

**Universidade do Minho**

Rui Manuel Marques Gomes

**Desenvolvimento de um Conversor CA-CC para o  
Condicionador Ativo Série de um UPQC Trifásico**

Dissertação submetida na Universidade do Minho  
para a obtenção do grau de  
Mestre em Engenharia Eletrónica e de Computadores

Trabalho realizado sob orientação do  
Doutor João Luiz Afonso

Maio 2019





*Aos meus pais e avó*



# Agradecimentos

A elaboração desta dissertação só foi possível com a ajuda do meu orientador Professor João Luiz Afonso, a quem agradeço o empenho, a dedicação, a disponibilidade, as sugestões oferecidas e o completo acesso ao laboratório do Grupo de Eletrónica de Potência e Energia.

Queria também agradecer aos Professores: Gabriel Pinto; Vítor Monteiro; Luís Barros e Tiago Sousa, pela ajuda, disponibilidade, espírito de equipa e pelo excelente ambiente presente no laboratório.

Um especial abraço aos meus pais, Ana Maria Antunes Marques e António Aires da Silva Gomes, bem como, à minha avó, Maria Rosa Antunes, pela paciência, por todo o amor demonstrado e pelo apoio incondicional que me foi dado.

Queria agradecer a todos os alunos do brilhante curso de Mestrado Integrado em Engenharia Eletrónica Industrial e Computadores, por me terem ajudado e apoiado, criando um bom ambiente de trabalho e camaradagem.

Este trabalho de mestrado está enquadrado no projeto “*ESGRIDS – Enhancing Smart GRIDs for Sustainability*”, financiado por Fundos FEDER através do Programa Operacional Competitividade e Internacionalização - COMPETE 2020 e por Fundos Nacionais através da FCT - Fundação para a Ciência e tecnologia, com a referência SAICTPAC/0004/2015 – POCI-01-0145-FEDER-016434.

Este trabalho de mestrado está enquadrado no projeto de IC&DT “*newERA4GRIDs – New Generation of Unified Power Conditioner with Advanced Control, Integrating Electric Mobility, Renewables, and Active Filtering Capabilities for the Power Grid Improvement*”, financiado pela Fundação para a Ciência e a Tecnologia, com a referência PTDC/EEI-EEE/30283/2017.



# Resumo

Com o crescente incremento do uso de cargas não-lineares, cada vez mais tem aumentado a degradação da qualidade de energia elétrica. Este aumento deve-se ao facto de que muitos dos equipamentos que utilizamos hoje em dia requerem que se converta a tensão alternada da rede elétrica em tensão contínua através de díodos ou tiristores. Estes equipamentos, chamados de cargas não-lineares, provocam vários tipos de problemas em relação à qualidade de energia elétrica, como distorção das formas de onda de tensão e corrente, sobreaquecimento de cabos de alimentação e transformadores, funcionamento incorreto de determinados equipamentos mais sensíveis, entre muitos outros problemas.

Para resolver essas questões, apresenta-se, nesta dissertação, o processo de desenvolvimento de um protótipo de um condicionador ativo série, o qual permite a compensação dos seguintes problemas de qualidade de energia elétrica: *sags*, *swells*, desequilíbrios e harmónicos de tensão. Esta dissertação destaca-se pelo facto de estar englobada num equipamento denominado UPQC (*Unified Power Quality Conditioner* – Condicionador Unificado de Qualidade de Energia Elétrica), que adicionalmente também integra uma interface com energias renováveis.

Ao longo deste documento é descrito, passo a passo, o estado da arte sobre o tema mencionado, sendo apresentado o levantamento de algumas topologias e algoritmos de controlo existentes, com ulterior escolha de cada um deles, bem como a implementação e teste com interpretação dos resultados obtidos.

## Palavras-Chave:

Compensação de Harmónicos, Cavas de tensão, Condicionador Ativo Série, Condicionador Unificado de Qualidade de Energia Elétrica, Desequilíbrios de Tensão, Eletrónica de Potência, Qualidade de Energia Elétrica, Sobretensões.



# Abstract

With the increasing raise of the use of non-linear loads, there has been a raise on the degradation of the electric power quality. This raise is due to the fact that many equipments we use nowadays require that the AC voltage of the electrical network needs to be converted to DC using diodes or thyristors. This hardware, called non-linear loads, causes various types of problems regarding to the electrical power quality, such has distortion of the waveforms of voltage and current, overheating of the power cables and transformers, malfunction of more sensitive equipment, among many other problems.

To solve these questions, is presented on this dissertation, the process of developing a prototype of an active conditioner series, which allows the compensation of the following electric power quality problems: sags, swells, imbalances and voltage harmonics. This dissertation stands out because it is included in a UPQC (Unified Power Quality Conditioner) in which integrates an interface with renewable energies.

Throughout this document, the state of the art on the mentioned topic is described step by step and presented the survey of some existing control algorithms, with subsequent choice of each one, as well as the implementation and test with interpretation of the obtained results.

## **Keywords:**

Harmonics Compensation, Power Electronics, Power Quality, Series Active Conditioner, Unified Power Quality Conditioner, Voltage Unbalances, Voltage Sags, Voltage Swells.



# ÍNDICE

Agradecimentos .....	v
Resumo.....	vii
Abstract.....	ix
Lista de Figuras.....	xiii
Lista de Tabelas .....	xv
Acrónimos e Siglas .....	xvii
Capítulo 1      Introdução .....	19
1.1      Qualidade da Energia Elétrica .....	19
1.1.1      Cavas de Tensão.....	19
1.1.2      Sobretensões.....	20
1.1.3      Desequilíbrios .....	20
1.1.4      Harmónicos de Tensão.....	21
1.2      Enquadramento .....	22
1.3      Motivações .....	22
1.4      Objetivos .....	23
1.5      Organização da Dissertação .....	23
Capítulo 2      Condicionadores Ativos Série .....	25
2.1      Introdução .....	25
2.2      Funcionamento de Conversores CA-CC Bidirecionais .....	26
2.2.1      Conversor Monofásico em Meia Ponte .....	26
2.2.2      Conversor Monofásico em Ponte Completa.....	27
2.2.3      Conversores Multinível.....	28
2.3      Topologias de Condicionadores Ativos de Potência .....	29
2.3.1      Conversor Trifásico de 2 Níveis, 3 Braços e 4 Fios .....	29
2.3.2      Conversor Trifásico de 3 Níveis, 3 Braços e 4 Fios .....	31
2.4      Teorias de Controlo para Condicionadores Ativos de Potência .....	31
2.4.1      Teoria p-q.....	32
2.5      Conclusões .....	33
2.5.1      Escolha da Topologia.....	34
2.5.2      Escolha da Teoria de Controlo .....	35
Capítulo 3      Simulação do Condicionador Ativo Série .....	37
3.1      Introdução .....	37
3.2      Funcionamento como Inversor.....	37
3.3      Funcionamento como Condicionador Ativo Série .....	42
3.4      Conclusão .....	45
Capítulo 4      Desenvolvimento do <i>Hardware</i> para o Condicionador Ativo Série .....	47
4.1      Introdução .....	47
4.2      Andar de Controlo .....	47

---

4.2.1	Sensores de Tensão .....	48
4.2.2	Circuito de Condicionamento de Sinal .....	49
4.2.3	Microprocessador.....	50
4.2.4	Circuito de Comando.....	51
4.2.5	Circuito de Drive .....	52
4.2.6	Circuito de Proteção dos IGBTs .....	52
4.2.7	Circuito dos Relés .....	53
4.2.8	Circuito de DAC .....	54
4.2.9	Fonte de Alimentação .....	54
4.2.10	Montagem Final do andar de controlo .....	55
4.3	Andar de potência .....	55
4.3.1	Semicondutores .....	56
4.3.2	Bobinas.....	56
4.3.3	Transformadores.....	57
4.3.4	Filtros Passivos .....	59
4.3.5	Condensadores para o barramento CC .....	59
4.3.6	Montagem Final do Andar de Potência .....	60
4.4	Conclusão .....	62
Capítulo 5	Validação Experimental do Condicionador Ativo Série .....	63
5.1	Introdução .....	63
5.2	Validação como Inversor .....	63
5.3	Validação como Condicionador Ativo Série .....	67
5.4	Conclusão .....	73
Capítulo 6	Conclusão .....	75
6.1	Conclusões Finais .....	75
6.2	Sugestões de Trabalho Futuro .....	77
Lista de Referências	.....	79

# Lista de Figuras

Figura 1.1. Exemplo de uma cava de tensão ou <i>voltage sag</i> .....	20
Figura 1.2. Exemplo de uma sobretensão ou <i>voltage swell</i> .....	20
Figura 1.3. Exemplo de um desequilíbrio de tensão num sistema trifásico.....	21
Figura 1.4. Exemplo de uma forma de onda com harmónicos de tensão. ....	22
Figura 2.1. Esquemático de um UPQC. ....	25
Figura 2.2. Diagrama representativo de um conversor do tipo: VSI (a) e CSI (b). ....	26
Figura 2.3. Conversor monofásico em meia ponte.....	26
Figura 2.4. Exemplo dos níveis de tensão à saída do conversor monofásico em meia ponte.....	27
Figura 2.5. Conversor monofásico em ponte completa.....	28
Figura 2.6. Comparação entre formas de onda de tensão à saída de conversores: (a) Meia ponte; (b) Ponte completa; (c) Multinível de 5 níveis; (d) Multinível de 9 níveis. ....	29
Figura 2.7. Topologia de condicionador ativo série 2 níveis, 3 braços e 4 fios. ....	30
Figura 2.8 Topologia de Condicionador ativo série de 3 níveis, 3 braços e 4 fios. ....	31
Figura 2.9 Esquema das grandezas presentes na teoria p-q. ....	33
Figura 2.10 Esquema da organização dos componentes do UPQC. ....	35
Figura 3.1 Modelo de simulação do condicionador ativo série como como inversor. ....	38
Figura 3.2 Resultados da simulação do condicionador ativo série como inversor sem filtro passivo.....	38
Figura 3.3 Modelo de simulação do condicionador ativo série como inversor com filtro passivo. ....	39
Figura 3.4 Resultados da simulação do condicionador ativo série como inversor com filtro passivo.....	39
Figura 3.5 Modelo de simulação do condicionador ativo série como inversor com controlo PI e filtro passivo. ....	40
Figura 3.6 Resultados da simulação do condicionador ativo série como inversor com controlo PI e filtro passivo. ....	40
Figura 3.7 Resultados da simulação do condicionador ativo série como inversor com controlo PI e sem filtro passivo. ....	41
Figura 3.8 Tensão da rede elétrica para simulação final do condicionador ativo série como inversor. ....	41
Figura 3.9 Resultados da simulação final do condicionador ativo série como inversor.....	42
Figura 3.10 Modelo de simulação do condicionador ativo série a compensar um <i>sag</i> .....	42
Figura 3.11 Resultados da simulação do condicionador ativo série a compensar um <i>sag</i> .....	43
Figura 3.12 Transitório da tensão quando o condicionador ativo série entra em funcionamento. ....	43
Figura 3.13 Resultados da simulação do condicionador ativo série a compensar um desequilíbrio de tensões. ....	43
Figura 3.14 Harmónicos na tensão da rede elétrica para o condicionador ativo série compensar.....	44
Figura 3.15 Resultados da simulação do condicionador ativo série a compensar harmónicos de tensão, juntamente com desequilíbrio de tensões na rede. ....	44
Figura 3.16 Comparação entre as tensões de referência produzidas pelo algoritmo de controlo e as tensões produzidas pelo condicionador ativo série.....	45
Figura 4.1 Esquema com os blocos do andar de controlo do condicionador ativo série. ....	47
Figura 4.2 Montagem final das placas onde os sensores de tensão estão inseridos. ....	48
Figura 4.3 Esquema elétrico dos sensores de tensão.....	49

Figura 4.4 Placa do circuito de condicionamento de sinal. ....	50
Figura 4.5 Microprocessador DSP TMS320F28335. ....	50
Figura 4.6 Placa para o DSP TMS320F28335. ....	51
Figura 4.7 Placa do circuito de comando. ....	52
Figura 4.8 Placa do circuito de drive. ....	52
Figura 4.9 Placa do circuito de proteção dos IGBTs. ....	53
Figura 4.10 Esquema de funcionamento do circuito dos relés. ....	53
Figura 4.11 Placa do circuito dos relés. ....	54
Figura 4.12 Placa do circuito de DAC. ....	54
Figura 4.13 Montagem final do andar de controlo. ....	55
Figura 4.14 Módulo de IGBTs utilizado. ....	56
Figura 4.15 Esquema elétrico do módulo de IGBTs. ....	56
Figura 4.16 Bobina de núcleo partilhado utilizada. ....	57
Figura 4.17 Transformador utilizado. ....	58
Figura 4.18 Filtro passivo utilizado. ....	59
Figura 4.19 Condensador eletrolítico utilizado. ....	60
Figura 4.20 Esquema de ligações do barramento CC. ....	60
Figura 4.21 Montagem final do protótipo do UPQC. ....	61
Figura 5.1 Circuito de validação do condicionador ativo série como inversor. ....	64
Figura 5.2 Resultado experimental do condicionador ativo série como inversor com PWM a 50 % (20 V/div): (a) Fase A; (b) Fase B; (c) Fase C. ....	65
Figura 5.3 Resultado experimental do condicionador ativo série como inversor com onda sinusoidal de referência (5 V/div). ....	65
Figura 5.4 Resultado experimental do condicionador ativo série como inversor usando algoritmo de malha fechada ( $V_{Condicionador}$ : 10 V/div; $V_{DAC}$ : 1 V/div). ....	66
Figura 5.5 Circuito de validação do condicionador ativo série como inversor com transformadores de acoplamento. ....	67
Figura 5.6 Resultado experimental do condicionador ativo série como inversor a compensar problemas de QEE presentes na rede elétrica ( $V_{Condicionador}$ : 5 V/div; $V_{DAC}$ : 200 mV/div). ....	67
Figura 5.7 Modelo de simulação do ensaio final do condicionador ativo série. ....	68
Figura 5.8 Circuito do ensaio final. ....	69
Figura 5.9 Resultados da simulação do ensaio final do condicionador ativo série de acordo com o <i>hardware</i> presente no ensaio real. ....	70
Figura 5.10 Harmónicos de tensão na rede elétrica no ensaio final. ....	71
Figura 5.11 Tensões da rede elétrica no ensaio final. ....	71
Figura 5.12 Resultado experimental de comparação entre a rede elétrica e a tensão na carga no ensaio final (20 V/div). ....	72
Figura 5.13 Harmónicos de tensão na onda compensada. ....	72
Figura 5.14 Tensões na carga no ensaio final. ....	73

# Lista de Tabelas

Tabela 2.1 Níveis de tensão do conversor monofásico em meia ponte. ....	27
Tabela 2.2 Níveis de tensão do conversor monofásico em ponte completa. ....	28
Tabela 4.1 Valores das indutâncias das bobinas. ....	57
Tabela 4.2 Características dos transformadores utilizados. ....	59



# Acrónimos e Siglas

<b>Acrónimo / Sigla</b>	<b>Significado</b>
ADC	<i>Analog-to-Digital</i>
DAC	<i>Digital-to-Analog</i>
DSP	<i>Digital Signal Processor</i>
CA	Corrente Alternada
CC	Corrente Contínua
THD	<i>Total Harmonic Distortion</i>
GEPE	Grupo de Eletrónica de Potência e Energia
VSI	<i>Voltage source inverter</i>
CSI	<i>Current source inverter</i>
PLL	<i>Phase Locked Loop</i>
UPQC	<i>Unified Power Quality Conditioner</i>



# Capítulo 1

## Introdução

### 1.1 Qualidade da Energia Elétrica

Atualmente, devido ao aumento progressivo da utilização de cargas não-lineares, cada vez mais se tem ampliado a degradação da qualidade da energia elétrica.

Este incremento do número de cargas não-lineares deriva do facto de que muitos dos equipamentos que usamos com sistemas de controlo eletrónicos no dia-a-dia, como é o caso dos computadores, telemóveis, televisões, entre outros, convertem a tensão alternada da rede elétrica em tensão contínua, através de conversores a díodos ou a tiristores, provocando, entre outros problemas, o funcionamento defeituoso de algumas cargas sensíveis, interferências, degradação e sobreaquecimento de alguns equipamentos. Além disso, como muitas das cargas não-lineares utilizadas são normalmente monofásicas, surgem também problemas de desequilíbrios de tensões e correntes no sistema trifásico.

Para se poder entender melhor o conceito de qualidade de energia elétrica, são descritos, de seguida, alguns dos problemas mais comuns, no enquadramento desta dissertação, de acordo com a norma NP-EN 50160.

#### 1.1.1 Cavas de Tensão

Um evento de cava de tensão ou *voltage sag* acontece quando o valor eficaz da tensão da rede elétrica é menor do que 90 % do que o valor nominal, tendo normalmente uma duração inferior a 1 s.

De acordo com a norma NP-EN 50160, a soma de todos os eventos de *sag* não pode ultrapassar 5 % do tempo total em que a rede está a funcionar, ou seja, em 95 % do tempo a tensão eficaz da rede tem de estar acima dos 90 %. As medidas são feitas pela média da tensão eficaz da rede em intervalos de 10 minutos.

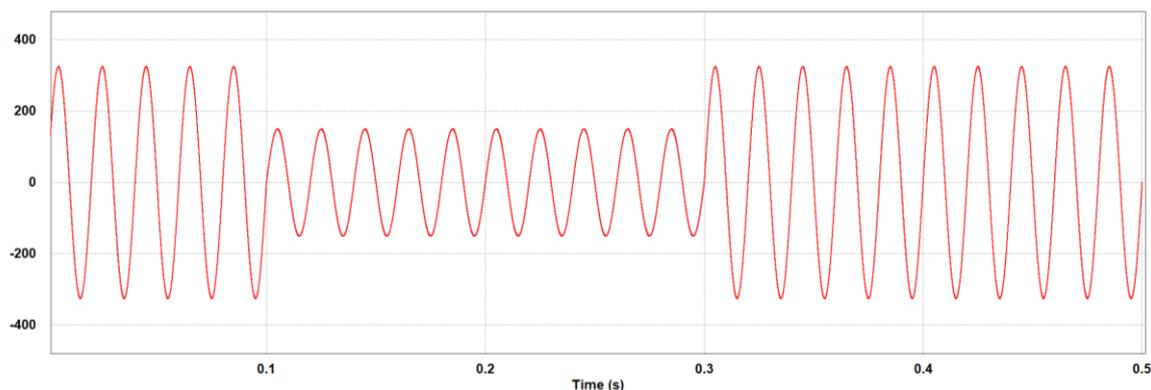


Figura 1.1. Exemplo de uma cava de tensão ou *voltage sag*.

### 1.1.2 Sobretensões

O problema de qualidade de energia elétrica designado por *voltage swell* ou sobretensão consiste numa subida no valor eficaz da tensão da rede elétrica para mais do que 110 % do que o seu valor nominal e durante um tempo superior a 10 ms, sendo que quando este evento dura menos do que esse tempo é designado por sobretensão transitória ou transitórios de tensão.

Para estar em conformidade com a norma NP-EN 50160, a tensão eficaz da rede não deve ultrapassar 110 % do valor nominal. As condições de medida aplicam-se igualmente como para os *sags*.

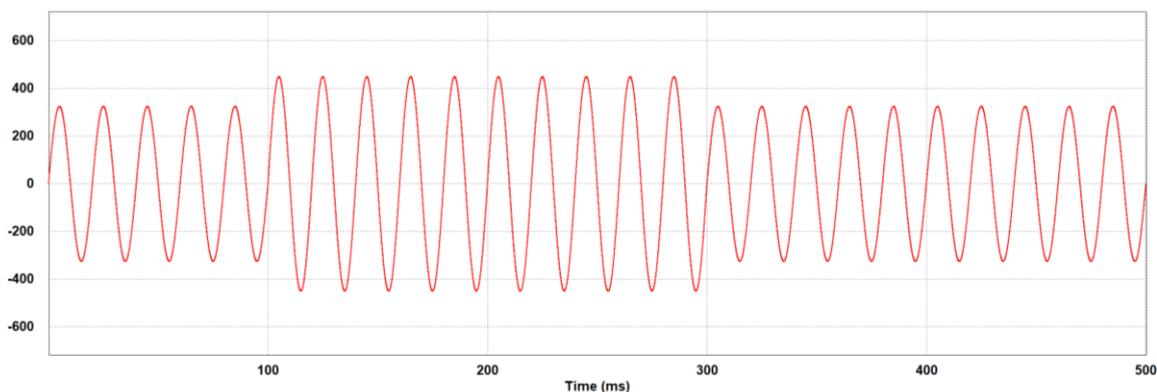


Figura 1.2. Exemplo de uma sobretensão ou *voltage swell*.

### 1.1.3 Desequilíbrios

Um desequilíbrio da tensão da rede elétrica, como o nome indica, é um evento que existe quando num sistema polifásico os valores eficazes das tensões são diferentes.

Para um desequilíbrio das tensões da rede elétrica ser aceitável de acordo com a norma descrita NP-EN 50160, para cada intervalo de uma semana, os valores eficazes médios durante 10 minutos da componente inversa não devem ultrapassar 2 % da componente direta.

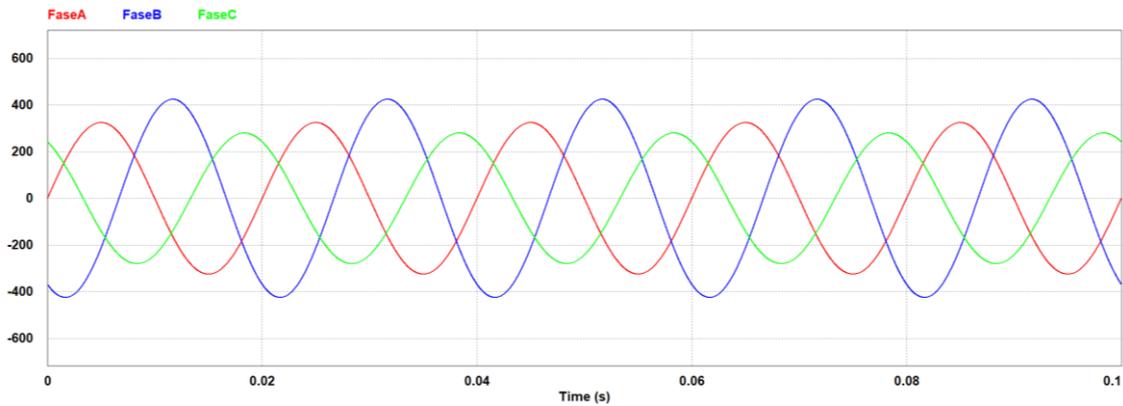


Figura 1.3. Exemplo de um desequilíbrio de tensão num sistema trifásico.

### 1.1.4 Harmónicos de Tensão

Os harmónicos são sinais sinusoidais, sendo a sua frequência múltipla de uma fundamental. Quando uma onda é influenciada por harmónicos, esta é distorcida.

Os harmónicos, associados às ondas de tensão, são o produto de uma série de acontecimentos que começam nas correntes distorcidas consumidas por cargas não-lineares, as quais, quando percorrem o trajeto desde o produtor até ao consumidor final (carga não-linear), passam pela impedância da rede, fazendo com que a tensão da rede tenha harmónicos.

Para se entender melhor o impacto dos harmónicos, existem maneiras de se determinar o quão influenciada está a onda. A maneira mais utilizada é o THD (*Total Harmonic Distortion*), cujo cálculo é o seguinte:

$$THD = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{h=\infty} U_h^2}}{U_f} \times 100 \quad (1.1)$$

Os  $U_h$  são os valores eficazes dos sinais harmónicos de ordem  $h$  e o  $U_f$  é o valor eficaz da onda com a frequência fundamental.

Para estar em conformidade com a norma NP-EN 50160, o valor de THD não deve ser maior do que 8 % para os primeiros 40 harmónicos.

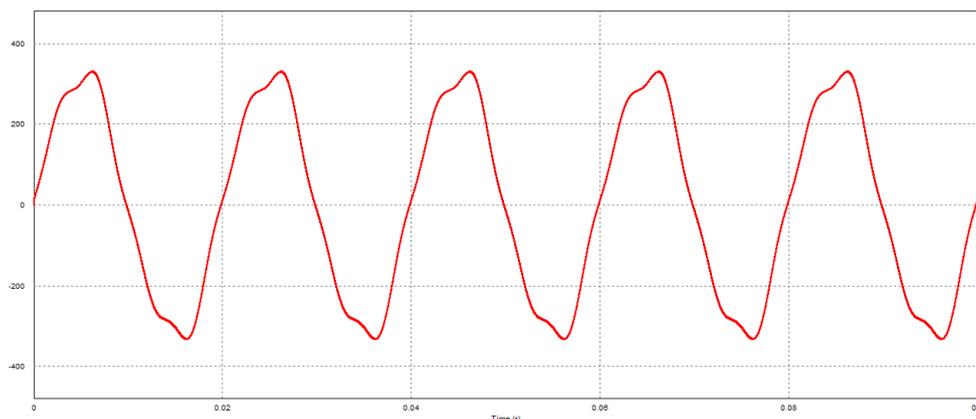


Figura 1.4. Exemplo de uma forma de onda com harmônicos de tensão.

## 1.2 Enquadramento

De forma a colmatar estes problemas, são utilizados equipamentos de eletrónica de potência, dos quais se destacam os filtros ativos paralelos, os filtros ativos série e os condicionadores ativos de potência (identificados na literatura por *unified power quality conditioner* - UPQC). Estas soluções ativas permitem corrigir algumas das precariedades dos filtros passivos, como por exemplo: só podem filtrar a frequência para que foram projetados; podem causar ressonâncias; e só podem operar para uma determinada carga.

No âmbito desta dissertação, será desenvolvido um filtro ativo série que, posteriormente, será enquadrado num UPQC.

## 1.3 Motivações

Tendo por base a qualidade da energia elétrica, a investigação efetuada nesta área pelo Grupo de Eletrónica de Potência e Energia (GEPE) e a matéria lecionada na unidade curricular de Filtros Ativos de Potência, decidi continuar essa investigação, não só com a intenção de continuar esse trabalho, mas também de ganhar experiência nas diversas áreas envolventes nesta dissertação, das quais se destacam o desenvolvimento de *hardware* e *software*. A par das motivações citadas, e não menos importante, está a contribuição para o progresso da tecnologia nacional, pois o projeto de desenvolvimento de um *unified power quality conditioner* (UPQC), no qual a minha dissertação está integrada, é inovador, visto que, graças à interface com energias renováveis e um módulo de armazenamento de energia, este UPQC conseguirá obter funcionalidades que outros UPQCs não ostentam.

Outra das motivações, além de aumentar a qualidade de energia elétrica para o utilizador, é a de reduzir o *stress* que os geradores que a rede de distribuição usufrui. Neste sentido, este trabalho de dissertação tem benefícios tanto na parte do consumidor, como na parte da produção da energia.

## 1.4 Objetivos

Esta dissertação tem como objetivos: o desenvolvimento de um condicionador ativo série que consiga resolver os seguintes problemas de QEE:

- Cavas de tensão;
- Sobretensões;
- Desequilíbrios de tensão;
- Harmónicos de tensão;

A elaboração deste projeto observa os seguintes passos:

- Estudo de topologias e teorias de controlo para conversores CA-CC trifásicos bidirecionais;
- Estudo sobre filtros ativos de potência;
- Simulação do conversor CA-CC como inversor
- Simulação do conversor CA-CC como condicionador ativo série;
- Implementação do conversor CA-CC como inversor;
- Teste do conversor CA-CC como inversor;
- Simulação do conversor CA-CC trifásico bidirecional como condicionador ativo série
- Teste do conversor CA-CC trifásico bidirecional como condicionador ativo série

## 1.5 Organização da Dissertação

Esta dissertação encontra-se dividida em 6 capítulos que estão dispostos no seguinte formato:

O primeiro capítulo serve como introdução aos problemas de qualidade de energia elétrica relacionados com o tema desta dissertação, contemplando ainda uma breve referência às cargas não-lineares.

No segundo capítulo, é apresentado o funcionamento dos equipamentos utilizados para resolver os problemas mencionados no capítulo anterior. Também são expostas algumas topologias e estratégias de controlo para os equipamentos, bem como uma escolha justificada para os mesmos.

O terceiro capítulo engloba todas as simulações necessárias para a validação do que foi escolhido no capítulo anterior com a ajuda do software PSIM.

No quarto capítulo, é descrita a construção do protótipo com todos os seus componentes, desde o andar de controlo até ao andar de potência.

No quinto capítulo, são realizados os testes para a validação experimental do protótipo e uma exposição dos resultados obtidos. Este capítulo apresenta uma estrutura semelhante ao do terceiro capítulo para uma mais fácil compreensão dos resultados apresentados.

Por último, o sexto capítulo contém as conclusões tiradas com a finalização deste trabalho, bem sugestões de trabalho futuro para continuar o trabalho desenvolvido.

# Capítulo 2

## Condicionadores Ativos Série

### 2.1 Introdução

Um filtro ativo série é um equipamento utilizado principalmente para corrigir os harmónicos existentes nas formas de onda da tensão, ligado em série com a rede elétrica, e que consegue gerar harmónicos em oposição de fase aos encontrados na rede elétrica, neutralizando-os. A sua constituição normalmente engloba um conversor CA-CC bidirecional, podendo ser monofásico ou polifásico, funcionando como inversor para gerar as formas de onda pretendidas. Este filtro também pode ser utilizado para compensar *sags*, *swells* e desequilíbrios de tensão no sistema trifásico [1].

Como exemplificado na Figura 2.1, quando um filtro ativo série e um filtro ativo paralelo estão a operar em conjunto - equipamento designado por UPQC[2] -, o filtro ativo série passa a chamar-se de condicionador ativo série e o filtro paralelo de condicionador ativo paralelo. Este equipamento consegue englobar as vantagens de ambos os filtros, podendo ainda compensar *sags* e *swells* durante longos períodos de tempo [1].

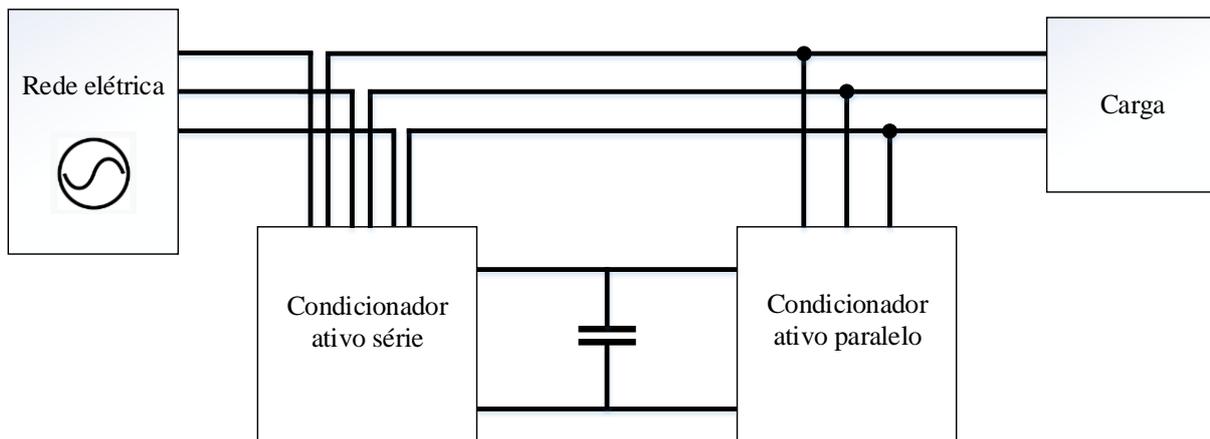


Figura 2.1. Esquemático de um UPQC.

Neste capítulo, analisar-se-ão as topologias de conversores CA-CC e as teorias de controlo para implementar no condicionador ativo.

## 2.2 Funcionamento de Conversores CA-CC Bidirecionais

Antes de passar para o estudo das topologias de um condicionador ativo série, é necessário entender como é que funciona um conversor mais simples, neste caso um conversor CA-CC monofásico, que é a base das topologias de condicionadores ativos de potência.

Este tipo de conversores, cuja principal diferença reside no modo como armazenam a energia, pode ser dividido em dois grupos: inversores como fonte de corrente (*current source inverter* – CSI) e inversores como fonte de tensão (*voltage source inverter* – VSI). Como os próprios nomes indicam, o VSI mantém a tensão no barramento CC constante utilizando um condensador, enquanto o CSI mantém a corrente constante no barramento CC através de uma bobina. Para este tipo de aplicações, como é o caso dos conversores necessários para o desenvolvimento da UPQC, é mais usual utilizar-se o VSI, pois este tipo de conversores é mais fiável, mais eficiente e possui um tempo de resposta menor quando comparado ao CSI [3]. Na Figura 2.2, está representada a principal diferença entre estes dois grupos de inversores.

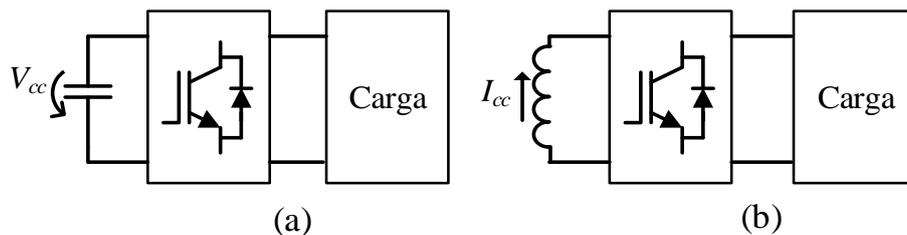


Figura 2.2. Diagrama representativo de um conversor do tipo: VSI (a) e CSI (b).

### 2.2.1 Conversor Monofásico em Meia Ponte

Este tipo de conversores monofásicos representa a topologia mais simples que se pode implementar num filtro ativo série ou um paralelo. Como se pode ver na Figura 2.3, esta topologia só necessita de dois semicondutores e de dois condensadores.

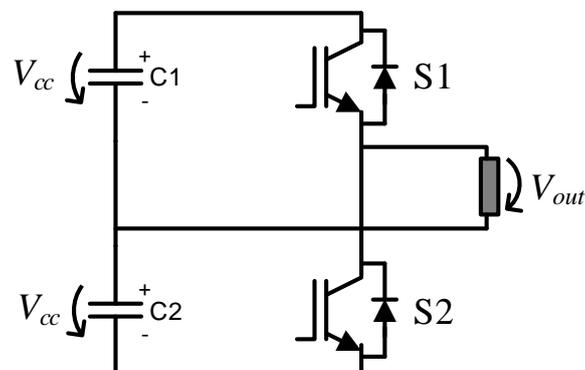


Figura 2.3. Conversor monofásico em meia ponte.

Com esta topologia, é possível obter dois níveis de tensão à saída do conversor, dependendo do estado de condução dos semicondutores, sendo que estes não podem entrar em condução simultaneamente, correndo o risco de ocorrer um curto-circuito. Na Figura 2.4, está representado o modo como o conversor alcança os dois níveis de tensão.

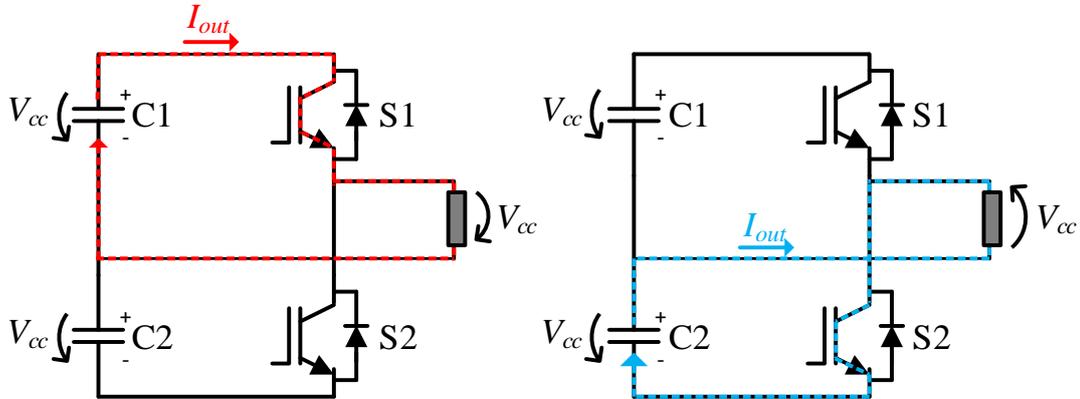


Figura 2.4. Exemplo dos níveis de tensão à saída do conversor monofásico em meia ponte.

Com estes dados, consegue-se obter uma tabela com os níveis de tensão em função do estado dos semicondutores:

Tabela 2.1 Níveis de tensão do conversor monofásico em meia ponte.

$S_1$	$S_2$	$V_{out}$	Estado
On	Off	$+V_{cc}$	1
Off	On	$-V_{cc}$	2

### 2.2.2 Conversor Monofásico em Ponte Completa

A Figura 2.5 representa a topologia em ponte completa. Esta já é mais complexa, tendo dois braços, cada um deles com 2 de semicondutores. Graças ao aumento de semicondutores, à saída do conversor já se consegue obter 3 níveis de tensão, sendo necessário apenas um condensador para servir de fonte de tensão, o que significa que é mais fácil regular a tensão no mesmo.

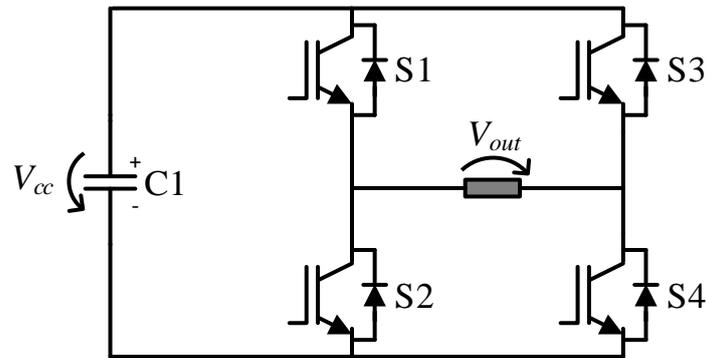


Figura 2.5. Conversor monofásico em ponte completa.

Para o conversor funcionar sem problemas, os semicondutores de cada braço não podem fechar ao mesmo tempo, como sucedia na topologia em meia ponte.

Existem 4 estados possíveis, dois deles com o mesmo nível de tensão, como se pode observar na Tabela 2.2.

Tabela 2.2 Níveis de tensão do conversor monofásico em ponte completa.

S <sub>1</sub>	S <sub>2</sub>	S <sub>3</sub>	S <sub>4</sub>	V <sub>out</sub>	Estado
On	Off	Off	On	+V <sub>cc</sub>	1
Off	On	On	Off	-V <sub>cc</sub>	2
On	Off	On	Off	0	3
Off	On	Off	On	0	4

Ainda existem outros conversores em que se consegue obter os 3 níveis de tensão à saída, constituindo exemplos dos mesmos o *diode clamped inverter* e o *flying capacitor inverter* [4].

### 2.2.3 Conversores Multinível

As topologias multinível, como o próprio nome indica, são conversores em que o nível de saída oferece múltiplos níveis de tensão, que vão desde os mais simples de 5 níveis [5] até alguns mais complexos de 23 níveis [6], podendo ter ainda mais pois quanto mais semicondutores o conversor tiver, mais níveis de tensão se pode obter à saída. Estes conversores nasceram da necessidade de obter níveis baixos de *ripple* tanto na tensão como na corrente de saída dos mesmos. Apesar de requerem muitos mais semicondutores, não precisam de suportar tensões muito elevadas à saída, baixando o

investimento necessário por semicondutor, exemplificando em [4], onde se pode ver uma comparação de custos entre conversores de 2 e 3 níveis.

Na Figura 2.6, é possível ver-se algumas ondas de saída destes conversores, comparando com os introduzidos anteriormente.

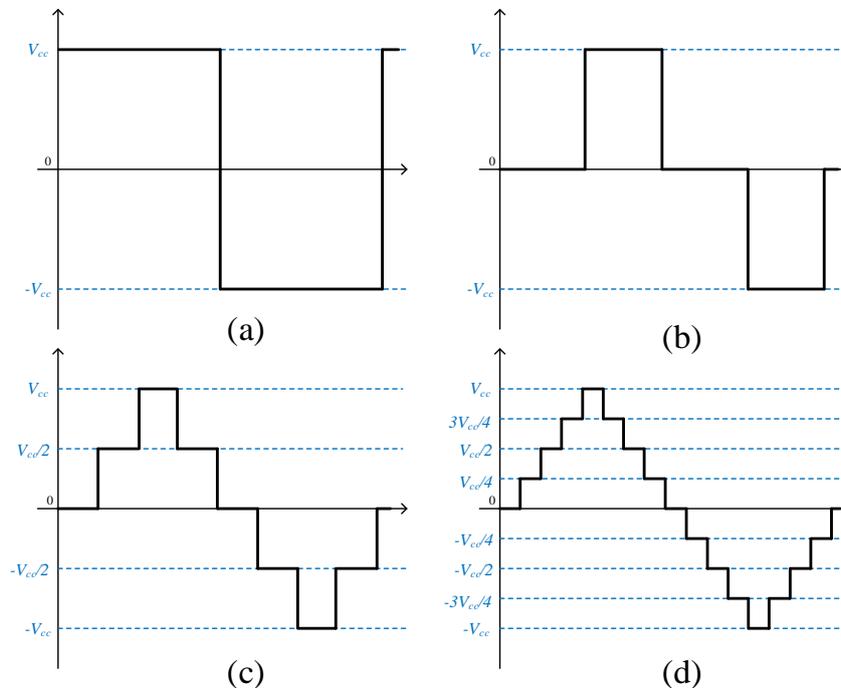


Figura 2.6. Comparação entre formas de onda de tensão à saída de conversores: (a) Meia ponte; (b) Ponte completa; (c) Multinível de 5 níveis; (d) Multinível de 9 níveis.

## 2.3 Topologias de Condicionadores Ativos de Potência

Neste subcapítulo serão apresentadas algumas topologias de conversores CA-CC, desde as topologias mais simples com apenas dois níveis de tensão, até algumas mais complexas com mais níveis. Estas topologias podem variar no número de níveis de tensão, no número de fios ligados à rede, no número de braços e no número de semicondutores em cada braço.

Apesar de a maior parte das topologias ser semelhante, existem topologias menos usuais, descritas em [7].

### 2.3.1 Conversor Trifásico de 2 Níveis, 3 Braços e 4 Fios

Esta topologia, representada pela Figura 2.7, é a mais simples e mais tradicional para este tipo de aplicações[8], pois apresenta um menor número de componentes, quando comparado com outras topologias para este tipo de finalidade.

É constituído por 3 conversores monofásicos em meia ponte, cada um ligado a uma das fases da rede elétrica, sendo por isso classificado como tendo 3 braços. Esta topologia possui 4 fios devido ao facto de 3 deles estarem ligados à rede elétrica e o restante faz ligação com o ponto médio do barramento CC.

A principal vantagem deste conversor é a de ser facilmente implementada, tanto no sistema de controlo como na sua construção. Em cada braço estão presentes 2 semicondutores, sendo estes os constituintes do conversor em meia ponte e um filtro passivo constituído por uma indutância com o objetivo de filtrar a corrente de saída do conversor, e uma resistência juntamente com um condensador para filtrar o ruído produzido pela comutação dos semicondutores.

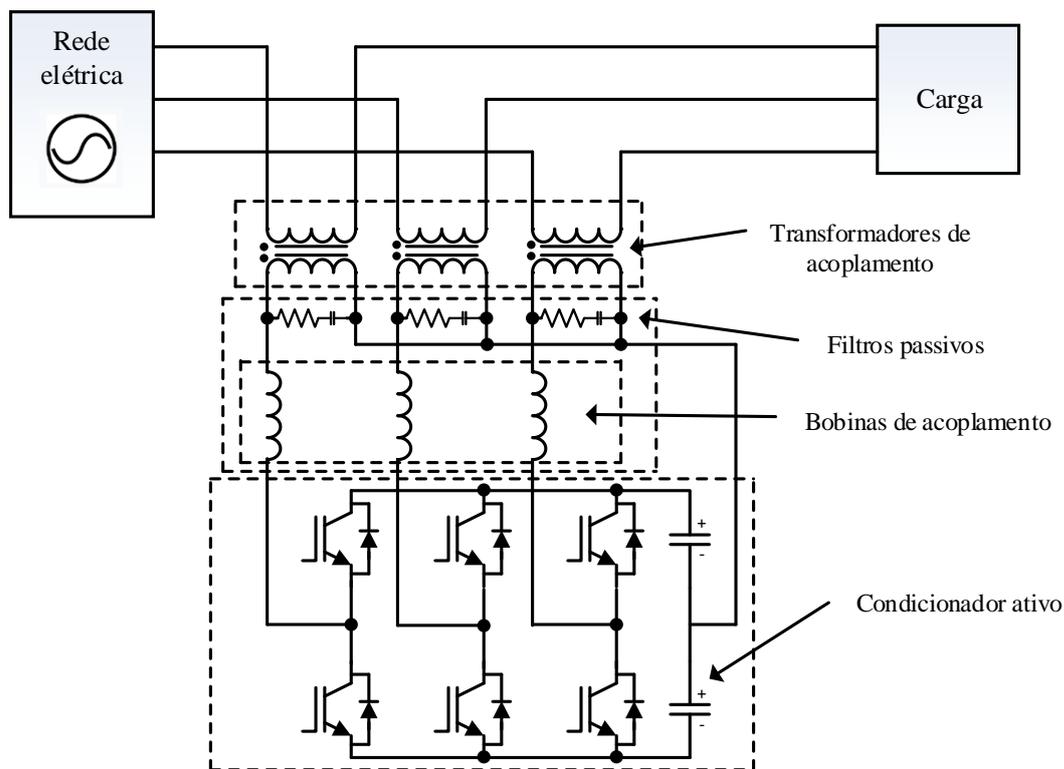


Figura 2.7. Topologia de condicionador ativo série 2 níveis, 3 braços e 4 fios.

Os transformadores são utilizados para acoplar cada braço do conversor à sua respetiva fase da rede elétrica, proporcionando também isolamento galvânico para o mesmo. Os conversores que utilizam este tipo de acoplamento à rede elétrica conseguem corrigir os distúrbios na tensão, aplicando uma tensão no primário do transformador que está diretamente ligado ao conversor, que, subsequentemente, aplica essa mesma tensão no secundário do transformador, modificando a onda da tensão que a carga usufrui.

### 2.3.2 Conversor Trifásico de 3 Níveis, 3 Braços e 4 Fios

A topologia de 3 níveis, 3 braços e 4 fios encontra-se representada na Figura 2.8. Comparando-a com a topologia apresentada anteriormente, apresenta mais 2 semicondutores em cada braço, com o objetivo de se obter 3 níveis de tensão à saída do conversor.

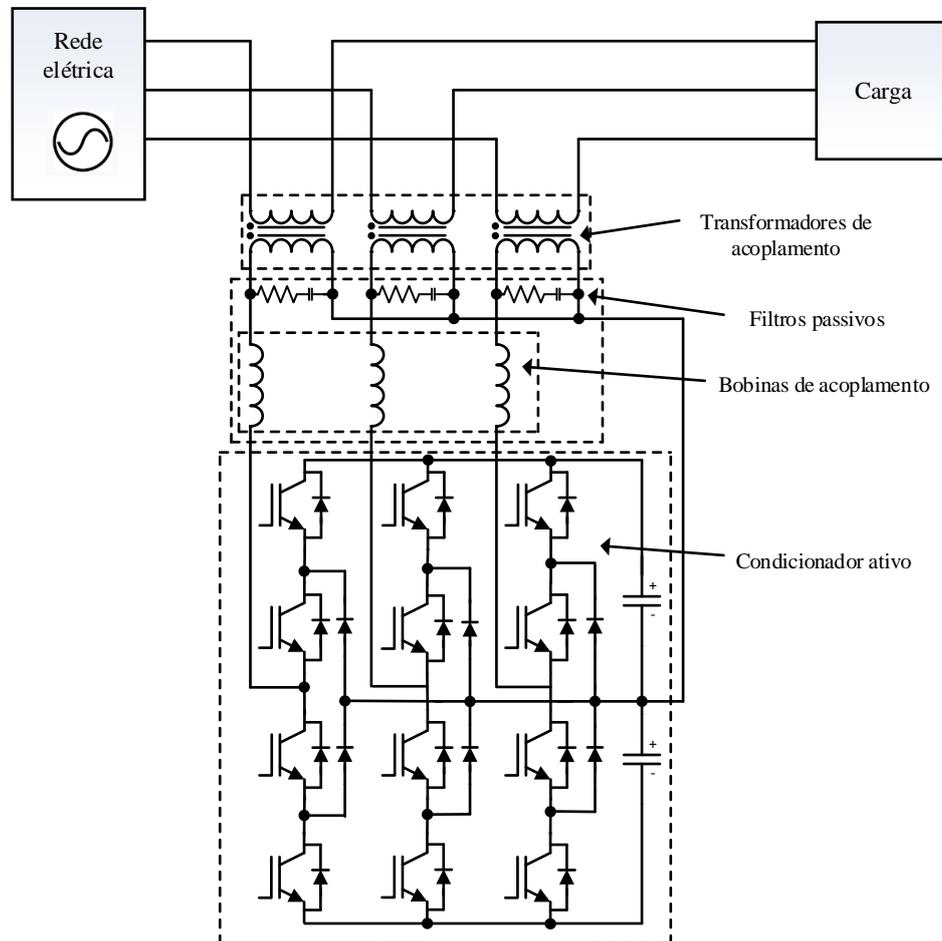


Figura 2.8 Topologia de Condicionador ativo série de 3 níveis, 3 braços e 4 fios.

## 2.4 Teorias de Controlo para Condicionadores Ativos de Potência

Neste subcapítulo, expõem-se algumas das teorias mais comuns utilizadas no ramo dos filtros e nos condicionadores ativos, como é exemplo a teoria p-q [9], a teoria d-q [10][11] e a FBD (Fryze-Buchholz-Depenbrock) [12][13].

Este subcapítulo tem uma breve explicação da teoria p-q, que é a teoria utilizada pelo condicionador ativo paralelo no UPQC em que esta dissertação está inserida, sendo também explicada no subcapítulo seguinte a teoria utilizada no condicionador ativo série.

### 2.4.1 Teoria p-q

Esta teoria foi inicialmente desenvolvida para ser utilizada em sistemas trifásicos de 3 fios (sem condutor neutro) [14], podendo ser utilizada para sistemas trifásicos com 4 fios (condutor neutro) [15][16]. Sendo esta teoria baseada no domínio do tempo, e tendo os valores utilizados significado físico, esta teoria é facilmente compreendida e adotada tanto em filtros ativos série como em filtros ativos paralelos.

A teoria p-q consiste na conversão das tensões e das correntes do sistema trifásico num sistema de coordenadas denominado por  $\alpha$ - $\beta$ -0, utilizando-se a transformada de Clark.

$$\begin{bmatrix} v_0 \\ v_\alpha \\ v_\beta \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1/2 & 1/2 & 1/2 \\ 1 & -1/2 & -1/2 \\ 0 & \sqrt{3}/2 & \sqrt{3}/2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_{an} \\ v_{bn} \\ v_{cn} \end{bmatrix} \quad (2.1)$$

$$\begin{bmatrix} i_0 \\ i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1/2 & 1/2 & 1/2 \\ 1 & -1/2 & -1/2 \\ 0 & \sqrt{3}/2 & \sqrt{3}/2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{an} \\ i_{bn} \\ i_{cn} \end{bmatrix} \quad (2.2)$$

Começando das equações (2.1) e (2.2), pode-se calcular a potência real instantânea ( $p$ ), a potência imaginária instantânea ( $q$ ) e a potência instantânea de sequência 0 ( $p_0$ ), utilizando os valores das correntes e tensões, como se pode ver em (2.3), (2.4), (2,5):

$$p = v_\alpha i_\alpha + v_\beta i_\beta \quad (2.3)$$

$$q = v_\beta i_\alpha - v_\alpha i_\beta \quad (2.4)$$

$$p_0 = v_0 i_0 \quad (2.5)$$

Finalmente, reagrupando equações anteriores num formato de matriz, temos o seguinte resultado:

$$\begin{bmatrix} p_0 \\ p \\ q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_0 & 0 & 0 \\ 0 & v_\alpha & v_\beta \\ 0 & -v_\beta & v_\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_0 \\ i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} \quad (2.6)$$

A partir desta matriz, consegue-se deduzir várias equações, como é exemplo a potência do sistema trifásico, no qual esta teoria está inserida:

$$p_{3\phi} = v_\alpha i_\alpha + v_\beta i_\beta + v_0 i_0 = p + p_0 = \bar{p}_{3\phi} + \tilde{p}_{3\phi} \quad (2.7)$$

Como já foi apresentado anteriormente, cada uma das grandezas presentes no plano  $\alpha\beta\text{-}0$  ( $p_0$ ,  $p$ ,  $q$ ) apresenta significado físico, em que  $\bar{p}$  representa o valor médio da potência real instantânea, ou seja, a energia transferida da fonte para a carga através das fases do sistema trifásico, e a sua componente alternada  $\tilde{p}$ , representa a energia que é trocada entre a fonte e a carga, sendo esta uma das parcelas que deve ser compensada.

A potência instantânea de sequência 0 ( $p_0$ ) representa a transferência de energia pelas componentes de sequência 0 da tensão e corrente, através do neutro e de uma ou mais fases do sistema trifásico. Esta grandeza também apresenta uma componente média  $\bar{p}_0$  que corresponde à transferência de energia da fonte para a carga, e uma componente alternada  $\tilde{p}_0$  que representa a energia trocada entre a fonte a carga.

Finalmente, temos a potência imaginária instantânea ( $q$ ), que representa a energia que é trocada entre as diferentes fases do sistema trifásico, não contribuindo para a transferência de energia entre a fonte e a carga, tendo esta também uma componente média  $\bar{q}$  e uma componente alternada  $\tilde{q}$ .

Com isto, é possível apresentar estas grandezas graficamente numa imagem para uma mais fácil compreensão.

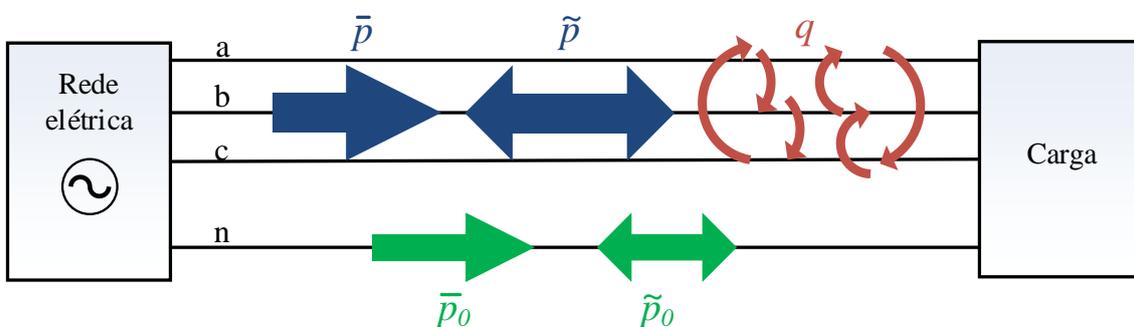


Figura 2.9 Esquema das grandezas presentes na teoria p-q.

## 2.5 Conclusões

Depois de apresentadas algumas topologias de conversores CC-CA bidirecionais e teorias de controlo para o condicionador, é apresentado neste subcapítulo a minha escolha dos mesmos para ser aplicado neste trabalho de mestrado.

### 2.5.1 Escolha da Topologia

A topologia adotada para este condicionador ativo série é a de um conversor a 2 níveis, 3 braços e 4 fios, pois a simplicidade da sua estrutura, quando comparada a outras, como a apresentada em 2.3.2, facilita a construção do mesmo. Também foi escolhido o ponto médio do barramento CC para ligação ao secundário dos transformadores, pois o condicionador ativo paralelo da UPQC faz compensação das correntes do neutro da rede elétrica.

Como esta topologia é compacta, devido a um menor número de componentes, é possível implementar os 3 conversores presentes neste UPQC no mesmo espaço, minimizando o tamanho total do equipamento. Na Figura 2.10, o esquema que se observa revela como está planeada a inserção dos conversores no interior da estrutura que constitui o UPQC.

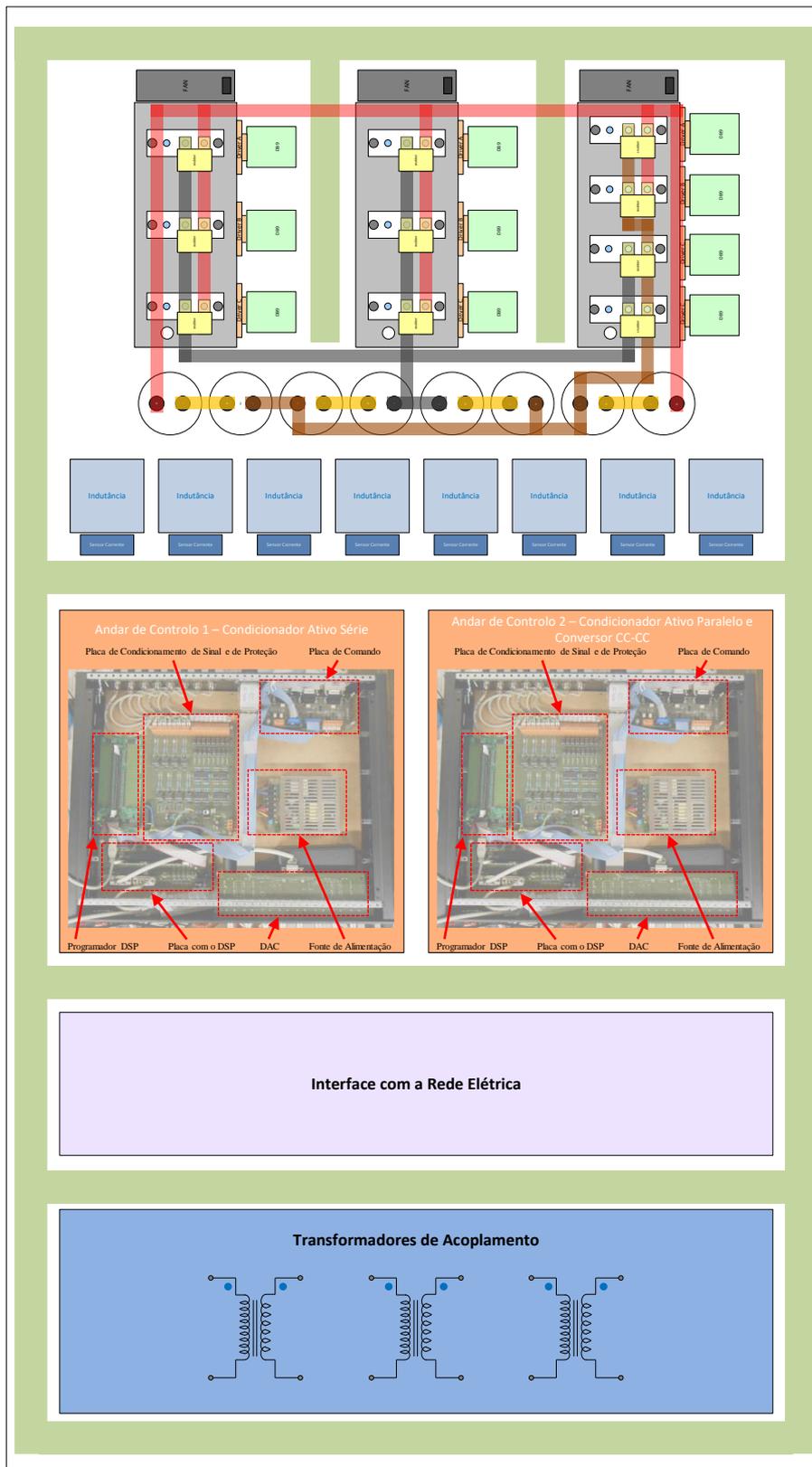


Figura 2.10 Esquema da organização dos componentes do UPQC.

## 2.5.2 Escolha da Teoria de Controlo

A teoria de controlo adotada para este conversor é uma teoria de controlo PI (proporcional integral), pois a sua simplicidade torna-a fácil de implementar.

Como o próprio nome indica, nesta técnica de controlo, está presente uma parcela proporcional e outra integral que contribuem para a forma da onda de tensão que vai servir de referencial para ser produzida pelos IGBTs.

Para chegar à onda referencial é necessário calcular o erro entre a tensão da rede e a tensão produzida pelo conversor.

$$v_{erro} = v_g - 325 \times pll - v_{conv} \quad (2.8)$$

Onde  $v_g$  é a tensão na rede e  $v_{conv}$  é a tensão à saída do conversor. Para calcular o erro também é necessária uma PLL (*Phase Locked Loop*) com o objetivo de esta ser uma senoide perfeita de 50 Hz com amplitude 1, em fase com a rede, sendo mais tarde multiplicada por 325 para servir de referencial para o conversor. A PLL sintetizada é uma Karimi PLL, que é um tipo de PLL muito utilizado para aplicações de eletrónica de potência [17]. Isto deveu-se ao facto de ser aproveitado um algoritmo desta PLL, sendo que esta é monofásica, mas para resolver esse problema basta replicar 3 ondas, havendo um deslocamento de fase entre elas, correspondente às três fases do sistema triásico da rede elétrica.

Depois de calculado o erro, basta utilizar a expressão (2.9) para chegar à onda final que vai fazer de referência de tensão para o inversor produzir.

$$v_{conv} = k_p v_{erro} + k_i \int_0^t v_{erro} dt \quad (2.9)$$

Para transformar a onda de referência numa tensão à saída do conversor é utilizado um algoritmo de SPWM (*Sinusoidal Pulse Width Modulation*)[18], onde o sinal de saída que é aplicado no terminal de *gate* dos semicondutores é o resultado de uma comparação entre uma onda de referência e uma onda portadora, sendo que neste caso a onda de referência é o  $v_{conv}$  e a onda portadora é uma onda dente de serra.

## Capítulo 3

### Simulação do Condicionador Ativo Série

#### 3.1 Introdução

Este capítulo integra o trabalho de simulações feito no âmbito desta dissertação graças à ferramenta de simulação PSIM. Esta ferramenta foi escolhida não só por ser um software específico para simulações de eletrónica de potência, mas também devido à sua simplicidade e facilidade de utilização, como são exemplo as ferramentas de análise de resultados e a capacidade de simular um sistema de controlo, usando tanto um microcontrolador como circuitos lógicos simples.

Todas as simulações serão feitas com a topologia proposta no capítulo anterior, com a possível necessidade de pequenas alterações mediante os resultados que se pretendam obter.

A estrutura deste capítulo apresentará algumas semelhanças com os testes que se irão fazer com o protótipo do condicionador para um mais fácil entendimento do funcionamento do mesmo.

#### 3.2 Funcionamento como Inversor

Neste subcapítulo, vai ser validada primeiramente a topologia escolhida, seguida da teoria de controlo. Antes de o conversor funcionar como condicionador ativo, é preciso que ele funcione como inversor, para ter a certeza que este conseguirá produzir as tensões necessárias para eliminar os problemas de qualidade de energia da rede elétrica. Com isto foi projetado um circuito na ferramenta PSIM apresentado na Figura 3.1.

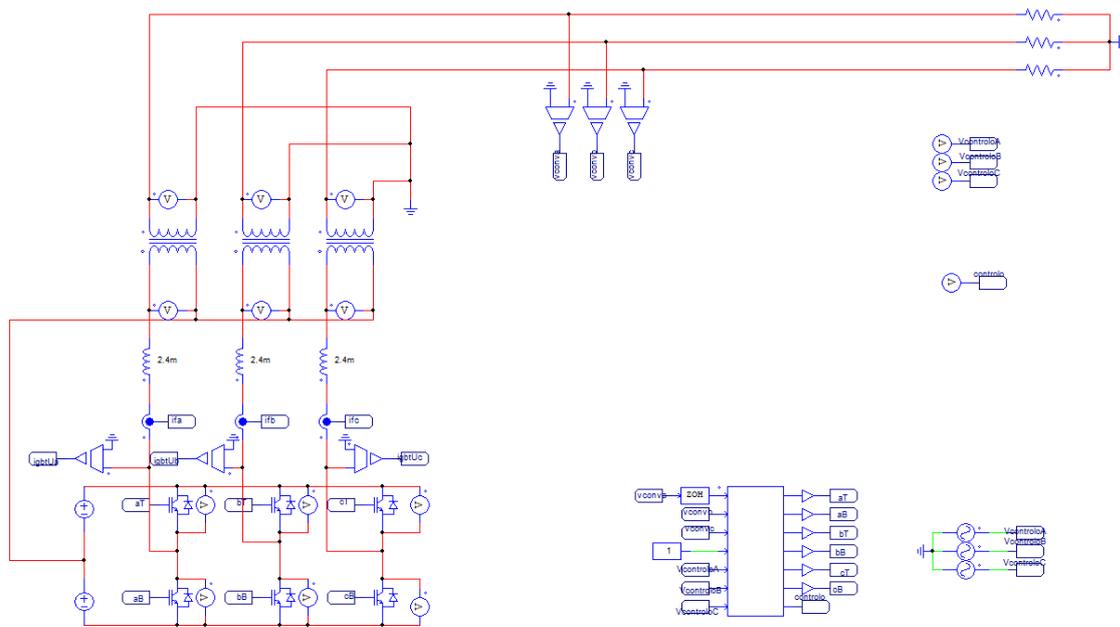


Figura 3.1 Modelo de simulação do condicionador ativo série como inversor.

Para controlar este conversor ainda não foi utilizado o algoritmo de controlo proposto no capítulo anterior para produzir as tensões de referência. Nesta primeira simulação, foram utilizadas 3 ondas sinusoidais com a mesma amplitude da rede elétrica, comparando-as com as produzidas pelo inversor para então obter a onda de saída. Para poder sintetizar uma onda de saída, o barramento CC foi constituído por duas fontes de tensão de 400 V para simular os condensadores pré-carregados do condicionador ativo paralelo do UPQC. A frequência de comutação dos semicondutores é de 20 kHz

As ondas de saída, como se pode ver na Figura 3.2, não são satisfatórias, pois apresentam grandes distorções, tendo estas um THD de 55,1 % demasiado grande para este tipo de aplicação, dado que, para estar de acordo com a norma NP-EN 50160, é necessário que o THD seja inferior a 8 % nos primeiros 40 harmónicos.

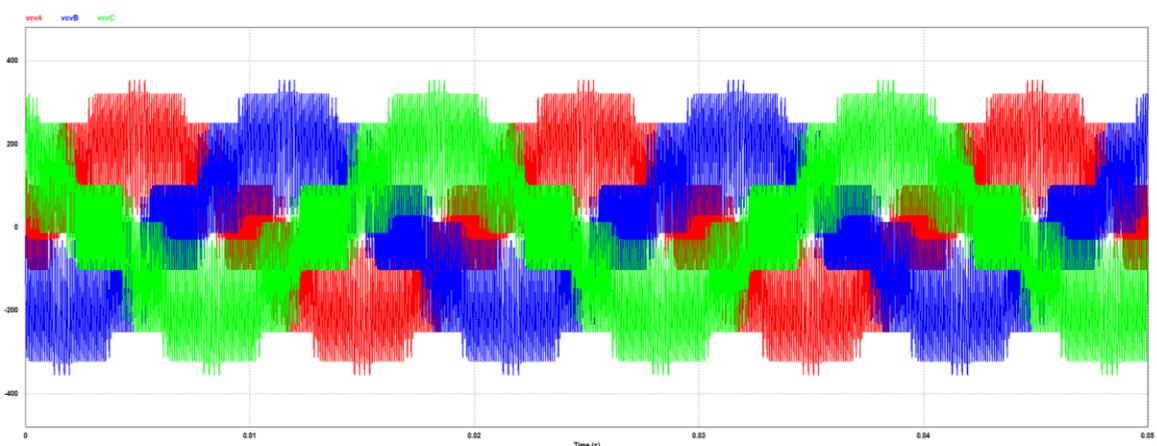


Figura 3.2 Resultados da simulação do condicionador ativo série como inversor sem filtro passivo

Em presença deste cenário, é necessário dimensionar um filtro passivo para eliminar o ruído presente nas ondas de saída. O filtro mencionado será semelhante aos que estão presentes nas topologias do capítulo 2, de que é exemplo a Figura 2.7, sendo que este tem uma resistência de  $4\ \Omega$  e um condensador de  $10\ \mu\text{F}$ , que, combinado com a indutância de  $2,4\ \text{mH}$ , faz com que o filtro passivo tenha uma frequência de corte por volta dos  $1000\ \text{Hz}$ . A escolha deste filtro deveu-se à frequência de corte adequada para esta aplicação.

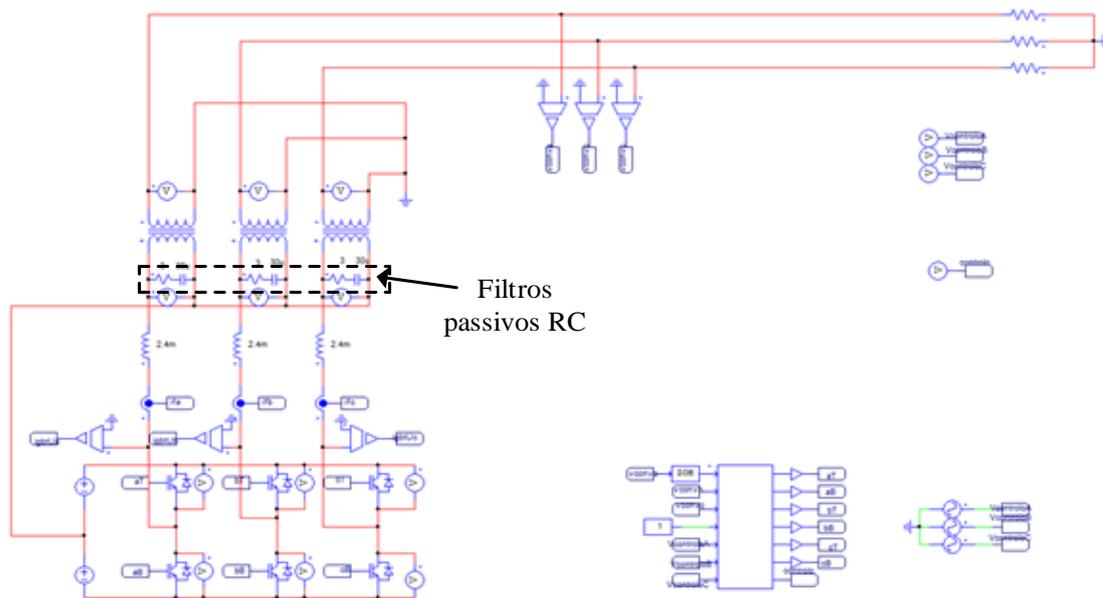


Figura 3.3 Modelo de simulação do condicionador ativo série como inversor com filtro passivo.

Com esta alteração evidenciada pela Figura 3.3, as ondas sintetizadas pelo conversor podem-se ver na Figura 3.4, tendo um THD de  $4,4\ \%$ .

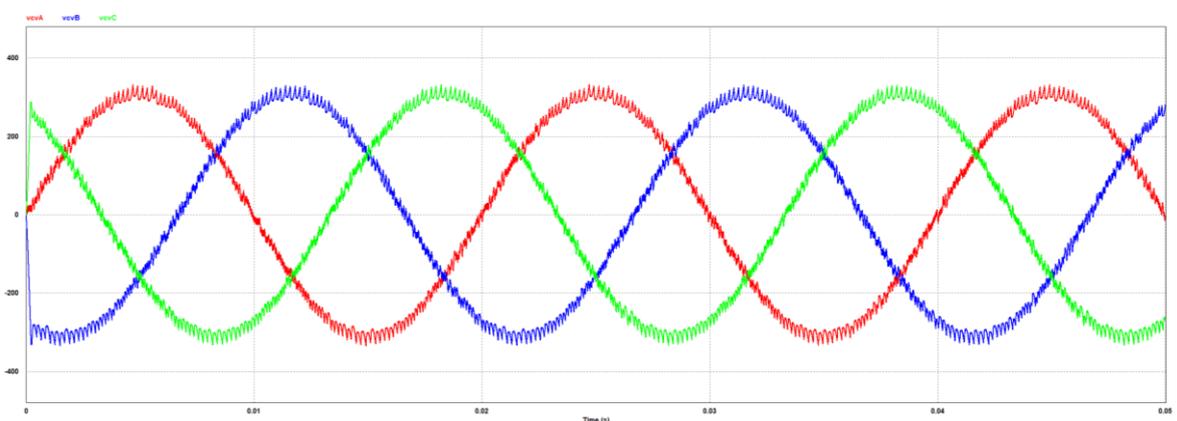


Figura 3.4 Resultados da simulação do condicionador ativo série como inversor com filtro passivo.

Depois de algumas alterações ao sistema de controlo descritas na Figura 3.5, nomeadamente utilizando o controlo proposto no capítulo anterior e mantendo a mesma frequência de comutação,

conseguiram-se umas ondas à saída do inversor com um THD de 1,8 %, como se pode ver na Figura 3.6.

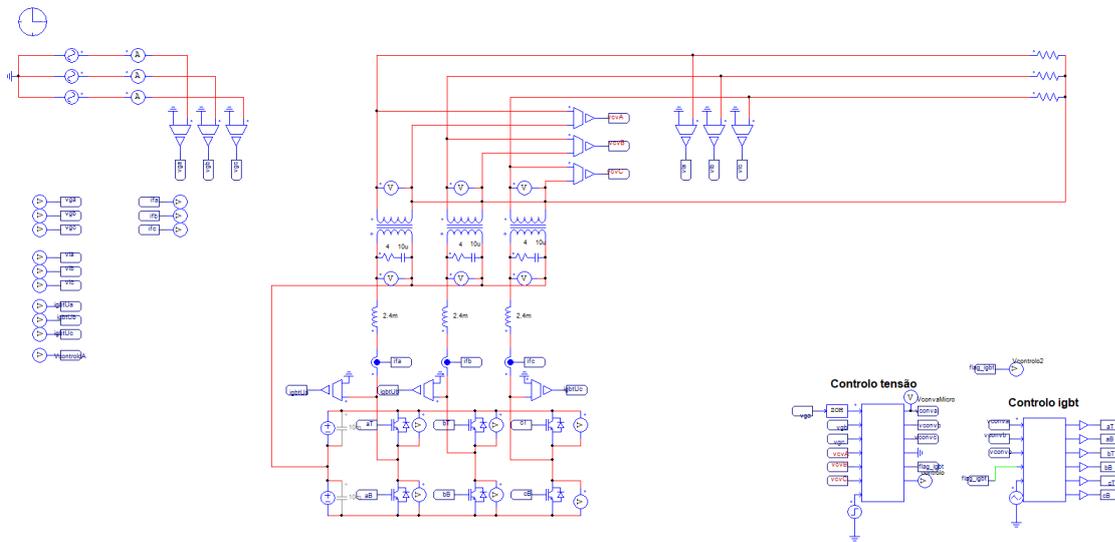


Figura 3.5 Modelo de simulação do condicionador ativo série como inversor com controlo PI e filtro passivo.

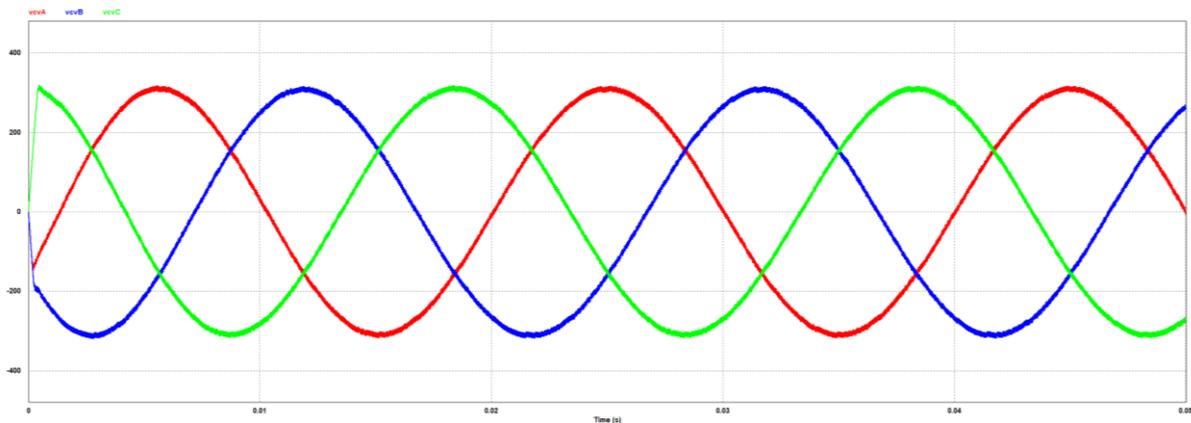


Figura 3.6 Resultados da simulação do condicionador ativo série como inversor com controlo PI e filtro passivo.

Para melhor demonstrar a eficácia deste algoritmo de controlo, efetuou-se uma simulação com as mesmas condições da anterior, mas sem a utilização do filtro passivo. O THD desta onda era de 3,3 %, sendo que, comparando com o resultado da simulação anterior, o THD da onda de saída ainda está a cumprir a norma NP-EN 50160. Com isto demonstrado, ainda é necessário o filtro passivo, pois este, apesar de pouco, reduz a distorção da onda de saída.

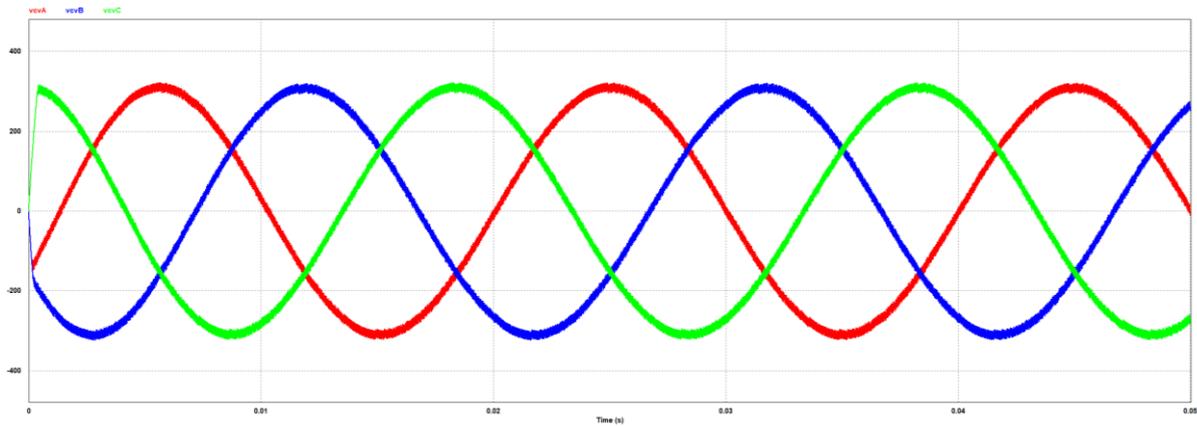


Figura 3.7 Resultados da simulação do condicionador ativo série como inversor com controlo PI e sem filtro passivo.

Para finalizar este subcapítulo, é preciso testar se o conversor consegue produzir uma onda de tensão passível de seguir a referência resultante do algoritmo de controlo, para que este funcione como condicionador ativo de potência. Para isso, foi simulada uma rede elétrica com presença de harmónicos, como se pode ver pela Figura 3.8, tendo a fase A 16 % de THD, a fase B 18 % e a fase C 23 %.

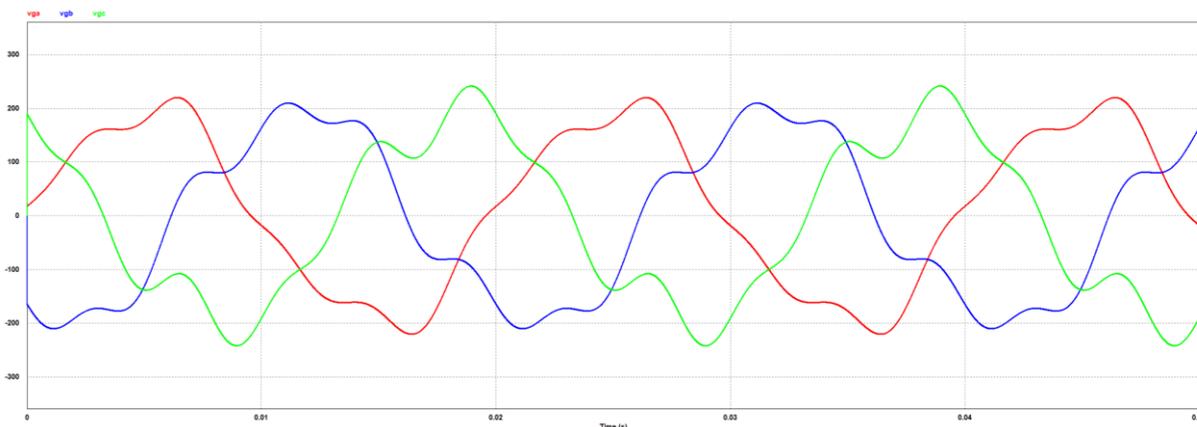


Figura 3.8 Tensão da rede elétrica para simulação final do condicionador ativo série como inversor.

Neste teste o conversor vai produzir as ondas necessárias para compensar os problemas de QEE presentes na rede simulada, sendo que as cargas ainda só vão estar ligadas ao conversor e não à rede elétrica.

Na Figura 3.9, podem-se ver as ondas produzidas pelo conversor, no gráfico de cima, e, no gráfico de baixo, a subtração da onda da rede com a onda produzida, sendo esta a onda compensada que estaria a alimentar as cargas se esta estivesse ligada à rede com o conversor ligado em série. A onda resultante tem um THD de 2 % para a fase A e 2,1 % para as fases B e C.

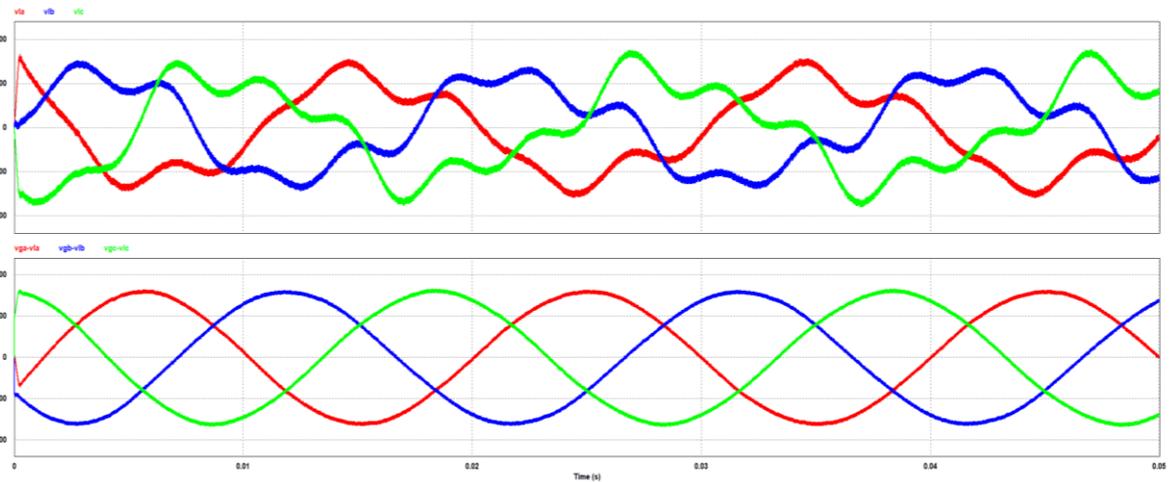


Figura 3.9 Resultados da simulação final do condicionador ativo série como inversor

### 3.3 Funcionamento como Condicionador Ativo Série

Tendo a simulação anterior resultados satisfatórios, pretende-se agora que o conversor funcione como condicionador ativo série, sendo necessárias mais algumas alterações para que o mesmo alcance o funcionamento pretendido.

Estas alterações, descritas na Figura 3.10, mostram o conversor ligado como condicionador, o que vai compensar uma subtensão ou *sag* na rede elétrica.

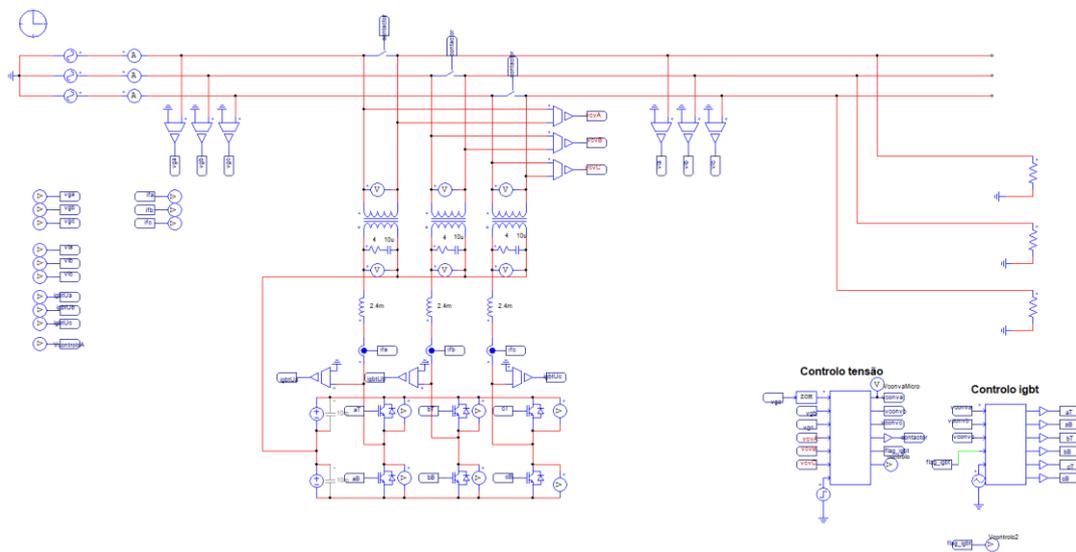


Figura 3.10 Modelo de simulação do condicionador ativo série a compensar um *sag*.

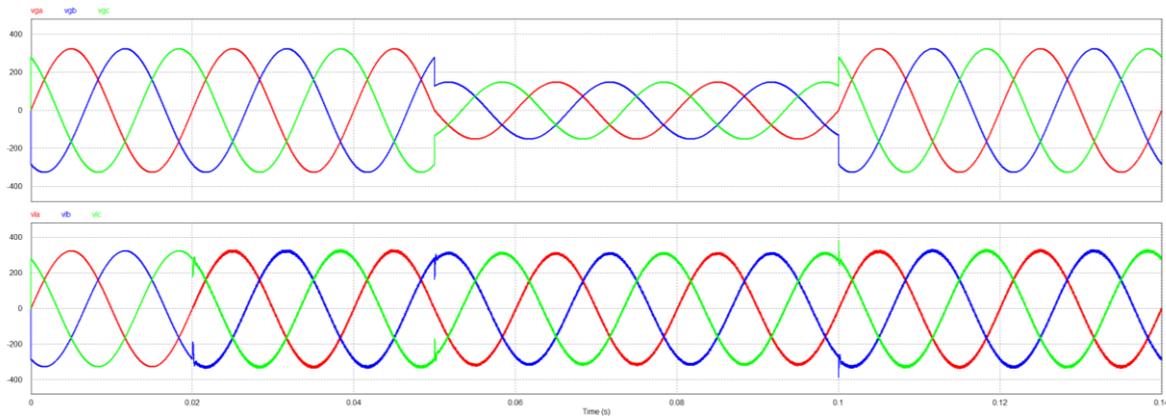


Figura 3.11 Resultados da simulação do condicionador ativo série a compensar um *sag*.

Como se pode ver na Figura 3.11, sendo que no gráfico de baixo temos as tensões da rede e no gráfico de cima as da carga, o condicionador consegue compensar o problema de qualidade de energia, com a onda de entrada da carga com um THD de 1,73 %. Na Figura 3.12, é possível ver o instante em que o condicionador é ligado, sendo evidente a sua rápida resposta ao evento de *sag*.

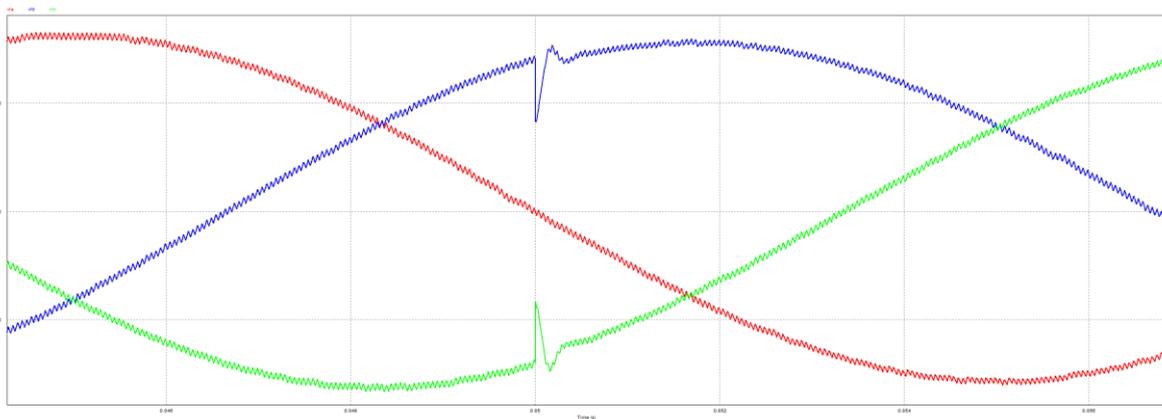


Figura 3.12 Transitório da tensão quando o condicionador ativo série entra em funcionamento.

De seguida, fez-se uma simulação em que a rede elétrica estava com um desequilíbrio nas tensões, sendo que a fase A tinha 141 V de tensão eficaz, a fase B tinha 255 V e a fase C tinha 177 V.

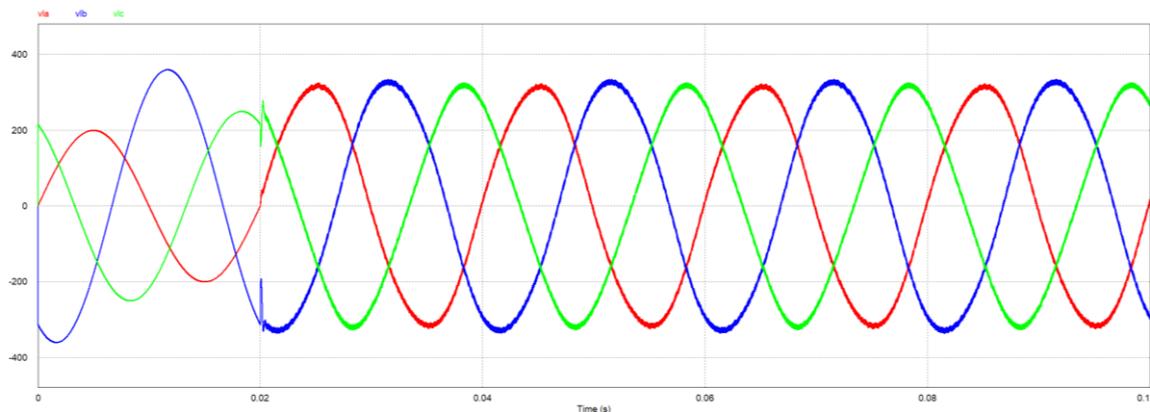


Figura 3.13 Resultados da simulação do condicionador ativo série a compensar um desequilíbrio de tensões.

Mediante os resultados demonstrados na Figura 3.13, pode-se concluir que o condicionador compensa o desequilíbrio, pois as ondas compensadas em cada uma das fases apresentam uma tensão eficaz de 225 V, 235 V e 224 V respetivamente e um THD de 2,4 %.

Para a situação seguinte, foi simulado cenário idêntico ao da terceira, mas com a adição de harmónicos na rede elétrica, podendo-se ver a respetiva onda na Figura 3.14, sendo evidente a sua extrema distorção harmónica de 31,4 % na fase A , 8,7 % na fase B e 18,2 % na fase C.

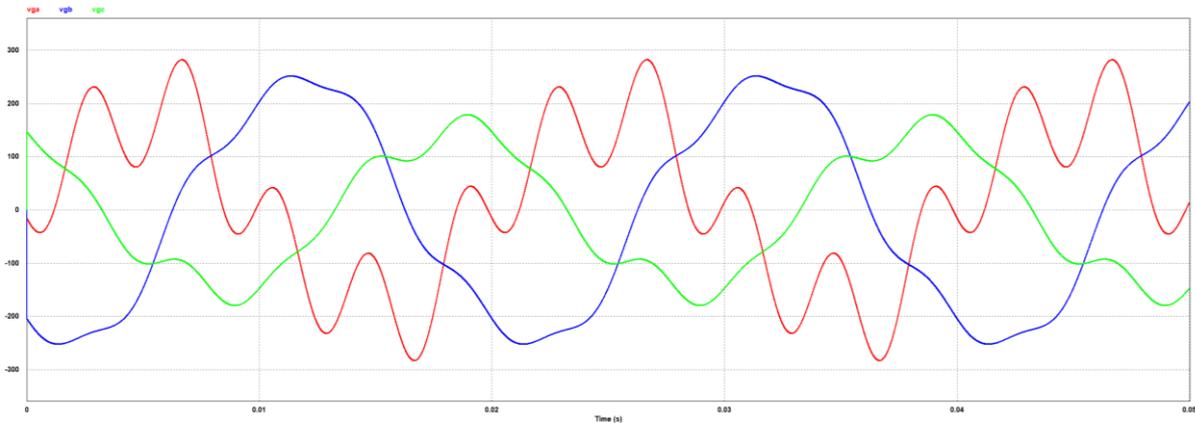


Figura 3.14 Harmónicos na tensão da rede elétrica para o condicionador ativo série compensar.

Depois de simulada a entrada do filtro em funcionamento, os problemas de qualidade de energia presentes na rede elétrica são resolvidos, como se observa na Figura 3.15, sendo que a onda de tensão da carga tem um THD de 4 % na fase A e 2 % na fase B e C.

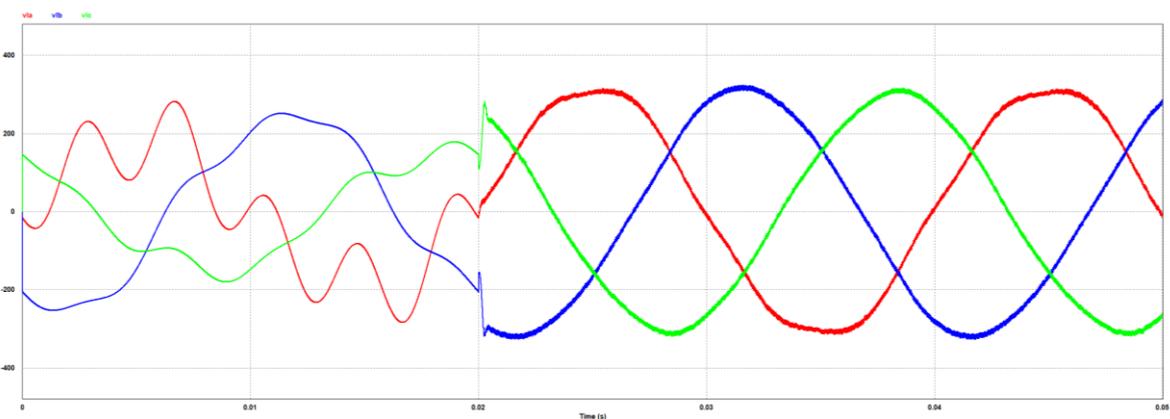


Figura 3.15 Resultados da simulação do condicionador ativo série a compensar harmónicos de tensão, juntamente com desequilíbrio de tensões na rede.

Na Figura 3.16 temos presente as referências produzidas pelo conversor, juntamente com a tensão produzida pelo mesmo. Como se pode ver, a tensão produzida consegue acompanhar a tensão de referência do algoritmo de controlo.

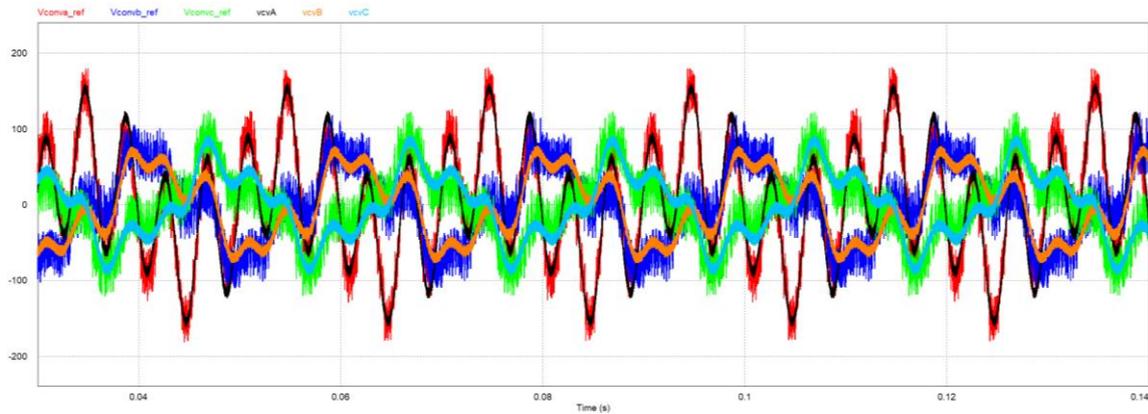


Figura 3.16 Comparação entre as tensões de referência produzidas pelo algoritmo de controlo e as tensões produzidas pelo condicionador ativo série.

### 3.4 Conclusão

Ao longo deste capítulo, com a ajuda da ferramenta de *software* de simulação PSIM conseguiram-se fazer as simulações implícitas nos tópicos apresentados de seguida:

- Primeiro, realizou-se a simulação da topologia do conversor proposta no capítulo anterior como inversor;
- Posteriormente, procedeu-se ao entendimento do impacto que o filtro passivo tinha no conversor;
- De seguida, procedeu-se à validação da teoria de controlo descrita no capítulo anterior;
- Para acabar a primeira parte do capítulo, fez-se uma simulação do conversor a funcionar como inversor, mas a seguir uma onda de referência do algoritmo de controlo, para ter a certeza que este se conseguiria comportar como um condicionador ativo série;
- Numa segunda parte, o conversor foi testado para funcionar como um condicionador ativo série, introduzindo no modelo de simulação diversos problemas de qualidade de energia elétrica para este compensar, começando com um *sag*, passando para um desequilíbrio, e finalmente harmónicos de tensão.

Esta metodologia permitiu proceder à validação do conversor como condicionador ativo série, fazendo simulações com os problemas de qualidade de energia presentes na rede elétrica e descritos no primeiro capítulo.

Com os resultados obtidos neste capítulo, é legítimo concluir que os requisitos necessários para o início da construção do conversor estão cumpridos, visto que nas simulações este consegue compensar rapidamente os problemas de qualidade de energia, usando a topologia e a teoria de controlo propostos no segundo capítulo.



# Capítulo 4

## Desenvolvimento do *Hardware* para o Condicionador Ativo Série

### 4.1 Introdução

Neste capítulo, vai ser apresentado o processo de desenvolvimento do *hardware* para o condicionador ativo série. Numa primeira parte, explicar-se-á como é que o *hardware* do andar de controlo vai funcionar, desde os sensores de tensão até à placa de comando que controla os *drivers* dos semicondutores. Depois, apresentar-se-á a construção do andar de potência que envolve todos os componentes da topologia proposta no segundo capítulo.

As placas de circuito impresso relativas ao andar de controlo foram desenvolvidas por investigadores do Grupo de Eletrónica de Potência e Energia (GEPE) da Universidade do Minho, sendo que alguns componentes foram redimensionados para poderem ser compatíveis com esta dissertação. Depois de estas serem impressas, foi a minha responsabilidade de soldar todos os seus componentes, montar as placas no seu respetivo sítio e testá-las para garantir o seu funcionamento nos ensaios do conversor.

### 4.2 Andar de Controlo

Como já referi, nesta parte vai ser explicado o circuito do andar de controlo e do funcionamento de cada um dos seus constituintes. Na Figura 4.1, está presente, de forma resumida, o esquema do andar de controlo.

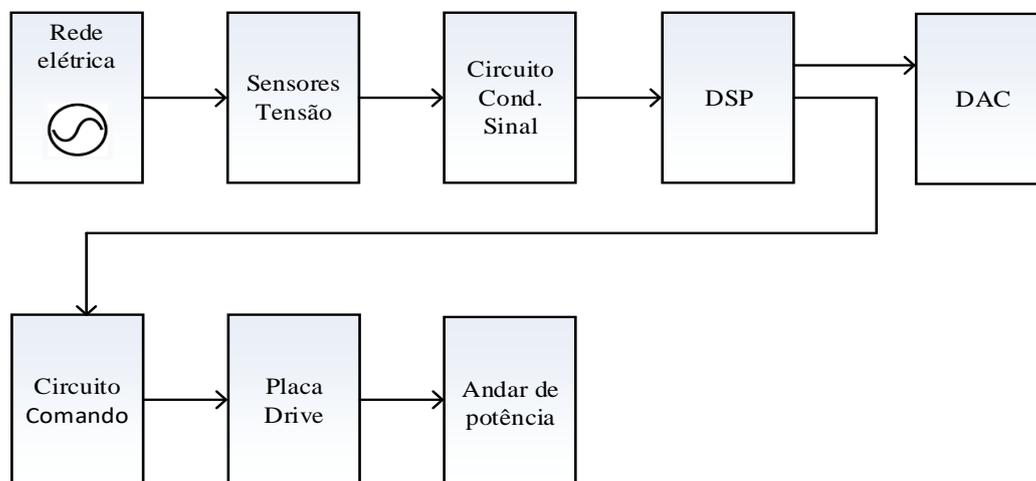


Figura 4.1 Esquema com os blocos do andar de controlo do condicionador ativo série.

De seguida, irá ser explicado como cada um dos componentes supra representados se integra no andar de controlo desta dissertação.

### 4.2.1 Sensores de Tensão

Para este conversor, foram utilizados 3 sensores de tensão com a referência CYHVS025A, desenvolvido pela ChenYang technologies, e 3 da LEM com a referência LV 25-P. Estes sensores de efeito de *hall* permitem medir as tensões das três fases da rede elétrica, servindo estas como referência para a PLL e como a variável  $v_g$  do algoritmo utilizado. Os três sensores restantes têm como função registar as tensões produzidas pelo conversor para serem utilizadas como  $v_{conv}$  no algoritmo de controlo. Na Figura 4.2, podem-se ver os sensores descritos.



Figura 4.2 Montagem final das placas onde os sensores de tensão estão inseridos.

Estes sensores conseguem medir valores até aos 2000 V e garantir isolamento galvânico até aos 2500 V. O respetivo esquema elétrico do sensor pode ser observado na Figura 4.3.

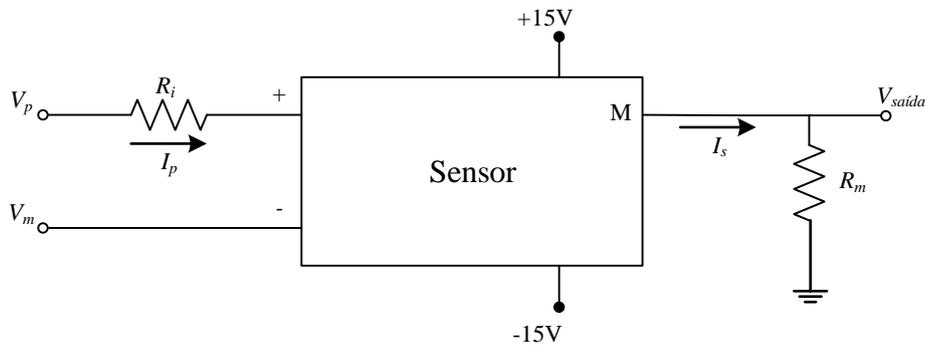


Figura 4.3 Esquema elétrico dos sensores de tensão.

Para o sensor funcionar sem problemas, impõe-se a limitação da corrente de entrada ( $I_p$ ) a 10 mA, pelo que é necessário calcular o valor da resistência de entrada ( $R_i$ ), com recurso à equação 4.1.

$$R_i = \frac{V_{rms}}{I_p} \quad (4.1)$$

Foram, por conseguinte, utilizadas duas resistências em série de 25 k $\Omega$  podendo assim os sensores medir uma tensão de até 500 V, sendo que o valor de pico da rede elétrica é de 325 V dando uma boa margem para o sensor não trabalhar no limite.

Para chegar à resistência  $R_m$  usou-se a equação 4.2.

$$R_m = \frac{V_{rms}}{I_s} \quad (4.2)$$

Sabendo que o circuito de condicionamento de sinal suporta uma tensão de entrada até 5 V e que a corrente de saída do sensor é de 25 mA RMS, usou-se uma resistência de 100  $\Omega$  na saída do mesmo.

### 4.2.2 Circuito de Condicionamento de Sinal

Como o sensor de tensão, depois de aplicada uma resistência de medida ( $R_m$ ), exibe uma tensão máxima de saída de 5 V e o microcontrolador utilizado tem um ADC (*Analogic-Digital Converter*) que opera de 0 até 3,3 V, é necessário um circuito que consiga converter o sinal.

O circuito utilizado está presente na Figura 4.4, e foi desenvolvido pelo laboratório do Grupo de Eletrónica de Potência e Energia, tendo 16 entradas para sensores, circuito de deteção de erros e interface com o circuito de comando.

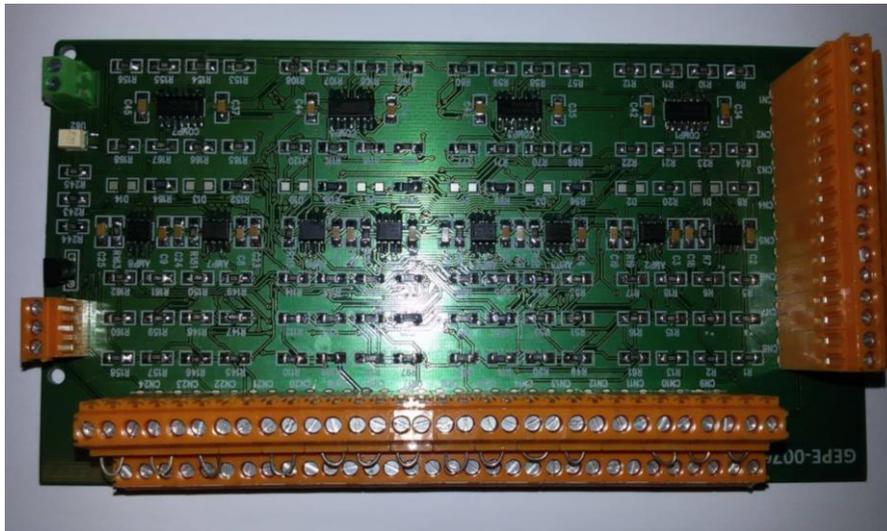


Figura 4.4 Placa do circuito de condicionamento de sinal.

O sinal de erro é mandado para o circuito de comando quando se detetam problemas nas grandezas dos valores medidos dos sensores, existindo isolamento entre os circuitos através de um optocoplador.

### 4.2.3 Microprocessador

O microprocessador utilizado para esta dissertação foi o DSP (*Digital Signal Processor*) TMS320F28335 da Texas Instruments representado na Figura 4.5. Esta placa possui 16 canais de *ADC*, 18 canais de *PWM (Pulse Width Modulation)*, memória flash de 256 KB\*16, entre outros.

Destaca-se o seu *IDE (Integrated Development Environment) Code Composer Studio* pela sua interface fácil de utilizar e muito completa, a rápida resposta a interrupções e a visualização das variáveis em tempo real, sendo esta última funcionalidade bastante útil para a realização dos testes do conversor. O DSP é programado usando linguagem C.



Figura 4.5 Microprocessador DSP TMS320F28335.

A placa de circuito impresso utilizada é a que está representada na Figura 4.6. Esta placa possui interfaces com a placa de comando, com a porta série para ligação ao computador, com o

programador do DSP, o DAC (*Digital-to-Analog Converter*) e dois canais GPIO (General Purpose Input/Output).

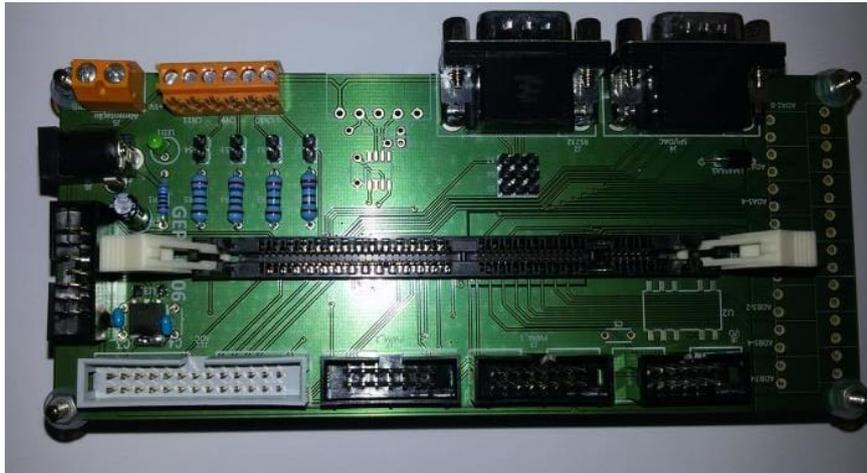


Figura 4.6 Placa para o DSP TMS320F28335.

#### 4.2.4 Circuito de Comando

O circuito de comando é responsável por receber os sinais de PWM da placa do microprocessador e redirecioná-lo para a placa de *drive*, oferecendo isolamento galvânico entre os dois. Também é responsável por mandar um sinal de erro ao DSP se ocorrer algum erro quer na placa de condicionamento de sinal, quer na placa de *drive* utilizando um LED vermelho para avisar o utilizador, tem interface com isolamento galvânico para saídas comuns, como é o caso do circuito dos relés, e um *enable* externo em que é necessário o utilizador ativar pelo *software*. Quando o circuito recebe um sinal de erro, automaticamente são desligadas as saídas de sinais de PWM.

Os sinais de PWM enviados para as placas de *drive* estão agrupados 2 a 2, sendo que cada saída (ficha DB9 na Figura 4.7) corresponde a cada um dos braços do conversor. Estes sinais são recebidos com um valor máximo de 3,3 V, devendo ser convertidos para 15 V antes de serem enviados para as placas de *drive*.

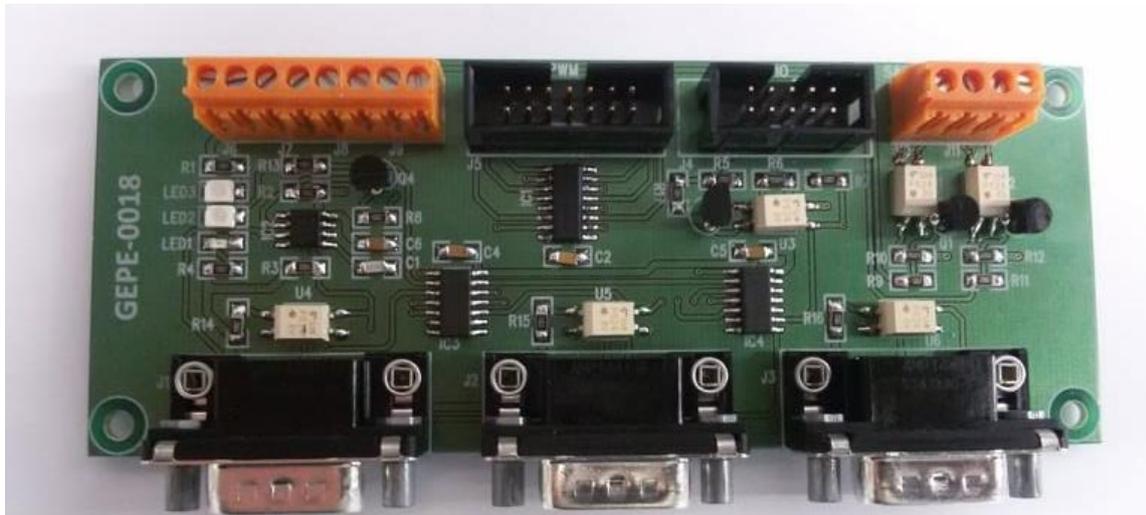


Figura 4.7 Placa do circuito de comando.

#### 4.2.5 Circuito de Drive

Este circuito é muito importante pois o andar de controlo, relativamente ao andar de potência, utiliza tensões e correntes muito mais baixas. Para isso é necessário um bom isolamento entre os dois andares, o que é garantido pelo driver SKHI 22A da Semikron, isolando tensões até aos 1500 V. Este driver é um driver duplo, utilizado em módulos de IGBTs da própria marca, garantindo *deadtimes* presentes nos sinais de PWM mediante adição de resistências na placa. Esta placa pode ver-se na Figura 4.8.



Figura 4.8 Placa do circuito de drive.

#### 4.2.6 Circuito de Proteção dos IGBTs

Ainda é necessário um circuito de proteção para a *gate* dos IGBTs representado pela Figura 4.9. Este circuito é utilizado para cada um dos braços do conversor, garantindo a proteção entre o terminal de *gate* os semicondutores e a placa de circuito de *drive*. Apesar de o circuito de *drive* ter resistências

para limitar a corrente de saída para a *Gate*, ainda é necessário assegurar que a tensão não ultrapasse a enviada pelo *driver*.



Figura 4.9 Placa do circuito de proteção dos IGBTs.

#### 4.2.7 Circuito dos Relés

Toda a interface da UPQC com a rede elétrica é feita através de disjuntores e contactores. Ao contrário dos disjuntores, em que urge uma ação manual para o acionar, os contactores necessitam de uma tensão na sua bobina interna para os fazer atuar. O circuito em questão tem a finalidade de acionar os contactores através de relés, acionados por um transístor, que, por sua vez, são acionados por *software*, como se pode ver pela Figura 4.10.

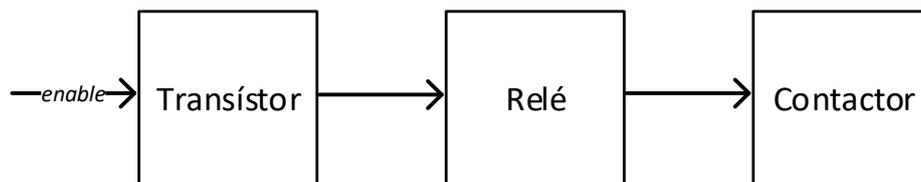


Figura 4.10 Esquema de funcionamento do circuito dos relés.

Na Figura 4.11 está presente a placa do circuito dos relés, sendo que esta placa é partilhada pelo condicionador ativo série e pelo condicionador ativo paralelo.



Figura 4.11 Placa do circuito dos relés.

### 4.2.8 Circuito de DAC

Este circuito serve como meio de facilitar o desenvolvimento do conversor, pois permite a visualização de até 8 canais analógicos por um osciloscópio, como se pode ver na Figura 4.12. Os sinais digitais vindos da placa do microprocessador são convertidos em sinais analógicos limitados entre +5 V e -5 V.

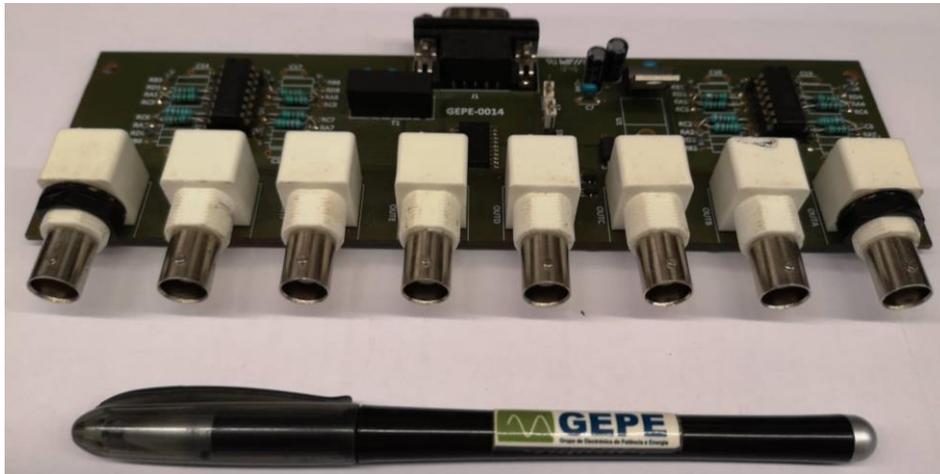


Figura 4.12 Placa do circuito de DAC.

A comunicação para a placa de DAC é feita através do protocolo *Serial Peripheral Interface* (SPI) através de uma ficha DB9. Por cada 1 V à saída da placa corresponde ao número 400 em decimal no *software* desenvolvido.

### 4.2.9 Fonte de Alimentação

Para alimentar todo o andar de controlo, foi escolhida a fonte de alimentação TX-060-0533Ti, fabricada pela TRACO Powers. Esta fonte é alimentada pelos 230 V da rede elétrica e contém 3 saídas isoladas

com valores de -15 V, +5 V e +15 V. Apesar de serem isoladas, como algumas das placas PCB contêm circuitos que necessitam de ser alimentados por vários níveis de tensão, houve a necessidade de ligar as referências (GNDs) nas saídas da fonte.

#### 4.2.10 Montagem Final do andar de controlo

Depois de todos os circuitos montados e testados, chegou a parte de montar o circuito. Este andar ficou no interior de uma caixa de alumínio, como se pode ver pela Figura 4.13.

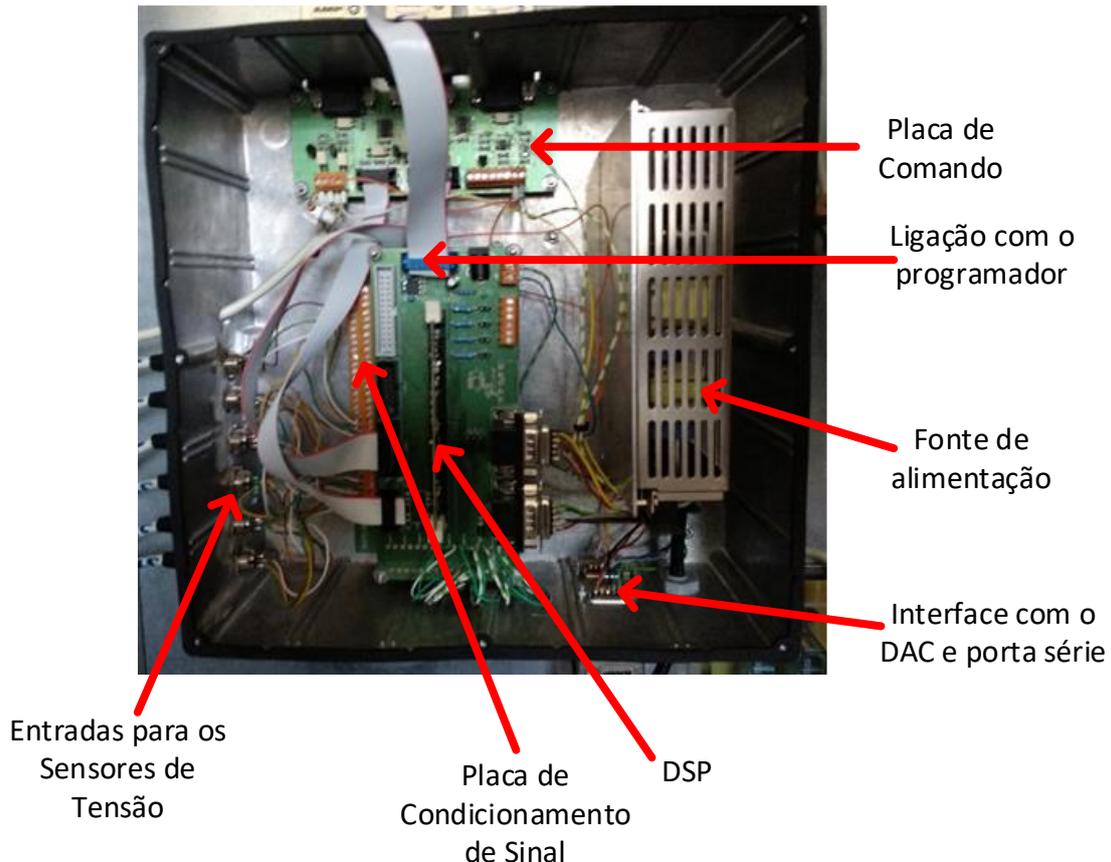


Figura 4.13 Montagem final do andar de controlo.

A placa do circuito dos relés está próxima dos contactores, as placas de *drive* estão perto dos IGBTs e os sensores estão mais próximos dos pontos de medida de modo a facilitar as mesmas.

### 4.3 Andar de potência

Nesta parte do capítulo, vai ser apresentado todo o *hardware* do circuito de potência utilizado na dissertação, nomeadamente todos os constituintes do conversor como elementos passivos, os semicondutores, as indutâncias, entre outros.

Também serão apresentados alguns dos conversores do UPQC, pois estes estão no mesmo espaço que o condicionador ativo série, demonstrando-se como ficou a montagem final do protótipo do mesmo.

### 4.3.1 Semicondutores

Os semicondutores utilizados foram os IGBTs da referência SKM100GB12T4 da marca Semikron. Estes semicondutores vêm em módulos de 2, como se pode ver pela Figura 4.14, e foram escolhidos por conseguirem comutar a 20 kHz, suportar tensões até 1200 V e correntes até 100 A.



Figura 4.14 Módulo de IGBTs utilizado.

Os módulos possuem IGBTs da 4ª geração da Infineon, tendo uma impedância interna de 30 nH e um diodo de *free-wheeling* em cada IGBT. O esquema elétrico do módulo está presente na Figura 4.15.

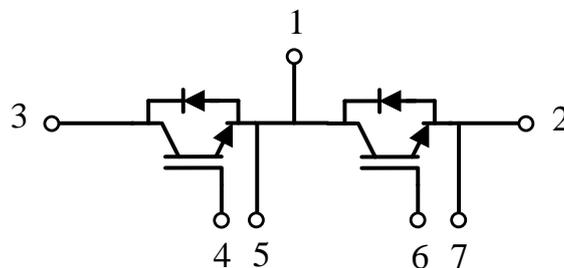


Figura 4.15 Esquema elétrico do módulo de IGBTs.

### 4.3.2 Bobinas

As bobinas utilizadas no conversor têm como função ajudar os transformadores como filtros de corrente através da equação 4.1.

$$v_L = L \frac{di(t)}{dt} \quad (4.1)$$

Através da análise da equação pode-se concluir que quanto maior for a indutância ( $L$ ) da bobina, mais esta se opõe à variação da corrente.

Pode ver-se na Figura 4.16 uma das bobinas com núcleo partilhado por dois enrolamentos que foram usadas na UPQC, tanto no lado do condicionador ativo série como no condicionador ativo paralelo.

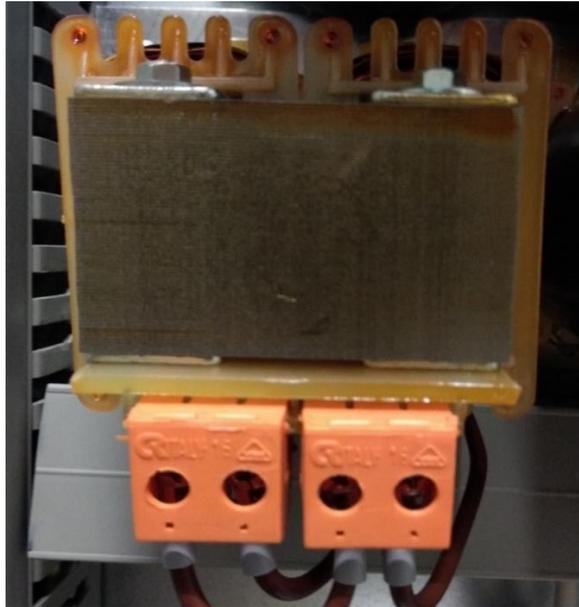


Figura 4.16 Bobina de núcleo partilhado utilizada.

Na Tabela 4.1 estão descritas as indutâncias das bobinas em função da frequência, usando o equipamento Hioki 3532-50 LCR Hitester. Na coluna do meio temos a indutância relativa a um enrolamento sozinho, e na coluna da direita a indutância relativa aos dois enrolamentos ligados em série.

Tabela 4.1 Valores das indutâncias das bobinas.

Frequência	L <sub>1enrolamento</sub>	L <sub>2enrolamentos</sub>
50 Hz	1,78 mH	6,84 mH
20 kHz	0,812 mH	2,78 mH
40 kHz	0,677 mH	2,32 mH

### 4.3.3 Transformadores

Os transformadores normalmente são usados para mudar o valor da tensão alternada através da razão entre o número de espiras dos 2 enrolamentos que possuem, sendo estes o primário e o secundário.

Estes enrolamentos estão à volta de um núcleo, normalmente constituído por um material ferromagnético, que é partilhado pelos dois conjuntos de espiras, sendo este o meio responsável por

transmitir a energia entre esses dois conjuntos de espiras. Na equação 4.2, pode ver-se a razão de transformação de um transformador.

$$\frac{v_2}{v_1} = \frac{i_2}{i_1} = \frac{N_2}{N_1} \quad (4.2)$$

Estes também oferecem isolamento galvânico entre os enrolamentos, sendo esta uma das razões por terem sido escolhidos para esta dissertação.



Figura 4.17 Transformador utilizado.

Da maneira de que os transformadores estão presentes no circuito descrito no capítulo anterior, estes também facilitam a transferência de energia entre o conversor e a rede elétrica. Na Tabela 4.2 estão presentes as características dos transformadores utilizados. Para os ensaios foram utilizados os enrolamentos que correspondem a uma razão de transformação de 1:1.

Tabela 4.2 Características dos transformadores utilizados.

Potência Nominal	Frequência	$U_{\text{Primário}}$	$U_{\text{Secundário}}$
11500 VA	50/60 Hz	230 V	25 V
11500 VA	50/60 Hz	230 V	50 V
11500 VA	50/60 Hz	230 V	115 V
11500 VA	50/60 Hz	230 V	230 V

#### 4.3.4 Filtros Passivos

Os filtros passivos, como já foi demonstrado no capítulo anterior, ajudam a filtrar o ruído das comutações dos semicondutores, pois como estes vão trabalhar a uma frequência de 20 kHz, o filtro foi dimensionado para uma frequência de corte de 1000 Hz. O filtro utilizado está presente na Figura 4.18. Neste filtro foram utilizadas resistências de potência de  $4 \Omega$  com capacidade para aguentar 50 W de potência dissipada com condensadores cerâmicos de  $40 \mu\text{F}$ .



Figura 4.18 Filtro passivo utilizado

#### 4.3.5 Condensadores para o barramento CC

Os condensadores utilizados para o barramento CC foram os B43456 A4828M da EPCOS, suportando uma tensão máxima até 350 V e uma capacidade de  $8200 \mu\text{F}$ . Na Figura 4.19 está presente o condensador, sendo que foram precisos 8 destes, pois a topologia escolhida para este conversor tem ponto médio para fazer ligação ao secundário dos transformadores e a tensão no barramento tem de

ser maior que a da rede elétrica para que o condicionador ativo paralelo consiga injetar corrente na rede elétrica.



Figura 4.19 Condensador eletrolítico utilizado.

Os condensadores foram agrupados como está na Figura 4.20. Com esta organização, o barramento CC consegue suportar uma tensão máxima de 1400 V com uma capacitância de 4100  $\mu\text{F}$ .

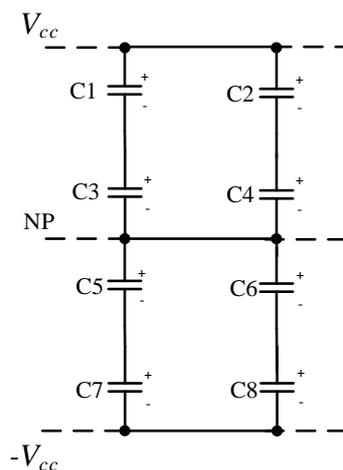


Figura 4.20 Esquema de ligações do barramento CC.

### 4.3.6 Montagem Final do Andar de Potência

Depois de todos os componentes serem testados, passou-se à montagem de todo o andar de potência. Como foi demonstrado na Figura 2.10, todo o *hardware* do UPQC já tinha sido previamente planeado quanto à sua posição dentro do espaço. Na Figura 4.21, podemos ver como ficou a montagem de todo o *hardware* do UPQC. Nesta parte do projeto, cada participante ficou com a responsabilidade de

montar o seu *hardware* no espaço, sendo que as partes comuns aos conversores foram montadas por todos os participantes. Eu fiquei responsável pela montagem dos constituintes do condicionador ativo série, o Simão Almeida do condicionador ativo paralelo e o Daniel Peixoto pelo conversor CC-CC.

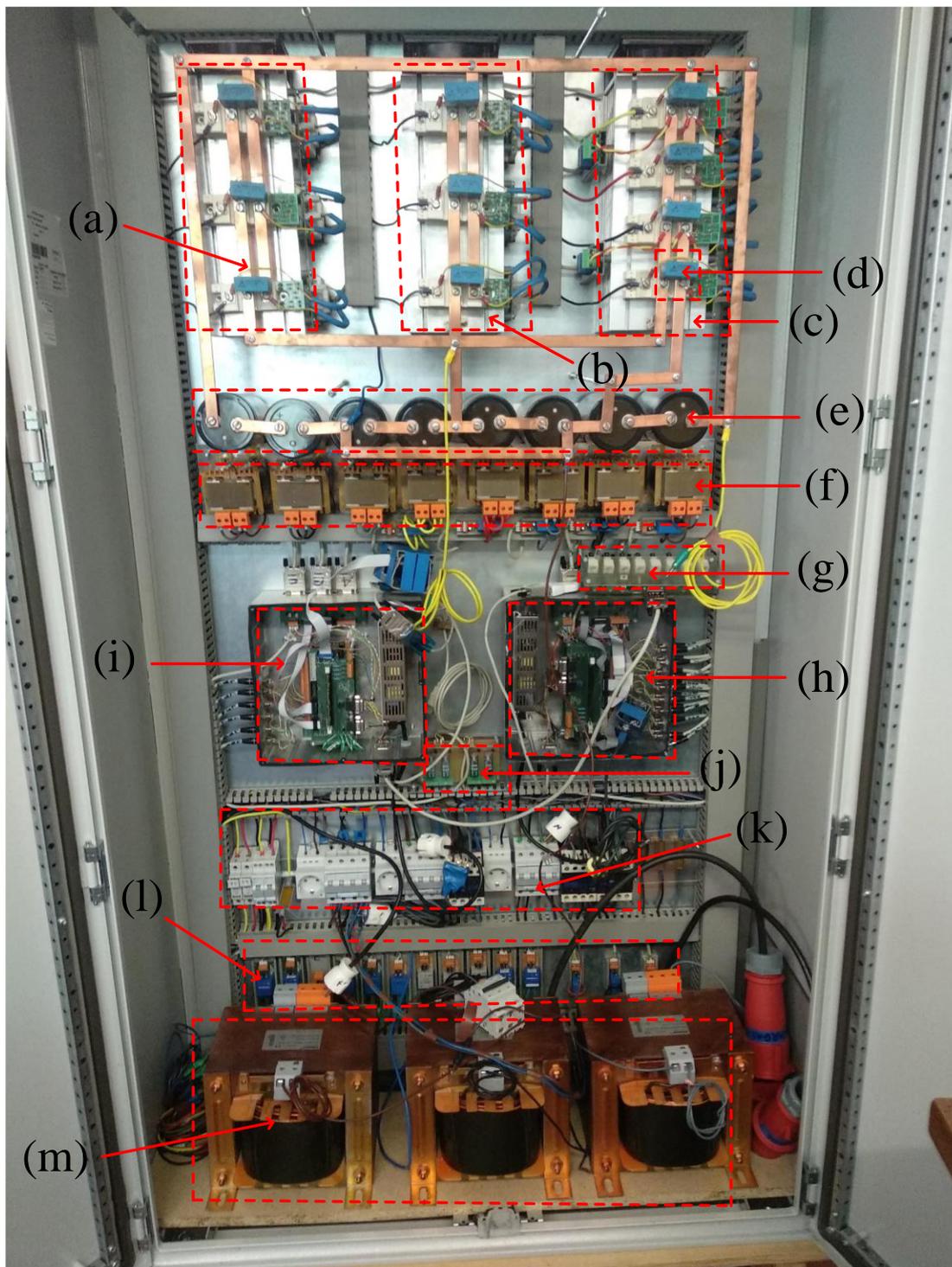


Figura 4.21 Montagem final do protótipo do UPQC.

A Figura 4.21 pode-se explicar da seguinte forma: Em (a) está presente o condicionador ativo série;(b) Condicionador ativo paralelo;(c) Conversor CC-CC;(d) Condensadores de *snubber* ;(e) Barramento CC;(f) Bobinas de núcleo partilhado,(g) DAC;(h) Andar de controlo do condicionador ativo paralelo e do

conversor CC-CC;(i) Andar de controlo do condicionador ativo série;(j) Placa do circuito dos relés;(k) Interface com a rede elétrica;(l) Sensores de tensão e corrente em;(m) Transformadores de acoplamento do condicionador ativo série.

## 4.4 Conclusão

Em suma, neste capítulo foi apresentado o andar de controlo e o andar de potência inseridos nesta dissertação. Foram apresentados os elementos constituintes de cada um dos andares detalhadamente, bem como as funções de cada um.

Começou-se por apresentar o andar de controlo, sendo o sensor de tensão o primeiro elemento no esquema do andar de controlo para aquisição de sinais. Depois descreveram-se todos os outros circuitos, seguidos das placas PCB onde estavam impressos os mesmos. Para finalizar esta parte do capítulo, exibiu-se o resultado da montagem de todo o andar.

Passando ao andar de potência, começou-se por apresentar os semicondutores utilizados, seguindo-se as bobinas, os transformadores, os filtros passivos e os condensadores.

Para finalizar este capítulo, foi apresentado o resultado da montagem do andar de potência, já com o andar de controlo juntamente com todo o *hardware* do condicionador ativo paralelo e do conversor CC-CC para interface com as energias renováveis, ficando assim o *hardware* do UPQC pronto.

# Capítulo 5

## Validação Experimental do Condicionador Ativo Série

### 5.1 Introdução

Neste capítulo estão apresentados os resultados da validação experimental do condicionador ativo série usando o material até agora apresentado, salientando-se que, dependendo do teste, o *layout* do mesmo poderá variar.

Quanto à organização deste capítulo, os testes feitos terão a mesma ordem que as simulações do capítulo 3, sendo que o condicionador será avaliado pela compensação dos problemas de qualidade de energia elétrica.

Nesta validação experimental, não será feito o teste do condicionador ativo série a compensar *swells*, pois o barramento CC do mesmo é carregado com uma fonte de tensão fabricada pela Kaise do modelo HY3005D-3 que não consegue absorver energia, havendo risco de aparecimento de problemas com a subida da tensão do barramento, pois é o condicionador ativo paralelo que ficou responsável por regular a tensão no barramento CC.

### 5.2 Validação como Inversor

Como já foi apresentado no capítulo 3, antes de passar ao teste como condicionador, o conversor deve ser testado como inversor para garantir que este consegue produzir as diversas formas de ondas necessárias para o seu funcionamento.

Os primeiros testes foram feitos com o circuito representado pela Figura 5.1.

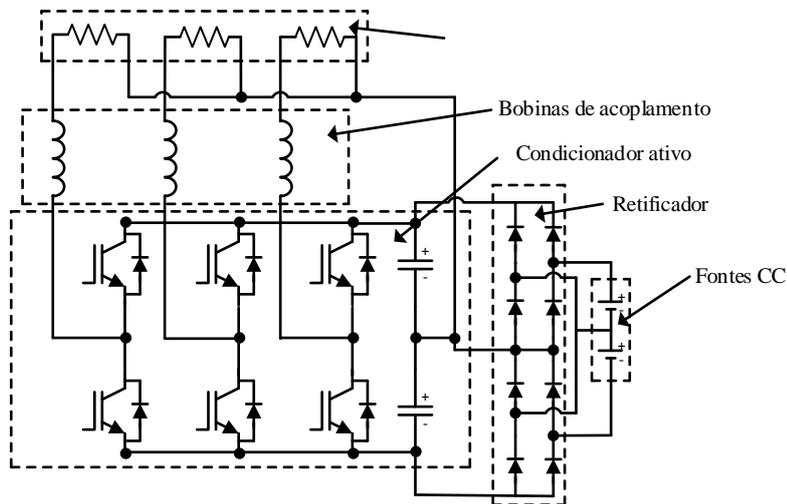


Figura 5.1 Circuito de validação do condicionador ativo série como inversor.

Este circuito, como se pode ver, não apresenta os transformadores, de maneira a não poder haver problemas com o sinal de PWM, pois se este estivesse a trabalhar com 100 % de modulação ocorreria um curto-circuito, destruindo o material apanhado no mesmo.

Durante todos os testes realizados, o barramento CC foi carregado com 60 V com o ponto neutro assumindo o potencial de 30 V, fazendo com que este fique com +30 V e -30 V em cada um dos conjuntos de 4 condensadores presentes.

Primeiramente, foi testado o *hardware* sem o algoritmo de controlo, usando-se simplesmente um sinal de PWM com modulação de 50 % na saída. Como resultado deste primeiro teste, temos a Figura 5.2, em que se pode ver em cada uma das fases nos gráficos (a), (b), (c), respetivamente, a forma de onda na saída do conversor. Estas formas de onda ficaram parecidas a uma onda triangular pelo facto de as bobinas estarem a fazer de filtro, como foi explicado no capítulo anterior. As cargas do circuito foram umas resistências com um valor de 13  $\Omega$ .

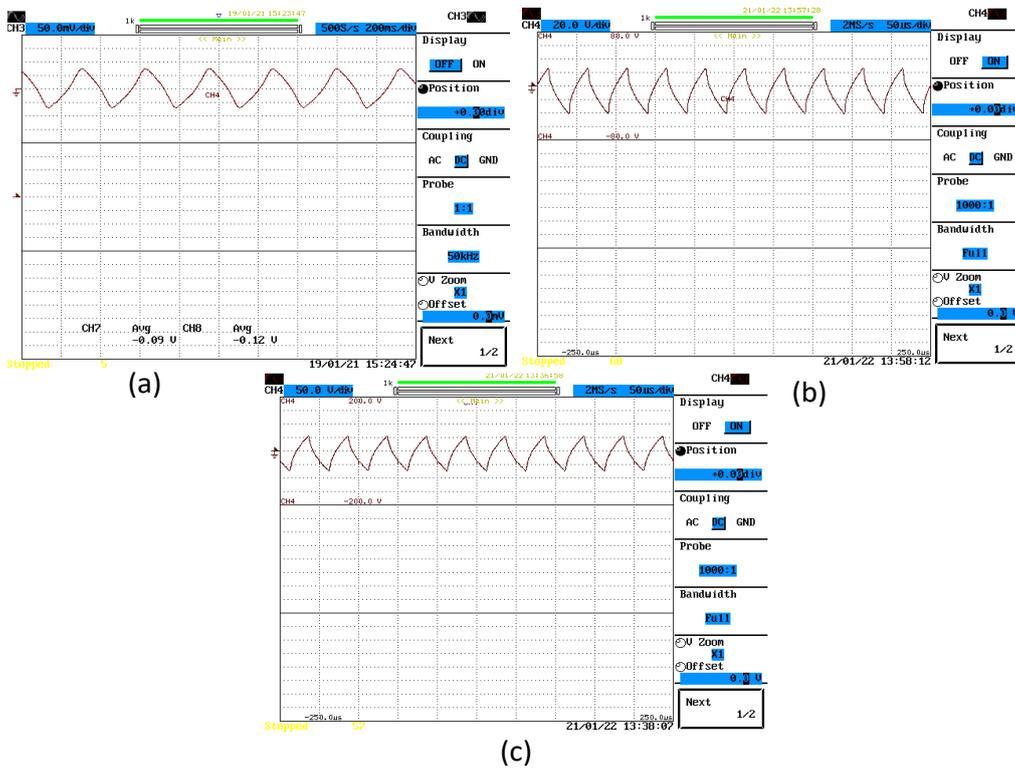


Figura 5.2 Resultado experimental do condicionador ativo série como inversor com PWM a 50 % (20 V/div): (a) Fase A; (b) Fase B; (c) Fase C.

Para o teste seguinte, foi usado o mesmo circuito, mas com a diferença que os sinais de PWM são sintetizados de maneira que a onda de saída seja uma senoide. Os resultados deste teste podem ver-se na Figura 5.3.

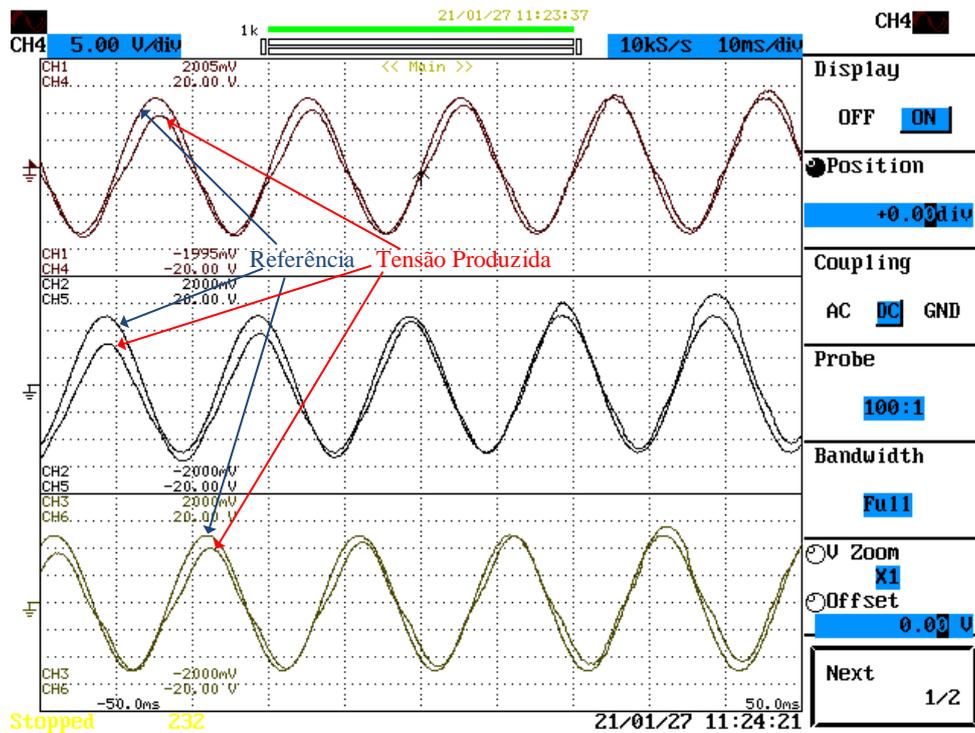


Figura 5.3 Resultado experimental do condicionador ativo série como inversor com onda sinusoidal de referência (5 V/div).

Nesta figura, estão representadas as 3 fases, cada uma com a referência da onda sinusoidal, juntamente com a onda sintetizada. Como se pode verificar, a onda sintetizada não segue totalmente a referência, como é esperado, pois o algoritmo de controlo responsável pelos sinais de PWM está em malha aberta. As ondas podem não possuir a mesma amplitude, dado que as ondas de referência estavam a ser transmitidas pelo DAC e as de saída estavam, pelas pontas de prova, ligadas diretamente ao osciloscópio.

Como se infere, para o teste seguinte foi utilizado um algoritmo em malha fechada para se averiguar que tipo de comportamento a onda de saída teria. Os resultados estão presentes na Figura 5.4.

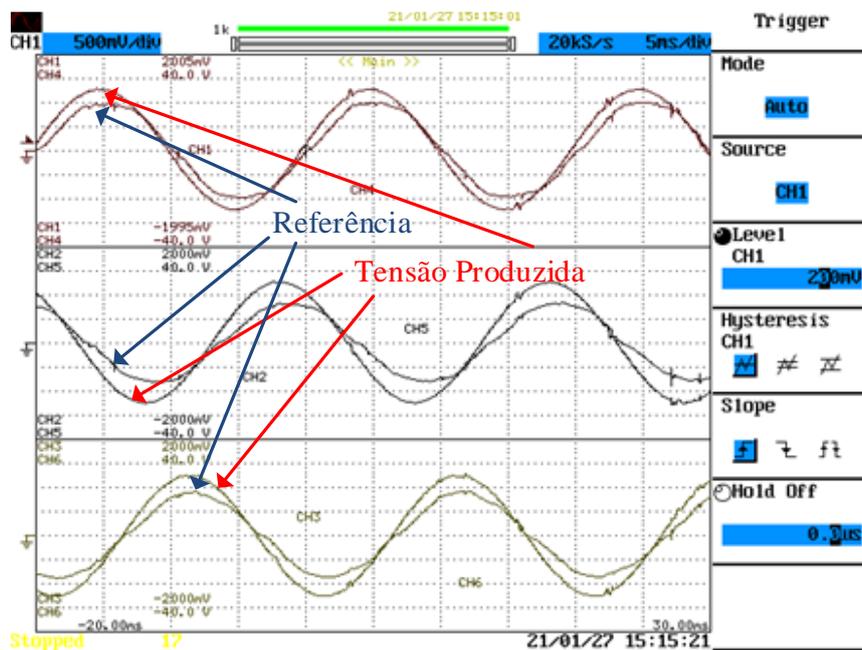


Figura 5.4 Resultado experimental do condicionador ativo série como inversor usando algoritmo de malha fechada ( $V_{\text{Condicionador}}$ : 10 V/div;  $V_{\text{BAC}}$ : 1 V/div).

Com esta figura consegue-se confirmar que a onda sintetizada não apresenta os mesmos problemas que no ensaio anterior. Também é relevante referir que as quebras na senoide se devem ao ruído na comutação dos semicondutores.

Para dar seguimento aos ensaios, fizeram-se alterações ao circuito, utilizando os transformadores apresentados no capítulo anterior. Este circuito, presente na Figura 5.5, tem como objetivo produzir as formas de onda necessárias para que o circuito funcionasse como um condicionador ativo série, sendo que este apenas não estava ligado à rede elétrica, ou seja, a tensão produzida à saída do conversor era a que o condicionador precisava para resolver os problemas de QEE presentes na rede. Para todos os testes efetuados, os transformadores de acoplamento usaram uma razão de transformação 1:1.

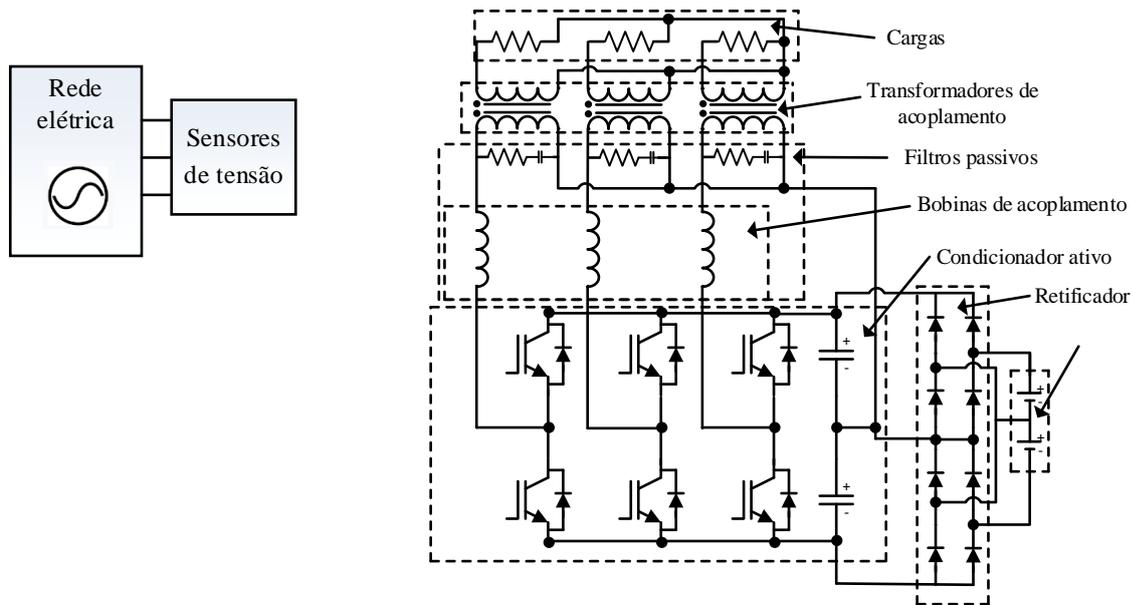


Figura 5.5 Circuito de validação do condicionador ativo série como inversor com transformadores de acoplamento.

Os resultados deste ensaio estão presentes na Figura 5.6, podendo ver-se que a tensão à saída do inversor consegue seguir a referência, granjeando o resultado pretendido.

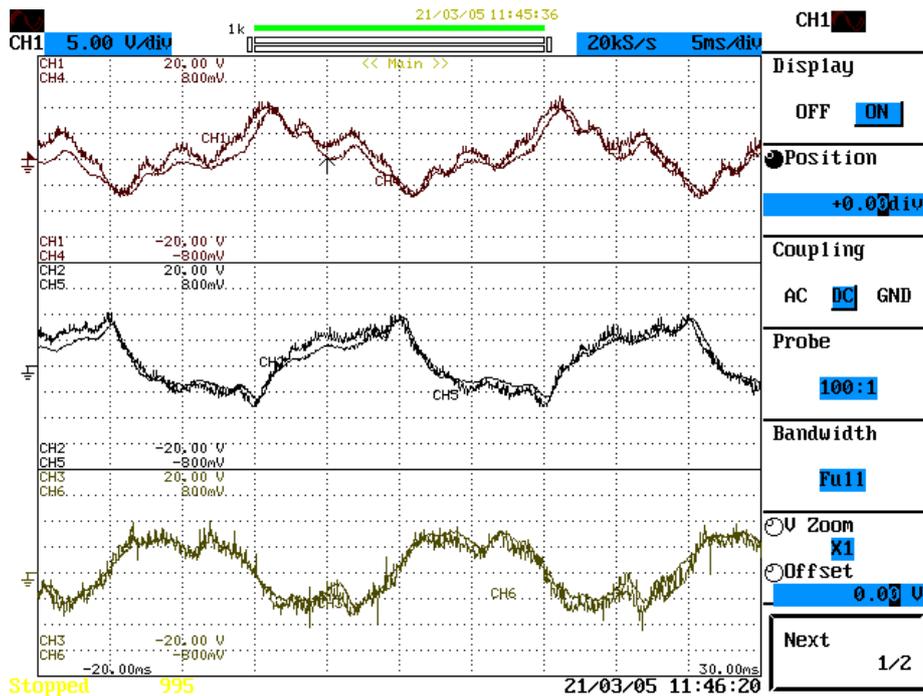


Figura 5.6 Resultado experimental do condicionador ativo série como inversor a compensar problemas de QEE presentes na rede elétrica ( $V_{\text{Condicionador}}$ : 5 V/div;  $V_{\text{DAC}}$ : 200 mV/div)

### 5.3 Validação como Condicionador Ativo Série

Tendo resultados satisfatórios e seguindo a estrutura da apresentação das simulações, é necessário colocar o conversor a funcionar como condicionador ativo série. Antes disso, vai ser demonstrada uma simulação com todo o *hardware* necessário e com os passos a seguir para que a interpretação dos

resultados do ensaio final seja mais fácil. Na Figura 5.7, encontra-se presente o circuito desenhado na ferramenta PSIM para o efeito.

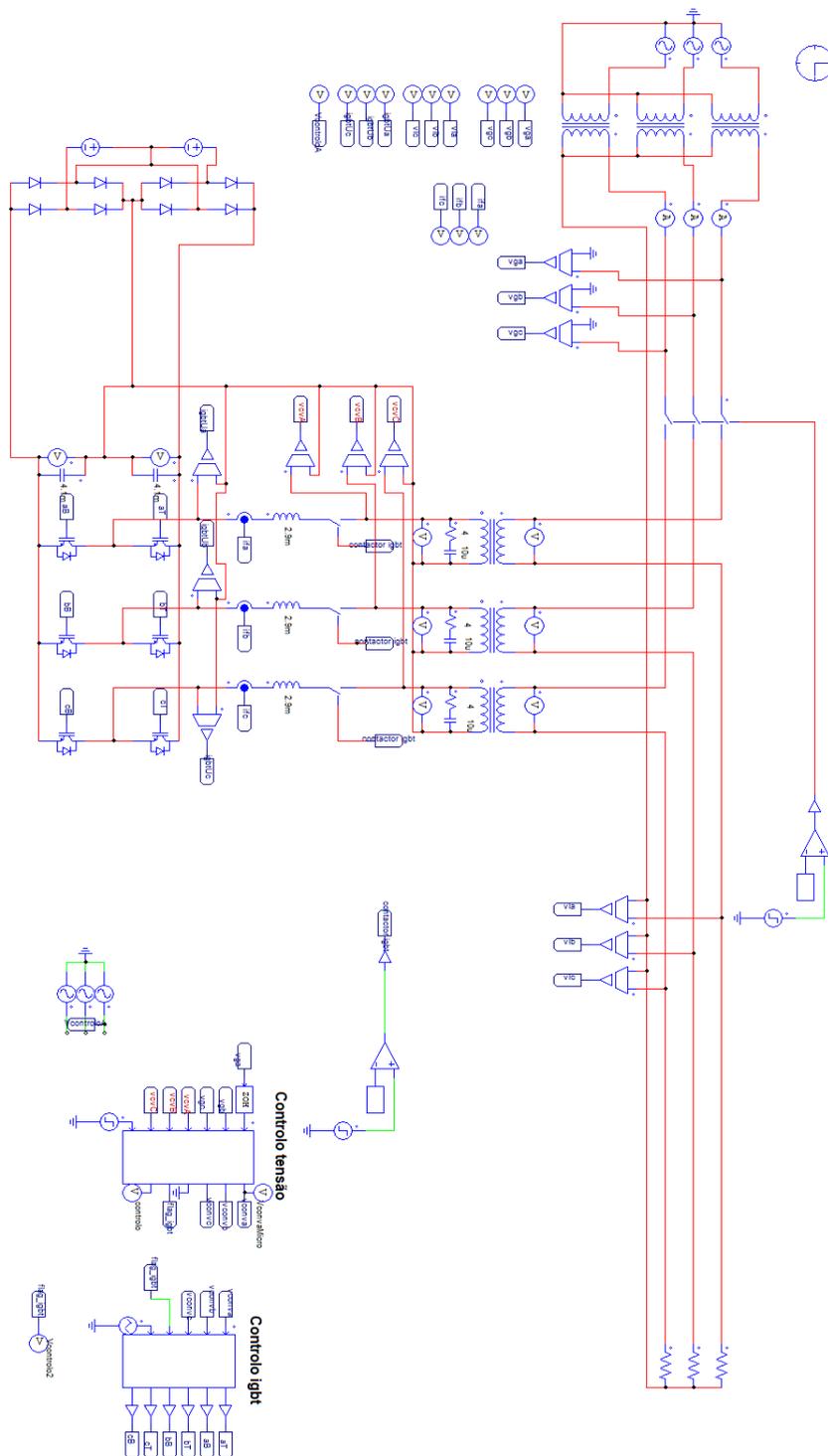


Figura 5.7 Modelo de simulação do ensaio final do condicionador ativo série.

Na Figura 5.8 é possível ver o circuito elétrico utilizado para o ensaio final. Como se pode ver, este circuito é igual ao do modelo de simulação, tendo ainda as mesmas condições de funcionamento do mesmo. Com isto, vou continuar com a descrição do circuito.

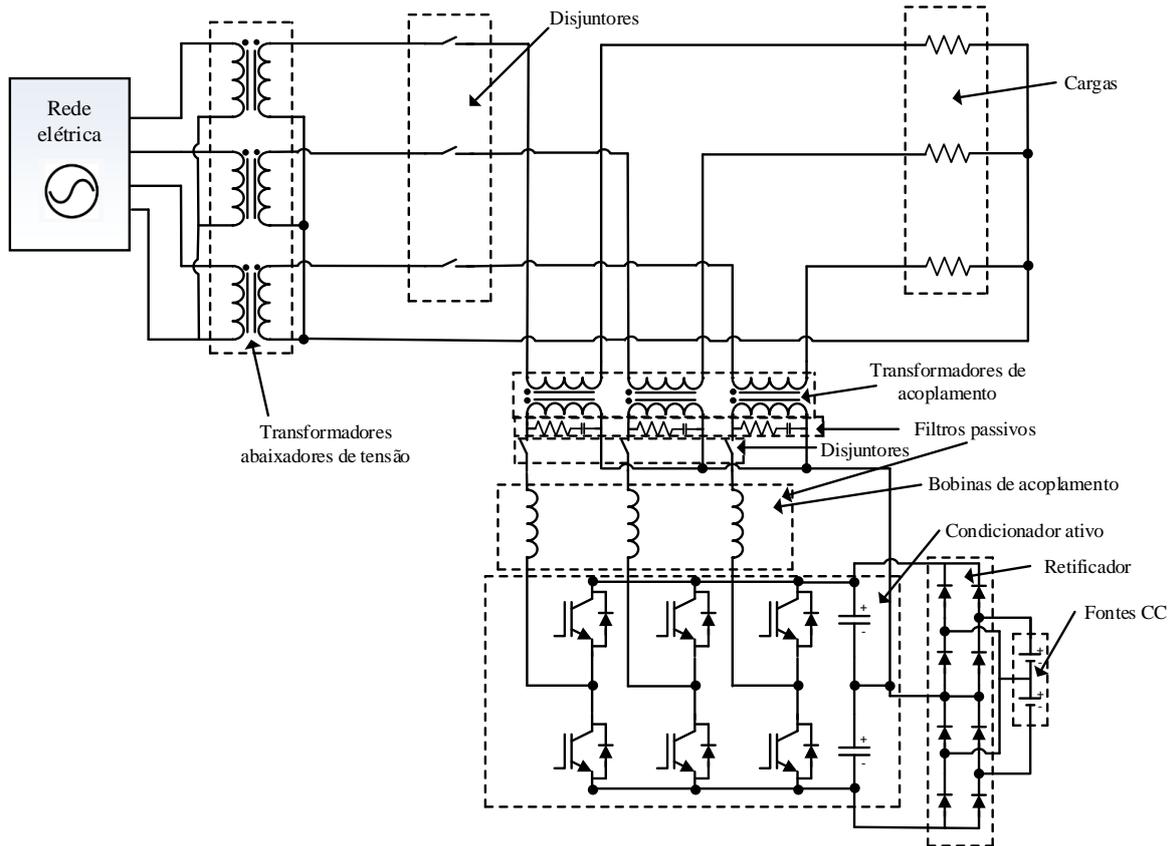


Figura 5.8 Circuito do ensaio final

Começando do lado da rede, é possível ver-se 3 transformadores monofásicos com o objetivo de baixar a tensão eficaz da rede de 230 V para 50 V para que caso ocorra algum problema os danos sejam menores. A seguir existe um contactor com a finalidade de ligar ou desligar o condicionador ativo série.

Do lado do condicionador, temos o conversor utilizado com um contactor a separar os transformadores e o filtro passivo dos semicondutores que é fechado quando o condicionador ativo série está pronto para compensar os QEE presentes na rede elétrica. Ainda do lado do condicionador, temos o barramento CC a ser alimentado por 2 fontes de 30 V para simular a que existe no laboratório do GEPE. O condicionador ativo série está programado para responder aos problemas de QEE existentes, como se a rede elétrica fosse normalmente de 60 V de tensão eficaz, sendo que neste caso vai estar a compensar um *sag*.

Finalmente, as cargas são iguais às que vão ser utilizadas, isto é, cargas resistivas de  $13\Omega$  por fase.

A duração total da simulação é de 1 s, com vários passos demarcados pelo fecho e a abertura dos contactores e o funcionamento do condicionador. O fecho do contactor da rede ocorre aos 0,02 s, o fecho do contactor do condicionador ocorre aos 0,06 s e o condicionador ativo série começa a funcionar aos 0,9 s. Na Figura 5.9, temos os resultados da simulação.

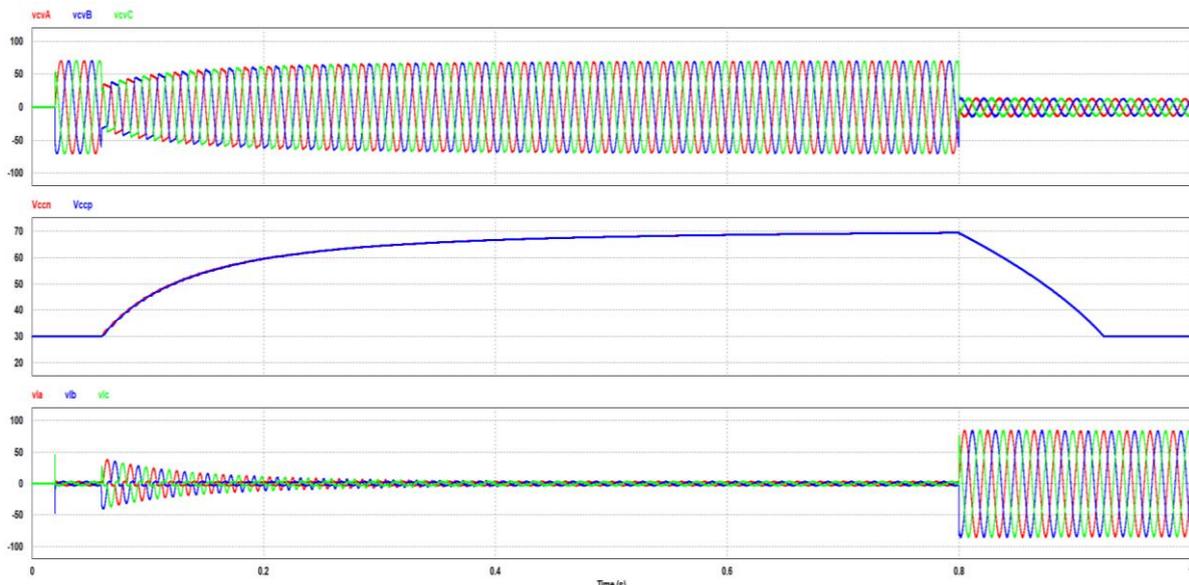


Figura 5.9 Resultados da simulação do ensaio final do condicionador ativo série de acordo com o *hardware* presente no ensaio real.

Nesta figura temos 3 gráficos:

- Em primeiro lugar, está a tensão no enrolamento secundário no transformador;
- Em segundo lugar, está a tensão no barramento CC;
- Em terceiro lugar, está a tensão na carga.

A tensão no secundário dos transformadores está dentro dos valores esperados, sendo que como o barramento CC está a ser carregado pela rede até a um máximo de 70V que é o seu valor de pico, como se pode ver pela equação 5.1. É de notar que esta equação só é válida para ondas sinusoidais. Isto acontece por causa dos diodos de *free-wheeling* que fazem com o conversor se comporte como um retificador.

$$V_{pico} = V_{eficaz} \sqrt{2} \quad (5.1)$$

$$50\sqrt{2} = 70,5 \text{ V}$$

Quando o condicionador ativo série começa a compensar os problemas de QEE, a tensão aos terminalis do secundário do transformador é a esperada para que na carga não haja os mesmos.

Quanto ao THD da tensão na carga quando o condicionador começa a compensar, está num valor bastante aceitável, sendo de 1,51 % para cada uma das fases.

Com todas as simulações feitas e validadas falta passar à validação do protótipo desenvolvido como condicionador ativo série. O teste terá as mesmas condições da simulação feita anteriormente com a diferença que os contactores presentes foram substituídos por disjuntores.

Inicialmente foi medido o THD da rede elétrica para ter uma base e um termo de comparação para ajudar na interpretação dos resultados. Na Figura 5.10, está presente o THD da rede elétrica e amplitude relativa dos harmônicos quando comparados com uma senoide perfeita. Esta análise da onda foi feita com a ajuda do analisador de qualidade de energia elétrica Fluke 435.

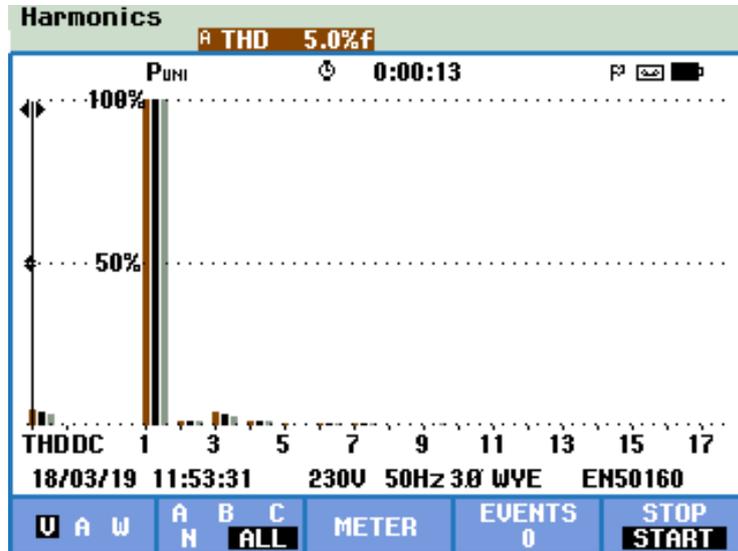


Figura 5.10 Harmónicos de tensão na rede elétrica no ensaio final

A forma da onda de tensão da rede elétrica está presente na Figura 5.11.

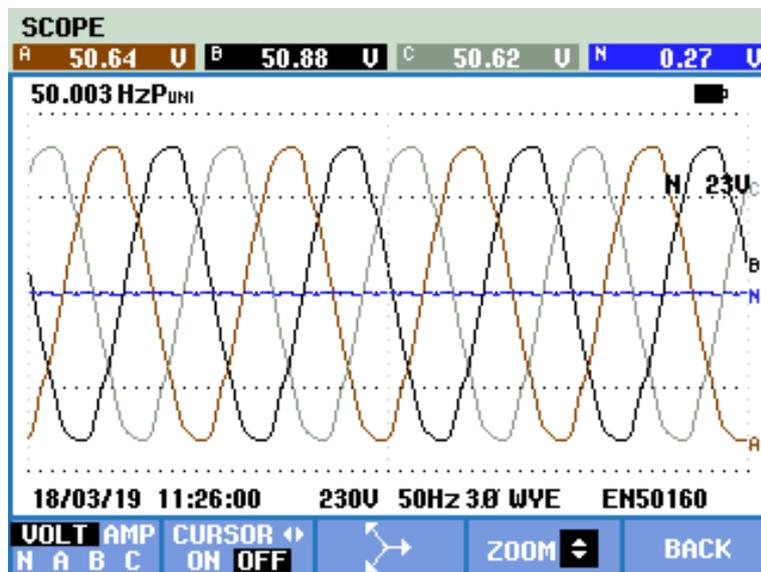


Figura 5.11 Tensões da rede elétrica no ensaio final.

Tendo todos os dados para poder comparar os resultados finais da validação do protótipo em funcionamento, pode-se proceder à interpretação dos resultados do ensaio final. Para esse efeito, está presente na Figura 5.12 uma comparação entre a tensão compensada na carga e a tensão da rede elétrica. É evidente que o condicionador está a conseguir compensar os problemas de QEE presentes na rede quando a onda de tensão presente na carga está sobreposta à da rede, uma vez que, observando a Figura 5.12, nota-se a falta de distorções na onda compensada.

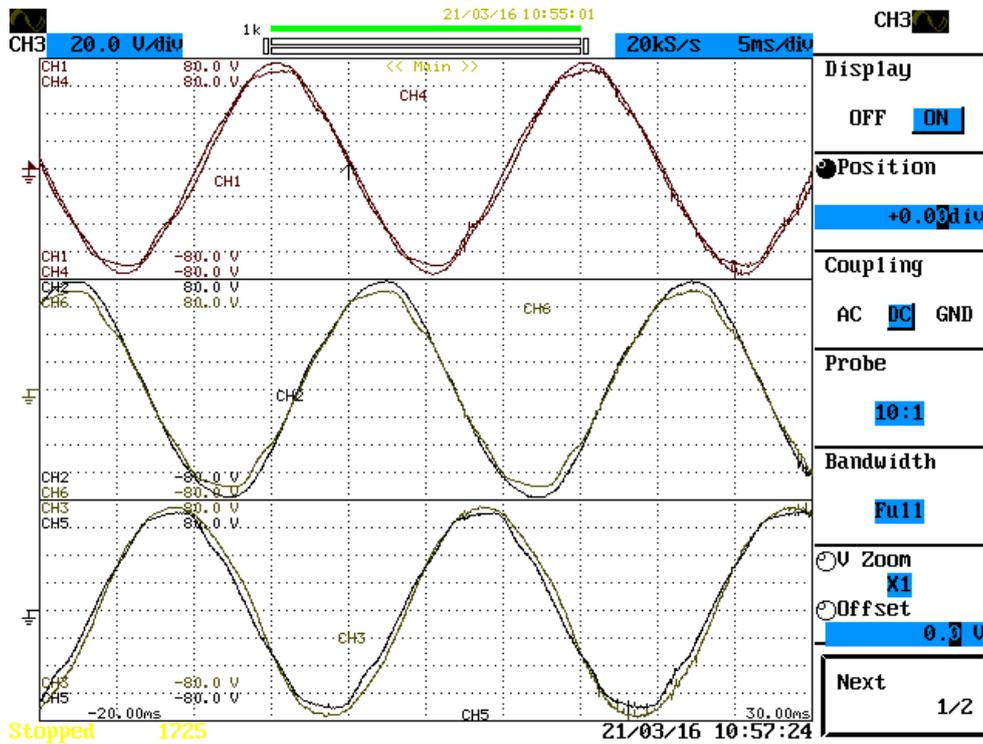


Figura 5.12 Resultado experimental de comparação entre a rede elétrica e a tensão na carga no ensaio final (20 V/div)

Para reforçar o facto de que o ensaio foi um sucesso, utilizou-se o mesmo analisador de qualidade de energia elétrica para verificar o THD da onda compensada, sendo este de 2,9 %, como demonstrado pela Figura 5.13.

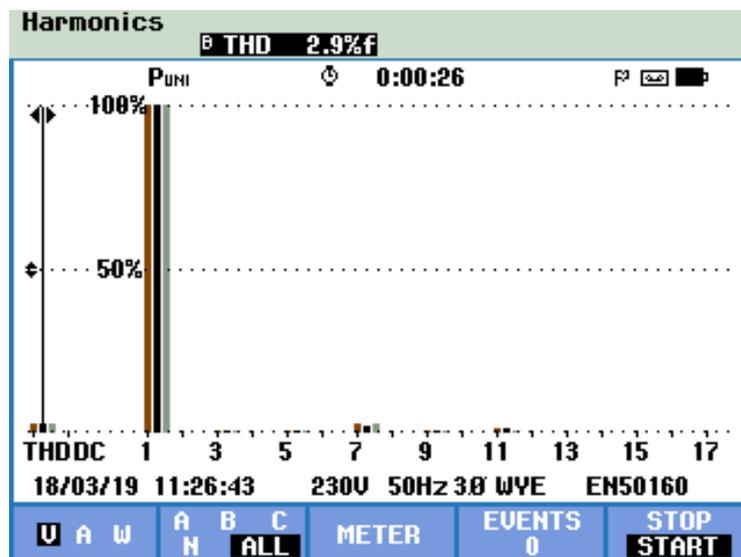


Figura 5.13 Harmónicos de tensão na onda compensada.

Em relação à tensão da forma de onda, pode-se ver pela Figura 5.14 que a tensão eficaz da mesma subiu, sendo que era esperado, pois o software foi configurado para que os 50 V se tratassem de um evento de sag.

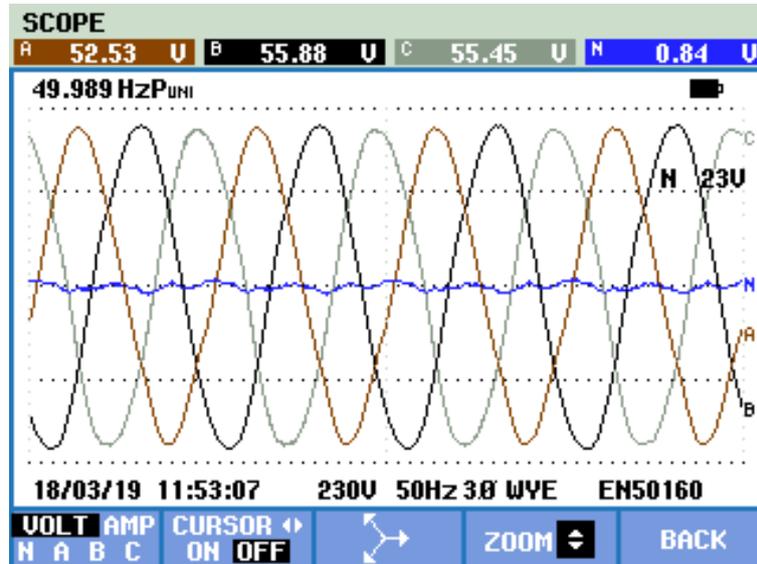


Figura 5.14 Tensões na carga no ensaio final

## 5.4 Conclusão

Em suma, neste capítulo foram realizados os ensaios necessários para a validação do protótipo como inversor e condicionador ativo série.

Começou-se por introduzir e explicar o material adicional utilizado para a realização de cada ensaio, como por exemplo as cargas utilizadas e as tensões presentes nos diversos circuitos.

De seguida, procederam-se aos ensaios para validar o protótipo como inversor, com a respetiva análise dos resultados obtidos em cada uma das etapas, chegando cada vez mais perto do resultado pretendido.

Finalmente, fez-se o ensaio do conversor como filtro ativo série, também com a interpretação dos resultados obtidos, havendo validação do objetivo inicial desta dissertação. Por fim, é de lamentar que não se tenha conseguido testar a capacidade de o protótipo compensar *swells* pois como no ensaio o barramento CC não foi regulado pelo condicionador ativo paralelo, o barramento não poderia absorver energia da rede elétrica.



# Capítulo 6

## Conclusão

### 6.1 Conclusões Finais

Nesta dissertação de mestrado foi abordado o processo de desenvolvimento de um condicionador ativo série trifásico com o objetivo de compensar problemas de tensão de qualidade de energia elétrica como *sags*, *swells*, desequilíbrios e harmónicos de tensão.

Ao longo deste trabalho, foram apresentados os vários passos necessários para a conceção do condicionador, reservando-se esta parte para a apresentação, resumida, das principais ideias de cada capítulo, bem como das conclusões finais sobre o trabalho realizado.

No primeiro capítulo foram expostas as motivações da realização deste trabalho, bem como os problemas de qualidade de energia elétrica que este condicionador tem de compensar. Ainda foram referidas as cargas não-lineares como principal causa dos problemas relacionados com harmónicos de corrente e tensão. Para resolver esses problemas foram referidas algumas soluções, nas quais esta dissertação está incluída.

No segundo capítulo, foi elaborado o estado da arte relacionado com os condicionadores ativos série. Numa primeira parte, foi introduzido o equipamento onde esta dissertação se engloba (UPQC). De seguida, foi explicada a base de funcionamento dos conversores CA-CC bidirecionais, bem como algumas topologias destes conversores. Ainda neste capítulo foram abordadas duas teorias de controlo para o condicionador, analisando a sua complexidade e facilidade na sua implementação. No final deste capítulo, foi justificada a escolha tanto da topologia do conversor, como da estratégia de controlo utilizadas.

Após isto, foram apresentadas as simulações feitas no *software* PSIM para poder validar as escolhas feitas no momento anterior. Inicialmente, foi testado o conversor como um inversor, com o objetivo de validar as capacidades de produção de tensão do mesmo. Ainda nesta primeira parte, foi explicada e demonstrada a importância da utilização de um filtro passivo juntamente com o conversor utilizado. Validado o funcionamento como inversor, foi passada à fase de funcionamento como um condicionador

ativo série. Nesta fase, foram testados vários cenários onde estavam presentes os problemas de qualidade de energia descritos no primeiro capítulo.

Com tudo preparado para a passar à parte da construção do protótipo, no quinto capítulo foi descrito cada um dos componentes utilizados no andar de controlo e no andar de potência do mesmo. Num primeiro momento, foram descritos os circuitos utilizados na construção do andar de controlo, nomeadamente os sensores de tensão, o circuito de condicionamento de sinal, o microprocessador, o circuito de comando, o circuito de drive, o circuito de proteção dos IGBTs, o circuito dos relés, o circuito de DAC, a fonte de alimentação, e, como corolário, a montagem final do andar com os componentes enumerados anteriormente. Numa segunda parte, foi feito o mesmo para todo o hardware presente no andar de potência do protótipo.

Depois de todos os componentes montados e testados, foi validado o protótipo na mesma ordem em que foram realizadas as simulações. Primeiramente, foi-se testar o conversor como inversor, tendo-se obtido resultados satisfatórios para avançar com os testes como condicionador. Nesta parte do capítulo, foi feita ainda uma simulação com todo o *hardware* necessário para se poder comparar melhor os resultados obtidos na validação experimental do protótipo. Para finalizar este capítulo, realizou-se um ensaio final com o protótipo a funcionar como um condicionador ativo série, seguido da interpretação dos resultados obtidos.

Depois de obtidos os resultados do ensaio final, é evidenciado pelo THD das ondas compensadas, comparando com o THD inicial da rede elétrica que o condicionador ativo série conseguiu melhorar a qualidade da energia elétrica.

Finalmente, com este trabalho, concluiu-se que foi um sucesso o desenvolvimento deste protótipo do condicionador ativo série, pois o mesmo conseguiu compensar os problemas de qualidade de energia presentes na rede elétrica, sendo que não foi validada a capacidade de resolver *swells*.

Em termos pessoais, esta dissertação foi bastante enriquecedora, visto que foram englobadas várias áreas da Eletrónica, como a Eletrónica de Potência, Eletrotécnica e Instalações Elétricas, Programação de Microprocessadores, Teoria de Controlo, entre outros. Com o desenvolvimento deste documento, também foram expandidas outras aptidões, como a edição de imagem para construir as figuras utilizadas, pesquisa de material relevante para o tema em questão e as capacidades intelectuais de processamento de informação, leitura e escrita.

## 6.2 Sugestões de Trabalho Futuro

Apesar dos testes realizados ao protótipo do condicionador terem apresentado bons resultados para a tensão de 50 V da rede elétrica, para trabalho futuro seria necessário realizar mais testes com uma tensão maior, nomeadamente de 115 V e 230 V. Além da tensão da rede, também poderiam ser realizados mais testes com diferentes cargas. Estas cargas poderiam ser não-lineares e com um consumo de energia maior. Além disso, poderia ser validada a compensação de *swells*, bem como analisados e testados diferentes algoritmos para controlo da tensão à saída do conversor. Para finalizar as sugestões relacionadas com os ensaios, fica a de por o condicionador ativo série a funcionar com o condicionador ativo paralelo e o conversor CC-CC para que o UPQC esteja finalizado.

Como sugestão final, fica o desenvolvimento de uma interface mais fácil de utilizar, podendo ser uma aplicação para o telemóvel onde se conseguia ver as tensões compensadas, o THD e uma lista com erros que ocorressem, bem como uma maneira de poder dar *reset* aos mesmos.



## Lista de Referências

- [1] R. Virmani, P. Gaur, H. Santosi, A. P. Mittal, and B. Singh, "Performance comparison of UPQC and active power filters for a non-linear load," *2010 Jt. Int. Conf. Power Electron. Drives Energy Syst. PEDES 2010 2010 Power India*, pp. 1–8, 2010,10.1109/PEDES.2010.5712559.
- [2] S. Chennai, "Novel Control Scheme for Unified Power Quality Conditioner based on Three-level ( NPC ) Inverter using Intelligent Systems," *8th Int. Conf. Model. Identif. Control*, pp. 43–48, 2016,10.1109/ICMIC.2016.7804192.
- [3] A. VanderMeulen and J. Maurin, "Current source inverter vs . Voltage source inverter topology," *Eaton*, no. June, pp. 1–8, 2014,10.1109/SPICES.2015.7804192.
- [4] M. K. Mika Ikonen, Ossi Laakkonen, "Two-Level and Three-Level Converter Comparison in Wind Power Application," *IEEE Proc. Nord. Work. Power Ind. Electron. NORPIE 2006*, pp. 1–11, 2006,10.1002/9780470551578.
- [5] A. Murali Krishna, K. N. V. Prasad, and G. Ranjith Kumar, "Realization of cascaded H-bridge 5-level multilevel inverter as Series Active Filter," *IET Conf. Publ.*, vol. 2012, no. 624 CP, pp. 1–8, 2012,10.1049/CP.2012.2225.
- [6] J. Pereda and J. Dixon, "23-Level Inverter for Electric Vehicles Using a Single Battery Pack and Series Active Filters," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 61, no. 3, pp. 1043–1051, 2012,10.1109/TVT.2012.2186599.
- [7] F. Z. Peng, "Harmonic sources and filtering approaches," *Ind. Appl. Mag. IEEE,2001.*, vol. 7, no. August, pp. 18–25, 2001,10.1109/2943.930987.
- [8] C. Kumar, "3-  $\Phi$  4 -Wire UPQC Topologies for Reduced DC-Link Voltage Rating," *2017 Int. Conf. Algorithms, Methodol. Model. Appl. Emerg. Technol.*, pp. 1–5, 2017,10.1109/ICAMMAET.2017.8186667.
- [9] J. G. Pinto, B. Exposto, V. Monteiro, L. F. C. Monteiro, C. Couto, and J. L. Afonso, "Comparison of current-source and voltage-source Shunt Active Power Filters for harmonic compensation and reactive power control," *IECON Proc. (Industrial Electron. Conf.*, no. 4, pp. 5161–5166, 2012, 10.1109/IECON.2012.6389552.
- [10] S. Biricik, O. C. Ozerdem, S. Redif, and M. O. I. Kmail, "Performance improvement of active power filters based on p-q and d-q control methods under non-ideal supply voltage conditions," *2011 7th Int. Conf. Electr. Electron. Eng.*, no. 5, pp. 1-312-1-316, 2011,10.5755/J01.EEE.19.1.3247.
- [11] P. P. Jadhav and A. S. Patil, "Reduce harmonics using PI controller in d-q reference frame for active power filter," *Proc. - Int. Conf. Glob. Trends Signal Process. Inf. Comput. Commun. ICGTSPICC 2016*, pp. 653–656, 2017, 10.1109/ICFRSPICC.2016.7955382.
- [12] W. Li, C. Yue, Y. Zhang, H. Gao, and M. Zhou, "Active Power Filter Based on FBD Current Detection," no. Iccse, pp. 839–843, 2016, 10.1109/ICCSE.2016.7581691.
- [13] J. Zhou, Z. Wang, and X. Fu, "Study on the improved harmonic detection algorithm based on FBD theory," *Asia-Pacific Power Energy Eng. Conf. APPEEC*, no. 1, pp. 2–5, 2011,10.1109/APPEEC.2011.5749145.
- [14] C. A. Patrascu and C. V. Suru, "The p-q theory and active current under non- sinusoidal conditions," *Development*, vol. 50783, no. 4, pp. 1–7, 2013,9781457714948.
- [15] S. Khani, "Modified pq theory applied to flexible photovoltaic systems at the 3-phase 4-wire distribution grids," *2012 Proc. 17th Conf. Electr. Power Distrib.*, pp. 1–5, 2012, 9781467314183.
- [16] T. D. Rachmildha, A. Llor, M. Fadel, P. A. Dahono, and Y. Haroen, "Quasi Hybrid Direct Power Control on 3-Phase 4-Wire Active Power Filter," no. 2, pp. 257–261, 2007,9789791633802.

- [17] A. C. Borr, R. F. S. Dias, A. C. S. Lima, and E. H. Watanabe, "Converter Based Controlled Reactance for Damping Subsynchronous Resonance," no. May 2014, pp. 1–6, 2009, 10.1109/ICEMS.2011.6073368.
- [18] P. B. Shendge and S. H. Pawar, "Simulink model for mitigation of Sag/Swell by Dynamic Voltage Restorer using SPWM technique," *Proc. Int. Conf. Intell. Sustain. Syst. ICISS 2017*, no. Iciss, pp. 747–750, 2018, 10.1109/ISS1.2017.8389274.