadro elétrico: (a) desde o início da monitorização até ao fim da sexta-feira dia 24 de Julho; (b) período de fim-de-semana; (c) desde o início da segunda-feira dia 26 de Julho até à manhã de quinta-feira

Ao observar estes gráficos das correntes, conclui-se que existe uma corrente de neutro elevada, visto acompanhar as formas de onda das outras fases, inclusive atinge um pico máximo superior em relação aos picos máximos das três fases.

Neste período de monitorização a fase *a* atingiu o valor máximo de 40 A, a fase *b* de 41 A, a fase *c* de 39 A e o neutro 53 A. Quanto aos valores mínimos, todas as fases atingiram valores próximos de zero, essencialmente nos períodos de inatividade do laboratório, em contrapartida, os valores máximos da corrente foram atingidos em períodos de atividade do laboratório.

Na Figura 4.6 apresentam-se as formas de onda das tensões e correntes, registadas num dado momento, das fases A, B e C. Consegue observar-se uma distorção de onda na tensão considerável e uma grande distorção e desequilíbrio entre as formas de onda da corrente em relação às formas de onda da tensão.

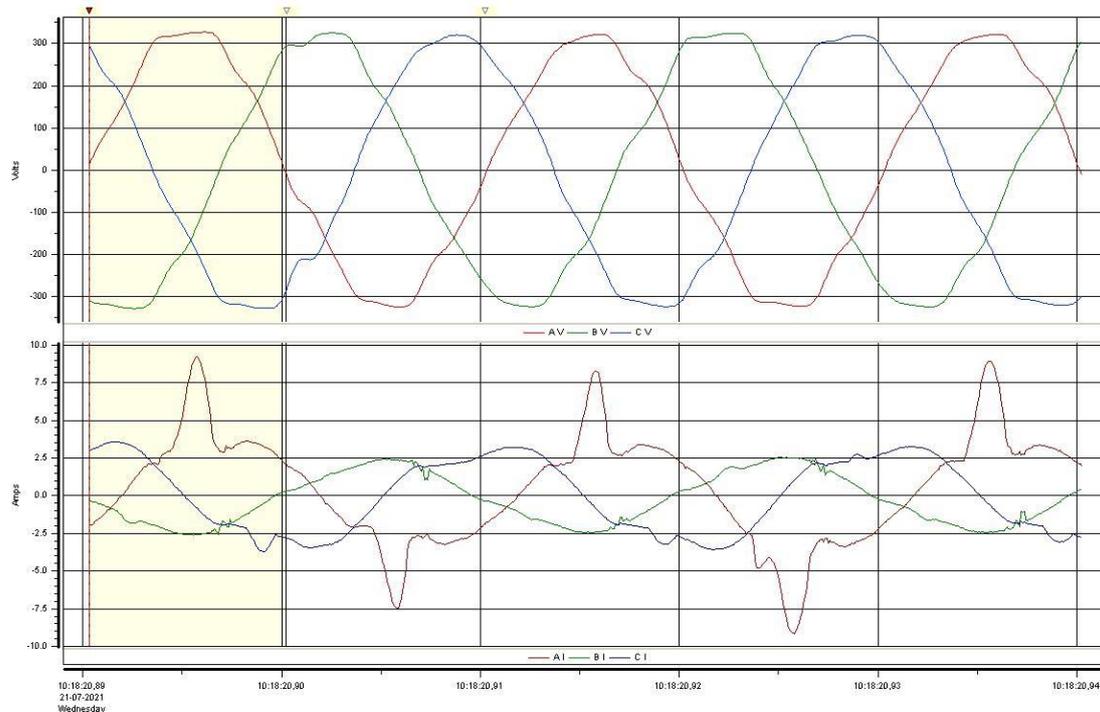


Figura 4.6 - Formas de onda das tensões e correntes no quadro elétrico.

Por observação das diversas formas de onda presentes neste subcapítulo facilmente se nota a necessidade de implementação de medidas mitigadoras para o desequilíbrio e distorção harmónica nas correntes das 3 fases do sistema elétrico e, também, para as correntes do neutro.

### 4.3.2 Registo e Análise das Potência e do Fator de Potência

Na Figura 4.7 observa-se a evolução das potências médias e do fator de potência, durante toda a monitorização, onde se verificou que os valores máximos das potências médias se registaram no

mesmo instante, isto é, tanto a potência ativa, a potência reativa e a potência aparente se registaram na quarta-feira dia 21 de Julho de 2021 por volta das 18h20.

O valor máximo da potência ativa média foi de  $P_{Méd} = 7,628$  kW, para a potência reativa média o valor máximo foi de  $Q_{Méd} = 4,704$  kVAR e para a potência aparente o valor máximo registado foi de  $S_{Méd} = 9,609$  kVA.

Quanto aos valores mínimos, a potência ativa e a potência aparente registaram os seus valores mínimos no mesmo dia, mas em instantes diferentes, no domingo dia 25 de Julho de 2021, a potência ativa registou o seu valor mínimo às 9h30, com o valor de  $P_{med} = 287$  W, a potência aparente registou o seu mínimo às 7h20 com o valor de  $S_{med} = 399$  VA.

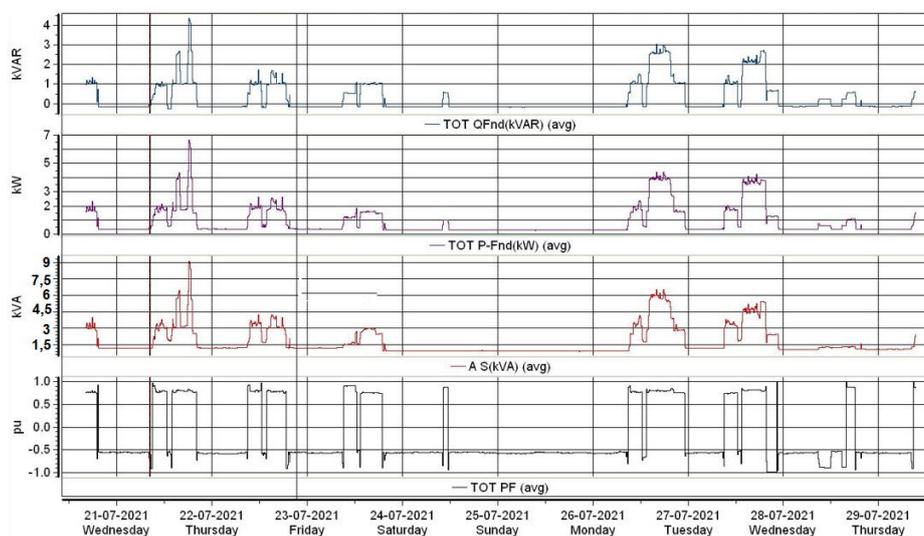


Figura 4.7 - Evolução temporal das potências médias no quadro elétrico.

A energia reativa atingiu um valor negativo de  $Q_{med} = -337$  VAR atingido às 13h30 da quarta-feira dia 21 de Julho de 2021, indicando que houve fornecimento de energia reativa capacitiva durante esse período. De destacar que o preciso momento em que ocorreu os valores mínimos das potências foram num domingo, dia em que o laboratório se encontra fechado. Estes valores são bastante constantes nos períodos de inatividade do laboratório, isto é, durante esses períodos de inatividade esses valores não sofrem muitas alterações ao valor mínimo dito anteriormente.

Por observação das formas de onda da Figura 4.8, facilmente se percebe que nos períodos de atividade, o fator de potência assume um valor positivo (capacitivo) entre 0,75 e 1.

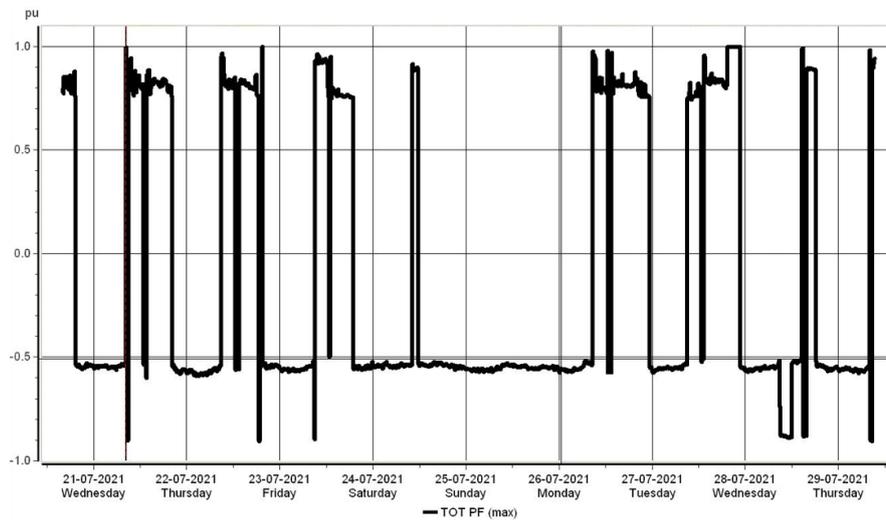
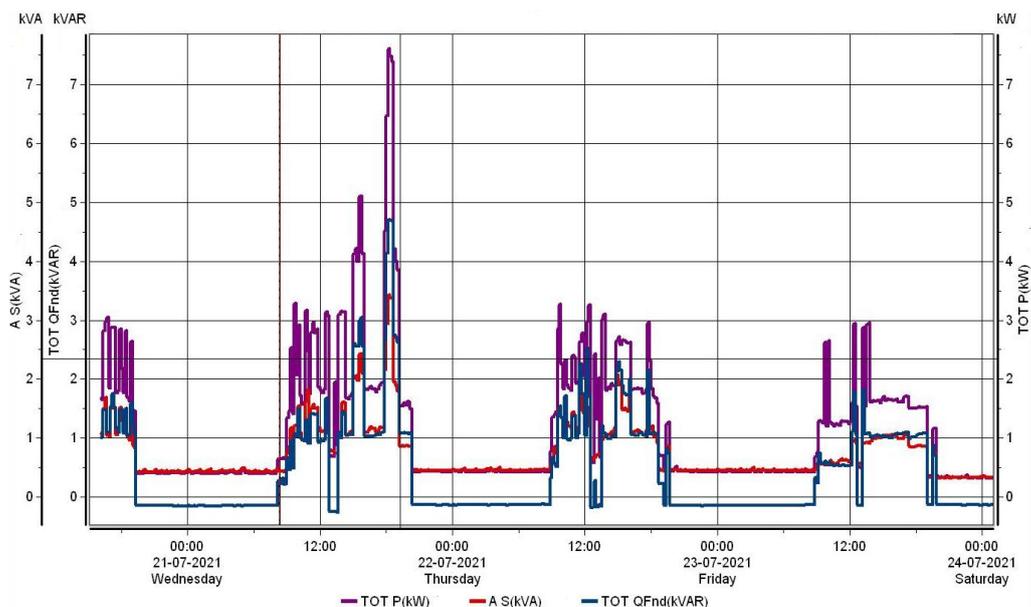


Figura 4.8 - Evolução temporal do fator de potência no quadro elétrico.

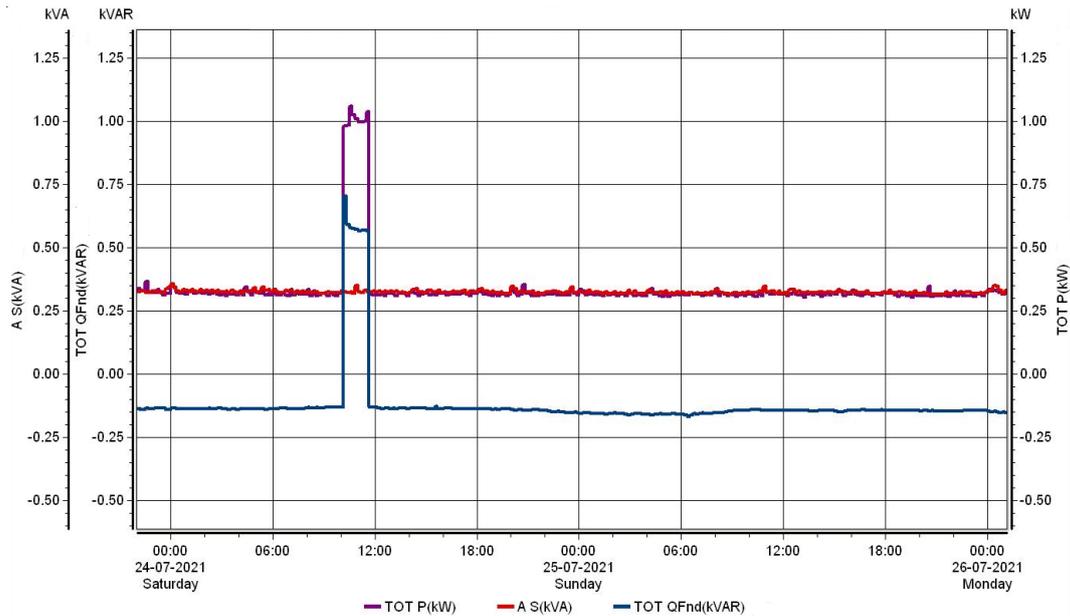
Tendo em conta que se trata de um laboratório de investigação e não de uma empresa ou indústria, com inúmeras cargas elétricas, em que um excedente de potência reativa pode ter consequências na fatura energética, estes valores são bastante aceitáveis, visto estarem bastante próximos do valor unitário, portanto, não se justifica a implementação de medidas para aumentar o fator de potência. Nos períodos de inatividade o fator de potência assume um valor indutivo de aproximadamente 0,6, isso significa que a instalação elétrica está a absorver energia reativa nos períodos de inatividade.

Tal, como no subcapítulo anterior, nas tensões e correntes, na Figura 4.9 e na Figura 4.10 mostra-se as formas de onda das potências divididas em três períodos diferentes, permitindo observar um acompanhamento da forma de onda da potência reativa com as outras potências.

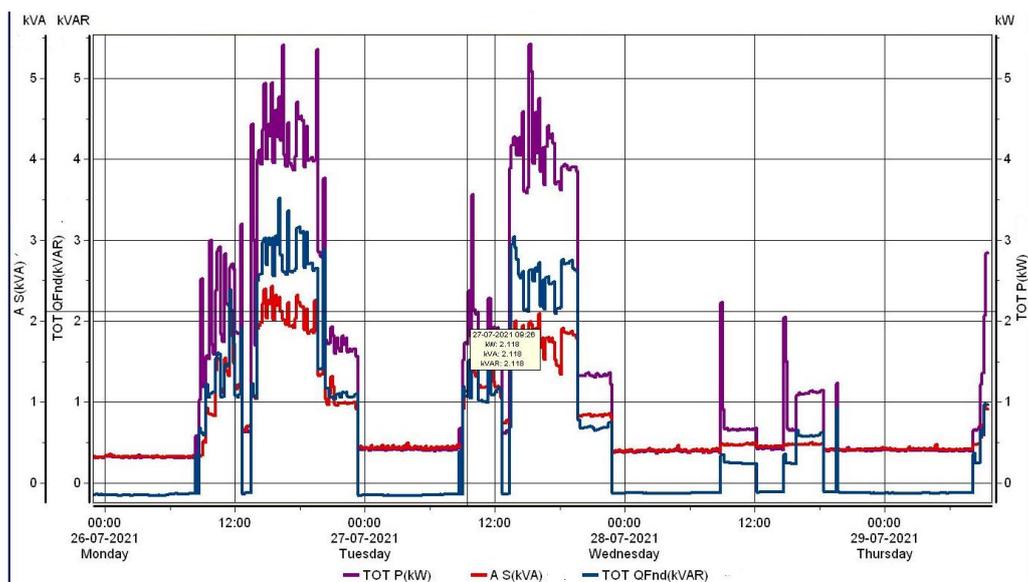


(a)

Figura 4.9 - Evolução temporal das potências médias no quadro elétrico desde o início da monitorização até ao fim da sexta-feira dia 24 de Julho



(a)



(b)

Figura 4.10 - Evolução temporal das potências médias no quadro elétrico: (a) período de fim-de-semana; (b) desde o início da segunda-feira dia 26 de Julho até à manhã de quinta-feira dia 29 de Julho

### 4.3.3 Registo e Análise dos Harmónicos e da Taxa de Distorção Harmónica das Tensões e das Correntes

Antes do registo e análise dos harmónicos e distorção harmónica, convém lembrar os conceitos de harmónicos e de taxa de distorção harmónica. Os harmónicos são um problema de qualidade de energia que provoca, entre outras, sobreaquecimento de cabos e equipamentos, baixo rendimento e consequentemente um aumento de perdas energéticas e aparecimento de corrente no neutro. A THD

permite avaliar a deformação da forma de onda, da tensão ou da corrente. Normalmente é retratado em termos relativos, mas também pode ser representado em termos absolutos.

A THD<sub>v</sub>, taxa de distorção harmónica presente na tensão, é considerada normal se for inferior a 8 %, no entanto se for superior a 8% pode ser necessária uma ação mitigadora, de modo a corrigir esse valor.

A THD<sub>i</sub>, taxa distorção harmónica presente na corrente, segundo a norma IEEE Standard 519-2014 [52], é considerada normal se for inferior a 8%. Se se situar entre os 10% e os 50% já começa a revelar poluição harmónica significativa. Se tiver um THD superior a 50% significa uma poluição harmónica muito grande, podendo levar á danificação de equipamentos ou até mesmo deixarem de funcionar, sendo necessária a correção do problema de forma urgente.

Foram medidas as taxas de distorção harmónica, tanto da tensão como da corrente, bem como os harmónicos individuais até á décima terceira ordem. Todos estes dados se encontram nas tabelas seguintes.

Tabela 2 - Taxa de Distorção Harmónica da Tensão no Quadro Elétrico.

<b>Taxa de Distorção Harmónica da Tensão (%)</b>	
<b>Fase</b>	<b>Resultado</b>
<b>A</b>	5,74
<b>B</b>	5,76
<b>C</b>	5,79

Fazendo uma análise da tabela 2 conclui-se que o THD<sub>v</sub> abaixo do limite de 8 % da norma NP EN 50160, estando, portanto, tudo em conformidade. Na tabela 3 encontra-se os harmónicos individuais da tensão.

Tabela 3 - Harmónicos Individuais da Tensão no Quadro Elétrico.

<b>Harmónicos Individuais da Tensão (%)</b>			
<b>Fase</b>	<b>Ordem</b>	<b>Resultado</b>	<b>Limite</b>
<b>A</b>	3	0,39	5
	5	4,02	6
	7	4,13	5
	9	0,77	1,5
	11	1,03	3,5
	13	0,9	3
<b>B</b>	3	0,38	5
	5	3,93	6
	7	4,26	5
	9	0,83	1,5
	11	1,22	3,5
	13	0,91	3
<b>C</b>	3	0,43	5
	5	4	6
	7	4,25	5
	9	0,62	1,5
	11	1,12	3,5
	13	0,98	3

Como seria de esperar, todos os harmónicos de tensão se encontram dentro dos limites da tabela 1 da norma NP EN 50160.

Na tabela 4 encontra-se a THDi, em cada uma das fases. E observa-se que os valores são elevados em relação ao recomendável pelo IEEE STD 519-2014, principalmente a fase *a*, que atinge um valor de quase 5 vezes mais que o valor recomendável, enquanto que na fase *b* e na fase *c* encontram-se residualmente superior em relação ao valor recomendável.

Tabela 4 - Taxa de Distorção Harmónica da Corrente no Quadro Elétrico.

<b>Taxa de Distorção Harmónica da Corrente (%)</b>	
<b>Fase</b>	<b>Resultado</b>
<b>A</b>	39,18
<b>B</b>	12,64
<b>C</b>	11,96

Através da tabela 5, pode observar-se os harmónicos individuais da corrente no quadro elétrico e comprova-se que existem na fase *a*, harmónicos exageradamente grandes, com apenas o harmónico de ordem 13 a cumprir com o limite recomendado pela a norma IEEE STD 519-2014. As fases *b* e *c* apresentam todos os seus harmónicos individuais dentro dos limites recomendados.

Tabela 5 - Harmónicos Individuais de Corrente no Quadro Elétrico.

<b>Harmónicos Individuais da Corrente (%)</b>			
<b>Fase</b>	<b>Ordem</b>	<b>Resultado</b>	<b>Limite</b>
<b>A</b>	3	25,86	7
	5	21,15	
	7	13,32	
	9	10,18	3,5
	11	3,91	
	13	2,35	
<b>B</b>	3	2,47	7
	5	2,67	
	7	3,66	
	9	1,98	3,5
	11	2,57	
	13	1,48	
<b>C</b>	3	2,52	7
	5	2,24	
	7	3,45	
	9	2,25	3,5
	11	2,99	
	13	1,59	

De destacar que apenas foi feita a análise até ao harmónico de ordem 13 pois, do harmónico de ordem 15 para a frente assumem pouca ou nenhuma influencia para a taxa de distorção harmónica, pois assumem valores quase nulos em qualquer uma das três fases.

#### **4.3.4 Registo e Análise da Frequência Fundamental da Tensão**

A Figura 4.11 mostra a evolução, ao longo do tempo, da frequência fundamental da tensão de alimentação, onde se constata que a frequência atingiu um valor mínimo de 49,87 Hz e um valor máximo de 50,12 Hz.

Assim, em relação aos 50 Hz, que representa a frequência nominal da tensão de alimentação em Portugal, observa-se um desvio de -0,26% e +0,24%. Desvios esses, dentro dos limites da norma NP EN 50160.

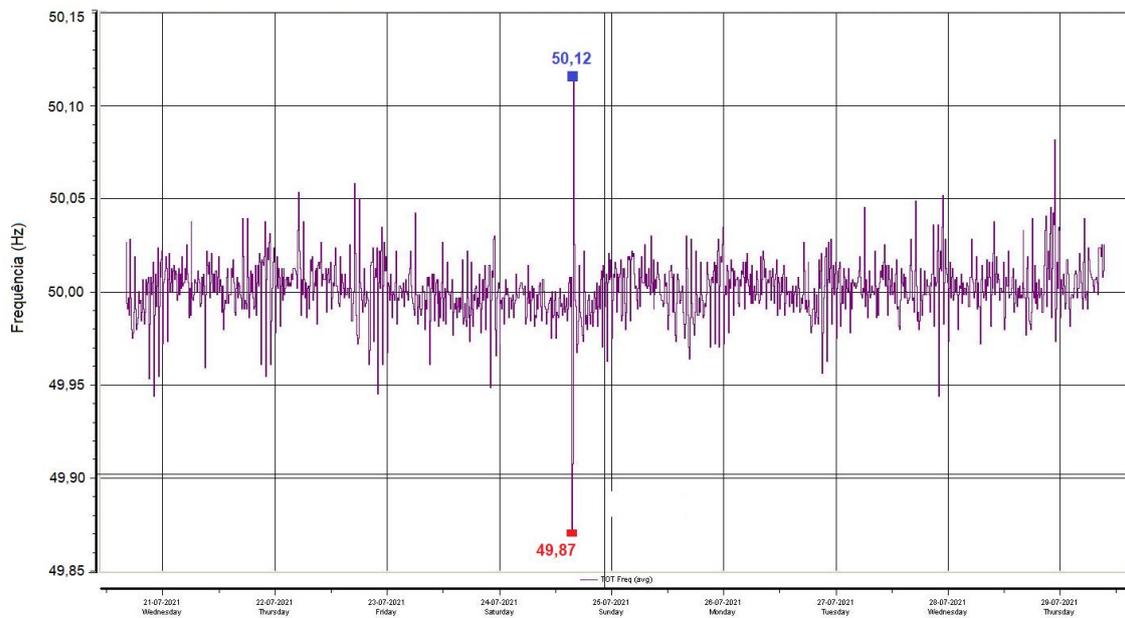


Figura 4.11 - Evolução da frequência fundamental da tensão no quadro elétrico.

### 4.3.5 Registo e Análise da Tremulação da Tensão

A Figura 4.12 mostra a evolução, ao longo de toda a monitorização, da tremulação da tensão, através da severidade de longa duração ( $P_{lt}$ ), que como visto anteriormente, é calculado sobre uma sequência de 12 valores da severidade de curta duração ( $P_{st}$ ), respeitando a equação (4.1).

$$P_{lt} = \sqrt[3]{\sum_{i=1}^{12} \frac{P_{st}^3}{12}} \quad (4.1)$$

Com valores iguais ou superiores a 1, a probabilidade de uma lâmpada piscar aumenta, podendo criar um possível desconforto visual aos utilizadores do laboratório. Contudo, apenas se registou um evento em cada uma das três fases, na quarta-feira, dia 21/07/2021. Na fase 1 registou-se o valor de 2,408, na fase 2 registou-se 1,491 e na fase 3 registou-se o valor de 1,373. Estes eventos ocorreram exatamente no mesmo instante estando diretamente relacionado com a cava de tensão ocorrida nesse momento.

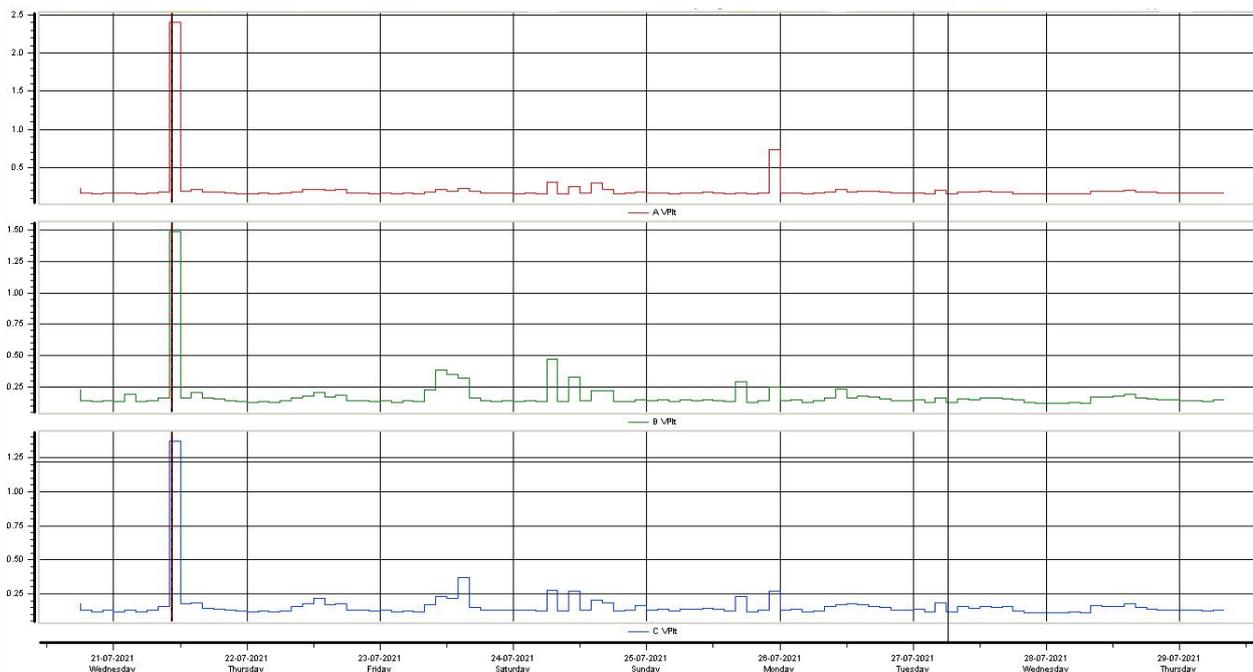


Figura 4.12 - Evolução da tremulação da tensão no quadro elétrico.

### 4.3.6 Registo e Análise do Desequilíbrio da Tensão

O desequilíbrio da tensão é determinado, como explicado no capítulo, através do fator de desequilíbrio, fator esse, que pode ser obtido, em valores percentuais, através da fração do módulo das componentes de sequência negativa com o módulo das componentes de sequência positiva da tensão. Através da Figura 4.13 observa-se o comportamento do fator de desequilíbrio da tensão

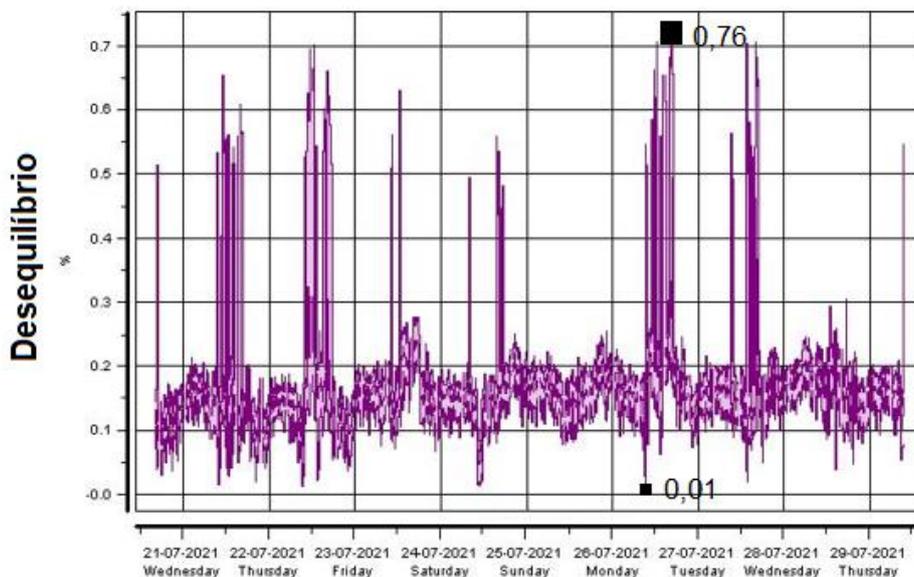


Figura 4.13 - Evolução da percentagem de desequilíbrio da tensão no quadro elétrico.

O fator de desequilíbrio de tensão, no período de monitorização, variou entre 0,01 % e 0,76 %, assim prova-se que, durante o período de monitorização, a componente inversa das tensões não ultrapassou 2 % da componente direta, estando, portanto, em acordo com a norma NP EN 50160.

### 4.3.7 Registo e Análise de outras ocorrências

Ao longo de todo o período de monitorização, o equipamento de monitorização apenas registou uma ligeira cava de tensão que durou menos de 0,5 segundos não registando qualquer interrupção de energia nem sobretensão.

No entanto, o monitorizador conseguiu registar alguns transitórios de tensão provavelmente causados pela comutação de semicondutores derivado aos testes experimentais dos alunos/investigadores no trabalho das suas dissertações/projetos.

## 4.4 Conclusões

Iniciou-se o capítulo fazendo uma breve descrição do caso de estudo da dissertação, o laboratório GEPE. Trata-se de um laboratório frequentado por alunos, investigadores e professores que se encontram a fazer os seus experimentos laboratoriais utilizando, frequentemente semicondutores de potência, bem como os seus computadores portáteis, entre outros equipamentos.

De seguida, explica-se todo os cuidados seguidos em todo o processo de instalação, desde o processo de aprendizagem e teste do equipamento até às normas de segurança cumpridas durante a instalação no quadro elétrico do laboratório.

Para uma boa monitorização da rede elétrica de forma a verificar a conformidade com a norma NP EN 50160 registar-se-iam e analisar-se-iam os valores e evolução temporal das tensões em cada uma das fases, das correntes em cada uma das fases e do neutro, de todas as potências necessárias (potência ativa, potência reativa e potência aparente), do fator de potência, da frequência fundamental da tensão, dos harmónicos e taxa de distorção harmónica das correntes e tensões, e do desequilíbrio e tremulação da tensão.

Apresentou-se a análise das tensões e concluiu-se que durante o período de monitorização os 95% dos valores eficazes médios de 10 minutos no quadro elétrico de baixa tensão do laboratório situaram-se no intervalo de 207 V a 253 V, correspondendo aos  $\pm 10\%$  da tensão de alimentação nominal, e, também, que 100% dos valores eficazes médios de 10 minutos se situam entre  $V_n - 15\%$  e  $V_n + 10\%$ , isto é entre 195,5 V e os 253 V, ambas as condições estão em conformidade da norma NP EN 50160.

Quanto às correntes, a primeira conclusão tirada através da visualização das formas de onda é o seu valor quase nulo nos períodos não laborais do laboratório e a presença de correntes no neutro.

Visualizou-se também as formas de onda instantâneas das correntes e tensões e concluiu-se que existe uma distorção assinalável nas formas de onda das tensões e uma distorção harmónica grande nas correntes, principalmente na fase A.

No registo das potências verificou-se que os seus valores mínimos correspondem aos períodos do dia de inatividade do laboratório e que existia um certo acompanhamento da potência reativa com as potências ativa e aparente. Pela análise da forma de onda da evolução temporal do fator de potência observa-se que nos períodos de atividade, o fator de potência assume um valor capacitivo entre 0,75 e 1, valores bastante aceitáveis, visto estarem bastante próximos do valor unitário.

Na análise dos harmónicos e das taxas de distorção harmónica das tensões e correntes, observa-se que os valores das tensões se encontram dentro dos valores normalizados. Quanto às correntes, registou-se uma THD, principalmente da fase A, quase 5 vezes acima do recomendável.

Observou-se, na frequência fundamental um desvio de -0,26% e +0,24% aos 50Hz correspondentes à frequência nominal da tensão de alimentação em Portugal. Desvios estes, dentro dos limites da norma NP EN 50160.

Na análise da tremulação da tensão de alimentação o  $P_{lt}$  não foi superior a 1 durante 95% do tempo. O único valor registado superior a 1 aconteceu na sequência de uma cava de tensão.

Na análise do fator de desequilíbrio de tensão o valor variou entre 0,01 % e 0,76 %, assim mostra-se que, durante o período de monitorização, a componente inversa das tensões não ultrapassou 2% da componente direta, estando, portanto, em acordo com a norma NP EN 50160. Por fim, de destacar, o registo de uma única cava de tensão e alguns transitórios provavelmente causados pela comutação de semicondutores.

Concluída a análise das medições, e tendo em conta a norma NP EN 50160, não se verificaram desvios assinaláveis aos parâmetros referentes aos valores de tensão, no entanto verificou-se, nas instalações do laboratório GEPE, que existem problemas com harmónicos de corrente, principalmente na fase  $\alpha$ . Juntamente com este problema observa-se que corrente é elevada durante alguns períodos

Posto isto, depois desta análise conclui-se que a instalação de um filtro ativo de potência paralelo, poderia mitigar os problemas descritos acima.

## Capítulo 5

# Validação das Melhorias de Qualidade de Energia Elétrica

### 5.1 Introdução

Como visto no capítulo anterior, a monitorização mostrou alguns problemas que necessitam de ser mitigados, quer seja com alterações ao modo de operação quer seja com a introdução de equipamentos de compensação de QEE, equipamentos esses descritos no capítulo 3.

Posto isto, neste capítulo é feita a validação da solução de compensação de QEE apresentadas na conclusão do capítulo anterior, isto é, é realizada a validação de um filtro ativo paralelo, através de simulações computacionais, com o objetivo de mostrar efetivamente a vantagens da implementação deste equipamento para a rede elétrica. A ferramenta de simulação utilizada para a realização das simulações computacionais foi o software *PSIM 9.1*, desenvolvido pela *Powersim Inc* [53], visto tratar-se de uma ferramenta de simulação, bastante indicada para circuitos de eletrónica de potência, com diversos componentes e blocos de controlo, como o Bloco C, que permite a implementação de teorias de controlo com recurso à linguagem programação C, facilitando a transição da malha de controlo do ambiente de simulação para a implementação experimental.

Por último, é apresentada a solução de mercado com as devidas características e respetivo orçamento cedido por uma empresa.

### 5.2 Simulações do Filtro Ativo de Potência Paralelo Trifásico

As simulações computacionais, seja de que tipo for, assumem, para a comunidade científica, um papel cada vez mais importante pois permitem uma validação tanto da topologia de *hardware* como dos algoritmos inerentes ao sistema de controlo. Com as ferramentas de simulação, é possível testar de diversas formas e condições os sistemas desejados de forma segura e sem custos, permitindo validar e otimizar o sistema ao máximo, permitindo uma melhor transição do modelo computacional para a experimentação laboratorial dos modelos desejados.

De seguida mostra-se o modelo de simulação, bem como os resultados, do filtro ativo de potência trifásico em diversos cenários de funcionamento e uma breve explicação da técnica de controlo de corrente para inversores e da teoria de potência utilizada.

A simulação feita serviu essencialmente para validação do filtro ativo de potência paralelo como solução para situações de distorção harmónica da corrente, mostrando resultados com diversos tipos de cargas.

### 5.2.1 Modelo de Simulação do Filtro Ativo de Potência Paralelo Trifásico

O modelo de simulação do FAP trifásico encontra-se organizado em 3 partes distintas, de forma a facilitar a observação de cada figura com mais detalhe e apresentar uma melhor ideia do modelo de simulação.

Na Figura 5.1 está representado o andar de potência do FAP, sendo possível observar-se o inversor do tipo fonte de tensão controlado por corrente e os vários sensores de tensão e corrente necessários ao completo funcionamento do sistema de controlo.

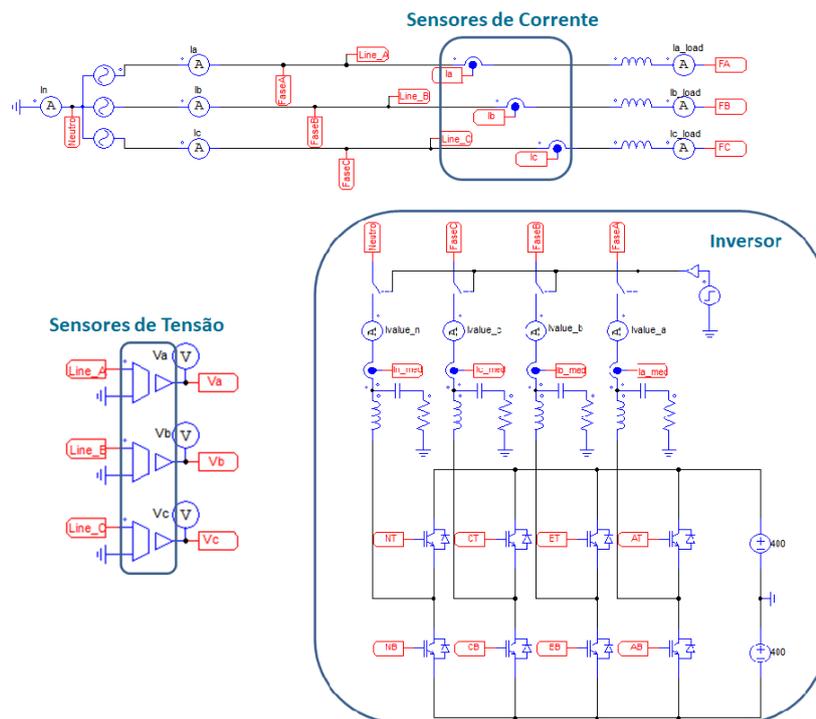


Figura 5.1 - Andar de potência do modelo de simulação em PSIM do FAP trifásico

De seguida é apresentado na Figura 5.2 a parte relativa ao sistema de controlo, este é realizado através de um bloco C. Este bloco, possui como entradas os sinais provenientes do andar de potência, obtidos pelos vários sensores de tensão e corrente utilizados, sendo nele gerados todas as correntes de compensação do FAP e os valores de referência da teoria  $p-q$  (apresentada mais à frente). Nesta parte é também definida a frequência da amostragem ( $f_a$ ) do sistema, através do bloco *Zero-Order Hold*

(ZOH), tendo sido estabelecido o valor de 100 kHz. À direita do bloco C, encontra-se a implementação da estratégia de controlo de corrente *Periodic Sampling* a ser aplicado no inversor.

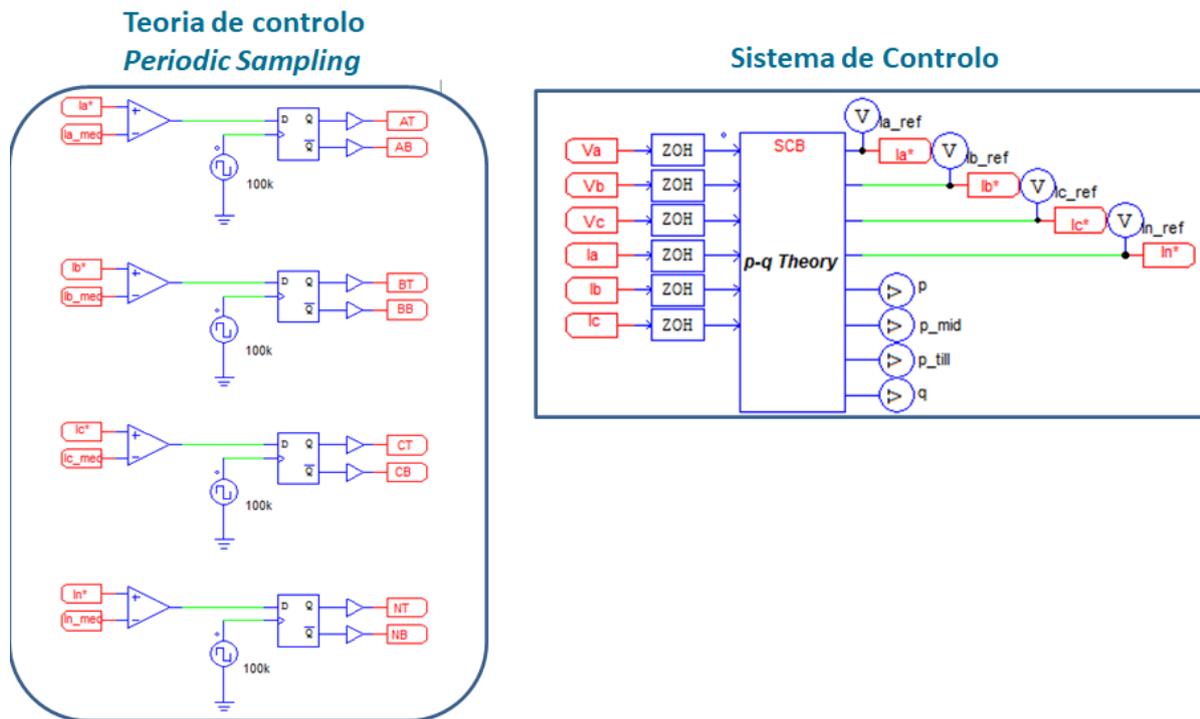


Figura 5.2 - Sistema de controlo do modelo de simulação em PSIM do FAP trifásico

A terceira e última parte, representada na Figura 5.3, mostra as diversas cargas utilizadas na simulação, pois é essencial que o FAP funcione independentemente da carga que esteja a usar. Conseguiu validar-se o comportamento do sistema com diversas cargas, tanto lineares como não-lineares, mas ofereceu-se um especial foco às cargas não-lineares pois são estas que consomem corrente não sinusoidal, provocando distorção harmónica. As simulações foram feitas de forma individual, isto é, ligando cada carga uma a uma, de forma a que se conseguisse validar o sistema independentemente da carga, no entanto, também se simulou com todas as cargas ligadas em paralelo de forma a validar o sistema num cenário de diversas cargas ligadas na rede.

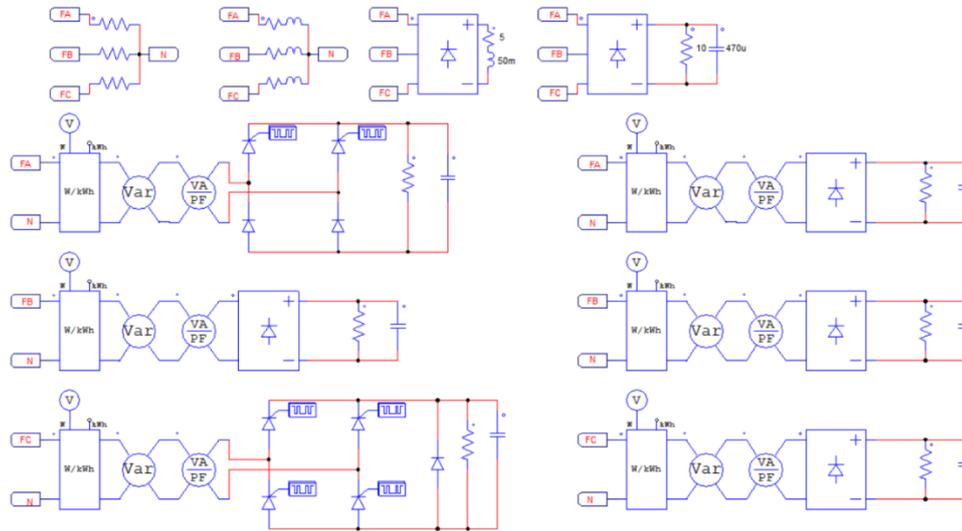


Figura 5.3 - Cargas utilizadas, no modelo de simulação PSIM, do FAP.

### 5.2.2 Controlo de Corrente por *Periodic Sampling*

De forma a garantir à saída do inversor fonte de tensão uma corrente o mais próxima possível da corrente de referência utiliza-se técnicas de controlo de corrente, portanto quanto maior o grau de aproximação maior a qualidade de forma de onda da corrente de saída, existindo assim menor distorção harmónica da corrente [54].

Existe um grande número de técnicas de controlo de corrente, como o controlo de corrente por histerese, no entanto, nesta simulação optou-se por a técnica de controlo de corrente por amostragem periódica (*Periodic Sampling*), por se tratar de uma técnica de implementação bastante simples que apresenta uma boa resposta dinâmica [55], apresenta também como vantagem em relação à técnica de controlo por histerese a capacidade de limitar a frequência máxima de comutação.

A técnica de controlo de corrente por *periodic sampling* consiste, muito sucintamente, na comparação direta da corrente de referência obtida no controlador, através de teorias de potência, com a corrente de saída do conversor, limitando a frequência máxima de comutação nos semicondutores a uma frequência fixa. Esta técnica, como mostra na Figura 5.2 utiliza um comparador sem histerese que efetua a comparação referida anteriormente seguido de um *flip-flop* do tipo D que funciona como um circuito de amostragem e retenção (*sampling and hold*) limitando a frequência máxima de comutação a metade da frequência de amostragem, ou seja, a entrada do circuito de amostragem e retenção são o resultado (saída) do comparador e na entrada de *clock* uma onda quadrada com uma frequência igual à frequência de amostragem.

Assim, em cada transição positiva do *clock*, o sinal de saída do comparador é transferido para a saída do *flip-flop*, voltando a ser atualizado no período de amostragem seguinte. Este circuito garante que

quando a corrente de saída do conversor é inferior à corrente de referência de uma das fases, o IGBT inferior é aberto e o IGBT superior é fechado, na situação contrária, ocorre o inverso, ou seja, o IGBT inferior fecha-se e o IGBT superior abre-se. As saídas de um *flip-flop* são utilizadas como comando para as *gates* dos IGBTs de um braço, nesta simulação existem 4 braços logo foram utilizados 4 circuitos de amostragem e retenção.

### 5.2.3 Teoria $p-q$

Como já visto anteriormente, a principal função de um FAP é a compensação de harmónicos e desequilíbrios de corrente. Posto isto, o princípio de funcionamento de um FAP consiste em fornecer às cargas os harmónicos e a potência reativa que estas necessitam. Para solucionar tais problemas é necessário calcular e injetar na rede correntes de compensação.

De forma a efetuar o cálculo das correntes de referência recorre-se a teorias de controlo que necessitam de receber como parâmetros de entrada os valores instantâneos da tensão na rede e das correntes da carga. Visto tratar-se de um fator decisivo para o desempenho do FAP, várias teorias de controlo tem sido desenvolvidas ao longo do tempo [56], tais como, a teoria FBD [57], a teoria CPC [58] entre outras. No entanto, nesta simulação optou por utilizar-se a teoria  $p-q$ , designada, também, de teoria de potência ativa e reativa instantânea [59]. Esta teoria apresenta como vantagem o facto de ser baseada no domínio do tempo, ou seja, o seu uso torna-se aplicável tanto em regime permanente como em regime transitório, permitindo o controlo dos filtros ativos em tempo real. A teoria  $p-q$  tem também a vantagem de apresentar uma simplicidade dos seus cálculos, uma vez que apenas são necessárias operações algébricas para os cálculos envolvidos [60]. De seguida são explicados todos os passos necessários para a aplicação da teoria  $p-q$  no controlo de um FAP.

O primeiro passo necessário na teoria  $p-q$  é transformar as tensões e correntes instantâneas para um outro sistema de coordenadas estacionário, ou seja, passar as tensões e correntes, através da transformada direta de Clarke, do sistema de coordenadas  $a-b-c$  para o sistema de coordenadas  $\alpha-\beta-0$ , como apresentado em (X) e (Y) [29]:

$$\begin{bmatrix} v_0 \\ v_\alpha \\ v_\beta \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{3}} \\ 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix} \quad (5.1)$$

$$\begin{bmatrix} i_0 \\ i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{3}} \\ 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} \quad (5.2)$$

Após a conversão das tensões e correntes para o sistema de coordenadas  $\alpha$ - $\beta$ -0, o próximo passo consiste em calcular, através da equação (5.3), a potência real instantânea ( $p$ ), a potência imaginária instantânea ( $q$ ) e a potência instantânea de sequência zero ( $p_0$ )[29].

$$\begin{bmatrix} p_0 \\ p \\ q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_0 & 0 & 0 \\ 0 & v_\alpha & v_\beta \\ 0 & v_\beta & -v_\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_0 \\ i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} \quad (5.3)$$

Estas potências podem ser separadas em componentes médias e componentes alternadas[60].

$$p = \bar{p} + \tilde{p} \quad (5.4)$$

$$q = \bar{q} + \tilde{q} \quad (5.5)$$

$$p_0 = \bar{p}_0 + \tilde{p}_0 \quad (5.6)$$

Antes de se passar ao próximo e último passo, que se trata do cálculo das correntes de compensação, é necessário perceber o significado físico de cada componente de potência apresentado nas equações (5.4), (5.5) e (5.6).

O significado físico de cada componente está associado a como é feita a troca de energia entre a rede elétrica e as cargas. Assim sendo, o valor médio da potência real instantânea ( $\bar{p}$ ) é a energia por unidade de tempo transferida da fonte para as cargas através das três fases do sistema elétrico, o valor alternado da potência real instantânea ( $\tilde{p}$ ) é a energia por unidade de tempo trocada entre a fonte e as cargas, através das três fases do sistema elétrico, a potência real instantânea ( $p$ ) corresponde à energia por unidade de tempo que é transportada da fonte para a carga e vice-versa, em qualquer instante de tempo, ou seja, é a potência que incorpora o valor médio e o valor alternado. Existe, também, a componente de potência imaginária instantânea ( $q$ ) que se trata da energia trocada, por unidade de tempo, entre as três fases do sistema elétrico, sem que ocorra qualquer transferência de energia entre a fonte e as cargas, incorpora também o valor médio ( $\bar{q}$ ) e o valor alternado ( $\tilde{q}$ ). Por último, o valor médio da potência instantânea de sequência zero ( $\bar{p}_0$ ) corresponde à energia, por unidade de tempo, transferida da fonte para as cargas com auxílio do neutro, o valor alternado da potência instantânea de sequência zero ( $\tilde{p}_0$ ) corresponde à energia, por unidade de tempo, trocada entre a fonte e as cargas, com auxílio do neutro. A potência instantânea de sequência zero ( $p_0$ ), tal

como a potência real instantânea  $p$ , incorporam as duas componentes, a componente média com a componente alternada [29][60].

Percebendo estes conceitos, passa-se para o próximo passo que consiste no cálculo das correntes de compensação. Para efetuar esses cálculos é necessário saber que componentes da teoria  $p-q$  devem ser compensadas. Com a instalação de um filtro ativo paralelo com controlo baseado na teoria  $p-q$ , todas as componentes que não transfiram energia da fonte para a carga ( $\bar{p}$  e  $\bar{p}_0$ ) passam a ser fornecidos diretamente pelo filtro ativo de paralelo.

Posto isto, de forma a calcular as correntes de compensação são necessárias as componentes alternadas da potência real instantânea ( $\tilde{p}$ ) e da potência instantânea de sequência zero ( $\tilde{p}_0$ ) e a componente imaginária instantânea ( $q$ ), como demonstra nas equações (5.7) e (5.8) [29][60].

$$\begin{bmatrix} i_{c\alpha}^* \\ i_{c\beta}^* \end{bmatrix} = \frac{1}{v_\alpha^2 + v_\beta^2} \begin{bmatrix} v_\alpha & v_\beta \\ v_\beta & -v_\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{p} - \tilde{p}_0 \\ q \end{bmatrix} \quad (5.7)$$

$$i_{c0}^* = i_0 \quad (5.8)$$

Por fim, aplicando a transformada inversa de Clarke, é necessário converter as correntes de compensação no referencial  $\alpha\beta 0$  para o referencial  $a-b-c$ , através da aplicação das equações (5.9) e (5.10)

$$\begin{bmatrix} i_{ca}^* \\ i_{cb}^* \\ i_{cc}^* \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{3}} \\ 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{c0}^* \\ i_{c\alpha}^* \\ i_{c\beta}^* \end{bmatrix} \quad (5.9)$$

$$i_{cn}^* = -(i_{ca}^* + i_{cb}^* + i_{cc}^*) \quad (5.10)$$

#### 5.2.4 Resultados da Simulação do Filtro Ativo Paralelo

O objetivo desta secção é, essencialmente, validar, avaliar e testar o filtro ativo paralelo como equipamento de compensação de problemas de QEE relacionados com as correntes da instalação elétrica. É avaliado o desempenho do FAP perante diversos tipos de cargas ligadas à rede, tanto lineares como não lineares.

Assim, e de forma a avaliar o comportamento do FAP na presença de cargas lineares, a primeira carga a ser representada será uma carga RL equilibrada, isto é, a carga RL trifásica é composta pela ligação em estrela, da série de uma resistência com uma bobina. O valor da resistência é de  $0,5 \Omega$  e a bobina

apresenta uma indutância de 5 mH. Na Figura 5.4, mostra-se um exemplo de uma carga RL trifásica

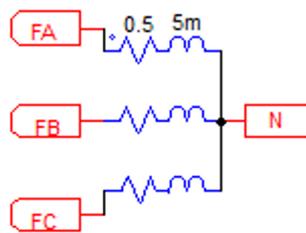


Figura 5.4 - Simulação de uma carga RL equilibrada

equilibrada.

Na Figura 5.5 são apresentadas as correntes fornecidas pela rede elétrica para alimentar a carga e na Figura 5.6 são apresentadas a corrente e tensão apenas numa fase, neste caso a fase *a*, até ao instante 0,05 s.

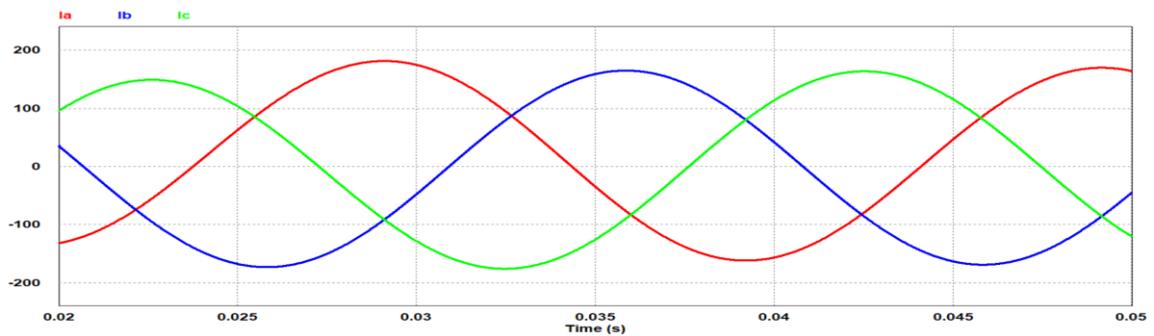


Figura 5.5 - Formas de onda da simulação das correntes da rede elétrica do Filtro Ativo Paralelo ligado a uma carga RL.

Na Figura 5.5 nota-se um certo desequilíbrio nas formas de onda da corrente, com estas a apresentarem, até ao instante 0,05 s, valores eficazes de 131,03 A na fase A 22,66 A na fase B e 116,43 A na fase C.

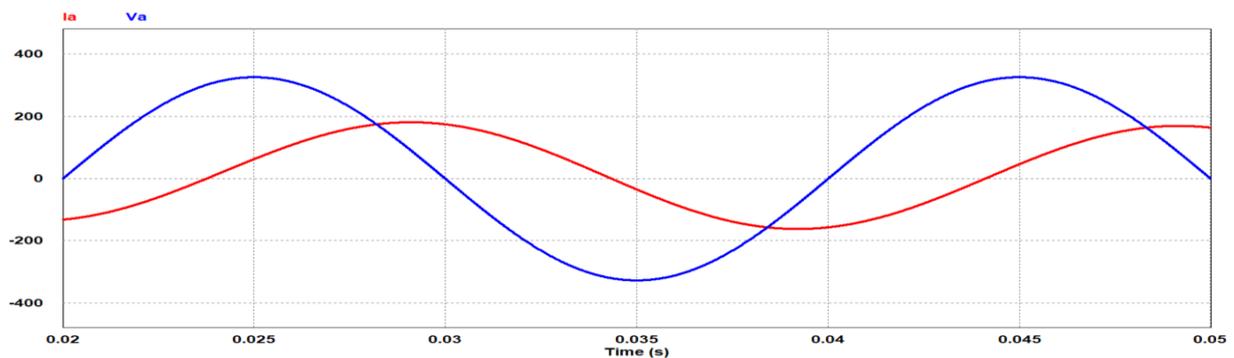


Figura 5.6 - Formas de onda da simulação da corrente e tensão da fase A do Filtro Ativo Paralelo ligado a uma carga RL.

Através da Figura 5.6 apura-se que este sistema apresenta um fator de potência indutivo, visto que a corrente se encontra atrasada em relação à tensão.

A seguir, através da Figura 5.7, mostra-se as correntes e tensões, em cada uma das fases, da rede elétrica após a ação do filtro ativo paralelo.

É possível verificar que a partir sensivelmente dos 50 ms, as correntes ficam em fase com as tensões, passando a apresentar uma forma de onda perfeitamente sinusoidal. Nota-se, também, uma diminuição da amplitude das correntes, existindo uma diminuição considerável do valor de pico

Com a compensação eficazes das correntes assumiram valores mais uniformes, pois as três fases apresentam um valor eficaz da corrente igual de, aproximadamente, 31 A. Existiu uma diminuição de quase 100 A do valor eficazes das correntes nas três fases.

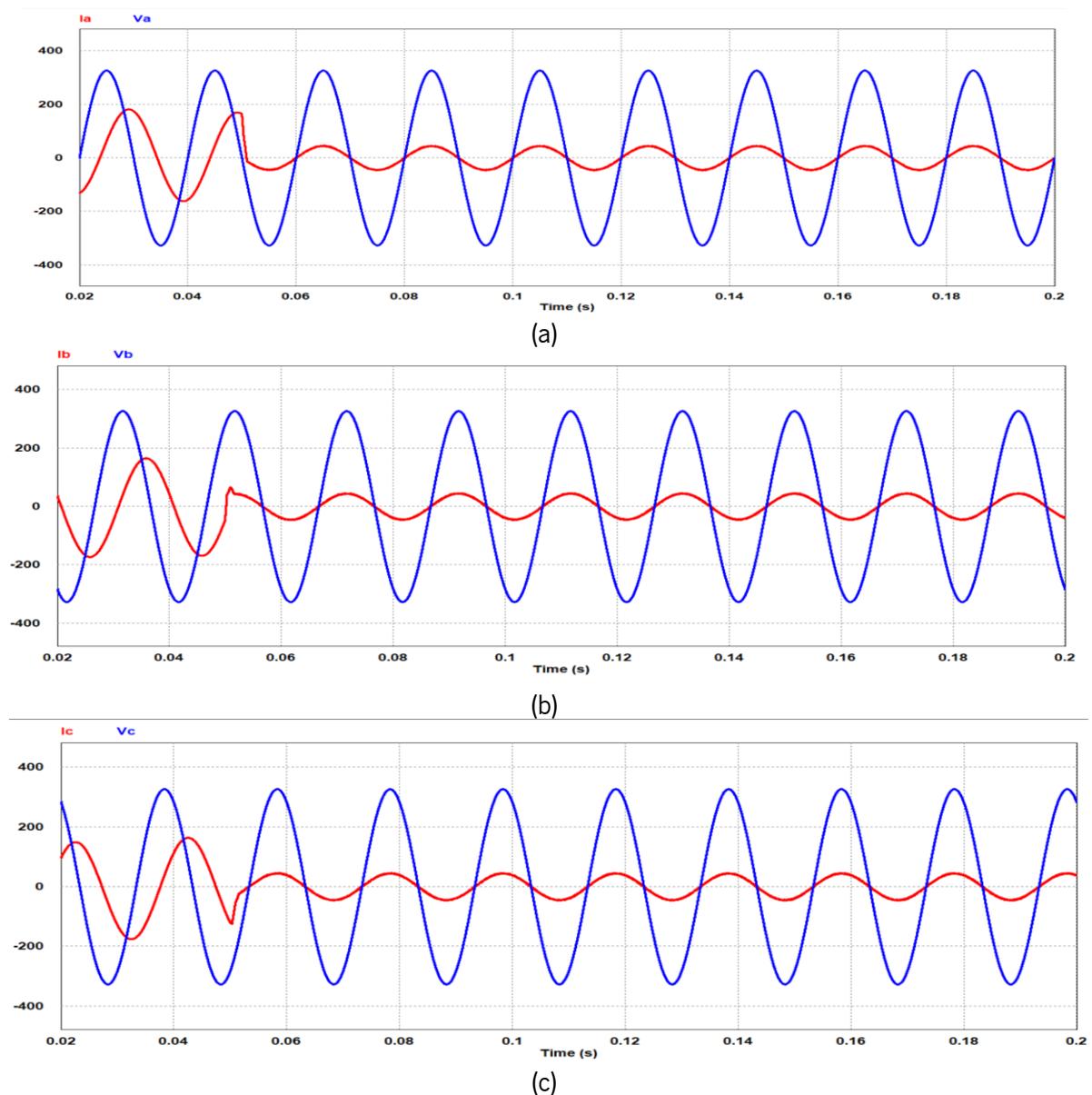


Figura 5.7 - Formas de onda da tensão e corrente após compensação pelo Filtro Ativo Paralelo com carga RL:  
(a) da fase A; (b) da fase B; (c) da fase C.

Depois para cargas lineares, optou-se por simular uma carga não linear, desta feita, simulou-se o filtro ativo paralelo com um retificador trifásico com carga RL, como mostra na Figura 5.8.

Utilizou-se um retificador trifásico não controlado, ou seja, apenas composto por diodos e a carga colocada no seu lado CC foi uma resistência de 5  $\Omega$  em série com uma bobina de 50 mH.

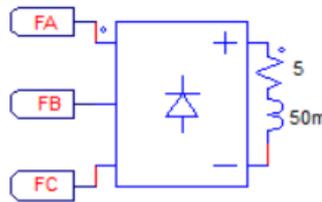


Figura 5.8 - Simulação de retificador trifásico com carga RL.

Na Figura 5.9 são apresentadas as correntes fornecidas pela rede elétrica para alimentar a carga e facilmente se verifica que as correntes se encontram bastante distorcidas, apresentando um THD nas três fases de, aproximadamente, 20%, até aos 50 ms da simulação

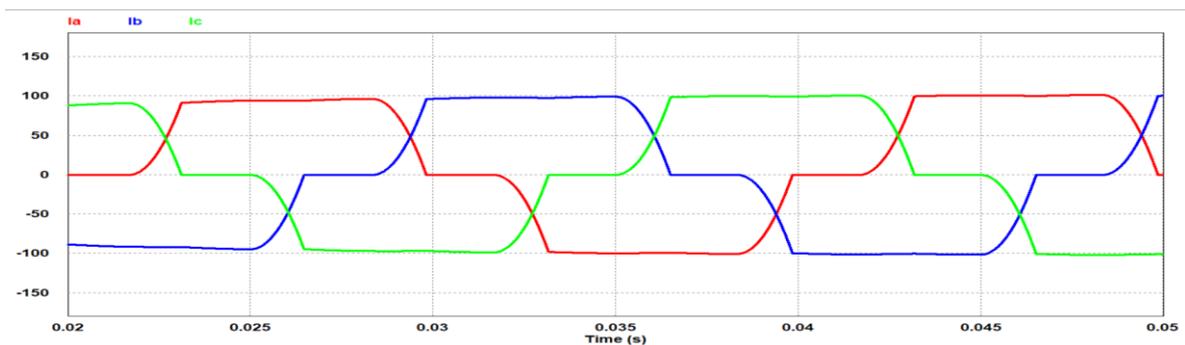


Figura 5.9 - Formas de onda da simulação das correntes da rede elétrica do Filtro Ativo Paralelo ligado a um retificador trifásico com carga RL.

Na Figura 5.10, observa-se as formas de onda da tensão e da corrente na fase A, verificando-se uma forma de onda da corrente muito longe do ideal, com muita distorção harmónica.

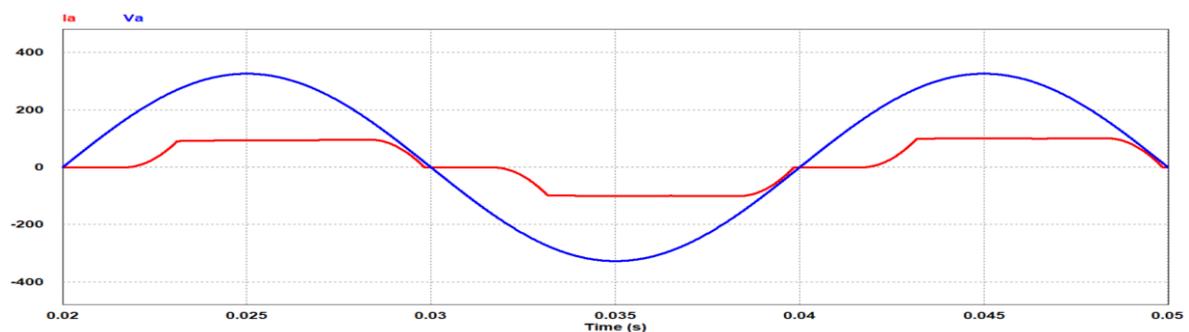


Figura 5.10 - Formas de onda da simulação da corrente e tensão A da fase do Filtro Ativo Paralelo ligado a um retificador trifásico com carga RL.

A seguir, através das formas de onda na Figura 5.11 mostra-se as correntes e tensões, em cada uma das fases, da rede elétrica após a compensação.

É possível verificar, que a partir sensivelmente dos 50 ms as correntes passam a possuir uma forma de onda sinusoidal em fase com as respectivas tensões, existindo uma diminuição do THD dos 20% para aproximadamente 1,2%.

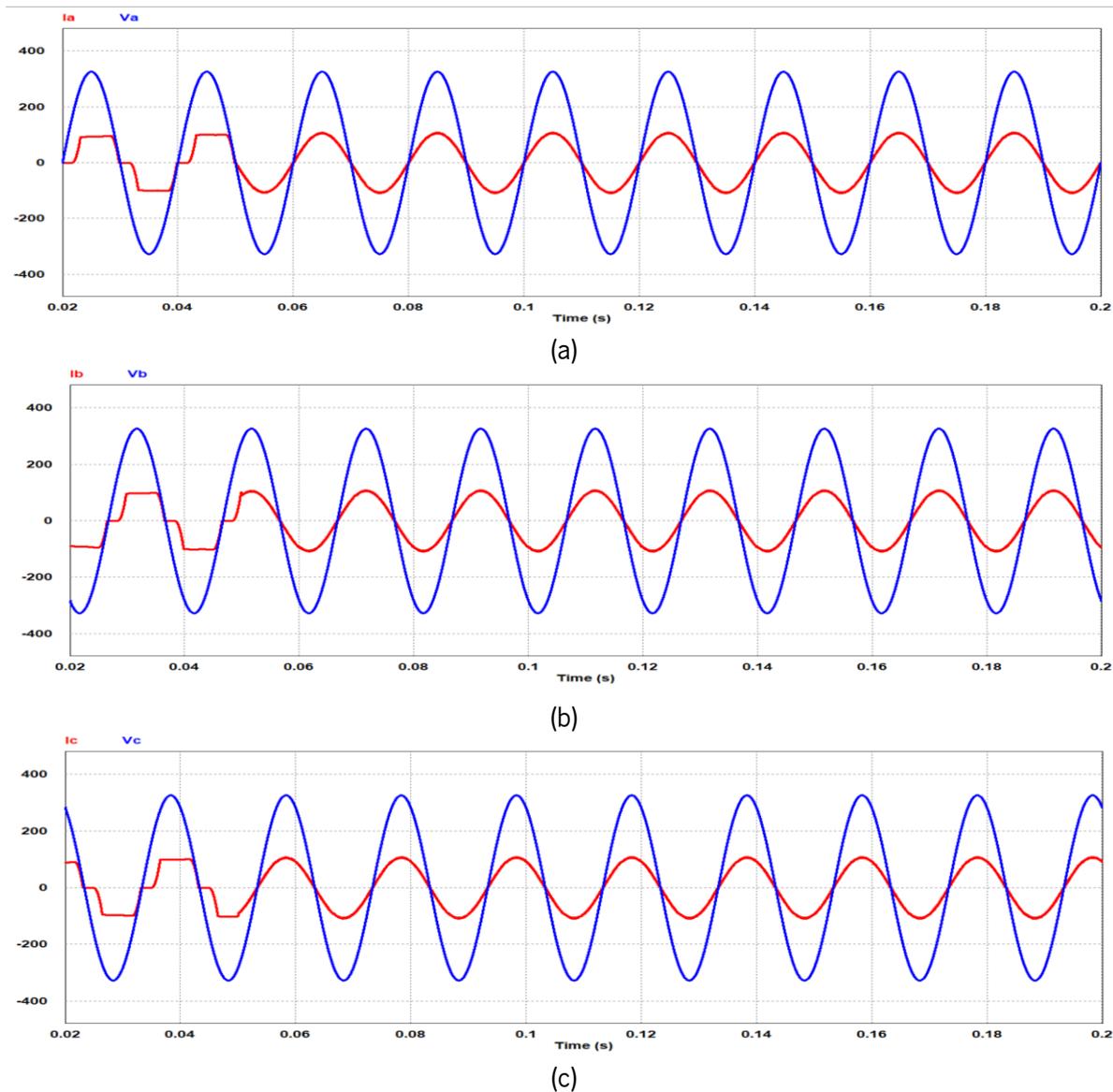


Figura 5.11 - Formas de onda da tensão e corrente após compensação do Filtro Ativo Paralelo ligado a um retificador trifásico com carga RL: (a) da fase A; (b) da fase B (c) da fase C.

Como já foi visto simulou-se o filtro ativo paralelo com uma carga linear e com uma carga não-linear, sem a utilização do neutro, chegando-se à conclusão que para ambos os casos o filtro ativo paralelo conseguiria corrigir as distorções harmónicas da corrente, criando uma forma de onda sinusoidal e em fase com a respetiva tensão.

Faltando assim validar este equipamento para outro dos problemas ocorrido, as correntes no neutro. Posto isto, e tendo em conta que no laboratório GEPE utiliza-se maioritariamente equipamentos de

baixa potência como computadores, simulou-se o filtro ativo paralelo ligado a cada uma das fases um retificador monofásico controlado com filtro capacitivo, de forma a simular um ambiente mais real, visto tratar-se de um dos tipos de retificador mais utilizados em equipamentos de baixa potência[3].

Na Figura 5.12 mostra-se o exemplo de uma simulação de retificador monofásico com carga capacitiva.

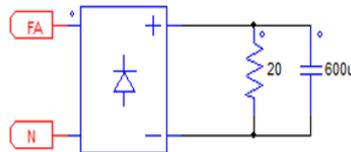


Figura 5.12 - Simulação de retificador monofásico com filtro capacitivo.

Na Figura 5.13 são apresentadas as correntes fornecidas pela rede elétrica para alimentar a carga e na Figura 5.14 são apresentadas a corrente e tensão apenas na fase A, até ao instante 0,05 s.

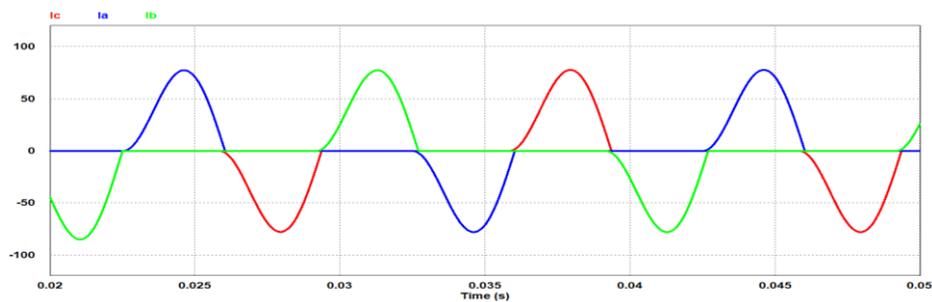


Figura 5.13 - Formas de onda da simulação das correntes da rede elétrica do Filtro Ativo Paralelo ligado a três retificadores monofásicos com filtro capacitivo.

Pela observação das formas de onda da Figura 5.13 e Figura 5.14 percebe-se a ocorrência do mesmo tipo de problemas enumerado anteriormente, com as correntes a apresentar um THD, nas três fases de aproximadamente 102%.

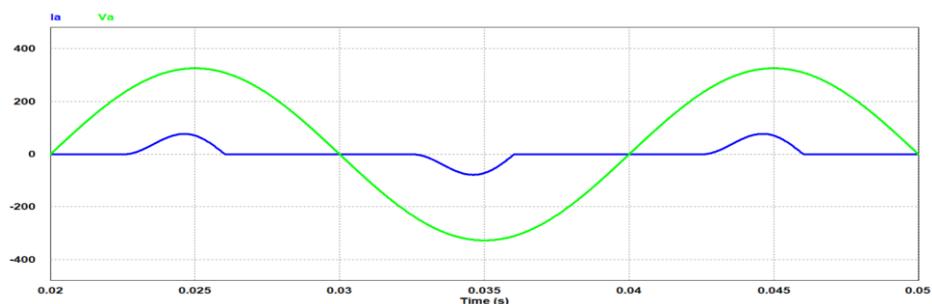


Figura 5.14 - Formas de onda da simulação da corrente e tensão da fase A do Filtro Ativo Paralelo ligado a três retificadores monofásicos com filtro capacitivo.

Na Figura 5.15 é possível observar as formas de onda da tensão e da corrente em cada uma das fases individualmente.

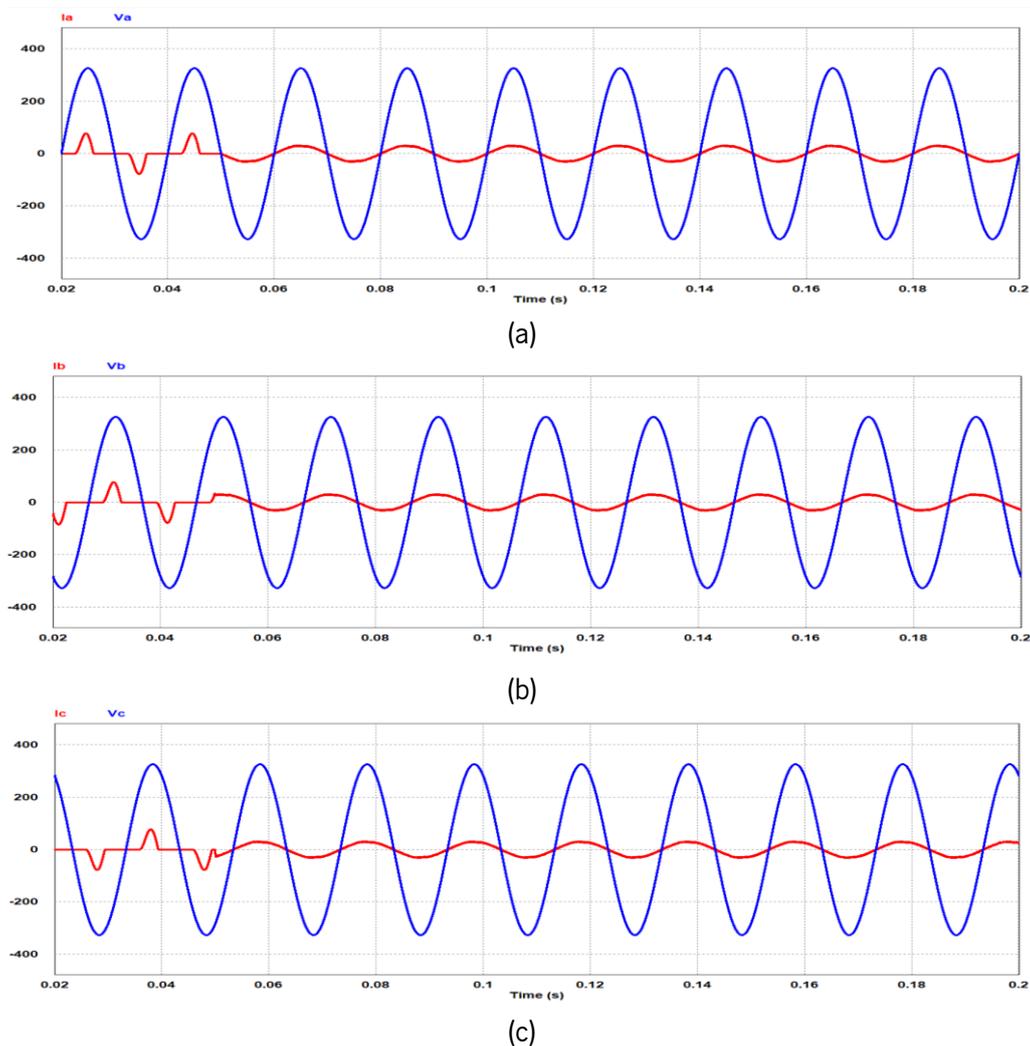


Figura 5.15 – Formas de onda da tensão e corrente após compensação na simulação do Filtro Ativo Paralelo ligado a três retificadores monofásicos ligados com filtro capacitivo: (a) da fase  $a$ ; (b) da fase  $b$ ; (c) da fase  $c$ .

Mais uma vez consegue validar-se, por observação das formas de onda da simulação presentes na figura 5.15, que a partir dos 50 ms, as correntes passam a possuir uma forma de onda sinusoidal em fase com as respetivas tensões, existindo uma diminuição do THD de valores a rondar os 102% para os 4%.

Por fim, mostra-se na Figura 5.16, a corrente no neutro para o mesmo período de simulação.

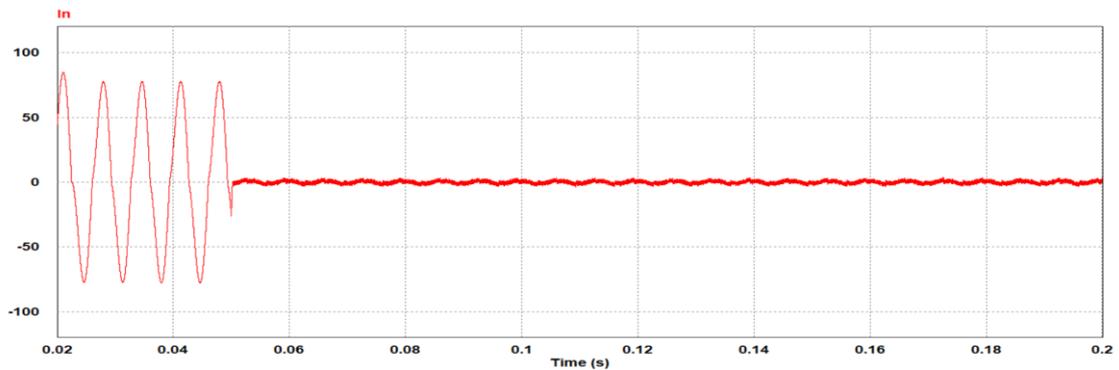


Figura 5.16 - Formas de onda da corrente após compensação do Filtro Ativo Paralelo ligado a três retificadores monofásicos com filtro capacitivo.

Facilmente se verifica que a partir dos 50 ms, existe uma anulação da corrente do neutro, passando de valores de pico a rondar os 85 A para valores a rondar os 0A.

Por último e visto que no laboratório existem sempre diversas cargas ligadas ao mesmo tempo á rede, simulou-se com diversas cargas ligadas em paralelo, tais como:

- **Cargas lineares:** cargas resistivas e RL equilibradas e desequilibradas;
- **Cargas não-lineares:** retificador trifásico com filtro indutivo, retificador trifásico com filtro capacitivo, 3 retificadores monofásicos iguais com filtro capacitivo cada um ligado a cada uma das fases e 3 retificadores monofásicos diferentes com filtro capacitivo, um não-controlado, um semi-controlado e outro totalmente controlado.

A Figura 5.3 mostra a simulação das cargas utilizadas para esta validação final. A Figura 5.17 mostra as correntes fornecidas nas três fases pela rede elétrica para alimentar a carga e na Figura 5.18 mostra a tensão e a corrente na fase A até ao instante  $t = 0,05$  s.

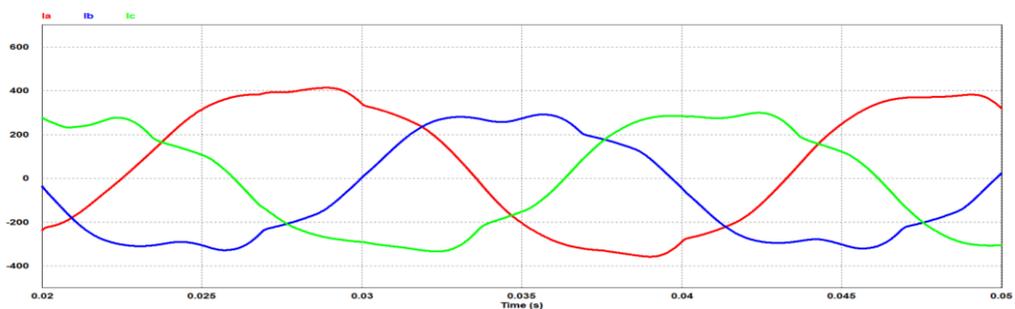


Figura 5.17 - Formas de onda da simulação das correntes da rede elétrica do Filtro Ativo Paralelo ligado a diversas cargas.

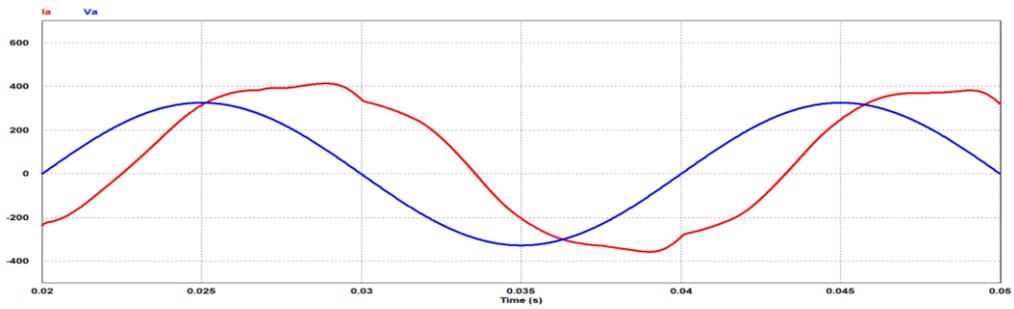


Figura 5.18 - Formas de onda da simulação da corrente e tensão da fase *a* da rede elétrica do Filtro Ativo Paralelo ligado a diversas cargas.

Facilmente se nota por observação direta distorções e desequilíbrios nas formas de onda das correntes. As formas de onda apresentam valores eficazes de, respetivamente, 298,95 A na fase A, 246,05 A na fase B e 235,4 A na fase C e com um THD de 11,2 %, 13,6 %, e 9,98 % nas fases *a*, *b* e *c*, respetivamente.

Na Figura 5.19 é possível observar as formas de onda da tensão e da corrente após compensação.

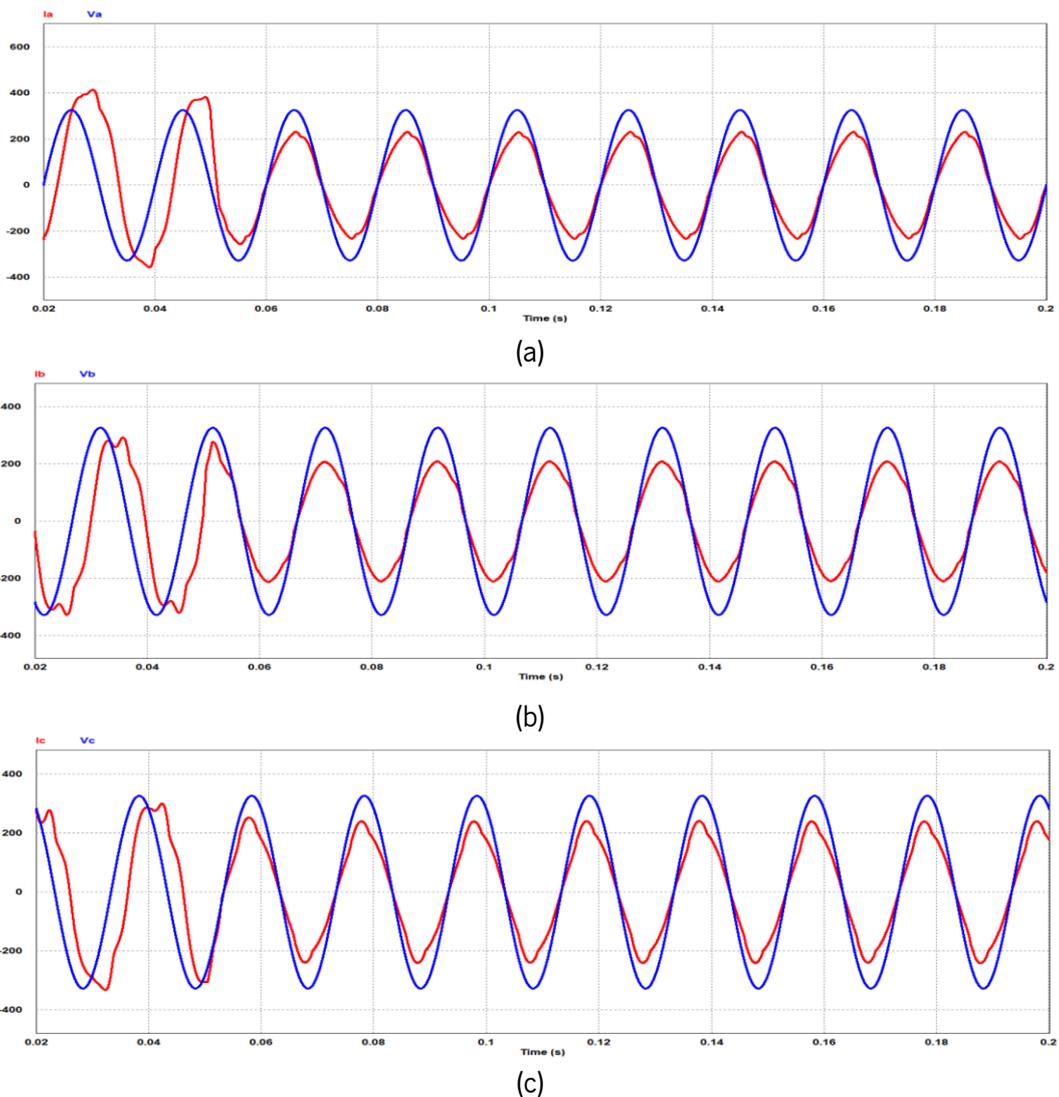


Figura 5.19 - Formas de onda da tensão e corrente após compensação do Filtro Ativo Paralelo ligado a diversas cargas: (a) da fase A; (b) da fase B; (c) da fase C.

Observa-se que após o instante  $t = 0,05\text{ s}$  as formas de onda das 3 fases ficam com valor eficaz uniforme de aproximadamente 156 A e em fase com a forma de onda da tensão. Verifica-se, também uma diminuição da distorção com as 3 correntes a apresentarem valores de THD a rondar os 4%

Concluindo, na Figura 5.20, mostra-se a corrente no neutro após a compensação do filtro ativo paralelo.

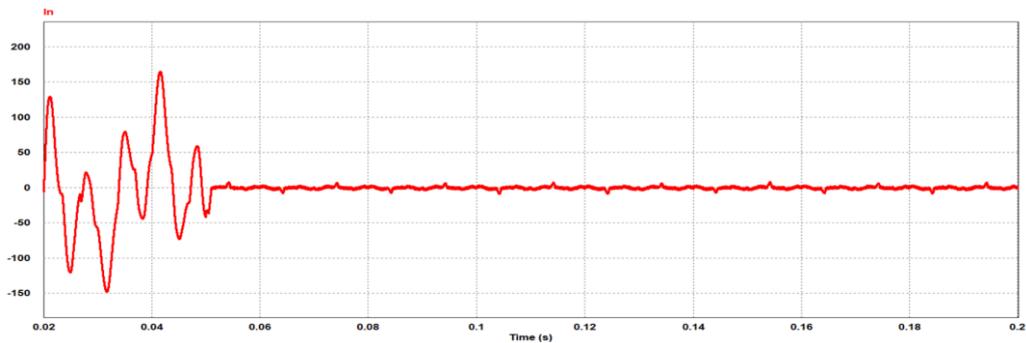


Figura 5.20 – Forma de onda da corrente no neutro após compensação do Filtro Ativo Paralelo ligado a diversas cargas.

Verifica-se que a partir do instante de atuação do filtro ativo paralelo, ou seja, o instante  $t = 0,05\text{ s}$ , existe uma anulação das correntes no neutro.

Com todas estas simulações, pode concluir-se que o filtro ativo de potência é um bom equipamento a aplicar em casos de harmónicos e desequilíbrios de corrente. Conseguiu validar-se a sua utilização com cargas lineares e não-lineares bem como validar em situações reais como as correções das correntes quando aplicado a retificadores de onda completa monofásicos com filtro capacitivo, bastante presentes em equipamentos de baixa potência. Também em situações com diversas cargas ligadas em paralelo, situações que acontecem múltiplas vezes no período normal de funcionamento do laboratório GEPE, os resultados foram bastante promissores.

### 5.3 Sugestão de Filtro Ativos de Potência a aplicar

Concluída a análise das medições, no capítulo 3, verificou-se que nas instalações do GEPE, existem problemas com harmónicos na corrente, assim optou-se por validar, através de simulações, o filtro ativo paralelo como aparelho capaz de efetuar a mitigação destes problemas.

Posto isto, foram contactadas algumas empresas distintas que pudessem fornecer propostas de equipamento e respetivo orçamento, no entanto apenas uma das empresas apresentou proposta, a Zeben – Sistemas Eletrónicos, Lda.

A Zeben – Sistemas Eletrónicos, Lda é uma empresa portuguesa fundada em 2005 e dedica-se exclusivamente ao desenvolvimento, fabrico e comércio de soluções de automação, e à prestação de

serviços eletrotécnicos, com sede em Viana do Castelo e escritório/armazém em Esposende e no Brasil [61].

A Zeben propôs o filtro ativo de potência modelo “ADF P100 – Filtro Ativo de Harmónicos” que, apresenta como características de aplicação a eliminação de harmónicos, equilíbrio das correntes nas fases e compensação dinâmica de energia reativa, tem as seguintes características técnicas:

- **Modelo:** Modelo P100, modular, refrigerado a ar;
- **Frequência nominal:** 45 - 65 Hz +/-2%;
- **Tensão nominal:** 480 V (208 – 480 V);
- **Compensação de Corrente por Fase:** 75 A (RMS);
- **Potência Nominal:** 52/62 kVA;
- **Ordem Máxima de Compensação Individual de Harmónicos:** 49<sup>a</sup>;
- **Índice de Proteção:** IP20;
- **Ecrã:** HMI gráfica 4,3”;
- **Peso:** 91 Kg;
- **Dimensões:** 230x1790x470 mm;
- **Custo:** 25.294,29 €

Apesar de várias tentativas de contacto com outras empresas, apenas a Zeben – Sistemas Eletrónicos, Ltda enviou uma proposta de equipamento com orçamento, e visto tratar-se de um produto que satisfaz as necessidades, com boas características de compensação, optou-se por sugerir a instalação do equipamento proposto pela Zeben – Sistemas Eletrónicos, Ltda.

## 5.4 Conclusões

Neste capítulo foi descrito o modelo de simulação em *PSIM* de um filtro ativo paralelo trifásico, equipamento apropriado para mitigar os problemas encontrados durante a monitorização do quadro elétrico do laboratório GEPE. Assim, no decorrer deste capítulo foram apresentados vários pontos relativos à simulação do FAP e do seu respetivo sistema de controlo com o objetivo de comprovar que o equipamento garante as características mitigadoras esperadas.

Posto isto, no início do capítulo, foi introduzido o modelo de simulação utilizado, mostrando tanto o circuito de potência como o sistema de controlo do modelo, juntamente com todas as cargas utilizadas na simulação do sistema proposto.

O sistema de controlo de qualquer circuito eletrónico de potência é essencial para o seu bom desempenho, pois é dele a responsabilidade pelo tratamento de toda a informação recebida do sistema

elétrico como as tensões e correntes, pela implementação dos algoritmos de controlo e pela atuação direta do circuito de potência do sistema. Assim, foi apresentado e explicitado, todas as partes referentes ao sistema de controlo utilizadas na simulação, mais concretamente a técnica de controlo de corrente e a teoria de potência utilizadas na simulação. Uma boa técnica de controlo de corrente torna-se necessária de forma a garantir à saída do inversor uma corrente o mais próxima possível da corrente de referência calculada no processador, garantindo assim uma maior qualidade de forma de onda da corrente de saída, sendo assim, existem diversas estratégias de controlo para inversores, no entanto, optou-se por utilizar neste modelo de simulação a técnica de controlo de corrente *Periodic Sampling*, explicitando o seu funcionamento, aplicação e os motivos para a escolha desta técnica.

De seguida, apresentou-se a teoria de controlo utilizada na simulação, a teoria  $p-q$ . Trata-se de uma teoria relativamente simples e intuitiva que pode ser aplicada no controlo de filtros ativos. As potências são calculadas a partir dos valores instantâneos das tensões e correntes, o que a torna indicada para sistemas de controlo em tempo real. Explicitado todos os passos do desenvolvimento do modelo de simulação, mostraram-se os resultados da simulação para diversas cargas individuais, simulando o sistema com cargas lineares e não-lineares, com e sem neutro, validando o filtro ativo de potência como um bom equipamento para correção de distúrbios nas correntes.

O GEPE apresenta inúmeros projetos com resultados, sendo dissertações de mestrado, teses de doutoramento ou trabalhos de investigação na área dos filtros ativos de potência, com diversas topologias e orientados para diferentes objetivos, no entanto, os protótipos em ambiente académico e de investigação não apresentam não estão homologados para operar de forma continuada e sem supervisão pelo que foi realizada uma prospeção de mercado e apresentado no subcapítulo 5.3, um modelo comercial de filtro ativo paralelo bem como as suas características técnicas e o custo associado.

# Capítulo 6

## Conclusões e Trabalho Futuro

### 6.1 Conclusões

Neste trabalho de dissertação foi feita uma monitorização da qualidade de energia nas instalações da Universidade do Minho, mais concretamente no Laboratório do GEPE. A monitorização da rede assume um papel vital para a melhoria da qualidade de energia pois possibilita ao utilizador a recolha dos dados necessários como os consumos energéticos e as diversas formas de onda de todos os parâmetros necessários a análise da QEE, permitindo a adoção de medidas de melhoria da qualidade de energia.

No Capítulo 1 foi feito um enquadramento ao tema e sua importância, com um ligeiro enquadramento aos problemas de QEE. Fez-se, também, uma breve descrição da Universidade do Minho, juntamente com os seus objetivos e as suas políticas de sustentabilidade energética. Apresentando-se também o laboratório do GEPE, caso de estudo desta dissertação.

No Capítulo 2 foram descritos todos os problemas de qualidade de energia elétrica como, por exemplo, cavas de tensão, sobretensões, harmónicas de tensão e corrente, entre outros. Com o principal objetivo de compreender a origem dos diversos problemas, a forma como estes afetam as instalações e prejuízos inerentes, sendo também explicitada possíveis soluções de mitigação para os problemas descritos. Em Portugal vigora a norma NP EN 50160 e foram apresentados ao longo do capítulo para os diversos problemas os limites estabelecidos por esta norma. Foram também descritas as diversas vantagens da monitorização e as principais características e funcionalidades do equipamento de monitorização utilizado nesta dissertação o *Dranetz Power Guide 4400*.

No Capítulo 3 foi realizado um levantamento dos principais aparelhos que são empregues nos sistemas elétricos para melhorar a qualidade de energia, dando, especial foco, nos filtros ativos de potência e UPS, apresentando os seus princípios de funcionamento, as suas principais características e as suas vantagens e desvantagens. Concluiu-se que o filtro ativo paralelo permite mitigar problemas de qualidade de energia associados às correntes da rede elétrica, tais como harmónicos e desequilíbrios

de corrente comportando-se como uma fonte de corrente. Já o filtro ativo série permite mitigar problemas de qualidade de energia associados às tensões da rede elétrica, tais como harmónicos e desequilíbrios de tensão comportando-se como uma fonte de tensão. No que diz respeito ao UPQC, trata-se de um equipamento que pode compensar problemas nas tensões e nas correntes, em simultâneo, pois trata-se da combinação de um filtro ativo paralelo com um filtro ativo série. Por último, foi apresentado, muito resumidamente, um conjunto de outras soluções e equipamentos que não apresentam tantas vantagens como os equipamentos descritos mais pormenorizadamente.

No Capítulo 4 explicita-se o processo de instalação do aparelho no quadro elétrico do laboratório e as normas de segurança seguidas durante a instalação do aparelho. Neste capítulo foi, também, realizado o registo e análise aos diversos parâmetros de qualidade de energia elétrica, segundo a norma portuguesa NP EN 50160. Em relação à tensão, não foram verificados desvios significativos, com valores de distorção harmónica a rondar os 5,70 %, valores abaixo do limite máximo de 8 % estabelecido pela norma portuguesa. Registou-se a ocorrência de alguns transitórios, bem com uma cava de tensão inferior a 0,5 s podendo ser justificados pelos diversos experimentos realizados no laboratório. Na análise da tremulação da tensão de alimentação, apesar de ter registado um ligeiro momento superior ao limite, o  $P_{lt}$  não foi superior a 1 durante 95 % do tempo. Quanto à análise ao desequilíbrio da tensão a componente inversa das tensões não ultrapassou os 2 % da componente direta, estando, portanto, em acordo com a norma. Os valores da frequência fundamental também se encontram de acordo com os limites pré-estabelecidos.

Os problemas encontrados residem essencialmente na corrente elétrica, com uma elevada distorção harmónica em relação ao valor recomendável, principalmente numa das fases que apresenta uma THD superior em relação às outras duas. Verifica-se a existência de correntes no neutro. Quanto às potências notou-se um acompanhamento da potência reativa com as restantes potências, não sendo, portanto, um problema grave.

Depois da análise aos diversos parâmetros monitorizados concluiu-se que a implementação de um filtro ativo de potência do tipo paralelo seria uma possível solução para os problemas encontrados. Assim, no capítulo seguinte, Capítulo 5, serviu essencialmente para demonstrar a validação da solução proposta no Capítulo 4, com o objetivo de comprovar que o equipamento sugerido garante as características mitigadoras esperadas. Foi explicitado todo o processo de simulação de um filtro ativo de potência do tipo paralelo, explicando toda o sistema de controlo implementado, como a técnica de controlo de corrente *Periodic Sampling* e a teoria  $p-q$ , bem como o porquê das suas escolhas.

Conseguiu validar-se o sistema proposto com o uso de diversas cargas, tanto para cargas lineares como para cargas não-lineares, conseguindo eliminar a distorção harmónica bem como a corrente do neutro. Por fim foi apresentada a sugestão de instalação de um filtro ativo paralelo comercial proposto pela empresa Zeben – Sistemas Eletrónicos, Ltda..

Tendo em conta que o objetivo desta dissertação consistia na análise dos índices de qualidade de energia elétrica nas instalações do laboratório GEPE na Universidade do Minho, de um modo geral pode concluir-se que quase todos os objetivos desta dissertação foram cumpridos, por ventura, poderia ter-se feito uma monitorização mais prolongada de forma a obter mais dados, tornando a análise mais rigorosa, no entanto, esta monitorização foi o suficiente para uma boa análise da QEE.

Ao longo da realização desta dissertação foram adquiridas várias competências complementares ao percurso académico, quer a nível de revisão bibliográfica, onde se estudou a fundo os diversos problemas de qualidade de energia elétrica, bem como os diversos equipamentos que possam funcionar como suporte para o combate aos problemas de qualidade de energia, como os Filtros Ativos de Potência de tipo Paralelo e do tipo Série, bem como o Condicionador Unificado de Qualidade de Energia, e as UPSs. Também foram atingidos progressos ao nível da capacidade de utilização de ferramentas de *software* novas como ao nível da leitura, compreensão e interpretação de dados, parâmetros e formas de onda sabendo identificar e analisar corretamente os diversos problemas. Foi também adquirida a capacidade de dimensionamento de equipamentos que possam solucionar parte dos problemas detetados. Estudaram-se, também, as diversas técnicas de controlo de corrente e teorias de controlo adequadas para os filtros ativos paralelos, o permitiu desenvolver um conhecimento aprofundado sobre o funcionamento destes equipamentos.

Na parte prática, foi possível ganhar conhecimentos de medidas de segurança aquando da instalação e remoção do analisador de qualidade de energia do quadro elétrico do laboratório do GEPE, permitindo também, indiretamente, perceber o funcionamento e tipo de equipamentos e materiais constituintes de um quadro elétrico. Para além disso foi possível ganhar destreza com vários equipamentos de medição, nomeadamente do equipamento de análise da qualidade de energia elétrica e das as pinças amperimétricas.

## 6.2 Sugestões para o futuro

Os resultados obtidos neste trabalho fazer uma análise da qualidade de energia elétrica do laboratório do GEPE, possibilitando a identificação de problemas de QEE e a sugestão de implementação de medidas de mitigação de acordo com os problemas encontrados na análise da monitorização.

Contudo e tendo em vista uma perspetiva futura, de seguida são apresentadas algumas sugestões:

- Se possível, instalar um monitorizador fixo no quadro elétrico do laboratório, podendo monitorizar a rede elétrica em tempo real permitindo uma maior vigilância do sistema energético e consequentemente maior rigor no funcionamento do mesmo, senão efetuar mais monitorizações de qualidade de energia elétrica utilizando o monitorizador portátil, ao longo de um ano civil;
- Apesar de não se tratar do principal objetivo desta dissertação, um registo e análise de consumos energéticos ao longo do ano de forma a perceber as possíveis perdas energéticas que estejam a ocorrer;
- Análise dos problemas e custos de possíveis avarias provocadas pelos problemas de QEE, mostrando a relação dos custos de investimentos com os ganhos inerentes à eliminação dos problemas, e o prazo de retorno do investimento;
- Implementação do filtro ativo paralelo sugerido, ou outro equivalente, e comparar os efeitos da sua implementação, ou seja, se efetivamente existiria uma melhoria na QEE e se sim, quanto beneficiaria o laboratório quer a nível de fatura energética quer a nível de melhoria dos trabalhos de todos os utentes do laboratório;
- Em caso de impossibilidade de aquisição do filtro ativo paralelo sugerido devido a restrições económicas, a implementação de um filtro ativo paralelo trifásico desenvolvido pelo GEPE, tendo em vista a melhoria da QEE no laboratório, seria uma boa forma de dar continuidade a este de trabalho.

## Lista de Referências

- [1] J. L. Afonso *et al.*, “SINUS - Tecnologia para Monitorização da Qualidade de Energia , Compensação Dinâmica de Harmónicos , Factor de Potência e Desequilíbrios e para Interface de Fontes Renováveis,” *Proceedings of XCLEEE - 10th Portuguese-Spanish Congress in Electrical Engineering*, no. July, pp. 2–7, 2007.
- [2] L. Energy, “Poor Power Quality costs European business more than € 150 billion a year,” *European Power Quality Survey*, pp. 1–2, 2007.
- [3] J. Afonso and J. Martins, “Qualidade da energia eléctrica,” *Robótica : Automação, Controlo, Instrumentação*, pp. 66–71, 2004.
- [4] S. Chattopadhyay, M. Mitra, and S. Sengupta, “Electric Power Quality,” *Power Systems*, vol. 62, no. october, 2011, doi: 10.1007/978-94-007-0635-4.
- [5] R. Este *et al.*, “Sistema de monitorização da qualidade da energia eléctrica baseado em pc e desenvolvido em labview,” *Industrial Electronics*, pp. 10–12.
- [6] “História.” <https://www.uminho.pt/PT/uminho/Informacao-Institucional/Paginas/Historia.aspx> (accessed Oct. 01, 2021).
- [7] “GEPE - Group of Energy and Power Electronics.” [https://www.gepe.dei.uminho.pt/index\\_en.html](https://www.gepe.dei.uminho.pt/index_en.html) (accessed Sep. 28, 2021).
- [8] “Relatório de Sustentabilidade Universidade Minho,” 2018.
- [9] D. Chapman, “The Cost of Poor Power Quality,” *Power Quality Application Guide*, p. 8, 2003.
- [10] “Norma Portuguesa NP EN50160, Características da tensão fornecida pelas redes de distribuição pública de energia eléctrica.,” *CENELEC*, 2001.
- [11] A. de Almeida, L. Moreira, and J. Delgado, “Power quality problems and new solutions,” *Renewable Energy and Power Quality Journal*, vol. 1, no. 1, pp. 25–33, 2003, doi: 10.24084/repqj01.004.
- [12] R. P. Bingham, “Sags and Swells,” no. September 1994, pp. 13–14, 1998.

- [13] H. Zbigniew and A. Bien, "Voltage Disturbances," *Power Quality Application Guide*, 2006.
- [14] B. Angelo, "Handbook of Power Quality," 2008.
- [15] C. L. Fortescue, "Method of symmetrical co-ordinates applied to the solution of polyphase networks," *Transactions of the American Institute of Electrical Engineers*, vol. 37, pp. 1027–1140, 1918, doi: 10.1109/T-AIEE.1918.4765570.
- [16] M. Sen Kurt, M. E. Balci, and S. H. E. Abdel Aleem, "Algorithm for estimating derating of induction motors supplied with under/over unbalanced voltages using response surface methodology," *The Journal of Engineering*, vol. 2017, no. 12, pp. 627–633, Dec. 2017, doi: 10.1049/joe.2017.0025.
- [17] R. Luís and G. Pregitzer, "Simulações Computacionais de Filtros Activos de Potência em Condições Reais de Operação," Universidade do Minho p. 242, 2006.
- [18] R. Ghandehari and A. Shoulaie, "Evaluating voltage notch problems arising from AC/DC converter operation," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 24, no. 9, pp. 2111–2119, 2009, doi: 10.1109/TPEL.2009.2021058.
- [19] "IEEE Trial-Use Standard Definitions for the Measurement of Electric Power Quantities Under Sinusoidal, Nonsinusoidal, Balanced, or Unbalanced Conditions Sponsor Power System Instrumentation and Measurements Committee of the IEEE Power Engineering Society," 2000.
- [20] R. N. Nandeshwar, "Lightening And Lightening Protection of Overhead Transmission Line," pp. 1–50, 2014.
- [21] J. Seymour and T. Horsley, "The Seven Types of Power Problems"; APC: New York, NY, USA, 2005. "
- [22] R. Alves, "Sistema de Monitorização de Consumos Energéticos e de Problemas de Qualidade de Energia Eléctrica," Universidade do Minho, 2008.
- [23] M. S. Kandil, S. A. Farghal, and A. Elmitwally, "Refined power quality indices," *IEE Proceedings: Generation, Transmission and Distribution*, vol. 148, no. 6, pp. 590–596, 2001, doi: 10.1049/ip-gtd:20010515.

- [24] E. W. Gunther, "Interharmonics in power systems," *Proceedings of the IEEE Power Engineering Society Transmission and Distribution Conference*, vol. 2, no. SUMMER, pp. 813–817, 2001, doi: 10.1109/pess.2001.970156.
- [25] J.R.M. Jr, G.C.D.S. (UFES), J.L.D.F. Vieira, D.S.L. Simonetti, G.P. Colnago, and E. Trarbach, "Modelagem computacional do flickermeter IEC em ambiente Matlab-Simulink ® - Parte I."
- [26] S. Guide, "Dran-View ® 6.0 Professional / Enterprise Part Number OM-DRANVIEW 2 Dran-View 6 User Guide."
- [27] R. C. Dugan, M. F. McGranaghan, S. Santoso, and H. W. Beaty, *Electrical Power Systems Quality*. doi: 10.1007/978-3-319-51118-4\_1.
- [28] M. Januário and W. L. Scarpim, "Estudo de utilização de filtros passivos de harmônicas em sistemas de extra baixa e baixa tensão," no. January 2013, 2014.
- [29] J. Afonso, C. Couto, and J. Martins, "Active Filters with Control Based on the p-q Theory".
- [30] J. G. Pinto, R. Pregitzer, L. F. C. Monteiro, and J. L. Afonso, "3-Phase 4-Wire Shunt Active Power Filter With Renewable Energy Interface," *Renewable Energy and Power Quality Journal*, vol. 1, no. 5, pp. 625–630, 2007, doi: 10.24084/repqj05.350.
- [31] A. Islam *et al.*, "Series active power filter implementation using P-Q theory," *2012 International Conference on Informatics, Electronics and Vision, ICIEV 2012*, pp. 915–918, 2012, doi: 10.1109/ICIEV.2012.6317511.
- [32] H. Akagi, "New trends in active filters for power conditioning s in Active Filters for Power n ing," *Ieee Transactions on Industry Applications*, vol. 32, 1996.
- [33] B. Singh, K. AlHaddad, and A. Chandra, "A review of active filters for power quality improvement," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 46, no. 5, p. 960971, 1999, doi: 10.1109/41.793345.
- [34] D. Figueroa, L. Morán, P. Ruminot, and J. Dixon, "A series active power filter scheme for current harmonic compensation," *PESC Record - IEEE Annual Power Electronics Specialists Conference*, pp. 3587–3591, 2008, doi: 10.1109/PESC.2008.4592511.

- [35] A. Kouzou, B. S. Khaldi, M. S. Boucherit, and M. O. Mahmoudi, "Apparent Power Evaluation of Series Active Power Filter with Recent Definitions," in *2008 5th International Multi-Conference on Systems, Signals and Devices*, 2008, pp. 1–6.
- [36] J. G. Pinto, R. Pregitzer, L. F. C. Monteiro, C. Couto, and J. L. Afonso, "A combined series active filter and passive filters for harmonics, unbalances and flicker compensation," *POWERENG 2007 - International Conference on Power Engineering - Energy and Electrical Drives Proceedings*, pp. 54–59, 2007, doi: 10.1109/POWERENG.2007.4380200.
- [37] J. G. O. Pinto, "Nova Topologia de UPQC sem Transformadores para Compensação de Problemas de Qualidade de Energia Elétrica," Universidade do Minho p. 240, 2011.
- [38] M. Aredes and R. M. Fernandes, "A unified power quality conditioner with voltage sag/swell compensation capability," *2009 Brazilian Power Electronics Conference, COBEP2009*, pp. 218–224, 2009, doi: 10.1109/COBEP.2009.5347700.
- [39] Y. Pal, A. Swarup, and B. Singh, "A comparative analysis of three-phase four-wire UPQC topologies," *2010 Joint International Conference on Power Electronics, Drives and Energy Systems, PEDES 2010 and 2010 Power India*, 2010, doi: 10.1109/PEDES.2010.5712513.
- [40] S. K. Khadem, M. Basu, and M. F. Conlon, "Integration of UPQC for Power Quality improvement in distributed generation network-a review," *IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Conference Europe*, 2011, doi: 10.1109/ISGTEurope.2011.6162813.
- [41] A. Windhorn, "A hybrid static/rotary UPS system," in *Fifth Annual Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC) Conference Proceedings*, 1990, pp. 416–419. doi: 10.1109/APEC.1990.66444.
- [42] MGE UPS Systems, "UPS topologies and standards," 1999.
- [43] J. Dixon, L. Morán, J. Rodríguez, and R. Domke, "Reactive power compensation technologies: State-of-the-art review," *Proceedings of the IEEE*, vol. 93, no. 12, pp. 2144–2163, 2005, doi: 10.1109/JPROC.2005.859937.
- [44] N. G. Hingoranl, L. Gyugyi, and M. E. El-Hawary, *Understanding FACTS: Concepts and technology of flexible ac transmission systems*. Wiley-IEEE Press, 1999. doi: 10.1109/9780470546802.

- [45] A. Ghosh and G. Ledwich, *Power Quality Enhancement Using Custom Power Devices*. 2002. doi: 10.1007/978-1-4615-1153-3.
- [46] A. Domijan, A. Montenegro, A. J. F. Keri, and K. E. Mattern, "Custom power devices: An interaction study," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 20, no. 2, pp. 1111–1118, 2005, doi: 10.1109/TPWRS.2005.846101.
- [47] J. Qirong, L. Chun, and X. Jianxin, "Investigation of voltage regulation stability of static synchronous compensator in power system," in *Power Engineering Society Winter Meeting, 2000*, 2000, vol. 00.
- [48] B. Singh, S. S. Murthy, and R. S. R. Chilipi, "STATCOM-based controller for a three-phase SEIG feeding single-phase loads," *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 29, no. 2, pp. 320–331, 2014, doi: 10.1109/TEC.2014.2299574.
- [49] C. Kumar and M. K. Mishra, "A voltage-controlled DSTATCOM for power-quality improvement," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 29, no. 3, pp. 1499–1507, 2014, doi: 10.1109/TPWRD.2014.2310234.
- [50] J. G. Nielsen, M. Newman, H. Nielsen, and F. Blaabjerg, "Control and testing of a dynamic voltage restorer (DVR) at medium voltage level," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 19, no. 3, pp. 806–813, 2004, doi: 10.1109/TPEL.2004.826504.
- [51] *Dranetz-BMI Power 4400 PowerGuide - User Guide*, Dranetz-BMI, .
- [52] IEEE Industry Applications Society. Static Power Converter Committee. and IEEE Power Engineering Society. Transmission and Distribution Committee., *IEEE recommended practices and requirements for harmonic control in electric power systems*. Institute of Electrical and Electronics Engineers, 1993.
- [53] S. Khader, A. Hadad, and A. A. Abu-Aisheh, "The application of PSIM and Matlab/ Simulink in power electronics courses," *2011 IEEE Global Engineering Education Conference, EDUCON 2011*, pp. 118–121, 2011, doi: 10.1109/EDUCON.2011.5773124.
- [54] A. Araujo, J. G. Pinto, B. Exposto, C. Couto, and J. L. Afonso, "Implementation and comparison of different switching techniques for shunt active power filters," *IECON Proceedings (Industrial Electronics Conference)*, pp. 1519–1525, 2014, doi: 10.1109/IECON.2014.7048703.

- [55] M. P. Kazmierkowski and M. A. Dzieaniakowski, "Review of current regulation techniques for three-phase PWM inverters," *IECON Proceedings (Industrial Electronics Conference)*, vol. 1, pp. 567–575, 1994, doi: 10.1109/iecon.1994.397839.
- [56] T. Santos, J. G. Pinto, P. Neves, D. Gonçalves, and J. L. Afonso, "Comparison of three control theories for single-phase active power filters," *IECON Proceedings (Industrial Electronics Conference)*, pp. 3637–3642, 2009, doi: 10.1109/IECON.2009.5415144.
- [57] M. Depenbrock, "The FBD-method, a generally applicable tool for analyzing power relations," in *ICHPS 1992 - International Conference on Harmonics in Power Systems*, 1992, pp. 135–141. doi: 10.1109/ICHPS.1992.559009.
- [58] Iu. A. Sirotin, "ORTHOGONAL COMPONENTS OF THE THREE-PHASE CURRENT AT ASYMMETRICAL ACTIVE - REACTIVE LOAD IN 4-WIRE CIRCUIT," *Electrical Engineering & Electromechanics*, vol. 0, no. 3, p. 62, Jun. 2016, doi: 10.20998/2074-272x.2016.3.10.
- [59] Hirofumi Akagi, Yoshihira Kanazawa, Koetsu Fujita, and Akira Nabae, "Generalized Theory of Instantaneous Reactive Power and Its Application," in *International Power Electronics Conference*, 1983, pp. 1375–1386.
- [60] João L. Afonso, M. J. Sepúlveda Freitas, and Júlio S. Martins, "p-q Theory power components calculations," in *2003 IEEE International Symposium*, 2003, pp. 385–390. doi: 10.1109/isie.2003.1267279.
- [61] "Apresentação." <https://zeben.pt/pt/apresentacao> (accessed Dec. 16, 2021).