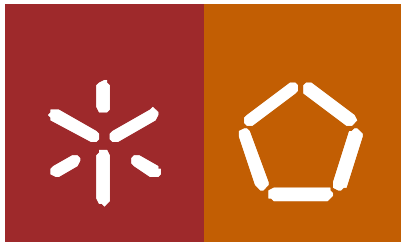


Universidade do Minho
Escola de Engenharia

André Campos Teixeira

Interface de um Gerador Eólico com a Rede Eléctrica

AGRADECIMENTOS

Ao Professor Júlio Manuel de Sousa Barreiros Martins meu orientador nesta dissertação, pelo seu encorajamento, apoio, dedicação e disponibilidade demonstrada ao longo deste trabalho.

Aos Professores João Luiz Afonso e Manuel João Sepúlveda Freitas pelo auxílio prestado em alguns momentos importantes, para o desenvolvimento deste trabalho.

Aos meus colegas do laboratório, Carlos Ribeiro, Renato Alves, Domingos Gonçalves, Pedro Neves, Gabriel Pinto, Luís Monteiro e Raul Almeida pela amizade, colaboração e ajuda prestada no decorrer deste trabalho.

Aos meus pais Manuel Teixeira e Olívia Campos pelo encorajamento dado para que eu conseguisse superar mais uma etapa na minha vida.

Ao meu irmão e à minha cunhada, Ricardo Teixeira e Daniela Dias, pela atenção e ajuda durante a realização deste trabalho.

À minha namorada Sónia Alves, por estar sempre a meu lado e me ter dado sempre apoio quando precisava.

Resumo

A energia eléctrica é maioritariamente produzida em grandes centrais eléctricas, normalmente muito afastadas dos locais onde é consumida. Em geral, as centrais térmicas queimam combustíveis fósseis, contribuindo para a emissão de substâncias poluentes e para o aquecimento global do planeta. Além disso, o mercado de produtos petrolíferos é muito instável, causando constantes alterações nos preços desses produtos. Por outro lado, as necessidades energéticas têm vindo a aumentar constantemente, não sendo previsível que o aumento da oferta volte, alguma vez, a compensar o aumento da procura. Assim, os governos de diversos países têm vindo a apostar cada vez mais em fontes de energias renováveis, como por exemplo, parques eólicos e centrais solares.

Os fabricantes de fontes de energias renováveis têm começado a disponibilizar no mercado unidades de pequena potência, destinadas a fornecer energia a pequenas empresas ou habitações. No entanto, a oferta de soluções baseadas neste tipo de máquinas e respectiva electrónica de interface é ainda escassa.

O principal objectivo deste trabalho consistiu no estudo, simulação e implementação de um sistema de interface entre um gerador eólico de pequena potência e a rede eléctrica. A ligação entre o gerador e a rede foi feita recorrendo a um conversor *Step-up* (*Boost*), seguido de um Filtro Activo Paralelo Monofásico, sistema que permite injectar a energia eléctrica na rede, e tem ainda a possibilidade de eliminar harmónicos de corrente e corrigir o factor de potência.

Foram estudadas diversas soluções alternativas e recorreu-se a ferramentas de simulação para testar cada bloco separadamente, pala além da solução completa. Foi implementado e testado o conversor CC-CC *Boost*. Como conversor CC-CA, utilizou-se um Filtro Activo Monofásico que foi desenvolvido no âmbito de um outro trabalho que decorre no Departamento de Electrónica Industrial da Universidade do Minho, limitando-se o candidato a estudar esta solução e a proceder à sua integração no sistema proposto.

Palavras-Chave: Geradores Eólicos, Conversores CC-CC, Interfaces com a Rede Eléctrica, Filtros Activos de Potência.

Abstract

Electricity is mostly produced in big power stations, normally far away from the places where it is used. In general, thermal power plants burn fossil fuels, contributing to the emission of pollutants and to the global warming of the planet. Moreover, the market of petroleum products is very unstable, causing constant changes in the prices of these products. Furthermore, the energy needs are constantly increasing and one cannot foresee that the production will ever cope the needs again. Therefore, the governments of several countries have been focused more and more on renewable sources of energy, for example wind farms and solar plants.

The manufacturers of renewable power sources have started to place in the market low power units, designed to provide power to small companies or housing. However, the offer of solutions based on this type of machines and its interface electronics, is still scarce.

The main goal of this work consisted on the study, simulation and implementation of an interface system between a small wind power generator and the electrical network. The connection between the generator and the mains was made through a Step-up (Boost) converter, followed by a Single-phase Parallel Active Filter. In addition to delivering electric power into the electrical network, this system can eliminate current harmonics and provides power factor correction.

Several alternative solutions have been studied and simulation tools were used to test each block separately, together with the complete solution. The DC-DC Boost converter was implemented and tested. As DC-AC converter, a Single-phase Active Filter was used, which was developed within the scope of one another project that in running in the Department of Industrial Electronics of the University of the Minho. The candidate´s job was to study this solution and to integrate this block in the proposed solution.

Keywords: Wind generators, Renewable energy, interface with electrical network, CC-CC converter, active filters.

Índice

ÍNDICE III

LISTA DE FIGURAS V

LISTA DE TABELAS IX

CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO 1

1.1 IDENTIFICAÇÃO DO PROBLEMA 1
1.2 OBJECTIVOS DO TRABALHO 2
1.3 ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO 2
1.4 FONTES DE ENERGIA ALTERNATIVA 3
1.4.1 Energia Solar *4*
1.4.2 Energia Eólica *8*
1.4.3 Energia Hidroeléctrica *9*
1.4.4 Energia Geotérmica *10*
1.4.5 Energia das Ondas *11*
1.4.6 Energia das Marés *15*
1.4.7 Biomassa *16*
1.5 PROBLEMAS DE QUALIDADE DA ENERGIA ELÉCTRICA E SOLUÇÕES 20

CAPÍTULO 2 - GERADORES EÓLICOS 23

2.1 COMPONENTES DE UM SISTEMA EÓLICO 24
2.2 TURBINA DE EIXO VERTICAL 25
2.3 TURBINA DE EIXO HORIZONTAL 26
2.4 GRANDES UNIDADES EÓLICAS 28
2.5 PEQUENOS GERADORES EÓLICOS 29
2.5.1 Mini-Geradores Eólicos *29*

CAPÍTULO 3 - INTERFACE COM A REDE ELÉCTRICA 33

3.1 INTERFACE COM A REDE ELÉCTRICA DE GRANDES EÓLICAS 33
3.2 INTERFACE COM A REDE ELÉCTRICA DE PEQUENAS EÓLICAS 35
3.3 CONVERSORES CC-CC 37
3.3.1 Conversores CC-CC Não-Isolados *37*
3.3.2 Conversor CC-CC Isolado *38*
3.3.3 Conversores CC-CC para Utilização no Sistema de Interface da Eólica com a Rede Eléctrica *40*
3.4 FILTRO ACTIVO PARALELO 52
3.4.1 O Filtro Activo Paralelo Trifásico *53*
3.4.2 Teoria p-q *54*
3.4.3 Filtro Activo Paralelo Monofásico *57*
3.4.4 Interface entre Fontes de Energias Renováveis e a Rede Eléctrica Utilizando Filtros Activos *58*

CAPÍTULO 4 - SIMULAÇÕES 61

4.1 CONVERSOR CC-CC *STEP-UP* (*BOOST*) 61
4.1.1 Simulação *61*
4.2 CONVERSOR CC-CC *PUSH-PULL* EM PONTE COMPLETA 64
4.2.1 Simulação *66*
4.3 FILTRO ACTIVO PARALELO MONOFÁSICO 67
4.3.1 Simulação do Filtro para Diferentes Tipos de Cargas *68*
4.4 SIMULAÇÃO DO SISTEMA DE INTERFACE ENTRE A EÓLICA E A REDE ELÉCTRICA (SOLUÇÃO COMPLETA) 74
4.4.1 Simulação do Sistema para Diferentes Tipos de Cargas *74*

CAPÍTULO 5 - IMPLEMENTAÇÃO 79

5.1 CONVERSOR CC-CC *STEP-UP (BOOST)* 79
5.1.1 Sistema de Controlo *79*
5.1.2 Andar de Potência *86*
5.2 FILTRO ACTIVO PARALELO MONOFÁSICO 89
5.3 SISTEMA DE EMULAÇÃO DE UM GERADOR EÓLICO 90

CAPÍTULO 6 - RESULTADOS EXPERIMENTAIS 91

6.1 CONVERSOR *STEP-UP* (*BOOST*) 91
6.1.1 Teste com Tensões Reduzidas *91*
6.1.2 Teste com Tensão Nominal *94*
6.2 FILTRO ACTIVO PARALELO MONOFÁSICO 96

CAPÍTULO 7 - CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHO FUTURO 99

7.1 CONCLUSÕES 99
7.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS 100

REFERÊNCIAS 101

ANEXO 1 105

ANEXO 2 106

ANEXO 3 107

Lista de Figuras

Figura 1.1 – Efeito fotovoltaico 5
Figura 1.2 - Tipos de células fotovoltaicas 5
Figura 1.3 - Painel fotovoltaico 6
Figura 1.4 - Central fotovoltaica solar de Serpa 6
Figura 1.5 - Evolução da área de colectores solares instalados em Portugal 8
Figura 1.6 – Exemplos de aerogeradores disponíveis no mercado 9
Figura 1.7 - Potência Eólica instalada até finais de 2006 (fonte REN) 9
Figura 1.8 - Evolução da quota da potência hidroeléctrica no parque de electroprodutores (fonte: ren) 10
Figura 1.9 - Esquema de produção de electricidade através de energia geotérmica 11
Figura 1.10 - Esquema de funcionamento do OWC 12
Figura 1.11 - Funcionamento do AWS 13
Figura 1.12 - Esquema do sistema FWPV 13
Figura 1.13 - Conversor de energia *Pelamis* 14
Figura 1.14 - Implementação dos sistemas das energias das ondas 14
Figura 1.15 - Esquema de obtenção de energia do mar 15
Figura 1.16 - Moinho de Maré do Parque Natural da Ria Formosa 16
Figura 1.17 - Processo de digestão anaeróbia 16
Figura 1.18 - Esquema de ligação de incineração e produção de energia eléctrica 17
Figura 1.19 - Gerador de energia da *Haase* usando biogás 18
Figura 1.20 - Percentagens mínimas de incorporação de biocombustíveis 19
Figura 2.1 - Sensor de direcção do vento (esquerda) e anemómetro de copos (à direita) 23
Figura 2.2 - Potencia eólica instalada na União Europeia 23
Figura 2.3 - Aerogerador 24
Figura 2.4 - Turbina de eixo vertical a) Esquema, b) *Darrieus* de 2 pás 25
Figura 2.5 - Relação entre diâmetro do rotor e potência (fonte: TreeHugger) 26
Figura 2.6 - Turbina eólica de rotor horizontal a) Esquema, b) *offshore* 27
Figura 2.7 - Mapa com alguns parques eólicos instalados em Portugal 28
Figura 2.8 - Eólica da Enercon modelo E-112 29
Figura 2.9 - WindRotor Modelo WRE.060 30
Figura 2.10 – Turbina eólica *Turby* 31
Figura 2.11 – Turbina eólica Inclin 600 31
Figura 2.12 – AIR 403 32
Figura 2.13 – Esquema dos componentes constituintes da eólica AIR 403 32
Figura 3.1 – Gerador assíncrono com rotor em gaiola de esquilo 33
Figura 3.2 - Gerador assíncrono com rotor em gaiola de esquilo e conversor de frequência 34
Figura 3.3 - Gerador assíncrono com dupla alimentação (de rotor bobinado) 34
Figura 3.4 - Gerador síncrono ligado directamente a rede eléctrica 34

Figura 3.5 - Gerador síncrono com conversor de frequência....35
Figura 3.6 - Gerador síncrono com conversor de frequência e sem caixa de velocidade....35
Figura 3.7 – Diagrama de blocos do sistema de alimentação de uma carga através de um inversor com transformador....36
Figura 3.8 - Diagrama de blocos do sistema de alimentação de uma carga através de um inversor sem transformador....36
Figura 3.9 - Diagrama de blocos da interface entre a eólica e a rede eléctrica....37
Figura 3.10 – Conversor *Step-Down* (*Buck*)....38
Figura 3.11 - Conversor *Boost (Step-Up)*....38
Figura 3.12 – Conversor *Buck-Boost*....38
Figura 3.13 - Conversor *Flyback*....39
Figura 3.14 – Conversor *Forward* (transístor simples)....39
Figura 3.15 – Conversor *Forward* (dois transístores)....39
Figura 3.16 - Conversor *Push-Pull* em Meia Ponte....39
Figura 3.17 – Conversor *Push-Pull* em Ponte Completa....39
Figura 3.18 – Conversor *Step-up* (*Boost*)....42
Figura 3.19 – Etapas do interruptor do circuito *Boost* a) ligado b) desligado....42
Figura 3.20 – Formas de onda da tensão e corrente na indutância no modo de condução contínua....43
Figura 3.21 – Tensão e corrente na indutância no limite da condução contínua....44
Figura 3.22 – Evolução de I_L e I_{LB} para V_{out} constante....45
Figura 3.23 - Tensão e corrente na indutância no modo de condução descontínua....46
Figura 3.24 – Características do conversor no modo descontínuo para manter a tensão de saída constante....47
Figura 3.25 – Efeito dos elementos parasitas na tensão de saída do conversor....48
Figura 3.26 – *Ripple* da tensão de saída do conversor *Boost*....48
Figura 3.27 - Diagrama interno do CI TL594 (fonte: Motorola)....51
Figura 3.28 – Diagrama de blocos do Filtro Activo Paralelo....53
Figura 3.29 - Diagrama de blocos do Filtro Activo Paralelo Trifásico....53
Figura 3.30 - Diagrama de blocos de compensação das correntes através do Filtro Activo Paralelo no referencial α-β-0....55
Figura 3.31 - Diagrama de blocos de compensação das correntes no referencial *a-b-c*....57
Figura 3.32 – Diagrama de blocos do esquema do Filtro Activo Paralelo Monofásico....58
Figura 3.33 – Diagrama de blocos da interface de energias renováveis com a rede eléctrica e teoria p-q....59
Figura 4.1 – Esquema da simulação do conversor *Boost* e sistema de controlo....62
Figura 4.2 – Forma de onda da tensão e corrente de saída....63
Figura 4.3 - Forma de onda da corrente de entrada do conversor....63
Figura 4.4 – Forma de onda da tensão e corrente de saída....64
Figura 4.5 - Forma de onda da corrente de entrada do conversor e tensão aos terminais da bobina....64
Figura 4.6 – Esquema do conversor *Push-Pull* em ponte completa....65
Figura 4.7 – Forma de onda da tensão e corrente de saída e corrente média de entrada....66
Figura 4.8 – Forma de onda da tensão e corrente de saída e corrente média de entrada....67

Figura 4.9 – Esquema de simulação do Filtro Activo Paralelo Monofásico 68
Figura 4.10 – Circuito com carga passiva *RL* 69
Figura 4.11 - Formas de onda para uma carga *RL* 69
Figura 4.12 – Forma de onda no lado CC para uma carga *RL* 70
Figura 4.13 - Circuito com rectificador monofásico com filtro capacitivo paralelo e carga *RL* 71
Figura 4.14 - Forma de onda para o caso de um rectificador monofásico em paralelo com uma carga *RL* 71
Figura 4.15 - Forma de onda do lado CC 72
Figura 4.16 - Circuito com rectificador monofásico com filtro capacitivo e carga *RL* na saída 72
Figura 4.17 - Forma de onda para rectificador monofásico com filtro capacitivo e carga *RL* 73
Figura 4.18 - Forma de onda da tensão no lado CC 73
Figura 4.19 – Esquema de ligação da interface da eólica a rede eléctrica 74
Figura 4.20 - Formas de onda da carga passiva RL 75
Figura 4.21 – Forma de onda da tensão do lado CC e potência média injectada pela fonte de energia alternativa 75
Figura 4.22 - Forma de onda para o caso de um rectificador monofásico em paralelo com uma carga *RL* 76
Figura 4.23 - Forma de onda da tensão do lado CC e potência média injectada pela fonte de energia alternativa 77
Figura 4.24 - Forma de onda do rectificador monofásico com carga RL/C 78
Figura 4.25 - Forma de onda da tensão do lado CC e potência média injectada pela fonte de energia alternativa 78
Figura 5.1 – Esquema do Oscilador 80
Figura 5.2 - Esquema do circuito amplificador de erro de tensão 80
Figura 5.3 - Esquema do circuito amplificador de erro de corrente 81
Figura 5.4 - Esquema do circuito *soft-start* 82
Figura 5.5 – Esquema de ligação das saídas 83
Figura 5.6 - Esquema ligação do LM 317 84
Figura 5.7 – Sistema de acoplamento 85
Figura 5.8 – Sistema de controlo do conversor *Boost* 86
Figura 5.9 – Valores da resistência e indutância da bobina para diferentes frequências 87
Figura 5.10 – Esquema do conversor *Boost* 88
Figura 5.11 – Conversor *Step-up* (*Boost)* 88
Figura 5.12 – Bancada de ensaios 88
Figura 5.13 – Implementação do Filtro Activo Paralelo Monofásico 89
Figura 5.14 – Sistema de alimentação do conversor 90
Figura 6.1 – Esquema de montagem para a primeira carga 91
Figura 6.2 – Tensão e corrente de entrada para a primeira carga 92
Figura 6.3 – Tensão e corrente de saída para a primeira carga 92
Figura 6.4 - Esquema de montagem para a segunda carga 93
Figura 6.5 - Tensão e corrente de entrada para a segunda carga 93
Figura 6.6 - Tensão e corrente de saída para a segunda carga 94
Figura 6.7 - Esquema de montagem 94

Figura 6.8 - Tensão e corrente de entrada.....95
Figura 6.9 - Tensão e corrente de saída.....95
Figura 6.10 – Diagrama de blocos do Filtro Activo Paralelo Monofásico e carga com rectificador monofásico com filtro capacitivo, em paralelo e carga resistiva.....96
Figura 6.11 - Formas de onda da tensão e corrente da fonte com o filtro desligado.....96
Figura 6.12 - Formas de onda da corrente da fonte e referência com o filtro desligado.....97
Figura 6.13 - Formas de onda da tensão e corrente da fonte com o filtro ligado.....97
Figura 6.14 - Forma de onda da corrente da fonte, de referência e injectada com o filtro ligado.....98

Lista de Tabelas

Tabela 1.1 - Rendimento eléctrico dos vários tipos de células fotovoltaicas (Fonte: BP Solar).....5
Tabela 1.2 - Aplicações Solares Térmicas (Fonte: *raplus*).....7
Tabela 1.3 - Potência dos sistemas de energia de onda em Portugal.....15
Tabela 1.4 - Centrais Termoeléctricas fonte.....19
Tabela 1.5 - Incorporação anual de biocombustíveis nos transportes.....20
Tabela 3.1 - Exemplos de circuitos integrados para accionamento de interruptores semicondutores 50
Tabela 6.1 – Rendimento do conversor.....94

Capítulo 1 - Introdução

1.1 Identificação do Problema

Desde os princípios da civilização que o Homem necessitou de energia para sobreviver. Esta era obtida inicialmente através do vento, água e lenha, e mais recentemente, através do carvão, petróleo, gás e urânio. No entanto, a utilização destas últimas fontes de energia é crítica, uma vez que a sua reposição num espaço temporal à escala do homem é impossível e, para além disso, são muito poluentes causando graves problemas ambientais. De forma a combater estes problemas tem-se vindo a apostar em energias renováveis, reduzindo assim a utilização do petróleo e carvão, criando novas perspectivas de futuro e tentando, ao mesmo tempo, atingir os objectivos do protocolo de Quioto, que tem como meta aumentar a eficiência energética em 20% e um aumento de 20% da quota das energias renováveis na EU até 2020 [1].

Hoje em dia, as energias renováveis mais promissoras e que se encontram numa fase mais avançada de desenvolvimento são as energias hídricas, solares e eólicas. Contudo, a energia eólica destaca-se de todas as outras, dado que esta tecnologia é de rápida implementação e permite obter um custo por kilowatt-hora economicamente viável ou, no mínimo, socialmente interessante [2].

Os detentores da tecnologia das grandes unidades eólicas estão sediados principalmente nos EUA e na Europa. São exemplos disso, a Gamesa (Espanha), a VESTAS (Dinamarca), a REpower, e a GE Wind (USA), que produzem geradores de potência até 5MW [3] [4]. Em contrapartida, a tecnologia para mini-geradores eólicos ainda está em fase de desenvolvimento, surgindo constantemente diferentes tipos de máquinas, variando principalmente no *design* das pás, que é optimizado de acordo com o tipo de utilização.

O mercado dos mini-geradores eólicos encontra-se em crescimento, estando direccionado, fundamentalmente, para uso doméstico, criando-se assim, a possibilidade de uma produção e de um consumo de energia eléctrica de forma cada vez mais descentralizada.

Os mini-geradores eólicos existentes no mercado disponibilizam normalmente a energia eléctrica que produzem em corrente contínua, sendo por isso necessário um sistema de interface que permita a sua ligação à rede eléctrica. No caso presente optou-

se pela utilização de um conversor CC-CC (*Boost*) seguido de um Filtro Activo Paralelo Monofásico, solução que para além de permitir injectar energia na rede eléctrica, tem ainda a capacidade de resolver problemas de qualidade de energia eléctrica, como a eliminação de harmónicos de corrente e a correcção do factor de potência.

1.2 Objectivos do Trabalho

Este trabalho tem como objectivo principal fazer a interface entre um mini-gerador eólico e a rede eléctrica, com um custo da interface o mais económico possível.

Os objectivos específicos deste estudo são constituidos por:

- Estudar os principais tipos de energias renováveis existentes e identificar a sua importância na situação nacional;
- Efectuar um estudo dos diferentes tipos de geradores eólicos e das soluções existentes para fazer a interface com a rede de energia, com ênfase para os equipamentos de pequena potência;
- Identificar os dispositivos já existentes no mercado de ligação do gerador eólico à rede eléctrica;
- Estudar uma solução de baixo custo para a interface de um mini-gerador eólico com a rede eléctrica;
- Efectuar a simulação computacional do conversor (*Boost*), do Filtro Activo Paralelo Monofásico e do conjunto do conversor mais filtro;
- Implementar a interface do gerador eólico com a rede eléctrica.

Uma das partes constituintes do sistema de interface para a eólica implementada foi o sistema desenvolvido no âmbito de outro projecto que decorre no departamento de Electrónica Industrial. Ao autor da presente dissertação coube a tarefa de estudar e integrar o referido filtro no sistema (eólica + conversor + filtro).

1.3 Organização da Dissertação

Esta dissertação encontra-se dividida em 7 capítulos.

O capítulo 1, aborda os diferentes tipos de energias renováveis de uma forma resumida, determinando o seu impacto a nível nacional. Apresenta ainda uma introdução

aos problemas de qualidade de energia eléctrica, bem como algumas soluções possíveis existentes no mercado.

O Capítulo 2, apresenta as diferentes topologias das unidades eólicas para as diferentes gamas de potência. Neste capítulo são ainda referidos alguns exemplos de mini geradores eólicos existentes no mercado.

O Capítulo 3, identifica os diferentes tipos de soluções existentes para ligar os grandes geradores eólicos à rede eléctrica. São identificadas as principais topologias de conversores CC-CC, com ênfase para os conversores *Boost* e *Push-Pull* em ponte completa. É realizada também uma abordagem aos diferentes tipos de controlo existentes para os conversores CC-CC. Faz-se, ainda uma breve referência aos Filtros Activos Paralelos, à teoria p-q, bem como uma variação da possibilidade da ligação de fontes de energia renovável à rede eléctrica através de Filtros Activos Paralelos.

O Capítulo 4, apresenta as simulações no PSIM dos conversores *Boost* e *Push-Pull* em ponte completa, do Filtro Activo Paralelo Monofásico e da solução completa (conversor CC-CC + filtro), para diferentes situações de carga.

O Capítulo 5, descreve de uma forma pormenorizada como foi realizada a implementação do conversor *Boost,* e de uma forma mais sucinta o processo de implementação do Filtro Activo Paralelo Monofásico.

O Capítulo 6, ilustra os resultados obtidos pela implementação do conversor *Boost* e do Filtro Activo Paralelo Monofásico.

O Capítulo 7, apresenta as conclusões do trabalho efectuado, bem como algumas sugestões para trabalho futuro.

1.4 Fontes de Energia Alternativa

Qualquer fonte de energia que seja renovável num espaço de tempo relativamente curto é considerada uma fonte de energia renovável. Dentro destes tipos de fontes de energia, existem as não poluentes e as poluentes. A energia solar, eólica, hidroeléctrica, mares e ondas, são consideradas energias renováveis limpas (não poluentes), enquanto as produzidas a partir da geotérmica, biomassa e biocombustíveis são consideradas energias renováveis poluentes [5].

As quantidades de energias renováveis produzidas em Portugal em 2005 atingiram um total de 6375 MW, sendo 4818 MW em energia hídrica, 474 MW em biomassa, biogás e resíduos sólidos urbanos, 1063 MW em eólica, 18 MW em geotérmica e 2 MW em fotovoltaica [12].

Uma vez que tem que se apostar nas energias renováveis de forma a combater a dependência do petróleo e carvão, em seguida faz-se um resumo da situação em Portugal no que diz respeito à utilização das principais fontes de energia alternativas.

1.4.1 Energia Solar

Existem duas formas de conversão da energia solar. Esta pode ser transformada em energia eléctrica, através dos painéis solares fotovoltaicos, ou pode ser transformada em energia solar térmica [5].

1.4.1.1 Energia Solar Fotovoltaica

Os sistemas fotovoltaicos são extremamente vantajosos em locais remotos onde não está acessível a rede eléctrica, ou para sistemas, onde outra forma de obter energia eléctrica é praticamente impossível, como por exemplo no espaço [6]. O custo de obtenção da energia é muito elevado devido ao baixo rendimento das soluções actualmente disponíveis, prevê-se contudo que o aumento do preço da energia eléctrica nos próximos anos, bem como o aumento da eficiência das células fotovoltaicas, contribuirão para um aumento do recurso à energia solar fotovaltaica, e para a sua produção em grande escala.

As células fotovoltaicas são construídas por materiais semicondutores como o silício. Cada célula fotovoltaica é constituída por uma camada positiva (“n”) e uma camada negativa (“p”), produzindo entre si um campo eléctrico. Ao serem atingidas pelas partículas energéticas vindas do sol (fotões), as células libertam electrões produzindo desta forma corrente contínua [9]. A figura 1.1 ilustra aquilo que se designa por “efeito fotovoltaico”.

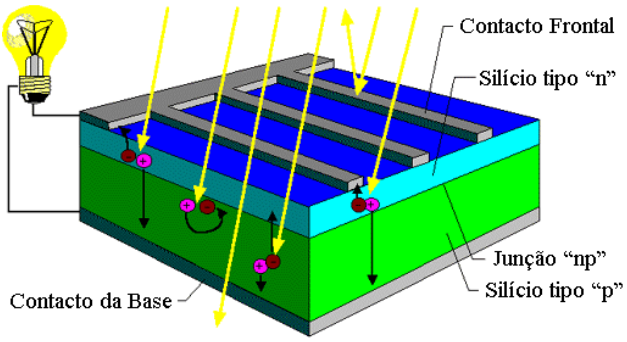


Figura 1.1 – Efeito fotovoltaico

Existem vários tipos de células fotovoltaicas (figura 1.2), sendo que cada tipo diferente de célula tem um rendimento típico (tabela 1.1).

Tabela 1.1 - Rendimento eléctrico dos vários tipos de células fotovoltaicas (Fonte: BP Solar)

Tecnologia	Rendimento Típico	Máximo Registado em aplicações	Rendimento máximo registado em laboratório
Mono-cristalino	12 - 15%	22.7%	24%
Poli-cristalino	11 - 14%	15.3%	18%
Amorfo	6 - 7%	10.2%	10.2%

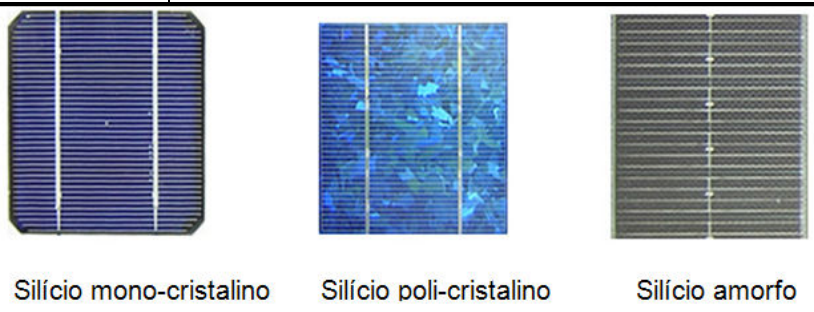


Figura 1.2 - Tipos de células fotovoltaicas

A quantidade de energia produzida por cada célula é muito limitada. Para que se produzam quantidades de energia razoáveis (com interesse prático), é indispensável associar várias células (em série e paralelo). O painel fotovoltaico da figura 1.3, por exemplo, é constituído por 72 células. A sua eficiência é de 18%, podendo produzir 225 W de potência máxima, o que implica que se tenha que ocupar uma grande área para produzir uma potência considerável. Este aspecto (para além do preço elevado), constitui a principal desvantagem deste tipo de energia [7] [8].

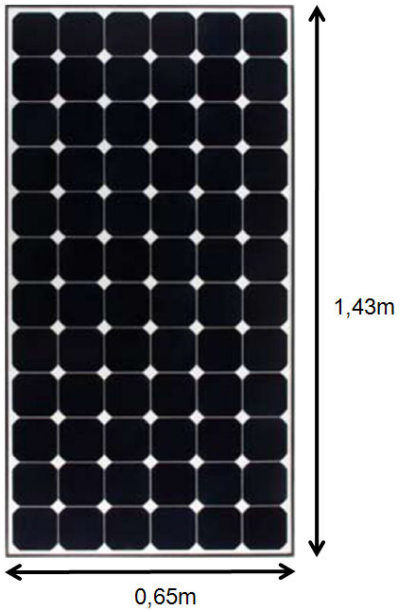


Figura 1.3 - Painel fotovoltaico

Em Portugal tem-se vindo a apostar na energia fotovoltaica. Para tal, tem-se vindo a construir parques fotovoltaicos, como o de Serpa (figura 1.4), com uma potência instalada de 11 MW ou o de Moura, com 62 MW, contribuindo assim para o objectivo que Portugal tem de atingir até o ano de 2010 os 150 MW [10].

Figura 1.4 - Central fotovoltaica solar de Serpa

1.4.1.2 Energia Solar Térmica

O aproveitamento solar térmico é mais comum para aquecimento de águas sanitárias através de colectores planos. Contudo é possível utilizar colectores concentradores e a partir daí, produzir energia eléctrica.

Os colectores planos são percorridos por um fluido térmico onde é aquecido, passando depois por um reservatório onde aquece a água para utilização [8].

Nos colectores concentradores os raios luminosos convergem num ponto fixo, elevando o fluido aí existente a uma temperatura elevada, podendo este ser utilizado para a produção de energia eléctrica ou para aquecimento de água a alta temperatura.

Na tabela 1.2, encontram-se identificadas as diferentes tecnologias existentes de aproveitamento solar térmico em função da temperatura e do tipo de aplicação da tecnologia [11].

Tabela 1.2 - Aplicações Solares Térmicas (Fonte: *raplus*)

Tecnologia	Temperatura ºC	Aplicação Típica
Plano sem cobertura	20-50	Piscinas
Plano com cobertura	50-100	Piscinas, Aquecimento, Águas sanitárias, Arrefecimento, Água Quente de Processos industriais
Cilindro parabólico fixo	100-110	Arrefecimento, Água Quente de Processos industriais
Tubo de vácuo	110-150	Água Quente de Processos industriais
Vácuo e Parabólico	150-180	Vapor para Processos industriais
Cilindro Parabólico	180-300	Vapor para Processos industriais, Produção de electricidade
Concentrador *Fresnel*	300-350	Produção de electricidade
Sistema prato *Stirling*	350-700	Produção de electricidade
Central de torre	700-1000	Produção de electricidade

Portugal tem vindo a apostar nos colectores solares para aquecimento de águas sanitárias. Foi mesmo lançado o Programa "Água Quente Solar para Portugal" que prevê

a instalação, até 2010, de um milhão de metros quadrados de colectores solares (figura 1.5) [12].

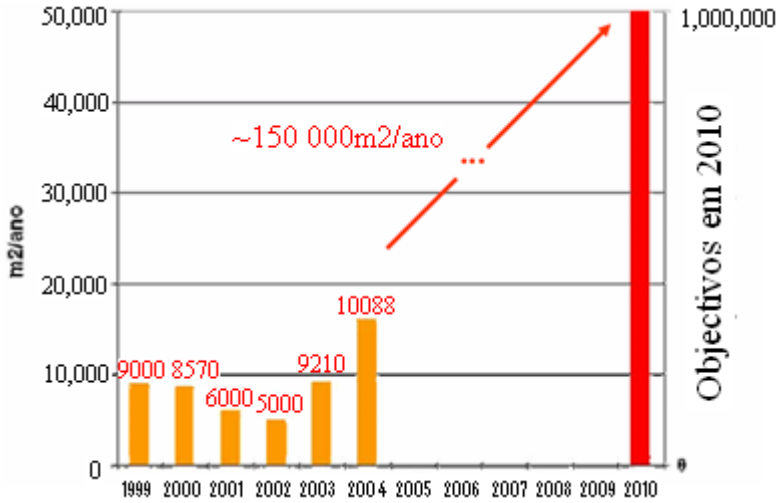


Figura 1.5 - Evolução da área de colectores solares instalados em Portugal

A implementação dos painéis solares térmicos em Portugal é destinada principalmente a piscinas, aquecimento, águas sanitárias, arrefecimento e água quente de processos industriais.

1.4.2 Energia Eólica

Este tipo de energia tem vindo a ser usada desde a antiguidade, com o recurso dos moinhos a vento, que tinham como finalidade bombear água e moer cereais. Mais recentemente são utilizados como aerogeradores eléctricos

Nas centrais eólicas é através dos aerogeradores que a energia eléctrica é obtida a partir da conversão da energia potencial do vento. Existem vários tipos de aerogeradores, os quais variam desde a altura da torre, número de pás, diâmetro e tipo de rotor. É possível encontrar no mercado turbinas eólicas que vão desde umas centenas de watts, até alguns megawatts de potência. Na figura 1.6, é apresentado um esquema de uma eólica de rotor vertical e um de rotor horizontal.

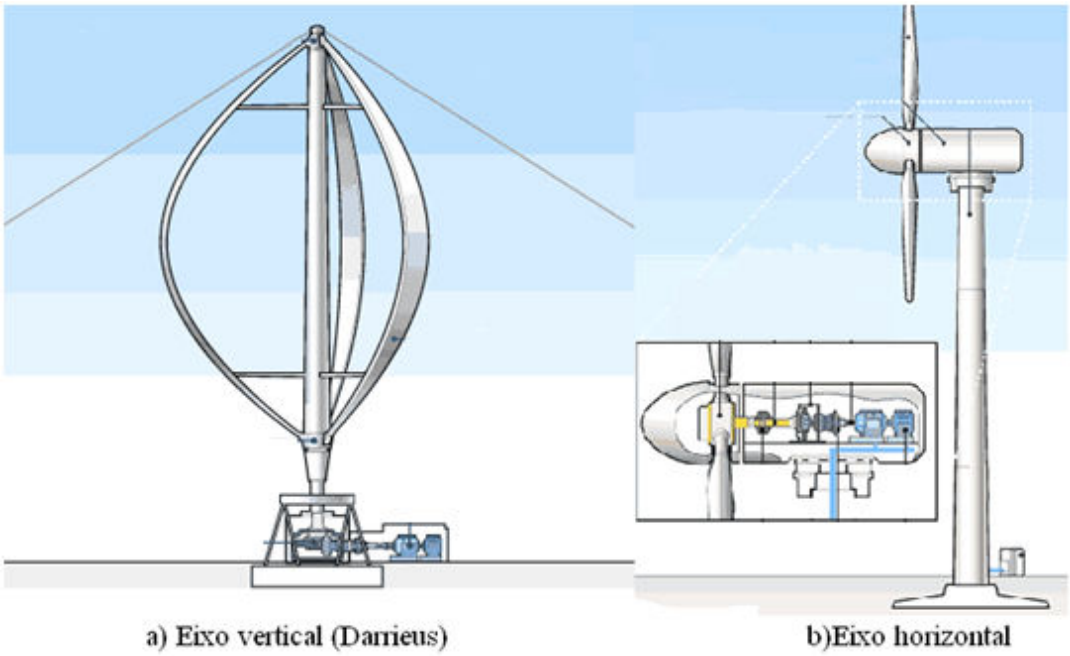


Figura 1.6 – Exemplos de aerogeradores disponíveis no mercado

Portugal tem vindo a apostar nesta tecnologia, já que é uma tecnologia amadurecida e de rápida implementação, (a figura 1.7 apresenta a evolução da potência eólica instalada em Portugal em 2006).

No capítulo 2, irá ser abordada com mais pormenor a energia eólica.

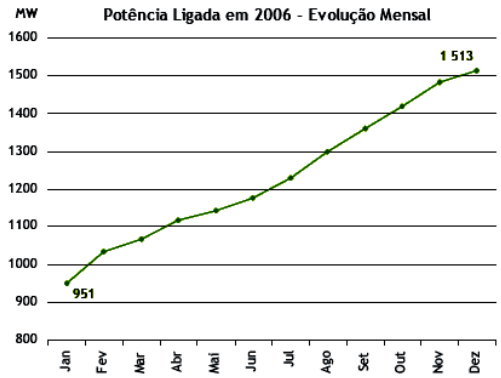


Figura 1.7 - Potência Eólica instalada até finais de 2006 (fonte REN)

1.4.3 Energia Hidroeléctrica

A energia hidroeléctrica emerge como a mais importante tecnologia dentro das energias renováveis, uma vez que permite a armazenagem de energia eléctrica, através de energia potencial da massa de água e permite produzir grandes quantidades de energia eléctrica.

A energia eléctrica é obtida pela conversão da energia potencial e cinética dos rios, em energia eléctrica através da movimentação das pás de uma turbina que está acoplada a um gerador eléctrico, que produz a energia.

Em Portugal, existem essencialmente médias e grandes hídricas, tendo no final de 2006 uma potência instalada de 4580 MW. As mini-hídricas correspondem a uma potência instalada de 370 MW, tendo, contudo, a tendência a aumentar futuramente [5].

A produção nacional da energia hidroeléctrica tem um papel importante na economia e na situação energética nacional, sendo possível ver na figura 1.8 a percentagem que ela representa na quota de potência instalada no parque electroprodutor.

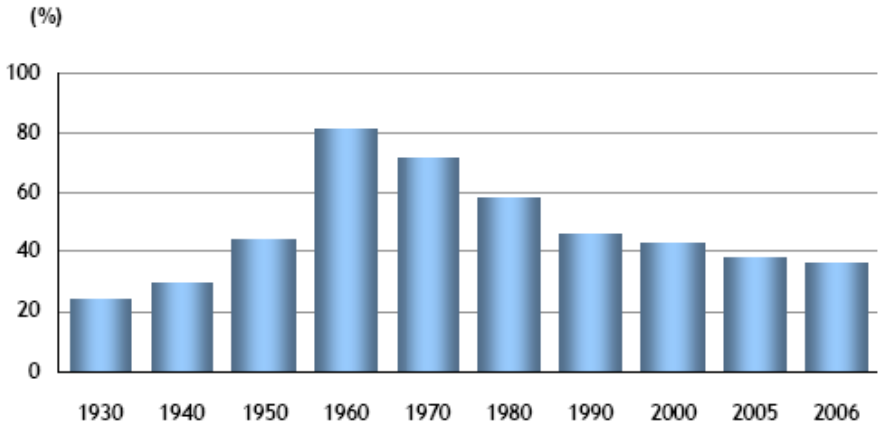


Figura 1.8 - Evolução da quota da potência hidroeléctrica no parque de electroprodutores (fonte: ren)

1.4.4 Energia Geotérmica

A energia geotérmica provém da energia térmica existente no interior da terra, aproveitando o calor das águas quentes aí existentes para produzir vapor que acciona turbinas ligadas a geradores eléctricos [14]. Esta energia é muito restrita, já que só pode ser explorada quando se observam determinados factores naturais, tais como:

- Os fluidos devem situar-se a baixa profundidade;
- O fluido tem que apresentar um baixo conteúdo de minerais e gases;
- A temperatura do fluido tem que ser superior a 150 ºC [16].

É ainda necessário ter em consideração o tipo de solo onde se efectua a perfuração, uma vez que pode haver a ocorrência de deslocamento de terras, caso a

pressão dentro dos poços de água não se mantenha estável [15]. Na figura 1.9 apresenta-se o esquema de produção de energia eléctrica através da energia geotérmica [14].

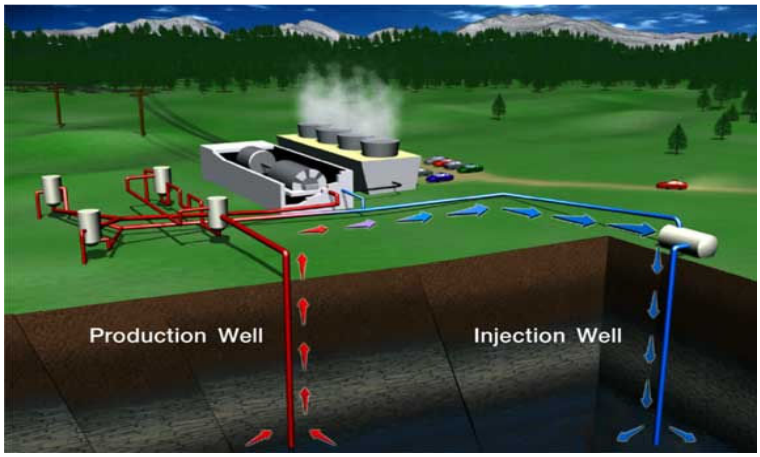


Figura 1.9 - Esquema de produção de electricidade através de energia geotérmica

Em Portugal, a energia geotérmica para a produção de energia eléctrica tem como principal fonte de produção os Açores, com 235 MW de potência instalada [5].

1.4.5 Energia das Ondas

A tecnologia que permite explorar a energia das ondas é recente, encontrando-se em grande desenvolvimento. Os rendimentos obtidos pela utilização desta tecnologia são baixos, não constituindo ainda uma proposta importante para resolver os problemas energéticos. No entanto este tipo de tecnologia apresenta um grande potencial se tivermos em atenção que, por exemplo, uma onda de três metros de altura corresponde a cerca de 25 kW de potência por metro linear de frente [5].

Existe uma grande variedade de dispositivos e métodos para captar a energia das ondas, mas tratando-se de uma tecnologia recente, não se encontra grande informação técnica disponível. É possível dividir as soluções de obtenção de energia das ondas em dois grupos.

1.4.5.1 Sistema na Costa

Este sistema localiza-se em águas pouco profundas, normalmente entre 8 e 20 m, sendo parte de um sistema apoiado directamente na costa. Causa algum impacto visual, mas possibilita um acesso fácil, em caso de manutenção [5].

O sistema de costa OWC (*Oscillating Water Column)* baseia-se numa câmara com uma abertura debaixo do nível do mar, onde as ondas provocam uma alteração de

pressão, conduzindo à movimentação de uma turbina que está acoplada a um gerador eléctrico, produzindo energia eléctrica. As turbinas são desenvolvidas para gerar quando o ar sai e entra do sistema, uma vez que quando entra uma onda, a pressão dentro da câmara é maior que no exterior saindo o ar, e quando a onda se retira, a pressão no interior da câmara fica menor que no exterior entrando ar. Este processo é apresentado na figura 1.10 [17].

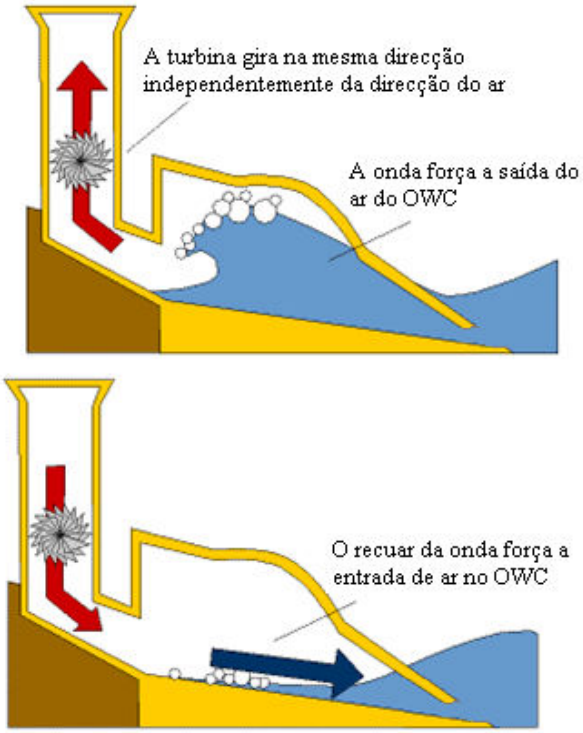


Figura 1.10 - Esquema de funcionamento do OWC

1.4.5.2 Sistema em Águas Profundas, Fora da Costa ("*Offshore*")

Este tipo de sistema situa-se, geralmente, entre os 25 m e 50 m de profundidade, comportando normalmente um corpo oscilante flutuante, embora em determinados casos o sistema fica totalmente submerso. O sistema de exploração de energia pode ser efectuado com o auxílio de uma turbina de ar ou de equipamentos, tipo motores eléctricos e sistemas óleo-hidráulicos acoplado a geradores eléctricos [18].

A vantagem deste tipo de sistema em relação ao sistema da costa reside no facto de não depender das condições da costa, sendo também mais apropriado para aproveitamento de energia das ondas em grande escala. No entanto, são sistemas mais complexos, o transporte de energia para terra é mais complicado, a amarração ao fundo

do mar é um problema complexo e é uma solução que interfere com a navegação e pesca.

Sistema AWS (*Archimedes Wave Swing*)

A tecnologia do sistema ASW teve origem na Holanda, consistindo numa câmara cilíndrica com ar pressurizado a qual tem uma parte fixa e uma parte móvel (tampa). A parte móvel move-se para cima e para baixo com a pressão da água, com se pode constatar na figura 1.11 [19].

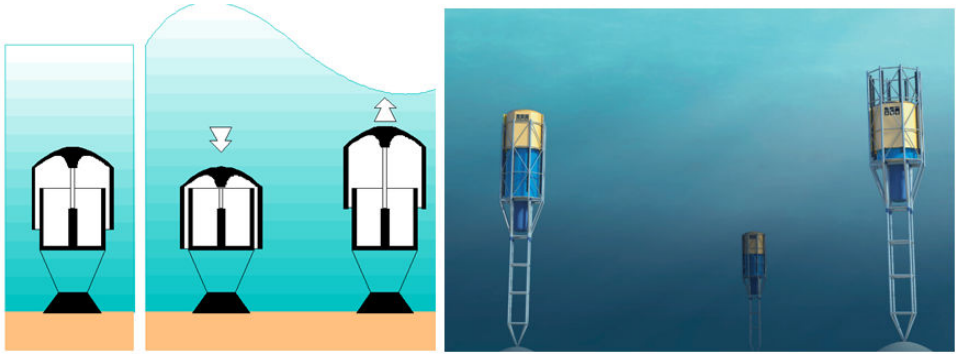


Figura 1.11 - Funcionamento do AWS

O movimento da tampa é aproveitado para fazer girar uma máquina que converte a energia mecânica em energia eléctrica.

Sistema FWPV (*Floating Wave Power Vessel*)

O sistema FWPV consiste numa plataforma flutuante que recolhe a água depositada pela rebentação das ondas numa rampa. A água é recolhida num depósito que se encontra acima do nível do mar (figura 1.12) e quando este se encontra cheio é esvaziado através de várias turbinas que estão acopladas a geradores [20].

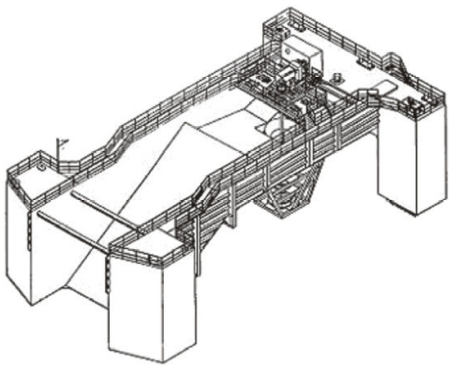


Figura 1.12 - Esquema do sistema FWPV

Sistema *Pelamis*

É uma estrutura semi-submersa composta por quatro secções cilíndricas unidas por juntas articuladas. A conversão de energia é feita nas três juntas de ligação. O esquema de ligações pode ser visto na figura 1.13 [21].

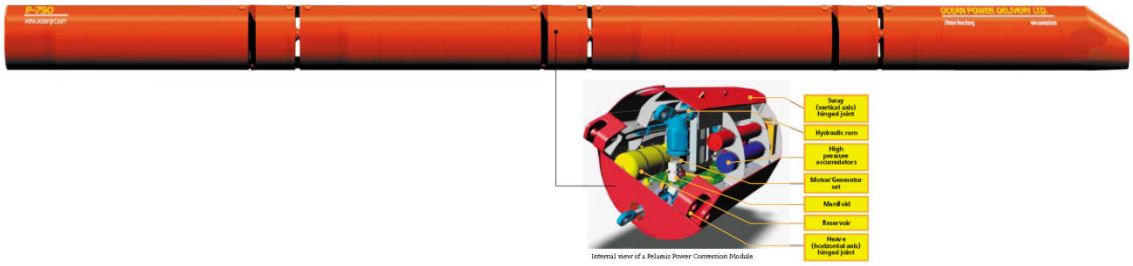


Figura 1.13 - Conversor de energia *Pelamis*

O movimento das juntas é feito através de ramos hidráulicos que bombeiam óleo a alta pressão para motores hidráulicos, os quais estão acoplados a geradores eléctricos, produzindo energia eléctrica.

Situação Nacional das Energias das Ondas

Portugal tem sido uns dos pioneiros neste tipo de tecnologia, tendo já a funcionar um sistema do tipo OWC nos Açores e em fase de implementação um sistema ASW e outro do tipo *Pelamis* (com uma de 750 kW) instalados na Póvoa de Varzim. A implementação pode ser observada na figura 1.14, e as potências instaladas em cada central, na tabela 1.3.

a) Central *Pelamis* b) Central OWC c) Central AWS

Figura 1.14 - Implementação dos sistemas das energias das ondas

Tabela 1.3 - Potência dos sistemas de energia de onda em Portugal

Tecnologia	*Potência*	*Localização*
AWS	2MW	Povoa Varzim
Pelamis	750kW	Povoa Varzim
OWC	400kW	Açores Ilha do Pico
OWC	1MW	Foz do Douro (em desenvolvimento)

1.4.6 Energia das Marés

A energia é obtida de modo idêntico ao da energia hidroeléctrica. É construída uma barragem que bloqueia o mar, formando um reservatório. Quando a maré está alta, a água entra dentro do reservatório passando por uma turbina acoplada a um gerador eléctrico, produzindo energia eléctrica. Quando a maré está baixa, a água sai do reservatório passando de novo pela turbina, produzindo assim mais energia eléctrica [5]. Este tipo de sistema pode ser visto na figura 1.15.

Figura 1.15 - Esquema de obtenção de energia do mar

Em Portugal foi utilizado este tipo de tecnologia há muitos anos, não tendo como finalidade a produção de energia eléctrica, mas sim a moagem de cereais. O moinho da figura 1.16 (designado por Moinho Novo de Marim) constitui um exemplo deste tipo de aplicação, tendo funcionado pela primeira vez, a 15 de Agosto de 1855 [23].

Figura 1.16 - Moinho de Maré do Parque Natural da Ria Formosa

1.4.7 Biomassa

A biomassa é utilizada para a produção de combustíveis tais como o biogás, o biodiesel, o etanol, ou o metanol. A partir da queima destes combustíveis ou dos produtos primários da biomassa, é possível produzir diversas formas de energia, incluindo energia eléctrica. Existe um grande leque de produtos primários para a obtenção do produto final, tais como os derivados das actividades agrícolas, os produtos e subprodutos da floresta e os resíduos da indústria da madeira [22]. O processo de tratamento dos resíduos é apresentado na figura 1.17.

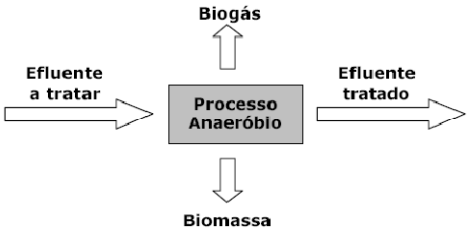


Figura 1.17 - Processo de digestão anaeróbia

Este tipo de tecnologia apresenta inúmeras vantagens, nomeadamente, a redução da emissão de gases com efeito de estufa, o aumento da diversidade de oferta da energia, a produção de energia sustentável a longo prazo, a criação de oportunidades de emprego, o desenvolvimento económico local, bem como a diminuição das importações de combustíveis convencionais [5].

A produção de energia eléctrica é obtida através da incineração de combustíveis ou dos produtos primários da biomassa numa caldeira, resultando vapor de água, gases e resíduos. O vapor é aproveitado por uma turbina de vapor que está acoplada a um gerador eléctrico, produzindo energia eléctrica. O esquema de incineração e produção de energia eléctrica pode ser visto na figura 1.18.

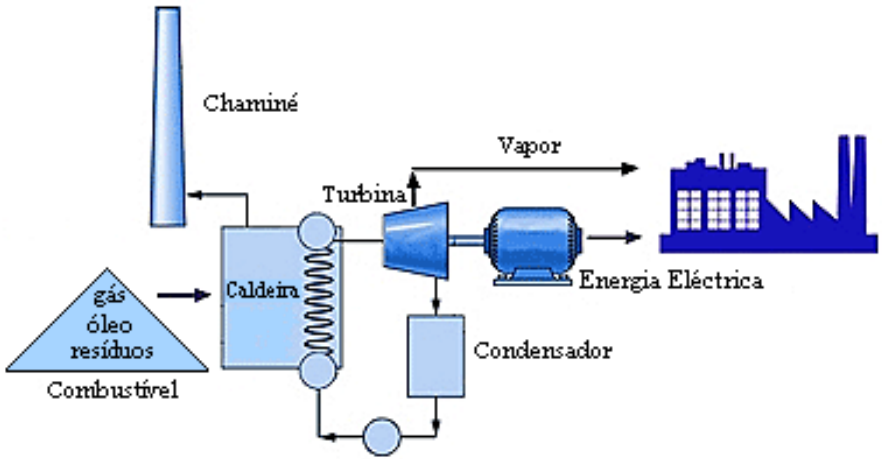


Figura 1.18 - Esquema de ligação de incineração e produção de energia eléctrica

1.4.7.1 Aproveitamento dos Lixos

Grande parte do lixo é reutilizável pelo processo de reciclagem, tendo o restante como destino, os aterros controlados, aterros sanitários, centrais de compostagem e centrais de incineração. O lixo tem um grande valor calorífico, variando entre 5 (madeira verde) e 44 (polietileno), podendo por isso ser útil grande parte do lixo não utilizado pela reciclagem [5]. Os resíduos podem ser aproveitados dos seguintes modos:

Incineração: os resíduos são queimados a temperaturas de 1100 ºC, resultando na produção de energia eléctrica, alguns gases e cinzas.

Gasificação: a partir da combustão parcial (com deficiência de oxigénio) dos resíduos, obtém-se um gás combustível que pode ser utilizado para diversos fins.

Pirólise: os detritos são aquecidos a 430 ºC, o que provoca a sua decomposição orgânica, resultando em alguns gases, líquidos e alguns materiais sólidos.

Este tipo de técnicas tem a vantagem de reduzir a quantidade de detritos necessários a colocar em aterros e a redução do impacto ambiental. Como contrapartida, apresenta um custo bastante elevado de instalação, manutenção, e em certos casos, pode provocar maus cheiros e emissão de partículas [5].

1.4.7.2 Biogás

Resulta da decomposição anaeróbica de matéria orgânica (decomposição de matérias orgânicas em meio anaeróbio por bactérias denominadas metanogénicas). O poder calorífico do biogás é de 50-60 % do conseguido com gás natural, mas por outro lado, o seu impacto em termos de poluição ambiental é muito menor [22].

Para além da produção de energia a partir do biogás constituir um processo simples e de baixo custo de manutenção, a utilização deste combustível reduz o impacto dos resíduos orgânicos no meio ambiente, bem como as emissões de gases de efeito de estufa. Para além disso, vai de encontro à política energética nacional, na qual Portugal terá de produzir até o ano de 2010, 50MW de energia eléctrica a partir do biogás. Empresas como a Envirogas já possuem sistemas com uma potência total instalada de 6 MW (distribuídas por todo país).

O biogás é apropriado para uma produção de energia do tipo caseira. Nalguns sectores como, por exemplo o sector agrícola onde numa exploração com 100 bovinos pode-se produzir cerca de 36 m^3 de biogás por dia. Este volume correspondendo à produção de 234kW/dia de energia eléctrica, constituindo, deste modo, um investimento rentável [5]. Na figura 1.19 apresenta-se o esquema de um gerador da *Haase* com uma potência de 1,25 MW, funcionando a biogás.

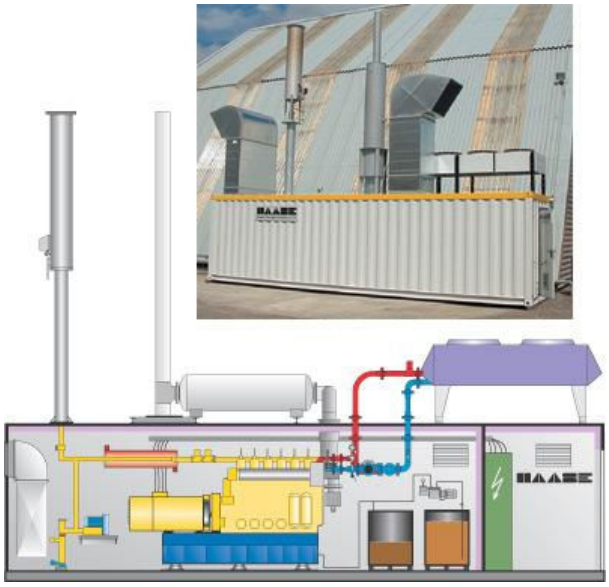


Figura 1.19 - Gerador de energia da *Haase* usando biogás

1.4.7.3 Resíduos Florestais

O aproveitamento dos resíduos florestais é utilizado para a produção de energia eléctrica ou para a produção de briquetes (aglomerado de madeira altamente densa), onde é utilizado como combustível em fornalhas e caldeiras. Constituí uma mais-valia, uma vez que os resíduos são muitas vezes deixados nas florestas, sem qualquer aproveitamento, podendo causar graves incêndios [5]. Em Portugal os resíduos florestais são aproveitados em centrais termoeléctricas, como a de Mortágua.

Em Portugal, a floresta preenche quase 40% do território nacional, razão pela qual se tem vindo a apostar na conversão dos seus resíduos. O nosso país tem como objectivo para o ano de 2010, atingir 250 MW de potência instalada, estando para já em pleno funcionamento apenas 24 MW e 10 MW em fase de implementação. Na tabela 1.4, estão identificadas algumas das centrais que já se encontram em funcionamento em Portugal.

Tabela 1.4 - Centrais Termoeléctricas fonte

Centrais	*2007*
Mortágua	10MVA
Vila Velha de Ródão	13 MW
Santa Maria da Feira e Oliveira de Azeméis (em implementação)	11MW

1.4.7.4 Biocombustíveis

Os biocombustíveis surgem da necessidade de se obter alternativas ao petróleo, uma vez que esta é uma fonte não renovável e altamente poluente. Os biocombustíveis são obtidos através de produtos naturais ou lixo, resultando em diversos produtos, tais como álcool, éteres, ácidos gordos e biodiesel. Vários países europeus tentam assim atingir os objectivos mínimos propostos pela directiva 2003/30/CE [24], pela qual se comprometem a incorporar uma percentagem mínima de biocombustíveis em relação ao consumo de combustíveis fósseis (figura 1.20).

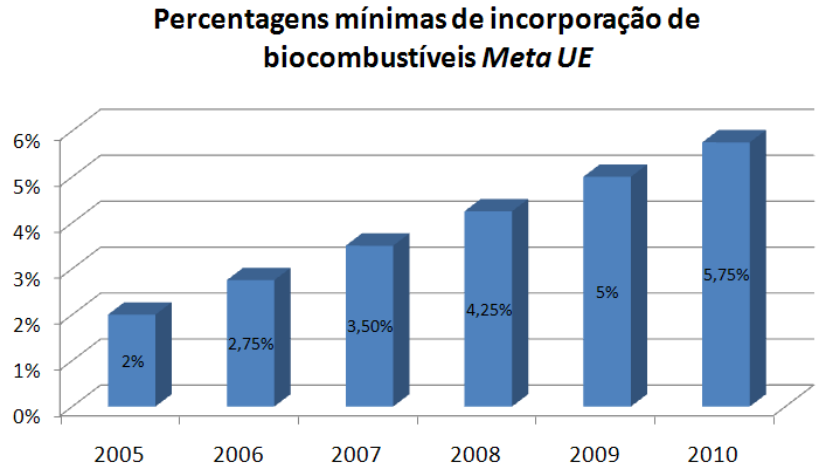


Figura 1.20 - Percentagens mínimas de incorporação de biocombustíveis

Em Portugal, tem-se vindo a apostar principalmente no bioetanol e no biodiesel, sendo este obtido através da reacção entre um ácido e um álcool denominada de

transesterificação. Na tabela 1.5 pode ser observado os valores anuais de incorporação dos biocombustíveis nos transportes.

Tabela 1.5 - Incorporação anual de biocombustíveis nos transportes

		2005	2010
Consumo total	Gasolina (m^3)	2535279	2429834
	Gasóleo (m^3)	6510035	7348518
Consumo de biocombustíveis	Bioetanol (m^3)	8055 (2% do total de consumo de Gasolina)	132413 (5,8% do total de consumo de Gasolina)
	Biodiesel (m^3)	122133 (2% do total de consumo de Gasóleo)	396356 (5,8% do total de consumo de Gasóleo)

1.5 Problemas de Qualidade da Energia Eléctrica e Soluções

Os principais problemas que podem por em causa a qualidade de energia eléctrica são:

- Factor de potência
- Flutuações de tensão (*flicker*)
- Harmónicos
- Inter-harmónicos
- Interrupções
- Ruído (interferência electromagnética)
- Subtensões temporárias ou cavas (*sag*)
- Sobretensões temporárias (*swell*)
- Micro-cortes (*notches*)
- Transitórios vários

Estes problemas podem causar graves falhas no funcionamento dos equipamentos, como a destruição, o encerramento, o bloqueio, o mau funcionamento e, ainda levar ao pagamento de uma taxa, caso ultrapasse determinado valor pré acordado (exemplo disso é o factor de potência).

As soluções clássicas para alguns destes problemas passam, normalmente, pela utilização de bancos de condensadores (para correcção do factor de potência) e pela utilização de filtros LC (para resolver problemas com harmónicos).

Como alternativa às soluções clássicas, desenvolveram-se mais recentemente Filtros Activos de Potência (série ou paralelo), os quais permitem resolver grande parte dos problemas de qualidade de energia eléctrica.

Os Filtros Activos Paralelos solucionam os problemas relacionados com os harmónicos de corrente resultantes da utilização cada vez mais intensa de cargas não-lineares ligadas à rede eléctrica, para além de compensarem desequilíbrios de corrente e permitirem fazer a compensação do factor de potência. Uma vez que no sistema de interface da eólica descrito neste trabalho se utiliza como bloco de saída um Filtro Activo Paralelo, que ao mesmo tempo permite injectar energia na rede e resolver alguns problemas de qualidade de energia eléctrica, este tipo de filtros será abordado de forma mais detalhada nos capítulos seguintes.

Capítulo 2 - Geradores Eólicos

A energia eólica provém dos ventos, sendo estes causados pela diferença de pressão ao longo da superfície terrestre, devido à radiação solar na terra ser maior nas zonas equatoriais do que nas polares, produzindo assim grandes correntes de ar. Os ventos com maior velocidade e direcção mais adequada situam-se a cerca de 10 km da superfície terrestre, sendo para já impossível o seu aproveitamento. Actualmente os ventos que são aproveitados encontram-se a algumas centenas de metros acima da superfície terrestre [5].

O potencial eólico de um determinado local deve ser avaliado ao longo dos anos, recorrendo a anemómetros e sensores de direcção de vento (figura 2.1). Muitas vezes tal não acontece na prática, tomando-se decisões com base nos registos estatísticos efectuados durante um ano.

Figura 2.1 - Sensor de direcção do vento (esquerda) e anemómetro de copos (à direita)

A potência eólica instalada na Europa tem vindo a aumentar de ano para ano, como se pode observar na figura 2.2 e nos Anexo 1e 2.

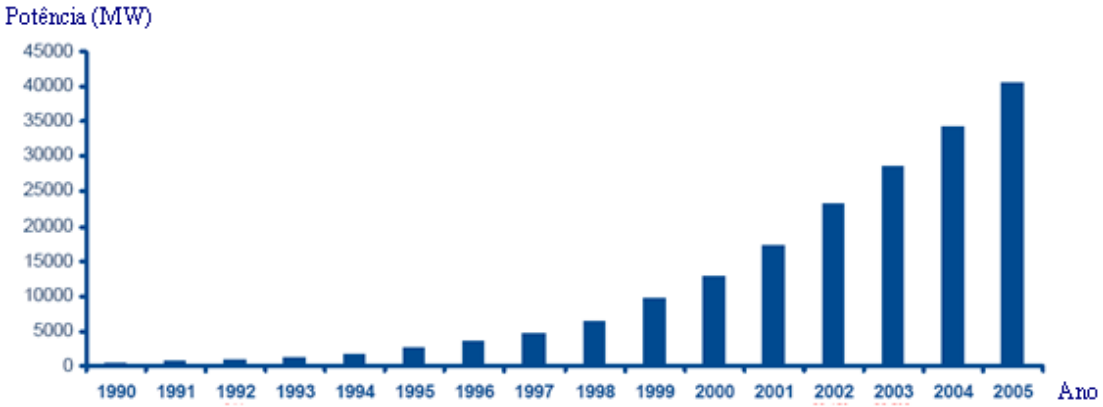


Figura 2.2 - Potencia eólica instalada na União Europeia

2.1 Componentes de um Sistema Eólico

Os geradores eólicos são constituídos por diversos elementos, sendo os principais os seguintes (figura 2.3):

- Pás do rotor: transformam a energia cinética do vento em energia mecânica;
- Transmissão e Caixa Multiplicadora: transmite a energia mecânica entregue pelo rotor ao gerador eléctrico. Alguns sistemas não utilizam estes componentes, sendo o rotor acoplado directamente ao gerador;
- Gerador eléctrico: converte a energia mecânica em energia eléctrica;
- Mecanismo de Controlo: orienta o rotor para o vento, controla a velocidade do vento e a carga suportada pelo gerador;
- Torre: sustenta e posiciona o rotor na altura conveniente;
- Transformador: faz o acoplamento eléctrico entre o aerogerador e a rede eléctrica

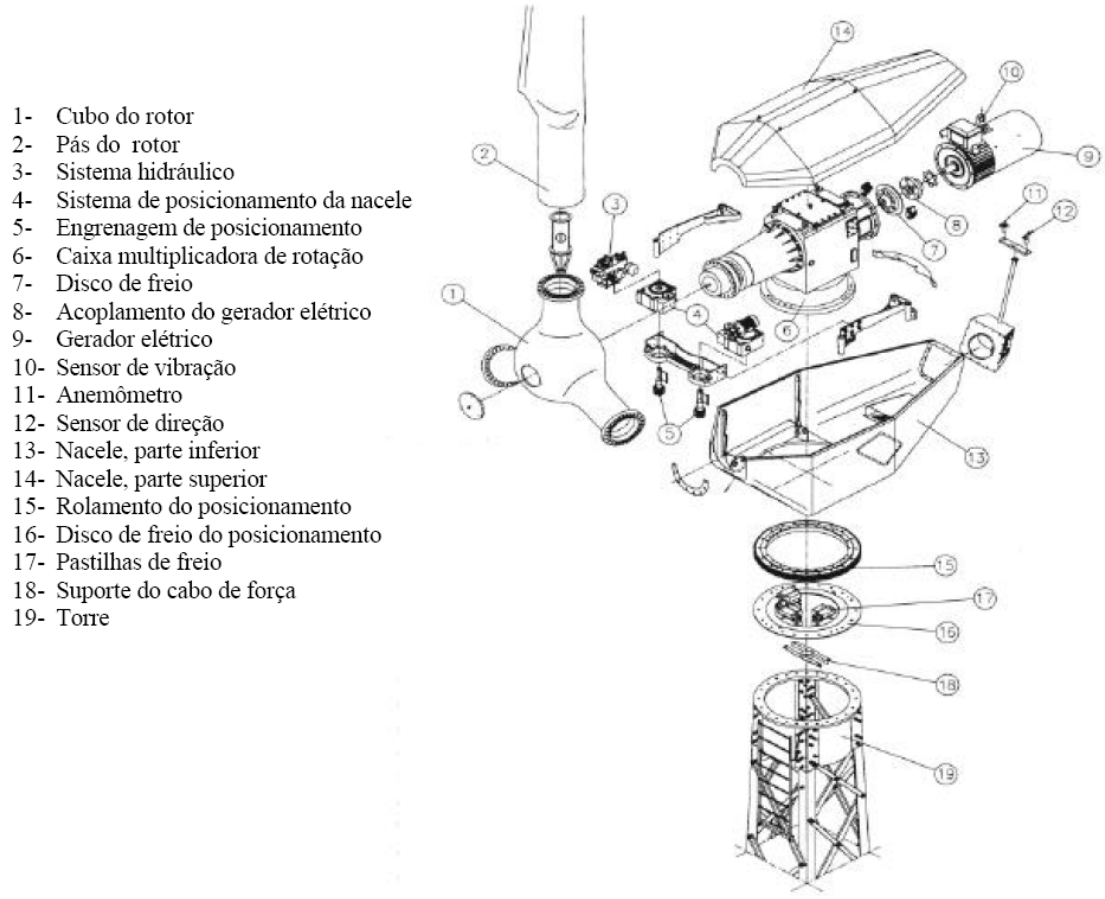


Figura 2.3 - Aerogerador

Um dos componentes mais importantes de uma eólica é as pás, uma vez que o seu *design* e tamanho influenciam directamente o rendimento, a potência e o preço do conjunto.

Os sistemas eólicos podem ser de eixo vertical ou de eixo horizontal, quer para as pequenas eólicas, quer para as grandes eólicas, embora neste último caso praticamente só sejam utilizadas as de eixo horizontal [25].

2.2 Turbina de Eixo Vertical

Esta tecnologia foi patenteada em 1927, pelo Engenheiro Francês *Darrieus*. A única eólica de eixo vertical comercializada com potência instalada considerável, foi a turbina de *Darrieus*, tendo esta 2 ou 3 pás (figura 2.4) [5].

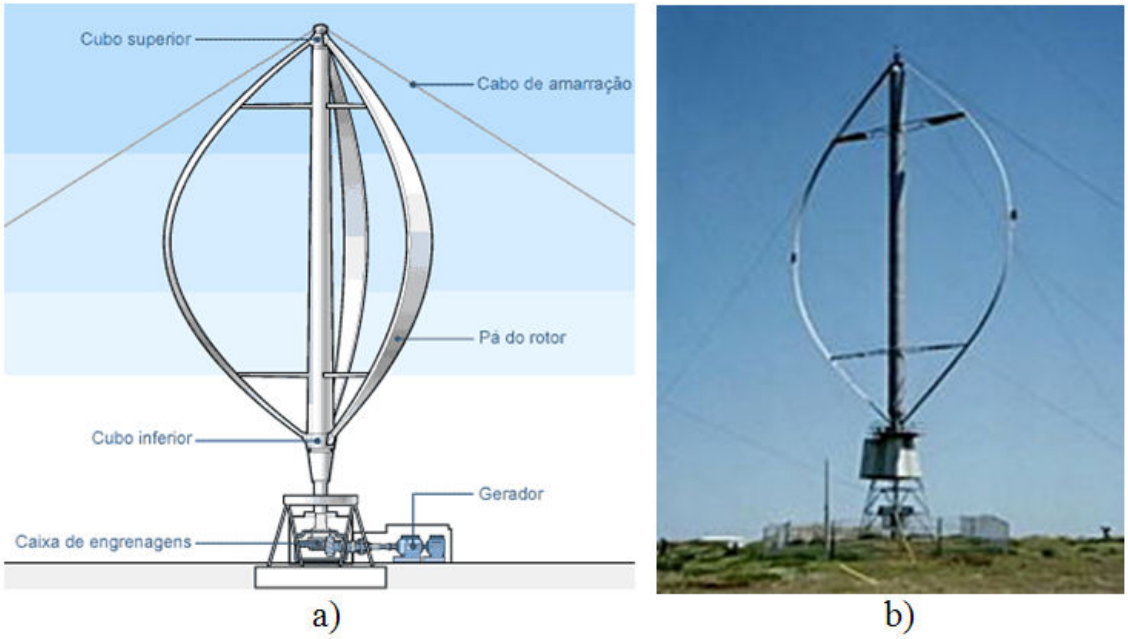


Figura 2.4 - Turbina de eixo vertical a) Esquema, b) *Darrieus* de 2 pás

As principais vantagens deste tipo de turbinas são:

- Maior rendimento que as de eixo horizontal;
- Concepção simples;
- Rodar independentemente da direcção do vento;
- Possibilidade de se instalar os diversos equipamentos de geração de energia junto ao solo.

Os principais inconvenientes são os seguintes:

- A velocidade junto ao solo é muito baixa;
- Normalmente este tipo de sistema não possui auto-arranque, necessitando de um mecanismo externo;

- Em alguns casos há necessidade de colocar cabos de tensão, aumentado a área de ocupação;
- Caso seja necessário substituir o rolamento principal, é necessário desmontar praticamente toda a turbina, tornando-se num processo demorado e dispendioso;

A última grande unidade deste tipo (a *Eole C*) foi instalada no Canadá. Tinha 4.200 kW de potência, um rotor com 100 m de diâmetro e deixou de funcionar em 1998, devido a problemas de manutenção. Em Portugal, nunca foi construído um parque eólico com geradores deste tipo.

2.3 Turbina de Eixo Horizontal

Todos os parques eólicos a nível mundial são constituídos por turbinas de eixo horizontal, uma vez que esta tecnologia possibilita um custo de implementação e manutenção mais reduzido que as turbinas de eixo vertical. À medida que o desenvolvimento da tecnologia o permite, o tamanho das torres e das pás vai crescendo, já que quanto mais alto estiver o rotor mais constantes são os ventos, conseguindo-se assim maiores potências e melhores rendimentos. [26]. A relação entre o diâmetro do rotor e a potência instalada pode ser constatada na figura 2.5

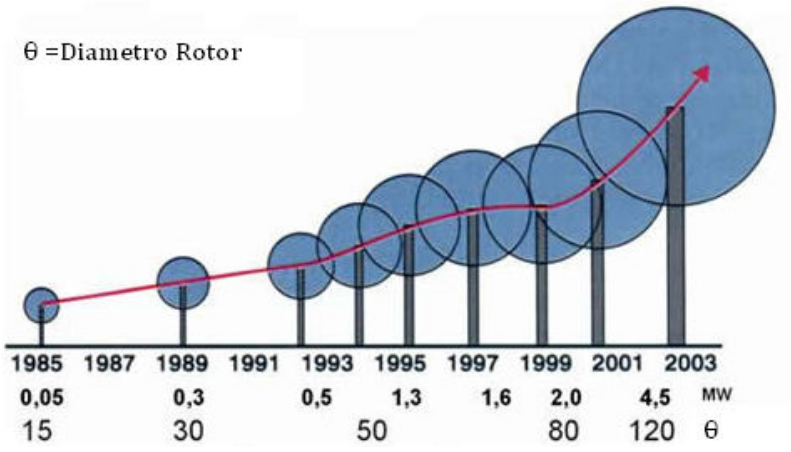


Figura 2.5 - Relação entre diâmetro do rotor e potência (fonte: TreeHugger)

As turbinas de eixo horizontal normalmente são constituídas por três pás, mas existem eólicas de uma, duas ou mais de três pás. As eólicas de uma ou duas pás têm normalmente um menor custo a nível de materiais, e um impacto visual menor. Por outro lado, a redução do número de pás faz com que o rendimento e a estabilidade

sejam menores [26]. As turbinas com mais de três pás são mais caras e tem um impacto visual maior, não sendo hoje em dia fabricados geradores deste tipo.

As turbinas podem ser colocadas em terra ou no mar (*offshore*), apresentando este tipo de colocação um melhor rendimento, uma vez que no mar os ventos são mais constantes. No entanto, os parques eólicos no mar apresentam várias desvantagens, como o facto de estarem afastados das redes de transporte de energia, tornando o sistema de conexão mais caro, a complexidade e o custo elevado da sustentação da eólica quando a costa marítima é profunda, ou ainda o facto de afectarem a navegação [26]. Na figura 2.6, é apresentado um esquema de uma eólica de rotor horizontal e um exemplo de parque *offshore*.

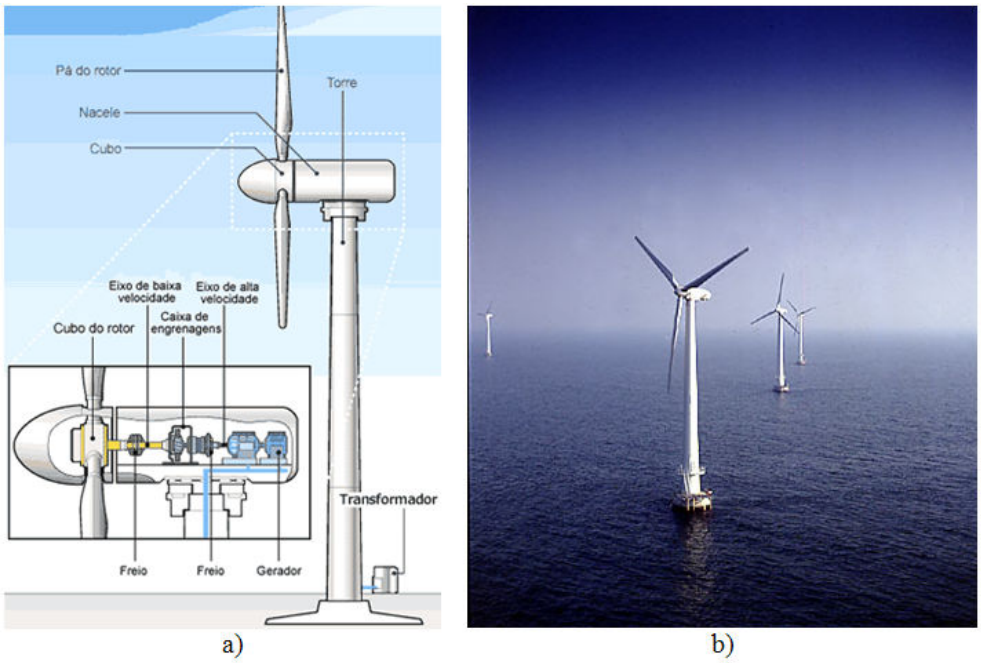


Figura 2.6 - Turbina eólica de rotor horizontal a) Esquema, b) *offshore*

Em Portugal, só existem parques eólicos implementados em terra com geradores de rotor horizontal. O primeiro parque foi criado em 1988, em Santa Maria (Açores). Actualmente, os parques eólicos estão espalhados por todo o país (figura 2.7), havendo em Junho de 2007, 1731 MW de potência instalada [27].

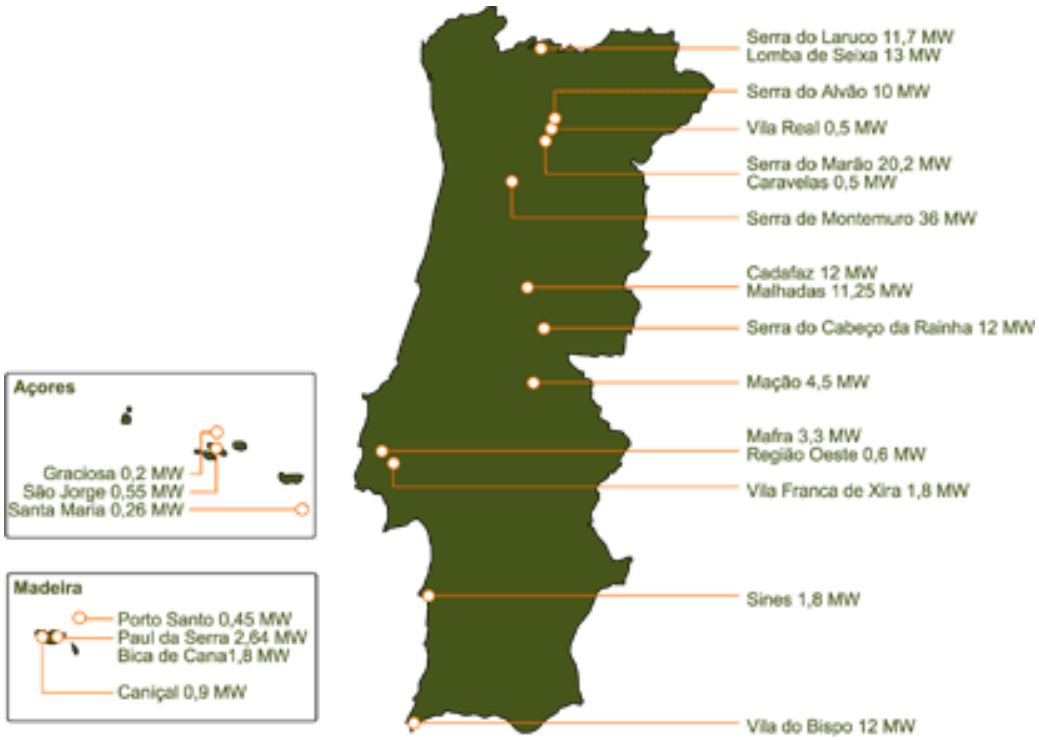


Figura 2.7 - Mapa com alguns parques eólicos instalados em Portugal

Com o objectivo de cumprir o protocolo de Quioto prevê-se que até 2010, Portugal tenha uma capacidade de geração de energia eólica de 4500 MW, cumprindo assim a meta de 39 % de produção de energia eléctrica com base em energias renováveis.

2.4 Grandes Unidades Eólicas

As turbinas eólicas consideradas de grandes dimensões tem uma potência instalada entre 50 kW e alguns MW, tendo um diâmetro do rotor compreendido entre 15 m e 124 m, havendo a expectativa de em 2020 atingir os 20 MW, em aerogeradores com pás com cerca de 120m de raio [28].

A título de exemplo apresenta-se as características de um dos maiores aerogerador actualmente comercializados (gerador da Enercon, modelo E-112, figura 2.8):

- Aerogerador de segunda geração (9 unidades construídas)
- Potência Nominal: 4,5 - 6 MW
- Diâmetro: 114 m
- Altura: 124 m
- Velocidade variável: 8 - 13 rpm
- 1º Protótipo construído em 2002

Figura 2.8 - Eólica da Enercon modelo E-112

2.5 Pequenos Geradores Eólicos

Estes geradores compreendem-se, normalmente, entre alguns *watts* e algumas dezenas de *Kilowatts,* e têm como finalidades micro parques eólicos, máquina piloto de um possível parque eólico de grandes dimensões, consumo doméstico e de pequenas empresas [29]. Geralmente, não estão ligadas directamente à rede eléctrica e apresentam menos condicionantes pelas características envolventes, do que as grandes eólicas [30].

Este tipo de geradores eólicos é muito vantajoso, sendo utilizado em locais isolados onde não está acessível a energia eléctrica. Outra aplicação típica é em barcos.

2.5.1 Mini-Geradores Eólicos

O mercado de mini-geradores eólico encontra-se ainda em fase de grande desenvolvimento, surgindo constantemente novos tipos de máquinas para diferentes tipos de utilização, que diferem principalmente no tipo de rotor, e no *design* das pás.

Os mini-geradores possuem potências típicas da ordem de poucas dezenas de *kilowatts*, existindo dois tipos: os de eixo vertical e os de eixo horizontal.

2.5.1.1 Mini-Gerador de Eixo Vertical

Nesta gama de potência encontram-se no mercado sobretudo geradores do tipo vertical, tais como os exemplos que se seguem.

Turbina Eólica Ropatec

Este sistema de eixo vertical é uma solução baseada no *Savonius* e no *Darrieus*, existindo no mercado turbinas eólicas entre 300 W e 6 kW.

Este tipo de geradores não necessita de mecanismo externo para fazer o arranque, e tem algumas características especiais, como p. ex., um formato de pás que dispensa mecanismos de arranque auxiliares. O exemplo da figura 2.9 é capaz de produzir 6 kW a partir de ventos de 14 m/s não possuindo mecanismo de corte para velocidades elevadas.

Figura 2.9 - WindRotor Modelo WRE.060

Turbina Eólica *Turby*

É uma turbina de eixo vertical (figura 2.10) que possui um *design* de pás único, sendo concebidas para serem utilizadas em meios urbanos, mais especificamente em cima dos prédios, aproveitando os ventos ascendentes e turbulentos. O sistema não tem mecanismo de corte, produzindo, por isso, cada vez mais energia à medida que a velocidade do vento aumenta [31]. Têm 2 m de diâmetro, produzem 2,5 kW a 14 m/s e custam cerca de 11500 €.

Figura 2.10 – Turbina eólica *Turby*

2.5.1.2 Mini-gerador de Eixo Horizontal

Os mini-geradores de eixo horizontal são os que se encontram mais no mercado, variando estes, principalmente, no tamanho e *design* das pás, e na potência por elas produzidas. No mercado podem ser encontradas turbinas com geradores deste tipo tais como:

Turbina Eólica *Bornay*

Este fabricante de turbinas produz mini-geradores eólicos de potências que vão desde os 250 W até aos 6 kW. O modelo Inclin 600, p.ex. (figura 2.11), inclui um alternador trifásico de ímanes permanentes e uma potência nominal de 600 W. Este aerogerador é equipado com um rotor de duas pás, com diâmetro de 2 metros e tem um custo (sem instalação) de 2300,00€ [32].

Figura 2.11 – Turbina eólica Inclin 600

Turbina Eólica AIR

O fabricante da turbina AIR (*Southwest Windpower*, *Inc*.), produz turbinas eólicas com potências a partir dos 200 W até aos 3,2 kW, variando na dimensão e no *design* das

pás. A turbina utilizada neste trabalho (a AIR 403) é deste tipo. Possui uma potência nominal de 400 W, está equipada com um rotor de três pás com um diâmetro de 1,17 metros (figura 2.12) e tem um custo (sem instalação) de 1000€ [33].

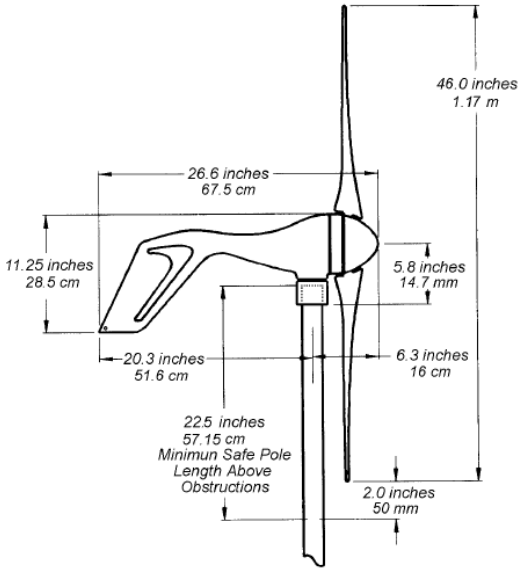


Figura 2.12 – AIR 403

O gerador eólico AIR 403 é equipado com um gerador síncrono trifásico de rotor de ímanes permanentes e inclui um rectificador e um regulador de tensão, transformando a tensão alternada de amplitude variável, numa tensão contínua de 12 V, 24 V, 36 V ou 48 V, possibilitando fazer assim a conexão directa da saída da eólica a um banco de baterias. Na figura 2.13 apresenta-se o esquema dos diversos componentes constituintes do gerador eólico AIR 403.

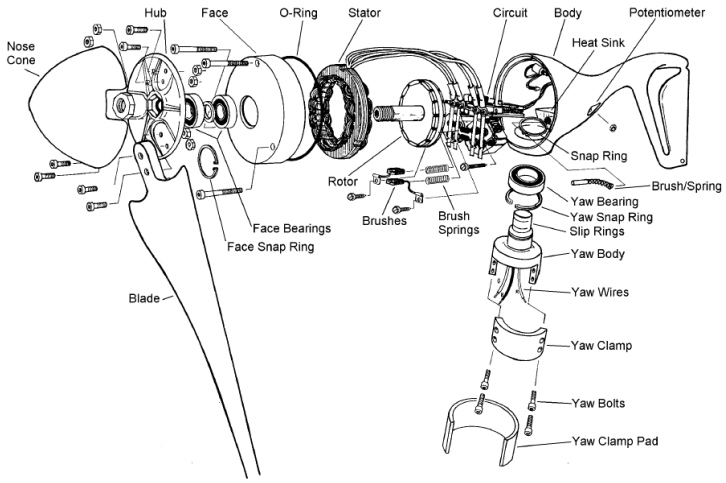


Figura 2.13 – Esquema dos componentes constituintes da eólica AIR 403

Capítulo 3 - Interface com a Rede Eléctrica

A ligação de fontes alternativas de energia à rede eléctrica constitui um desafio, quer em termos de procura de soluções técnicas, quer mesmo em termos legais. A legislação que regula o modo como este tipo de energia é injectado na rede eléctrica prevê, p. ex., que os produtores devem fornecer uma parcela de potência reactiva que seja, pelo menos, 40 % da energia activa produzida, (alínea d do artigo 22º do decreto-lei nº 313/95 de 24 de Novembro) [44].

3.1 Interface com a Rede Eléctrica de Grandes Eólicas

Os principais tipos de associação de grandes aerogeradores e respectiva electrónica de interface que é possível encontrar na prática são os seguintes:

- Gerador assíncrono com rotor em gaiola de esquilo;
- Gerador assíncrono com rotor em gaiola de esquilo e conversor de frequência;
- Gerador assíncrono com dupla alimentação (de rotor bobinado);
- Gerador síncrono ligado directamente a rede eléctrica;
- Gerador síncrono com conversor de frequência;
- Gerador síncrono com conversor de frequência e sem caixa de velocidade;

As figuras 3.1 a 3.6 apresentam o esquema simplificado das várias soluções possíveis.

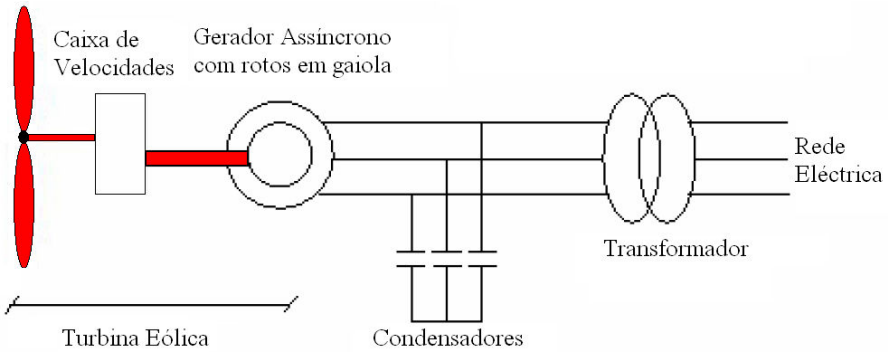


Figura 3.1 – Gerador assíncrono com rotor em gaiola de esquilo

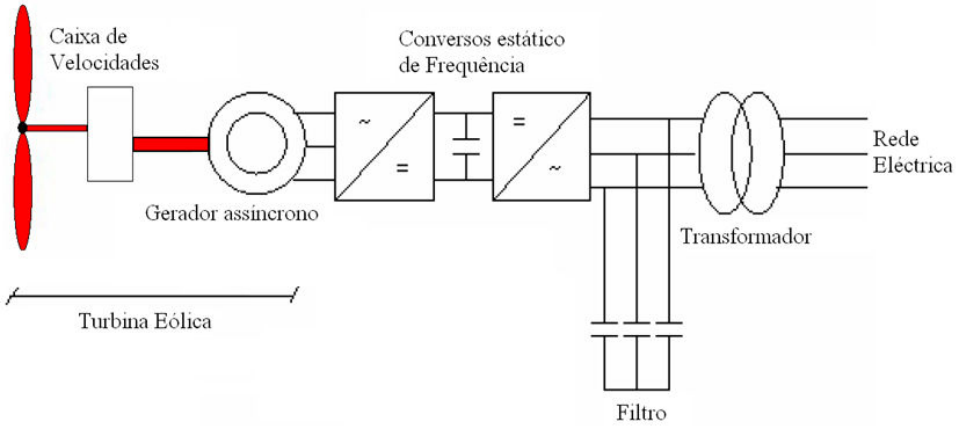


Figura 3.2 - Gerador assíncrono com rotor em gaiola de esquilo e conversor de frequência

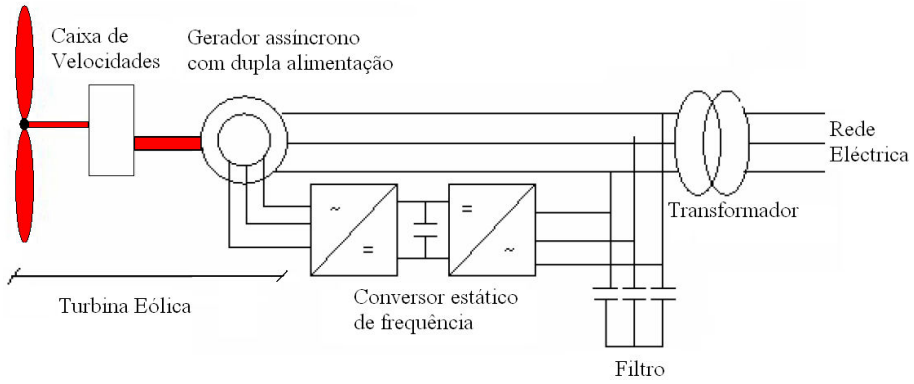


Figura 3.3 - Gerador assíncrono com dupla alimentação (de rotor bobinado)

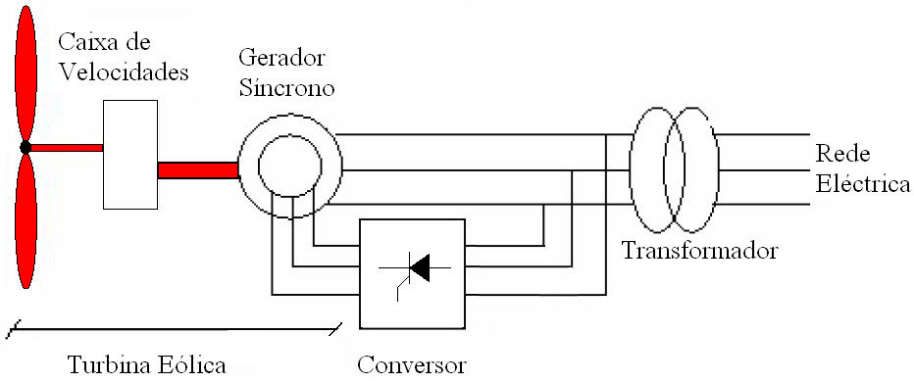


Figura 3.4 - Gerador síncrono ligado directamente a rede eléctrica

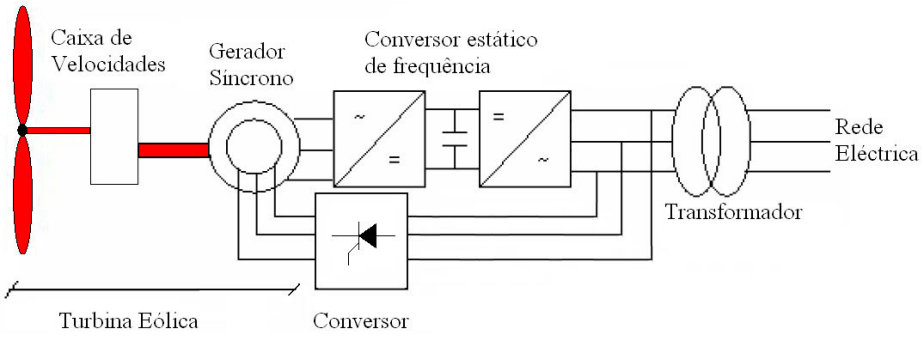


Figura 3.5 - Gerador síncrono com conversor de frequência

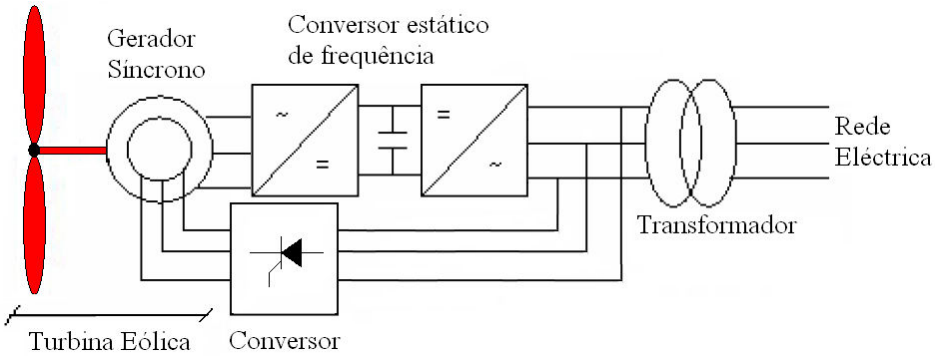


Figura 3.6 - Gerador síncrono com conversor de frequência e sem caixa de velocidade

3.2 Interface com a Rede Eléctrica de Pequenas Eólicas

A energia produzida por pequenos geradores eólicos é normalmente utilizada para consumo de cargas isoladas da rede eléctrica, já que assim não é preciso obedecer a determinadas normas como as referidas anteriormente. As pequenas unidades eólicas disponibilizam normalmente corrente contínua à saída (regulada para ligação directa a baterias), sendo por isso necessário utilizar um inversor (como p. ex., o das figuras 3.7 e 3.8), para gerar uma forma de onda equivalente à da rede eléctrica. No mercado existe uma grande variedade destes dispositivos, variando principalmente na tensão de alimentação e na potência, como é o caso dos inversores da *Studer*, com modelos como o AJ 400 para potências até 400 W, tensão de entrada de 48 V e um custo aproximado de 300 € ou o AJ 1000, para potências até 1000 W e tensão de entrada de 12 V, tendo um custo de cerca de 700 €.

Para fazer a interface de pequenas unidades eólicas com a rede eléctrica, o conceito é idêntico ao que é utilizado para alimentar uma carga isolada, mas o sistema de controlo é mais complicado, uma vez que é necessário obedecer a determinadas restrições como, p. ex., a tensão de saída tem que estar sincronizada com a da rede

eléctrica. O número de equipamentos para fazer a interface de pequenas eólicas com a rede eléctrica disponíveis no mercado é ainda relativamente reduzido. Existem ainda assim alguns exemplos, como é o caso, do IG 15 e IG 60HV da *Froniusih* com potências de saída de 15 e 60 kW e com um preço a oscilar entre 1400 € e 2700 €.

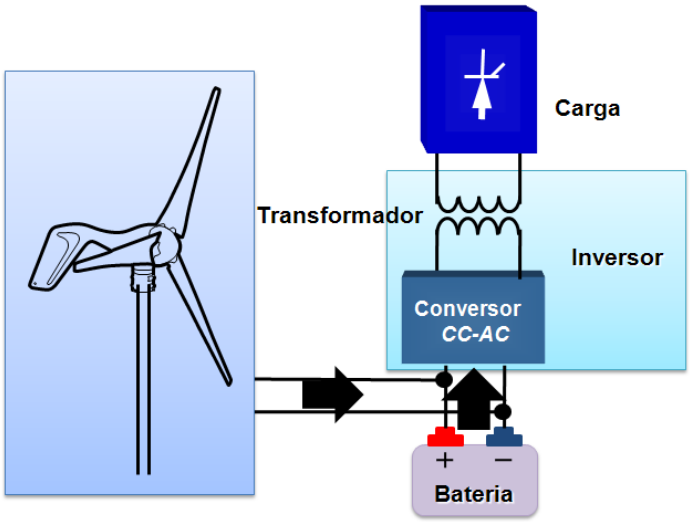


Figura 3.7 – Diagrama de blocos do sistema de alimentação de uma carga através de um inversor com transformador

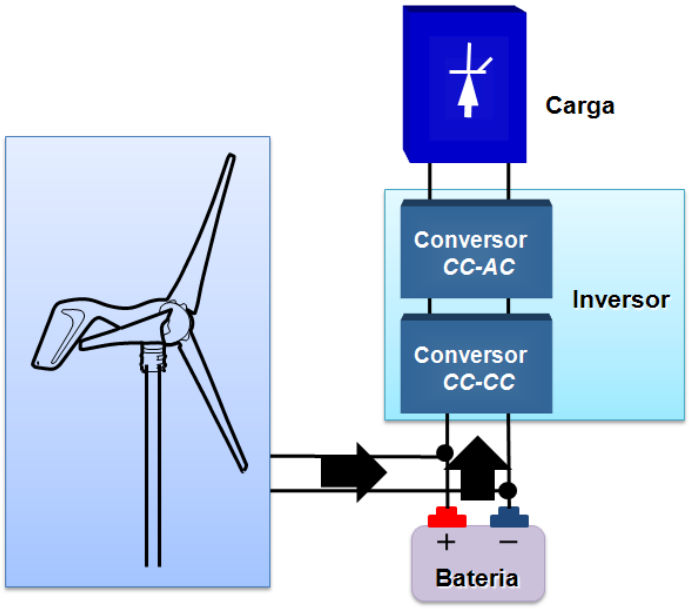


Figura 3.8 - Diagrama de blocos do sistema de alimentação de uma carga através de um inversor sem transformador

Um dos objectivos deste trabalho consistia na implementação de um sistema de interface de uma pequena eólica com a rede eléctrica. Na solução aqui proposta optou-se por utilizar um conversor CC-CC (*Boost*) para fazer o ajuste da tensão de saída da eólica para níveis compatíveis com os da tensão de entrada (CC) de um Filtro Activo

Paralelo que, por sua vez, injecta a energia na rede eléctrica (figura 3.9). A vantagem da utilização do Filtro Activo Paralelo Monofásico, tem a ver com o facto de permitir integrar diferentes fontes de energia alternativa (partilhando o mesmo barramento de corrente contínua), para além de possibilitar a solução de alguns problemas de qualidade de energia eléctrica, como é o caso da correcção do factor de potência e da eliminação de harmónicos.

Em seguida analisa-se com algum detalhe os conversores de potência acabados de referir, ou seja, os conversores CC-CC e os Filtros Activos Paralelos.

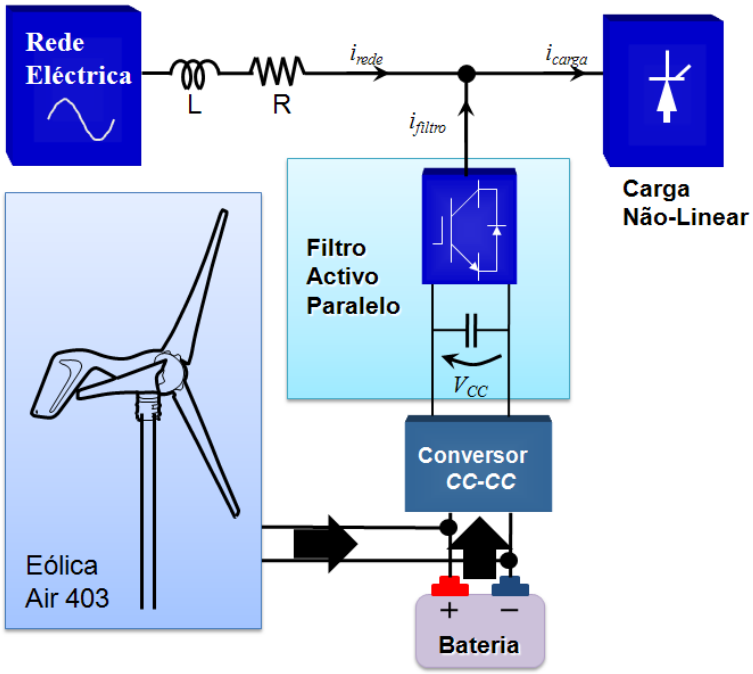


Figura 3.9 - Diagrama de blocos da interface entre a eólica e a rede eléctrica

3.3 Conversores CC-CC

Os conversores CC-CC permitem obter uma saída em corrente contínua (regulada ou não) de valor diferente da tensão de entrada. Este tipo de conversores pode ainda ser isolado, permitindo neste caso (para além de isolamento galvânico) um ajuste adicional da amplitude da tensão quando necessário [34].

3.3.1 Conversores CC-CC Não-Isolados

Os conversores CC-CC não-isolados são a solução indicada quando este requisito não é indispensável e não são necessárias razões de transformação elevadas, uma vez que são simples de implementar e têm baixo custo.

São constituídos, geralmente, por um indutor, um díodo, um interruptor controlado e condensadores – um à entrada, outro à saída do circuito. O seu controlo é feito por modulação de largura de impulso (PWM), utilizando frequências de comutação que vão desde alguns kHz até centenas de kHz, dependendo da potência de saída e do tipo de aplicação.

Nas figuras que se seguem apresentam-se os esquemas simplificados das configurações básicas de conversores não-isolados.

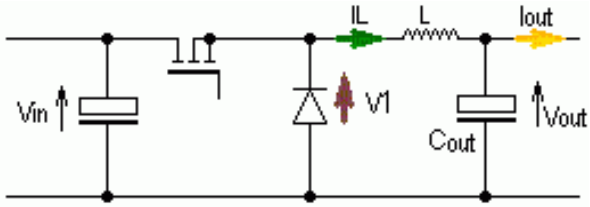


Figura 3.10 – Conversor *Step-Down* (*Buck*)

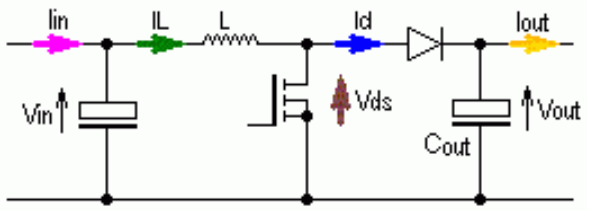


Figura 3.11 - Conversor *Boost (Step-Up)*

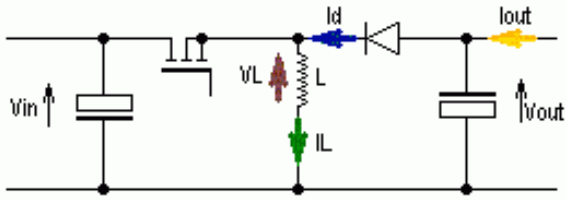


Figura 3.12 – Conversor *Buck-Boost*

3.3.2 Conversor CC-CC Isolado

Os conversores isolados são adequados para altas taxas de elevação ou redução da tensão de entrada. Derivam directamente dos conversores CC-CC não-isolados, mas incluem um transformador (normalmente de alta frequência) entre a entrada e a saída. Além de garantir isolamento, o uso do transformador permite reduzir os picos de tensão e de corrente dos interruptores semicondutores, possibilitando ainda múltiplas saídas.

Os tipos de conversores isolados mais comuns são:

- O *Flyback* (derivado do *Boost*)
- O *Forward* (derivado do *Buck*)

- O *Push-Pull* (derivado do *Buck*)

Os conversores variam, principalmente, no número de interruptores semicondutores que utilizam e nas aplicações a que se destinam. Nas figuras que se seguem apresentam-se os esquemas simplificados das configurações básicas destes conversores.

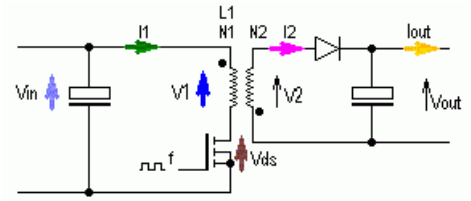


Figura 3.13 - Conversor *Flyback*

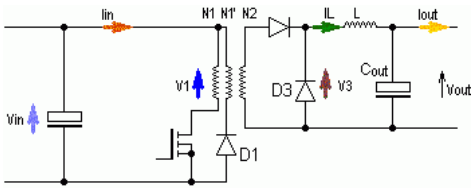


Figura 3.14 – Conversor *Forward* (transístor simples)

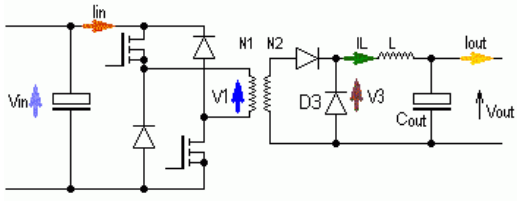


Figura 3.15 – Conversor *Forward* (dois transístores)

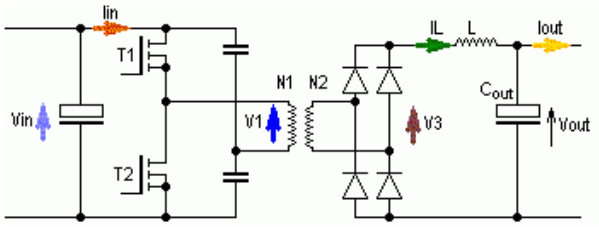


Figura 3.16 - Conversor *Push-Pull* em Meia Ponte

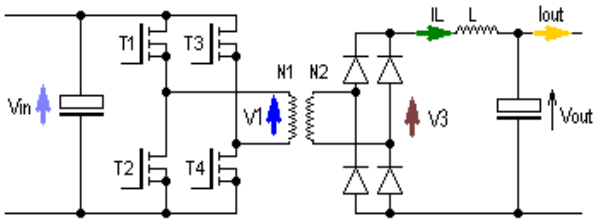


Figura 3.17 – Conversor *Push-Pull* em Ponte Completa

3.3.3 Conversores CC-CC para Utilização no Sistema de Interface da Eólica com a Rede Eléctrica

Em seguida analisa-se com algum detalhe o funcionamento dos conversores *Push-Pull* em ponte completa e do conversor *Step-up (Boost),* uma vez que foram aqueles cuja utilização foi ponderada ao longo deste trabalho, como bloco de entrada para o sistema de interface da eólica com a rede eléctrica.

3.3.3.1 Conversor *Push-Pull* em Ponte Completa

O conversor *Push-Pull* em ponte completa (figura 3.17) é um conversor CC-CC isolado muito utilizado, quer para elevar, quer para baixar uma tensão CC. Possui várias vantagens, nomeadamente o facto de poder ser utilizado para potências mais elevadas comparativamente com o conversor *Push-Pull* em meia ponte, uma ver que os interruptores semicondutores conduzem metade da corrente. Para este conversor são válidas as seguintes expressões (úteis para os cálculos relacionados como o projecto):

Tensão de Saída

$$V_{out} = V_{in} \cdot D \cdot a \tag{3.1}$$

Onde D e a são:

$$D = \frac{T_{on}}{T_s} \tag{3.2}$$

$$a = \frac{N_2}{N_1} \geq \frac{V_{out}}{V_{in}} \tag{3.3}$$

Onde:

V_0 é a tensão de saída do conversor;

V_{in} é a tensão de entrada do conversor;

D é o *duty-cycle* (ou factor de serviço);

a é a razão de transformação do transformador;

t_{on} é o tempo que os interruptores semicondutores estão ligados;

T_s é o período do sinal de comando;

N_1 é o número de espiras do primário;

N_2 é o número de espiras do secundário.

Corrente de Saída

$$\mathrm{I}_{\mathrm{out}} = \frac{\Delta I_L}{2} \tag{3.4}$$

$$\text{Onde } \Delta I_L = \frac{1}{2 \cdot L \cdot f}\left(V_{in} \cdot \frac{N_2}{N_1} - V_{out}\right)\left(\frac{V_{out}}{V_{in} \cdot \frac{N_2}{N_1}}\right) \tag{3.5}$$

Onde:

I_{out} é a corrente de saída;

ΔI_L é a variação da corrente na indutância;

L é o valor da indutância;

f é a frequência de comutação.

A utilização deste conversor para a entrada do sistema de interface para a eólica foi avaliada, mas esta solução acabou por ser abandonada por requerer demasiados componentes e apresentar custos demasiado elevados comparativamente ao conversor *Boost* apresentado a seguir. Mais adiante apresentam-se apenas os resultados relativos à análise do seu funcionamento, obtidos por simulação.

3.3.3.2 Conversor *Step-up* (*Boost*)

Os conversores do tipo *Boost* (figura 3.18) são conversores CC-CC não isolados que permitem produzir na saída uma tensão superior à de entrada (dependendo do valor do *duty-cycle*, *D*), sendo principalmente utilizados para regular ou elevar a tensão CC das fontes de alimentação e para fazer a travagem regenerativa de motores CC. Quando o interruptor é ligado (t_{on}), a corrente na indutância (L) aumenta e nela se armazena energia sob a forma de um campo magnético. Quando o interruptor está desligado (t_{off}), a energia armazenada na indutância é transferida através do díodo *D* para o condensador e para a carga. [35]. Na análise que se segue admite-se que todos os componentes são ideais (sem perdas) e que as tensões de entrada e de saída são aproximadamente constantes.

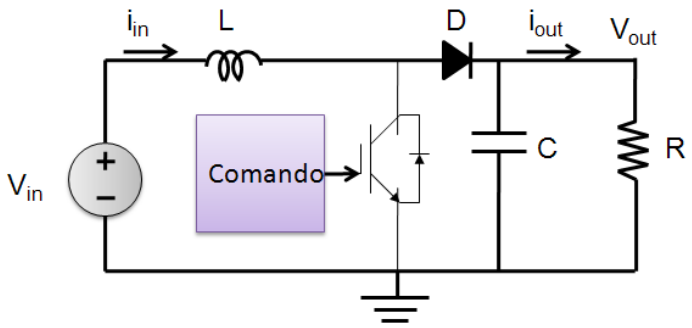


Figura 3.18 – Conversor *Step-up* (*Boost*)

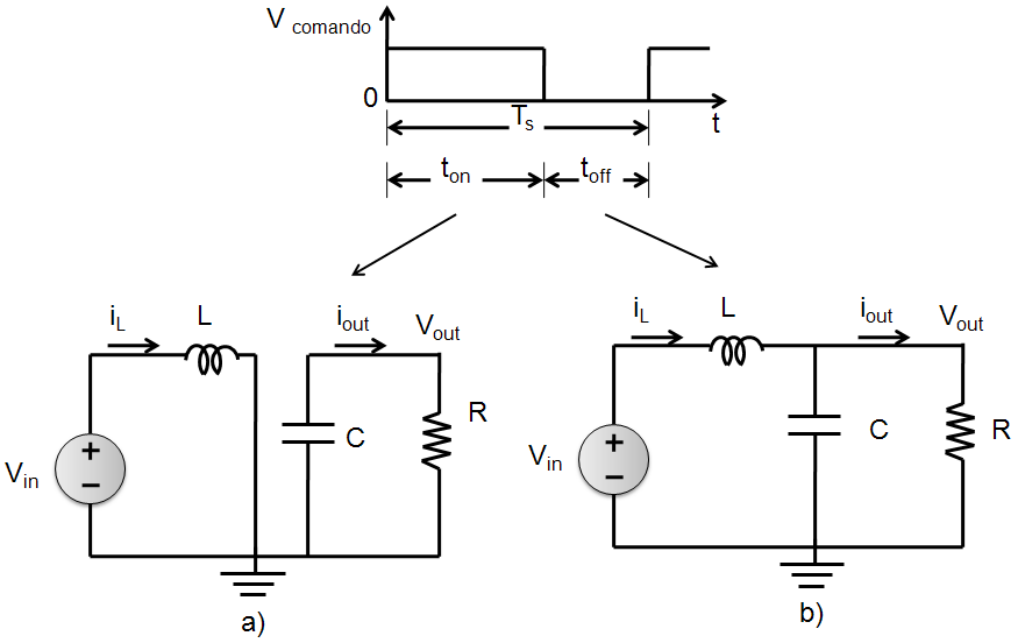


Figura 3.19 – Etapas do interruptor do circuito *Boost* a) ligado b) desligado

Modo de Condução Contínua

No modo de condução contínua (figura 3.20) supõe-se que a corrente na bobina nunca se anula ($i_L(t) > 0$). Quando o interruptor está ligado (T_{on}), a tensão da indutância é igual à tensão de entrada ($V_L=V_{in}$). Quando o interruptor está desligado (T_{off}), o valor da tensão da indutância é igual à diferença entre a tensão de saída e entrada ($V_L=V_{in}-V_{out}$). Uma vez que o valor médio da tensão na indutância tem que ser 0 V,

$$V_{in} \cdot t_{on} + (V_{in} - V_{out}) \cdot t_{off} = 0 \qquad (3.6)$$

Onde:

V_{out} é a tensão de saída do conversor;

V_{in} é a tensão de entrada do conversor;

D é o *duty-cycle*;

t_{on} é o tempo que o interruptor está ligado;

t_{off} é o tempo que o interruptor está desligado;

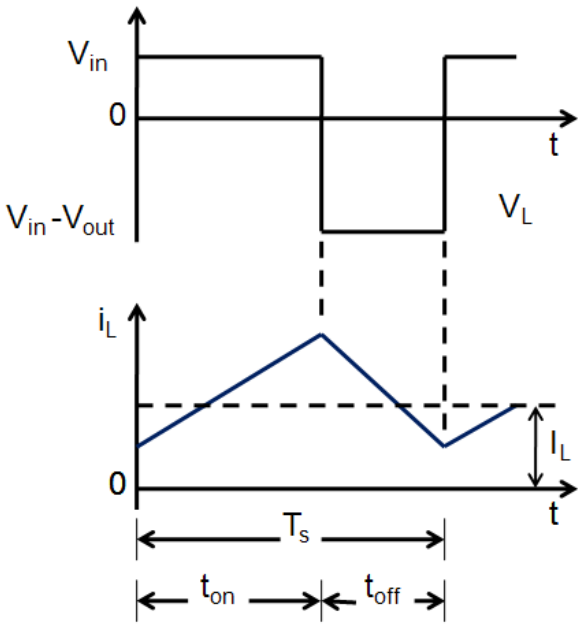


Figura 3.20 – Formas de onda da tensão e corrente na indutância no modo de condução contínua

Dividindo ambos os lados da equação 3.6 por T_s e resolvendo em ordem a V_{out}/V_{in} obtemos:

$$\frac{V_{out}}{V_{in}} = \frac{T_s}{t_{off}} = \frac{1}{1-D} \tag{3.7}$$

Onde:

T_s é o período do sinal de comando (e da tensão de saída);

Uma vez que se assume que o conversor não tem perdas, $P_{in} = P_{out}$ ou seja, $V_{in}I_{in} = V_{out}I_{out}$, pelo que a relação entre a corrente de entrada e de saída é:

$$\frac{I_{out}}{I_{in}} = \frac{V_{in}}{V_{out}} = (1-D) \tag{3.8}$$

Onde:

P_{out} é a potência de saída do conversor;

P_{in} é a potência de entrada do conversor.

I_{out} é a corrente de saída do conversor;

I_{in} é a corrente de entrada do conversor;

Limite Entre Modo de Condução Contínua e Descontinua

No limite do modo de condução contínua, a corrente na indutância (i_L) atinge o valor zero no fim do intervalo t_{off} (figura 3.21). O valor médio da corrente na bobina nesta situação é:

$$I_{LB} = \frac{1}{2} \cdot i_{L,pico} \tag{3.9}$$

$$I_{LB} = \frac{1}{2} \cdot \frac{V_{in}}{L} \cdot t_{on} \tag{3.10}$$

$$I_{LB} = \frac{T_s \cdot V_{out}}{2 \cdot L} D \cdot (1 - D) \tag{3.11}$$

Onde I_{LB} é a o valor médio da corrente na indutância no modo de condução contínua.

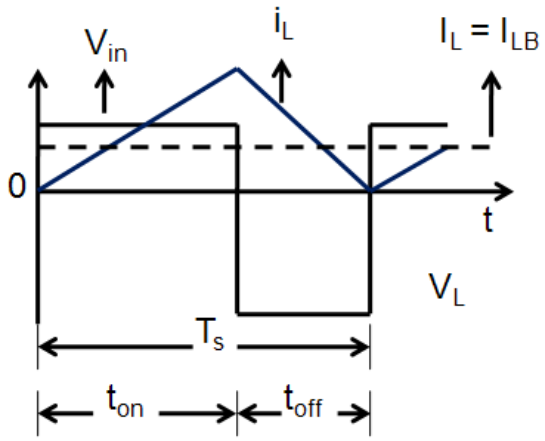


Figura 3.21 – Tensão e corrente na indutância no limite da condução contínua

Recorrendo à equação 3.8 e 3.10 e uma vez que $i_{in} = i_L$, o valor da corrente de saída no limite do modo de condução contínua (I_{oB}) é:

$$I_{oB} = \frac{T_s \cdot V_{out}}{2 \cdot L} D \cdot (1 - D)^2 \tag{3.12}$$

Na figura 3.22 apresentam-se os valores médios das correntes na indutância (I_{LB}) e na saída (I_{oB}) no modo de condução contínua em função do *duty-cycle D*, admitindo que a tensão de saída (V_{out}) se mantém constante.

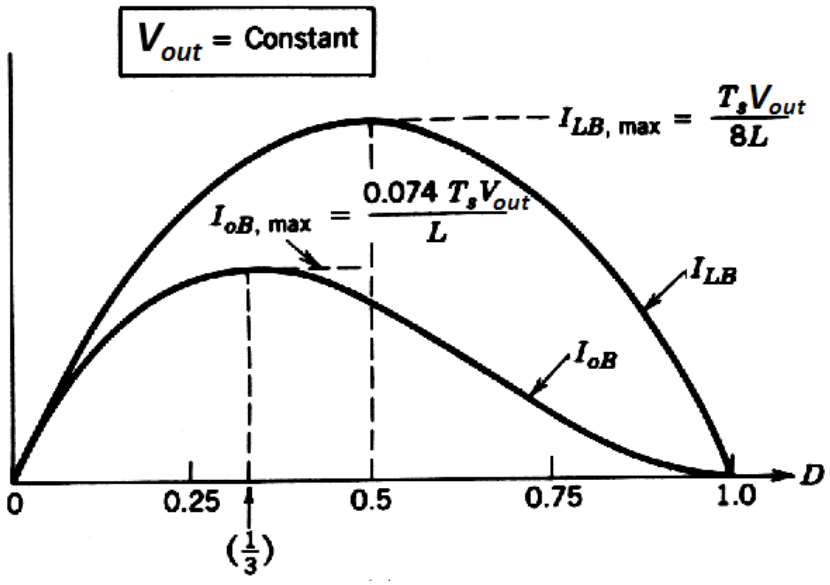


Figura 3.22 – Evolução de I_L e I_{LB} para V_{out} constante

Pelo gráfico conclui-se que o valor máximo da corrente na bobina que é preciso garantir para se manter o funcionamento no modo de condução contínua ocorre para $D = 0{,}5$ e é dado por,

$$I_{LB} = \frac{T_s \cdot V_{out}}{8 \cdot L} \tag{3.13}$$

No que diz respeito à corrente de saída, o valor máximo que é preciso garantir para se manter o funcionamento no modo de condução contínua ocorre para $D = 0{,}333$ sendo dado por,

$$I_{oB} = \frac{2}{27} \cdot \frac{T_s \cdot V_{out}}{L} = 0.074 \cdot \frac{T_s \cdot V_{out}}{L} \tag{3.14}$$

Modo de Condução Descontínua

O funcionamento no modo de condução descontínua ocorre quando a corrente i_L atinge o valor zero e assim se mantém durante um período de tempo (figura 3.23). Mais uma vez, quando o interruptor está ligado (durante $T_{on} = DT_s$), a tensão da indutância é igual à tensão de entrada ($V_L = V_{in}$). Quando o interruptor está desligado (T_{off}), o valor da tensão na indutância é igual à diferença entre a tensão de saída e entrada ($V_L = V_{in}$-V_{out}) enquanto flui corrente na bobina (durante $T_s\Delta_1$), passando a ser 0 V no restante período de tempo ($T_s\Delta_2$).

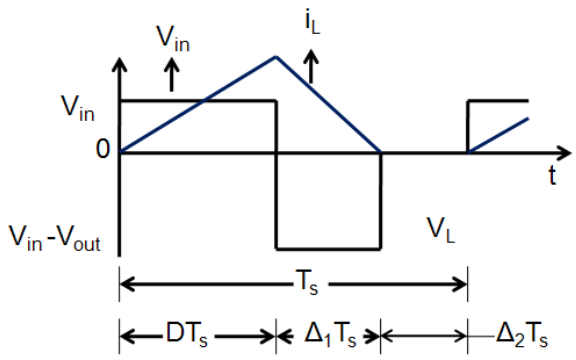


Figura 3.23 - Tensão e corrente na indutância no modo de condução descontínua

Se a potência de saída ($P_{out} = P_{in}$) diminuir, mantendo-se V_{in} e D constantes, o valor mínimo de i_L pode atingir o valor zero, entrando-se assim no modo de condução descontínua (figura 3.23). Note-se que apesar disso, o valor da tensão de saída pode ser mantido constante, desde que se ajuste o valor de D.

Neste caso, o valor da tensão na bobina é dado por:

$$V_{in} \cdot D \cdot T_s + (V_{in} - V_{out}) \cdot \Delta_1 \cdot T_s = 0 \tag{3.15}$$

Onde $T_s\Delta_1$ é o tempo que o interruptor está desligado e a tensão na indutância é diferente de zero;

A relação entre a tensão de saída e a de entrada é dada por:

$$\frac{V_{out}}{V_{in}} = \frac{\Delta_1 + D}{\Delta_1} \tag{3.16}$$

A relação da corrente de saída com a de entrada considerando que $P_{in} = P_{out}$ é:

$$\frac{I_{out}}{I_{in}} = \frac{\Delta_1}{\Delta_1 + D} \tag{3.17}$$

O valor médio da corrente de entrada é dado por:

$$I_{in} = \frac{V_{in}}{2 \cdot L} D \cdot T_s (D + \Delta_1) \tag{3.18}$$

Substituindo a corrente de entrada (I_{in}) da equação 3.16 na 3.17, o valor da corrente média de saída é:

$$I_{out} = \frac{V_{in} \cdot T_s}{2 \cdot L} \cdot D \cdot \Delta_1 \tag{3.19}$$

Para um valor de V_{out} constante, o *duty-cycle* varia em resposta a uma variação de V_{in}, sendo o valor do *duty-cycle* dado por:

$$D = \sqrt{\frac{4}{27} \cdot \frac{V_{out}}{V_{in}} \cdot \left(\frac{V_{out}}{V_{in}} - 1 \right) \cdot \frac{I_{out}}{I_{oB,\max}}} \tag{3.20}$$

Na fig. 3.24, o *duty-cycle* (D) é apurado em função da $I_{out}/I_{oB,max}$ para vários valores de V_{in}/V_{out}, a fronteira entre o modo contínuo e descontínuo é representado a tracejado.

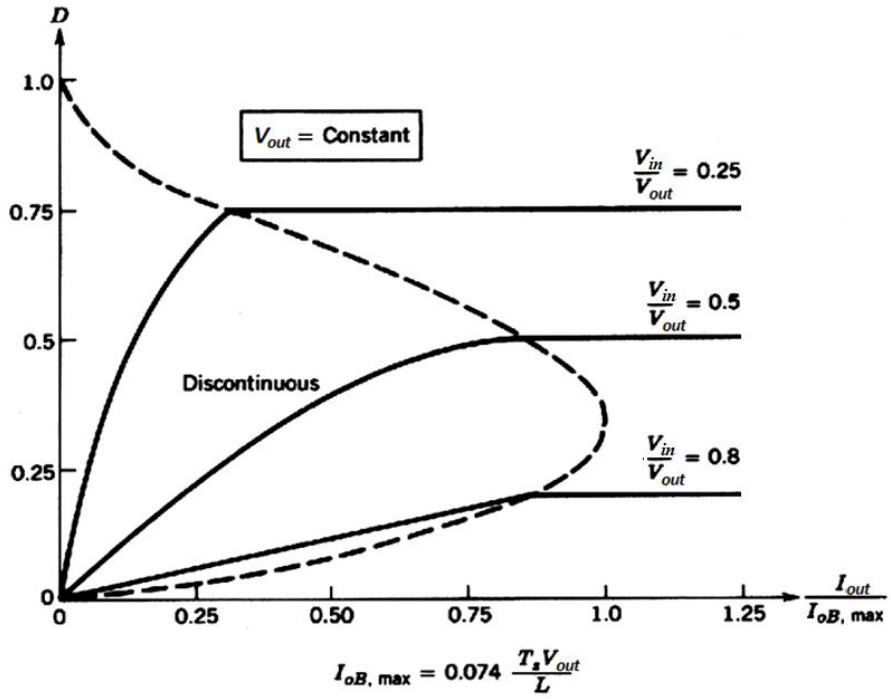


Figura 3.24 – Características do conversor no modo descontínuo para manter a tensão de saída constante

Admitindo que o valor de D (e da tensão de saída) se mantém constante, a energia transferida para a saída (condensador mais carga) é dada por:

$$\frac{L}{2} \cdot i_{L,peak}^2 = \frac{(D \cdot V_{in} \cdot T_s)^2}{2 \cdot L} \tag{3.21}$$

Efeito dos Elementos Parasitas

Os elementos parasitas no conversor (*Boost*) estão associados às perdas do condensador, indutância, interruptor e díodo. Na figura 3.25 mostra o efeito dos elementos parasitas na relação V_{out}/V_{in}, onde ao contrário do que faria supor a equação 3.7 (obtida em condições ideais), a tensão de saída, depois de atingir um valor máximo, acaba por cair para zero, à medida que o *duty-cycle* se aproxima da unidade [35].

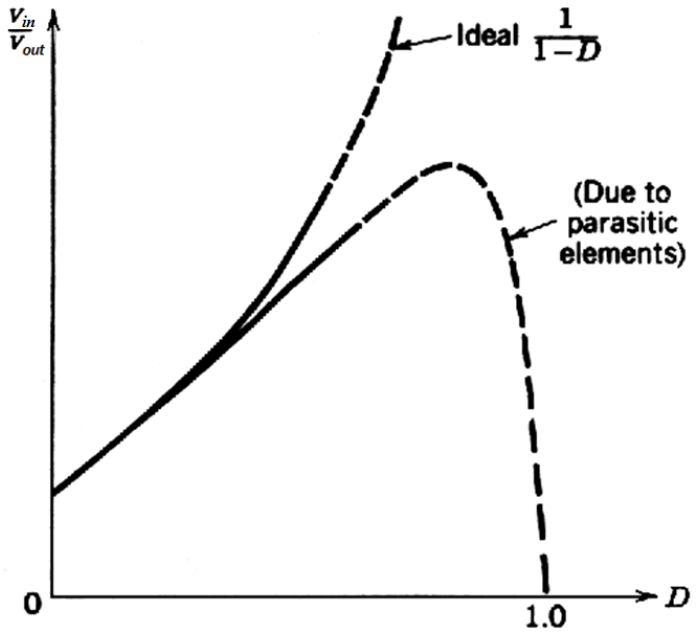


Figura 3.25 – Efeito dos elementos parasitas na tensão de saída do conversor

Ripple da Tensão de Saída

A tensão de saída do conversor apresenta um determinado *ripple* (figura 3.26), uma vez que, quando o interruptor está ligado o condensador garante o fornecimento de energia à carga (V_{out} decresce porque o condensador descarrega), enquanto que o interruptor está desligado, a indutância fornece energia à carga e ao condensador (V_{out} cresce porque o condensador recupera a sua carga).

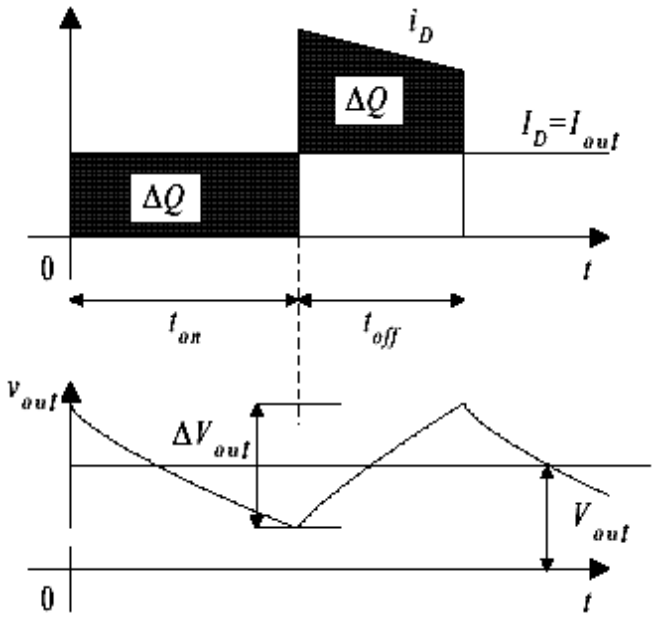


Figura 3.26 – *Ripple* da tensão de saída do conversor *Boost*

O *ripple* da tensão de saída assumindo que a corrente de saída se mantém constante é dado por:

$$\Delta V_{out} = \frac{\Delta Q}{C} = \frac{I_{out} \cdot D \cdot T_s}{C} = \frac{V_{out}}{R} \frac{D \cdot T_s}{C} \tag{3.22}$$

O valor relativo do *ripple* é:

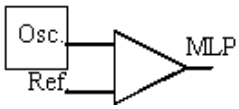
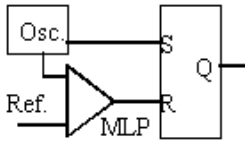
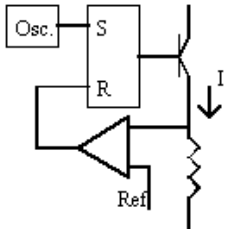
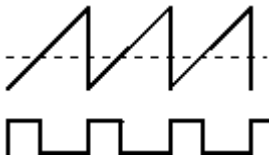
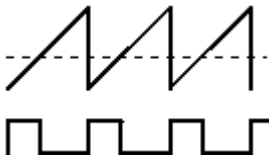
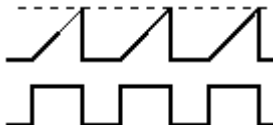
$$\frac{\Delta V_{out}}{V_{out}} = \frac{D \cdot T_s}{R \cdot C} = D \cdot \frac{T_s}{\tau} \tag{3.23}$$

Onde: $\tau = RC$

3.3.3.3 Circuito de Comando do Conversor CC-CC

Os conversores CC-CC são comandados por modulação de largura de impulso. O sinais de controlo são normalmente gerados por circuitos integrados (CIs) dedicados e/ou por microcontroladores, sempre que, para além de gerar os sinais de comando é necessário implementar outras funções de controlo mais ou menos sofisticadas (o que não acontecia no caso presente). Na tabela 3.1, apresentam-se exemplos de alguns CIs utilizados para controlar os conversores CC-CC [38].

Tabela 3.1 - Exemplos de circuitos integrados para accionamento de interruptores semicondutores

	Modo Tensão	**Modo Tensão com Latch**	**Modo Corrente**
Técnica de controlo (esquemático)			
Saída única	MC34060	MPC1600	UC1842
Saída dupla	TL494/594	SG3525/26/27	UC1846
Características	Baixo custo	Limite digital de corrente. Boa imunidade a ruído	Especial para Fly-back. Inerente compensação da tensão de entrada
Formas de onda triangular e à saída do comparador			

Um dos CI´s mais utilizados, pelas funções que implementa, pela sua versatilidade e pelo seu custo reduzido é o TL494/594. Na figura 3.27 pode observar-se um esquema simplificado deste CI. Apresentam duas saídas, de modo a ser possível accionar topologias tipo *push-pull*. As saídas podem ser ligadas em paralelo para accionamento de conversores de um interruptor. Foi este o circuito escolhido para comandar conversor *Boost* utilizado neste trabalho.

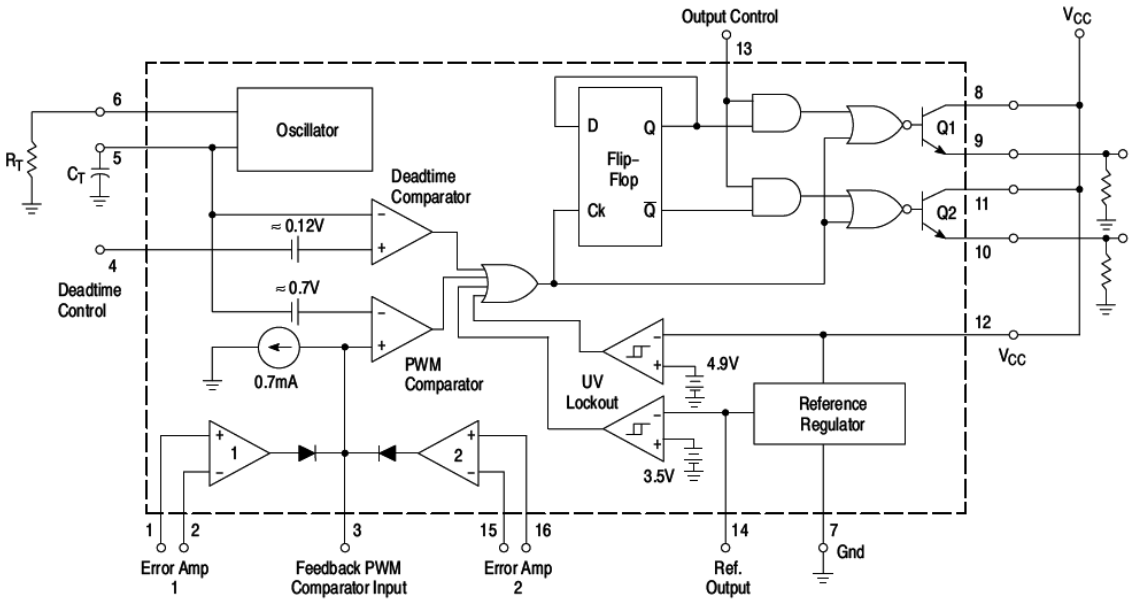


Figura 3.27 - Diagrama interno do CI TL594 (fonte: Motorola)

Uma onda triangular é obtida a partir de um oscilador, sendo apenas necessário ligar no exterior uma resistência (R_T) e um condensador (C_T). A onda de PWM é obtida por comparação da onda triangular com o sinal de erro produzido a partir de 2 amplificadores operacionais (incluídos no CI). O circuito ainda garante um tempo morto entre as comutações dos sinais que comandam dos 2 interruptores semicondutores (garantindo que nunca estão em condução simultaneamente), sendo o ajuste do tempo feito pela aplicação de uma tensão de valor adequado no *Deadtime Control* (pino 4).

Quando se pretende accionar mais do que um interruptor (tipologias tipo *push-pull*), o *Output Control* (pino 13) tem que estar no nível alto, já que a cada subida do sinal de PWM altera-se o estado de um flip-flop seleccionando uma das duas saídas. Quando se quer accionar só um interruptor o *Output Control* tem que estar no nível baixo, ficando as duas saídas a comutar simultaneamente.

O CI dispõe ainda de um regulador de tensão interno, disponibilizando 5V no pino 14.

3.4 Filtro Activo Paralelo

A proliferação nas últimas décadas de equipamentos electrónicos (que constituem cargas não lineares) ligados à rede eléctrica tem provocado um agravamento da qualidade de energia que se manifesta de diversas formas, nomeadamente, na deterioração das formas de onda da tensão e da corrente (supostamente sinusoidais). Tal origina, por sua vez, todo tipo de problemas, nomeadamente, interferências com sistemas de telecomunicações, mau funcionamento de equipamentos mais sensíveis ligados à rede, perdas adicionais nos condutores, etc., que se traduzem em prejuízos económicos muito elevados.

Os problemas relativos à qualidade de energia eléctrica podem ser minorados recorrendo a filtros passivos, a filtros activos (série e paralelo), ou a soluções híbridas (combinações de filtros passivos e filtros activos [40].

Uma vez que um dos blocos constituintes do sistema de interface implementado é na realidade um Filtro Activo Paralelo. Em seguida faz-se uma breve referência ao seu princípio de funcionamento. Recorda-se que a implementação do Filtro Activo Paralelo foi objectivo de um outro trabalho que decorre no Laboratório de Electrónica de Potência e Computadores do Departamento de Electrónica Industrial (DEI). O autor da presente dissertação limitou-se a estudar e a integrar o filtro activo no restante sistema de interface da eólica com a rede eléctrica.

O Filtro Activo Paralelo é um conversor de potência indicado para resolver problemas relacionados com as correntes de um sistema eléctrico, permitindo corrigir o factor de potência, equilibrar a corrente nas 3 fases (no caso dos filtros trifásicos) e eliminar eventuais harmónicos de corrente.

O filtro comporta-se como uma fonte de corrente controlada injectando na rede as componentes de corrente necessárias para que a fonte forneça apenas correntes sinusoidais equilibradas. O diagrama de blocos da figura 3.28 pretende ilustrar os vários componentes que constituem um Filtro Activo Paralelo e o seu princípio de funcionamento.

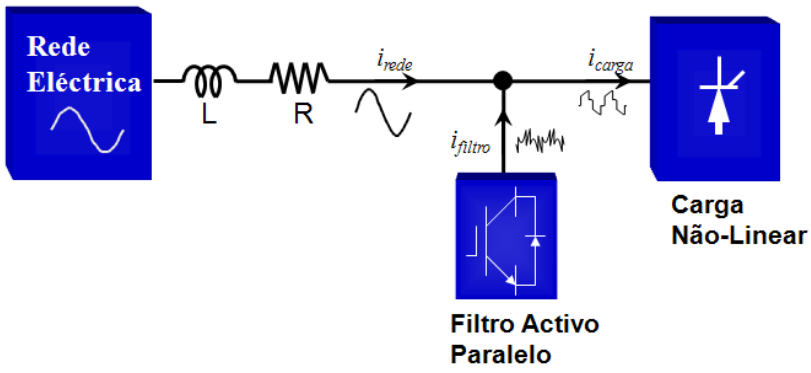


Figura 3.28 – Diagrama de blocos do Filtro Activo Paralelo

3.4.1 O Filtro Activo Paralelo Trifásico

Em termos de topologia o Filtro Activo Paralelo Trifásico consiste, basicamente, num inversor fonte de tensão trifásico com controlo de corrente, que inclui no lado de corrente contínua apenas um condensador como elemento armazenador de energia. O objectivo do filtro é fazer com que as correntes i_{sa}, i_{sb} *e* i_{sc}, (figura 3.29) sejam o mais possível, sinusoidais, equilibradas e em fase com as tensões V_a, V_b e V_c, e a corrente de neutro (i_{sn}) da fonte deve de ser nula. As correntes de compensação i_{ca}, i_{cb}, i_{cc} e i_{cn} que devem ser injectadas na rede para conseguir tal objectivo são determinadas pelo sistema de controlo, que pode ter várias implementações e recorrer a diversas teorias de suporte [41]. No caso presente o sistema de controlo do filtro baseia-se na "teoria da potência real e imaginária instantâneas", muitas vezes conhecida apenas por "teoria p-q".

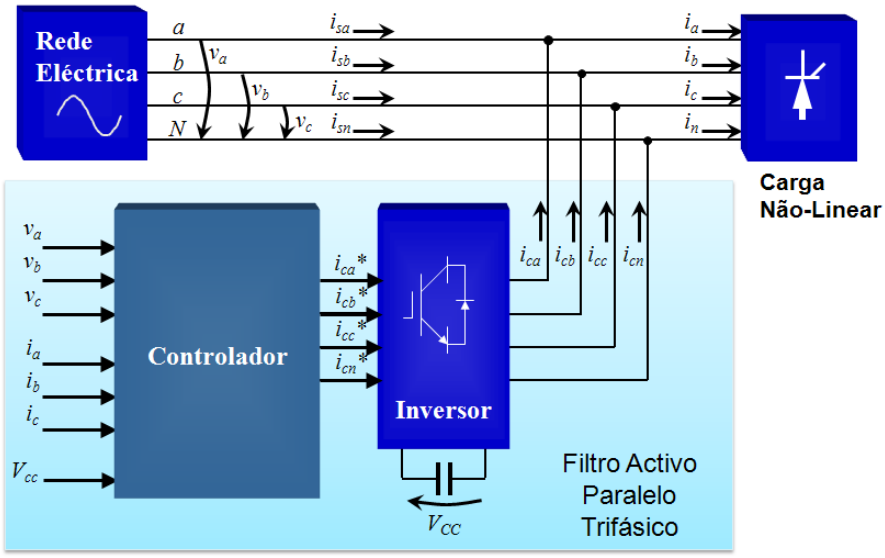


Figura 3.29 - Diagrama de blocos do Filtro Activo Paralelo Trifásico

3.4.2 Teoria p-q

O controlo dos Filtros Activos Paralelos pode ser feito recorrendo à teoria p-q, proposta por *Akagi et al*. [36] [37], em 1983, com o objectivo de desenvolver filtros activos de potência. Inicialmente, esta técnica foi desenvolvida apenas para sistemas trifásicos sem neutro, sendo mais tarde desenvolvida para sistemas trifásicos com neutro por *Watanabe e Aredes et al* [42] [43].

O primeiro passo a implementar da teoria consiste em aplicar a transformada de *Clarke,* passando as correntes e as tensões, das coordenadas *a-b-c*, para as coordenadas *α-β-0*.

$$\begin{bmatrix} v_0 \\ v_\alpha \\ v_\beta \end{bmatrix} = T . \begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix} \tag{3.24}$$

$$\begin{bmatrix} i_0 \\ i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} = T . \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} \tag{3.25}$$

Onde *T* é dado por:

$$T = \sqrt{\frac{2}{3}} . \begin{bmatrix} 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} \\ 1 & -1/2 & -1/2 \\ 0 & \sqrt{3}/2 & -\sqrt{3}/2 \end{bmatrix} \tag{3.26}$$

A partir das correntes e tensões calculadas pela transformada de *Clarke*, calcula-se três potências instantâneas:

- Potência real instantânea:

$$p = v_\alpha \cdot i_\alpha + v_\beta \cdot i_\beta \tag{3.27}$$

- Potência imaginária instantânea:

$$q = v_\beta \cdot i_\alpha - v_\alpha \cdot i_\beta \tag{3.28}$$

- Potência de sequência zero:

$$p_0 = v_0 \cdot i_0 \tag{3.29}$$

Pode-se, assim, tirar a relação entre a potência *a-b-c* e *α-β-0*:

$$p_{3\phi} = v_a \cdot i_a + v_b \cdot i_b + v_c \cdot i_c = v_\alpha \cdot i_\alpha + v_\beta \cdot i_\beta + v_0 \cdot i_0 = p + p_0 \tag{3.30}$$

$$q = v_\beta \cdot i_\alpha - v_\alpha \cdot i_\beta = \frac{(v_a - v_b).i_c + (v_b - v_c).i_a + (v_c - v_a).i_b}{\sqrt{3}} \quad (3.31)$$

A partir das potências calculadas em *α-β-0*, separa-se os valores médios dos valores alternados, sendo os valores médios fornecidos pela fonte, e os valores alternados devem ser compensados pelo filtro activo. O filtro também deve compensar toda a potência imaginária instantânea (*q*). O diagrama de blocos das correntes compensadas pode ser visto na figura 3.30.

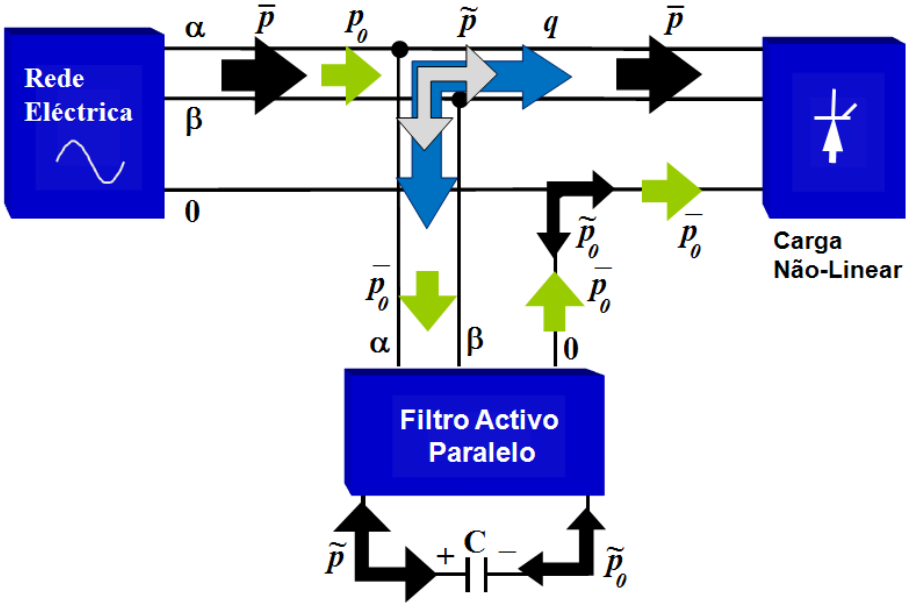


Figura 3.30 - Diagrama de blocos de compensação das correntes através do Filtro Activo Paralelo no referencial *α-β-0*

O significado físico das potências instantâneas é o seguinte:

$\bar{p}$ - Valor médio da potência real instantânea. Este valor corresponde à energia transferida da fonte de alimentação para a carga através das coordenadas *α-β* (pelas fases *a-b-c* do sistema trifásico).

$\tilde{p}$ - Valor alternado da potência real instantânea. Este valor corresponde à energia trocada entre a fonte de alimentação e a carga, através das coordenadas *α-β* (pelas fases *a-b-c* do sistema trifásico).

q - Potência imaginária instantânea. É a potência que circula entre as coordenadas *α-β* (pelas fases *a-b-c* do sistema trifásico), sem haver troca de energia entre a fonte e a carga. A potência *q* pode ser dividida em duas, uma contínua $\bar{q}$ e outra alternada $\tilde{q}$. Quando não há distorções ou desequilíbrios de tensão, $\bar{q}$ corresponde à potência reactiva trifásica convencional.

$\overline{p}_0$ - Valor médio da potência instantânea de sequência zero. É a energia transportada através do neutro, sendo a energia transferida da fonte de alimentação para a carga através de sequência zero do sistema de coordenadas α-β-*0*.

$\tilde{p}_0$ - Valor alternado da potência instantânea de sequência zero. É a energia trocada entre o neutro e uma ou mais fases, sendo a energia trocada entre a fonte de alimentação e a carga, através do sistema de coordenadas α-β-0.

As potências a compensar são:

Potência real instantânea a ser compensada p_x

$$p_x = \tilde{p} - \overline{p}_0 \tag{3.32}$$

Potência imaginária a ser compensada q_x

$$q_x = q \tag{3.33}$$

Substituindo estas nas equações das potências instantâneas temos:

$$\begin{bmatrix} i_{c\alpha} \\ i_{c\beta} \end{bmatrix} = \frac{1}{v_\alpha^2 + v_\beta^2} \cdot \begin{bmatrix} v_\alpha & -v_\beta \\ v_\beta & v_\alpha \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} p_x \\ q_x \end{bmatrix} \tag{3.34}$$

$$i_{c0} = i_0 = \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot (i_a + i_b + i_c) \tag{3.35}$$

Para além de se calcular o valor das correntes de compensação, também se deve calcular o valor da potência de regulação (P_{reg}), sendo responsável por manter o valor óptimo de tensão do lado CC.

$$p_{reg} = K \cdot (v_{ref} - v_{dc}) \tag{3.36}$$

$$p_x = \tilde{p} - \overline{p}_0 - p_{reg} \tag{3.37}$$

Por último, deve-se efectuar os cálculos da transformada inversa de *Clarke*, de modo a passar os valores de corrente do referencial α-β-*0*, novamente para o referencial *a-b-c*. É possível observar a compensação das correntes, através do Filtro Activo Paralelo no referencial *a-b-c*, na figura 3.31.

$$\begin{bmatrix} i_{ca} \\ i_{cb} \\ i_{cc} \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot \begin{bmatrix} 1/\sqrt{2} & 1 & 0 \\ 1/\sqrt{2} & -1/2 & \sqrt{3}/2 \\ 1/\sqrt{2} & -1/2 & -\sqrt{3}/2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_{c0} \\ i_{c\alpha} \\ i_{c\beta} \end{bmatrix} \tag{3.38}$$

$$i_{cn} = -\left(i_{ca} + i_{cb} + i_{cc}\right) \tag{3.29}$$

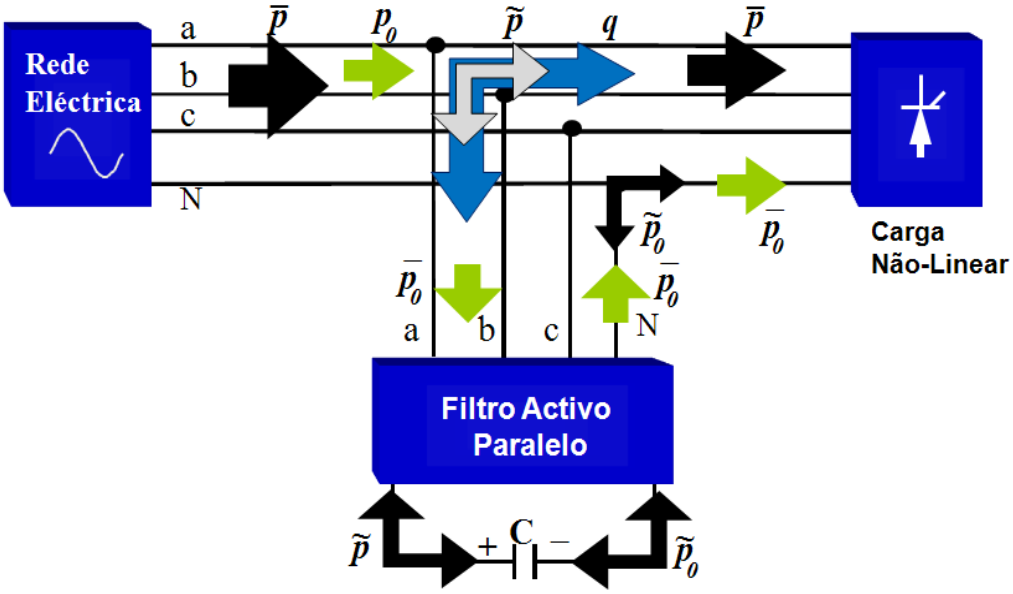


Figura 3.31 - Diagrama de blocos de compensação das correntes no referencial *a-b-c*

3.4.3 Filtro Activo Paralelo Monofásico

No Filtro Activo Paralelo Monofásico, utiliza-se também a teoria *p-q* no controlo, sendo necessário fazer alguns ajustes, uma vez que a teoria foi originalmente desenvolvida para sistemas trifásicos. Para adaptar a teoria *p-q* do sistema trifásico ao monofásico, é necessário sintetizar duas formas de onda virtuais e iguais à forma de onda da corrente e tensão medidas. Contudo, estas têm que ter um desfasamento de 120º entre si, criando-se assim, virtualmente um sistema trifásico para as correntes e para as tensões [40]. Na figura 3.32 apresenta-se o diagrama de blocos simplificado do Filtro Monofásico.

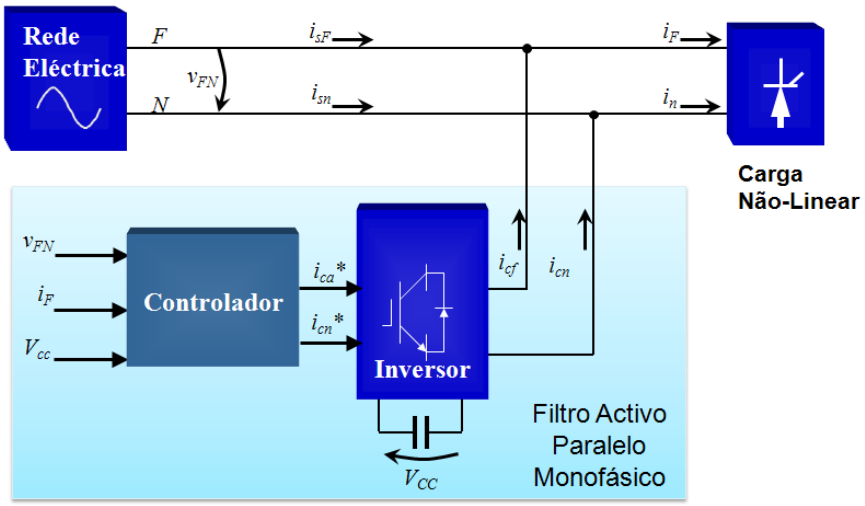


Figura 3.32 – Diagrama de blocos do esquema do Filtro Activo Paralelo Monofásico

3.4.4 Interface entre Fontes de Energias Renováveis e a Rede Eléctrica Utilizando Filtros Activos

Os Filtros Activos Paralelos podem funcionar como parte integrante da interface entre fontes de energias renováveis, como eólica e solar com a rede eléctrica [44]. Esta solução permite efectuar vários processos, tais como:

- Entregar energia eléctrica à rede fornecida por fontes de energias renováveis;
- Fornecer energia eléctrica à carga com ou sem auxilio da rede eléctrica sendo a energia proveniente das fontes de energias renováveis;
- Corrigir os problemas de energia eléctrica como factor de potência e harmónicos, e injectar a energia na rede fornecida pelas fontes de energias renováveis.

Estas soluções são possíveis, uma vez que as fontes de energias alternativas injectam corrente contínua do Filtro Activo Paralelo (elemento de armazenagem de energia CC), sendo necessário ajustar a teoria de controlo, introduzindo-se uma nova variável $\overline{p}_{alt}$, que corresponde à energia produzida pelas fontes de energias alternativa. A expressão da potência que é necessário injectar é então dada por:

$$p_x = \tilde{p} - p_{reg} + p_{alt} \tag{3.40}$$

$$q_x = q_G + q \tag{3.41}$$

q_G corresponde à "energia" reactiva capacitiva, que por lei deve ser fornecida fora das horas de vazio [44]. A figura 3.33 apresenta o diagrama de blocos simplificado que

representa o sistema de interface da eólica com a rede eléctrica, sendo possível identificar os principais blocos constituintes: o aerogerador, o conversor CC-CC, o condensador (que assegura o barramento de corrente contínua) e Filtro Activo Paralelo Monofásico.

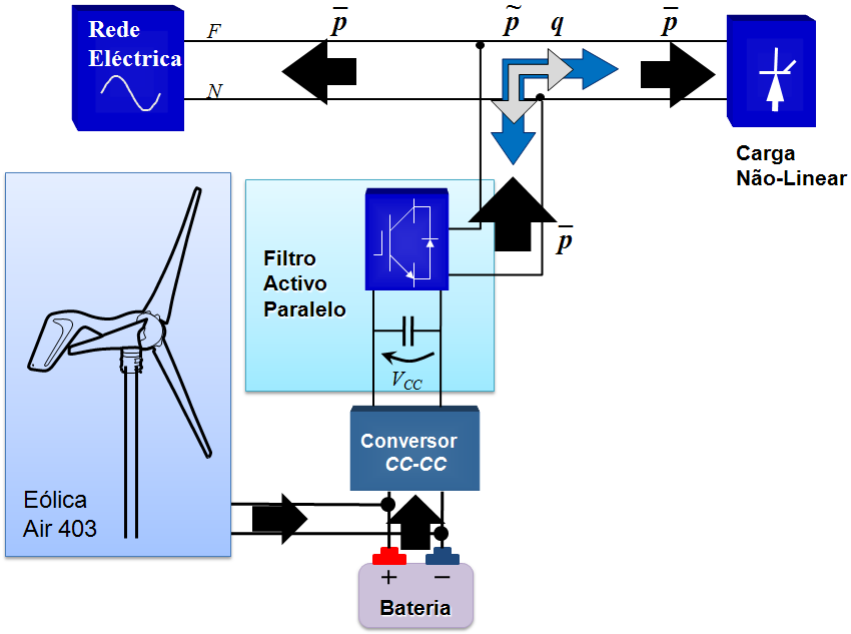


Figura 3.33 – Diagrama de blocos da interface de energias renováveis com a rede eléctrica e teoria p-q

Capítulo 4 - Simulações

Neste capítulo apresenta-se o resultado das simulações efectuadas no sentido de avaliar algumas alternativas, observar o comportamento dos vários circuitos e solucionar alguns problemas antes de passar para a fase de implementação.

Primeiro foram testados os vários blocos separadamente: os conversores CC-CC *Step-up* e *Push-Pull* em ponte completa e o filtro monofásico. Em seguida testou-se o sistema de interface completo. Como ferramentas de simulação utilizou-se o PSIM e os e o PSCAD (este último para simular o filtro activo e o sistema completo).

4.1 Conversor CC-CC *Step-up* (*Boost*)

O conversor *Boost* foi utilizado para elevar a tensão produzida pelo gerador eólico, que pode variar entre 46 V e 56 V para 500 V (que é a tensão adequada para o barramento CC do filtro activo).

4.1.1 Simulação

A simulação do conversor *Boost* foi efectuada, recorrendo-se ao PSIM. Todos os componentes com a excepção da bonina foram considerados ideais (constatou-se que as características reais da bobina têm uma grande influência nos resultados obtidos).

O conversor foi testado para duas condições de carga: num primeiro caso analisa-se o comportamento do conversor para a potência nominal do aerogerador (*Pout* = 400 W), utilizando-se uma resistência de 625 Ω à sua saída; no segundo caso testou-se o conversor numa situação próxima do vazio (ligando uma resistência de 4 kΩ na sua saída). O esquema da simulação do conversor *Boost* apresenta-se na figura 4.1

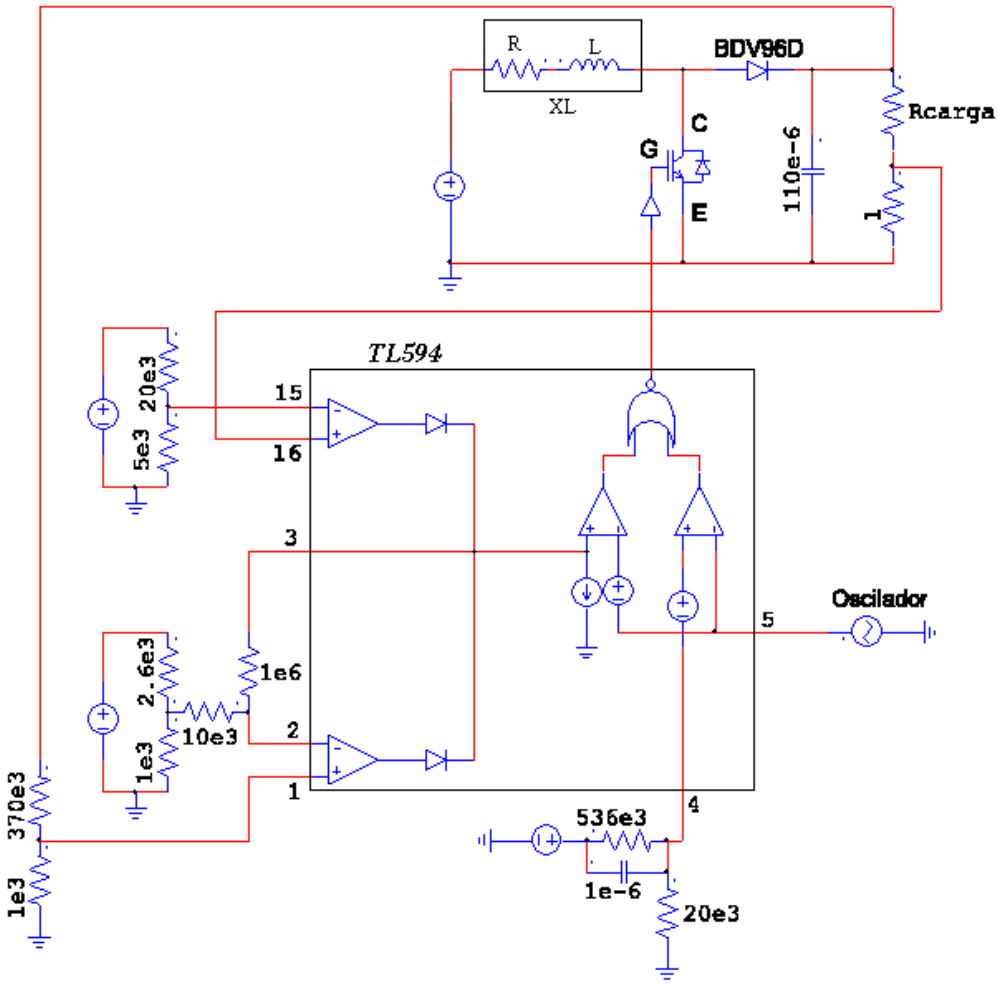


Figura 4.1 – Esquema da simulação do conversor *Boost* e sistema de controlo

As simulações confirmaram que o valor da resistência da bobina influencia consideravelmente o desempenho do conversor (nomeadamente no seu rendimento), a bobina utilizada nas simulações (e nos testes experimentais) tem uma indutância de 240 µH e uma resistência de 0,47 Ω para uma frequência de comutação de 5 kHz, e foi seleccionada de acordo com o explicado no ponto 5.1.2.1.

4.1.1.1 Simulação para Carga Nominal (Potência de Saída 400W)

Foram efectuadas simulações para tensões de entrada do conversor entre 46 e 56V. Como os resultados obtidos dependem pouco da tensão de entrada, na figura 4.2 apresenta-se apenas as formas de onda da tensão de saída (V_{saida}) para uma tensão de entrada de 46 V (inclui-se o transitório de arranque). O valor médio da tensão de saída obtido é de 501 V e o da corrente é de 0,8 A.

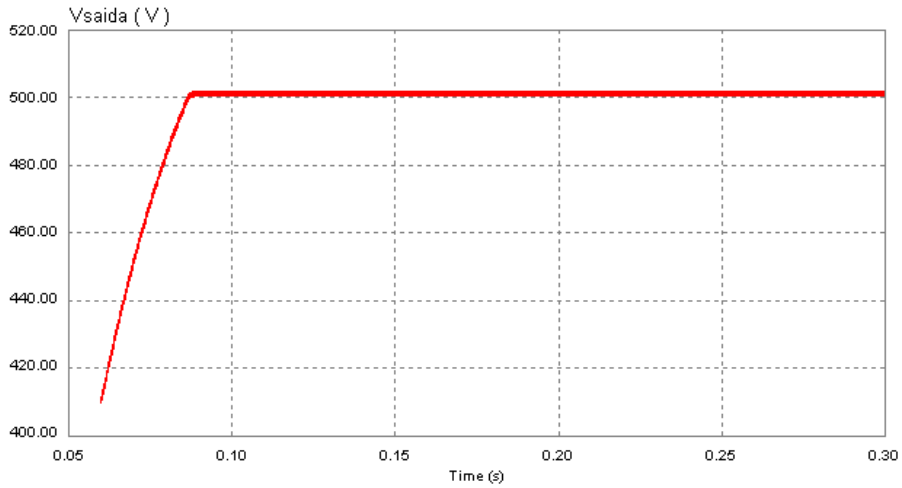


Figura 4.2 – Forma de onda da tensão e corrente de saída

Na figura 4.3 apresenta-se a forma de onda da corrente de entrada ($I_{entrada}$) e a forma de onda da tensão na bobina (V_{bobina}), em regime permanente. O valor médio da corrente de entrada é 10.55 A

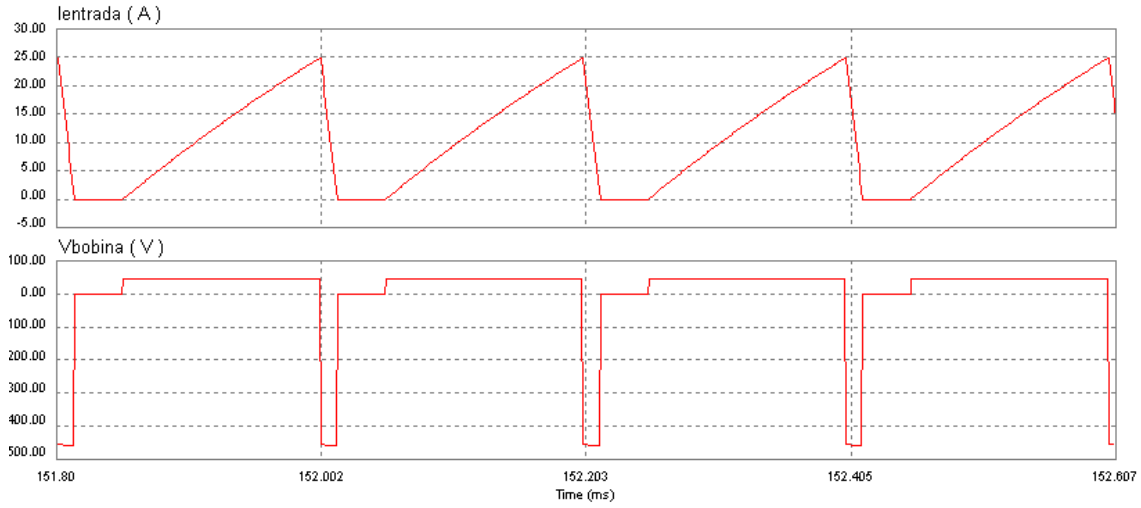


Figura 4.3 - Forma de onda da corrente de entrada do conversor

4.1.1.2 Simulação para uma Carga Ligeira

As simulações foram realizadas para 46 V e 56 V e uma vez mais, apresentam-se apenas os resultados para uma tensão de 46 V (figura 4.4), já que para 56 V os resultados eram praticamente iguais. O valor médio da tensão de saída é de 507 V e o da corrente é de 0,13 A e, como seria de esperar, a estabilização da tensão de saída é muito mais rápida.

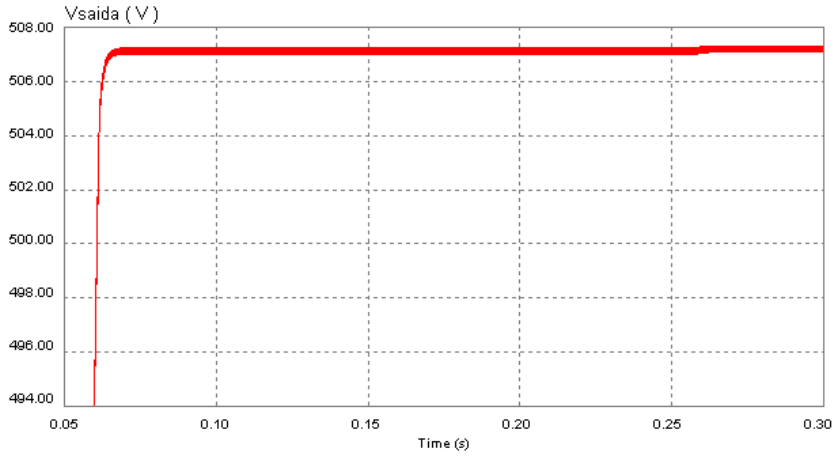


Figura 4.4 – Forma de onda da tensão e corrente de saída

Na figura 4.5 apresenta-se a forma de onda da corrente de entrada ($I_{entrada}$) e a forma de onda da tensão na bobina (V_{bobina}), em regime permanente. O valor médio da corrente de entrada é 1,5 A.

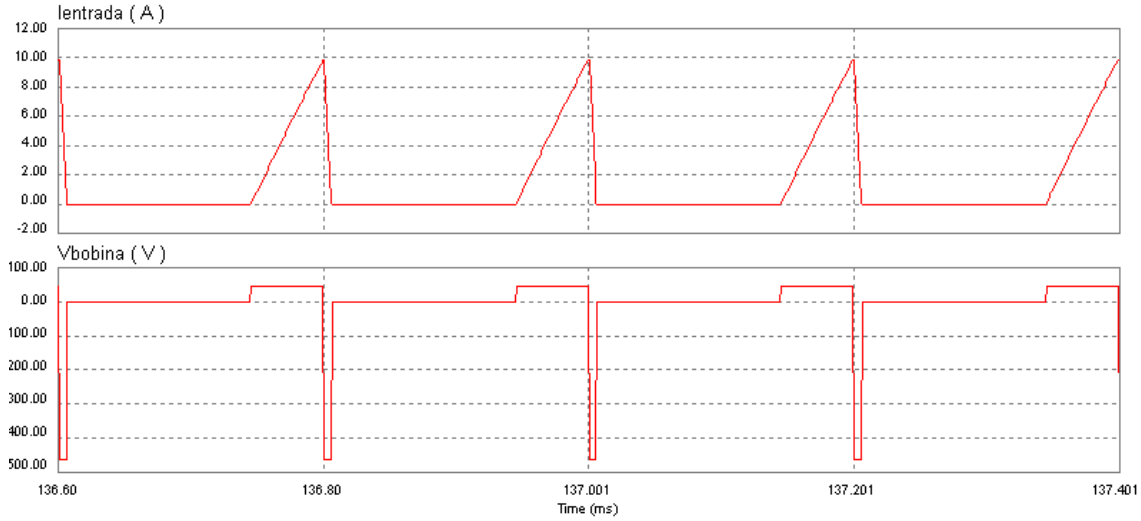


Figura 4.5 - Forma de onda da corrente de entrada do conversor e tensão aos terminais da bobina

Com esta simulação foi possível verificar que este conversor seria, em princípio implementável, apresentando rendimentos razoáveis (cerca de 81 % à plena carga, considerando só as perdas do bobina).

4.2 Conversor CC-CC *Push-Pull* em Ponte Completa

Na expectativa de que os 500 V de tensão de saída não fossem suficientes para garantir o funcionamento correcto do filtro activo, ponderou-se a utilização da topologia *Push-Pull* em ponte completa em alternativa ao conversor *Boost* (figura 4.6).

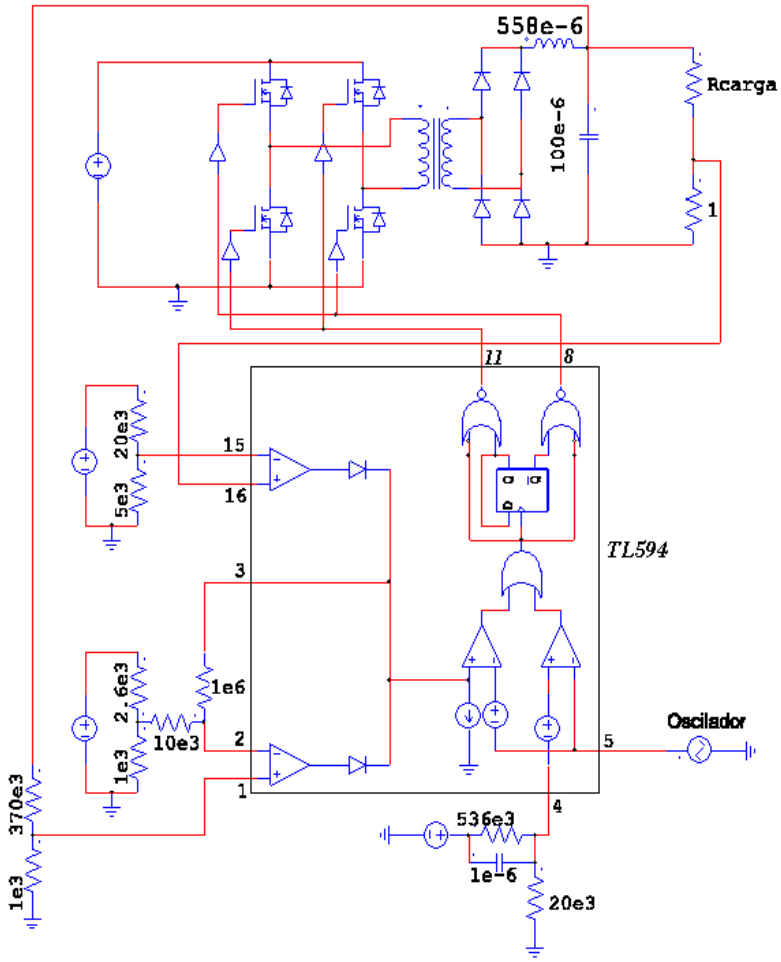


Figura 4.6 – Esquema do conversor *Push-Pull* em ponte completa

O valor médio da corrente à saída pretendido é de cerca de 1 A, logo o valor da variação da corrente na bobina que garante o funcionamento no modo de condução contínua é:

$$\Delta I_L = 2 \cdot I_{out} = 2A \tag{4.1}$$

Para um valor da tensão de entrada de 50 V e de saída de 500 V, é utilizado um transformador com uma razão de transformação de 1/11, o valor da bobina é dado pela equação 3.5, logo,

$$L = \frac{1}{2\Delta I_L f}\left(V_{in}\frac{N_2}{N_1} - V_{out}\right)\left(\frac{V_{out}}{V_{in}\frac{N_2}{N_1}}\right) = \frac{1}{2\cdot 2\cdot 20x10^{-3}}\left(50\cdot\frac{11}{1} - 500\right)\cdot\left(\frac{500}{50\cdot\frac{11}{1}}\right) = 568\mu H \tag{4.2}$$

4.2.1 Simulação

Este conversor foi testado nas mesmas condições do conversor *Boost*, apresentando-se em seguida os resultados obtidos.

4.2.1.1 Simulação para Carga Nominal (Potência de Saída 400 W)

A figura 4.7 mostra as formas de onda da tensão de saída (V_{saida}) e da corrente de saída (I_{saida}) e a forma de onda da corrente média de entrada ($I_{media_entrada}$), para a situação de regime nominal.

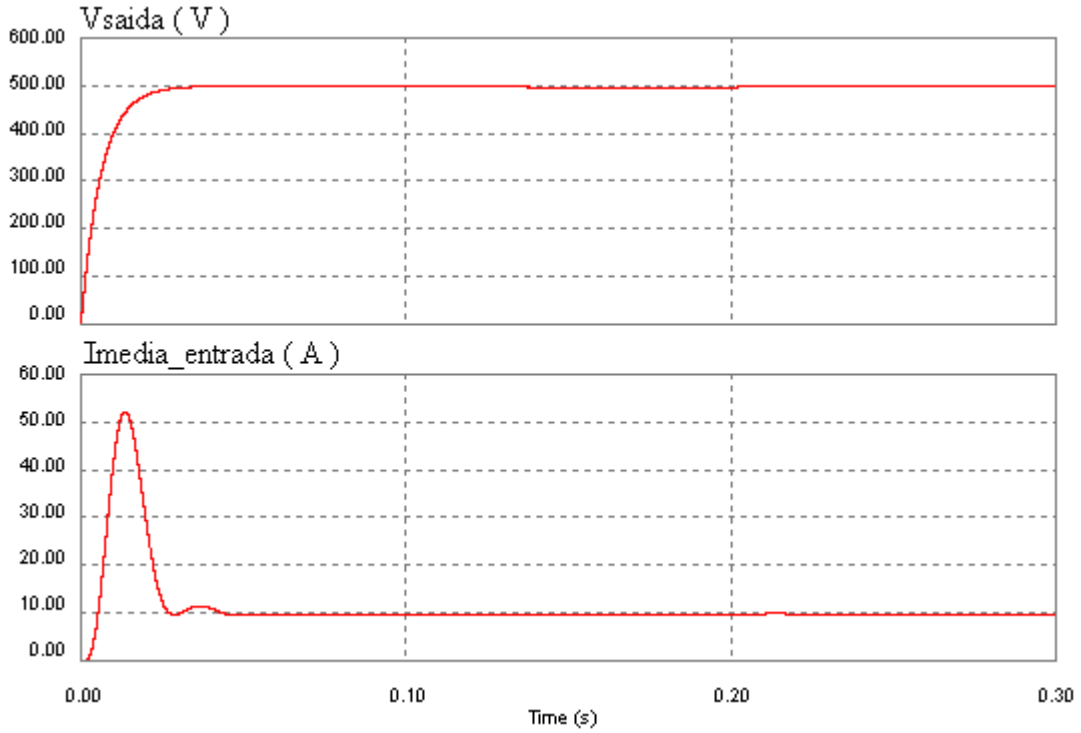


Figura 4.7 – Forma de onda da tensão e corrente de saída e corrente média de entrada

Inicialmente, o valor médio da corrente de entrada apresenta um pico elevado, tendo como causa o carregamento do condensador de saída.

4.2.1.2 Simulação para uma Carga Ligeira

A figura 4.8 mostra as formas de onda da tensão de saída (V_{saida}) e a forma de onda da corrente média de entrada ($I_{media_entrada}$), para uma situação próxima do vazio.

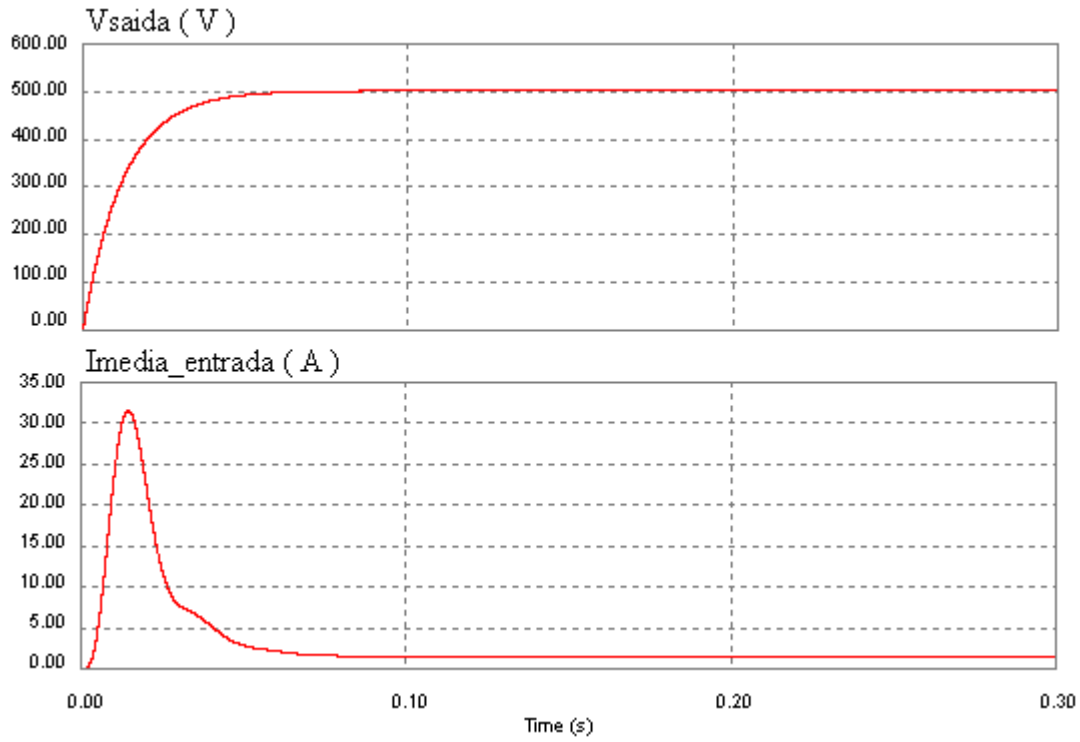


Figura 4.8 – Forma de onda da tensão e corrente de saída e corrente média de entrada

Inicialmente, o valor médio da corrente de entrada apresenta um pico elevado, tendo como causa o carregamento do condensador de saída.

4.3 Filtro Activo Paralelo Monofásico

Foram efectuadas algumas simulações do Filtro Activo Paralelo Monofásico utilizando o PSCAD, que incluem testes de operação com diferentes tipos de carga, em regime transitório e em regime permanente. Na figura 4.9 apresenta-se o esquema utilizado no PSCAD para simular o Filtro Activo Paralelo Monofásico e sua ligação à rede eléctrica. No anexo 3 apresenta-se o diagrama de blocos utilizado para implementar o controlador baseado na teoria p-q e o gerador de PWM para comando do inversor.

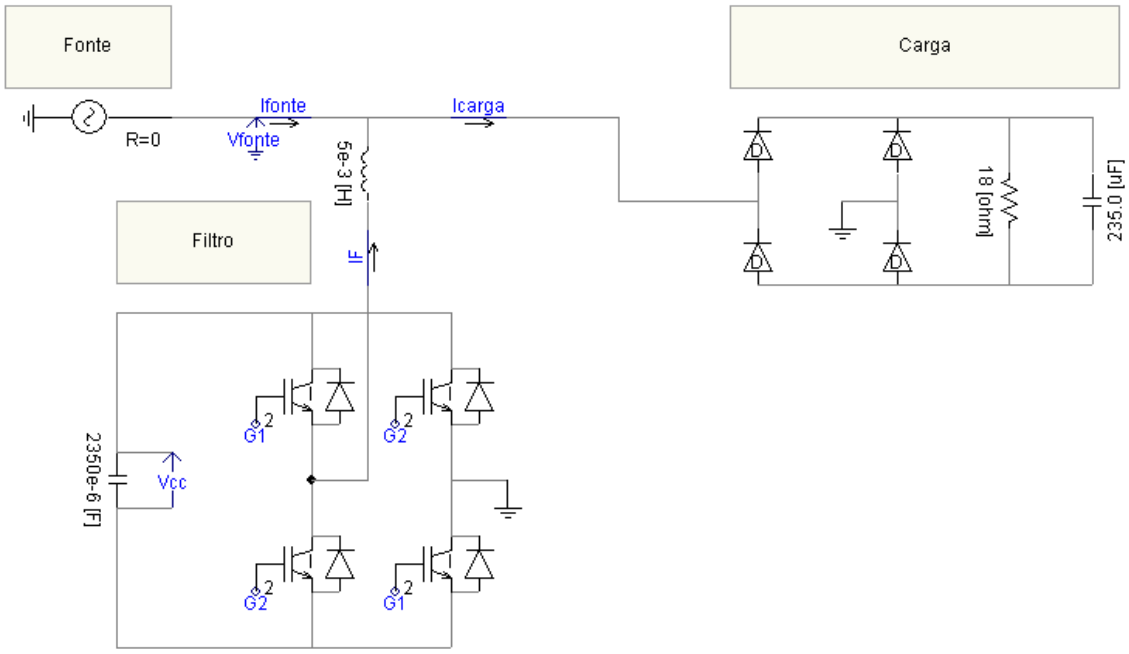


Figura 4.9 – Esquema de simulação do Filtro Activo Paralelo Monofásico

4.3.1 Simulação do Filtro para Diferentes Tipos de Cargas

Nas simulações efectuadas a seguir, o valor do condensador utilizado do lado CC é de 2350 µF, (que na prática corresponde a dois condensadores ligados em série de 4700 µF). Supõe-se que a tensão na rede eléctrica é 230 V e tensão (CC) no condensador em regime permanente foi ajustada para 500 V (aprox.). Supõe-se que o filtro está inicialmente desligado, entrando em operação ao fim de 0,1 s.

4.3.1.1 Funcionamento com uma Carga do Tipo *RL* Ligada à Fonte

Esta simulação corresponde ao tipo de situação que na prática é a mais comum. Seleccionou-se valores de $R = 18\ \Omega$ e $L = 200$ mH (figura 4.10) que correspondem a uma potência de cerca de 240 W com um factor de potência de 0,3 (indutivo).

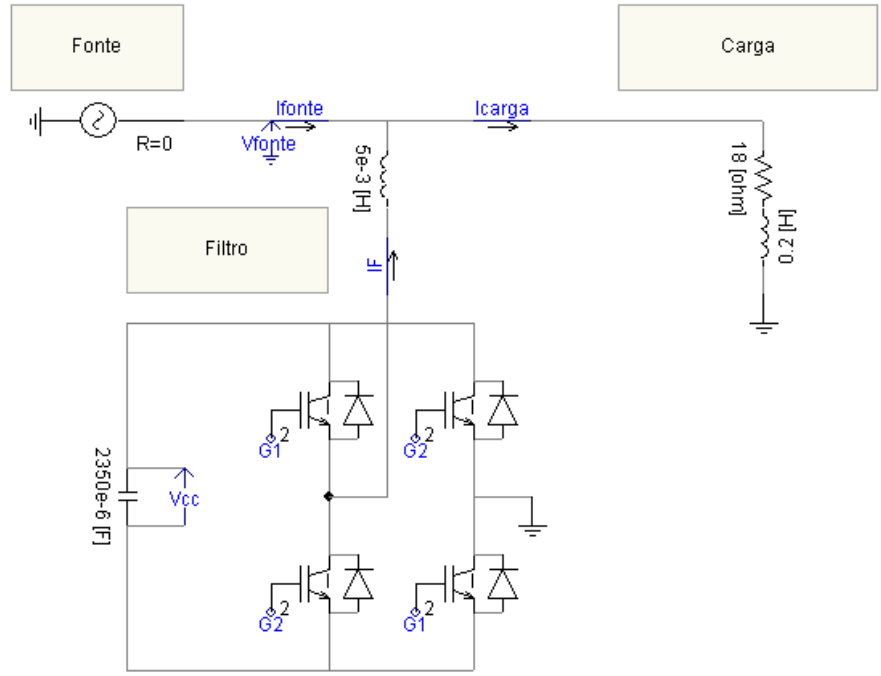


Figura 4.10 – Circuito com carga passiva *RL*

Na figura 4.11 apresenta-se as formas de onda da tensão (V_{fonte}) e da corrente (I_{fonte}) na rede eléctrica, da corrente na carga (I_{carga}), da corrente injectada pelo filtro (I_F), e da corrente de referência $I_{p\text{-}q}$ (calculada com base na teoria *p-q*).

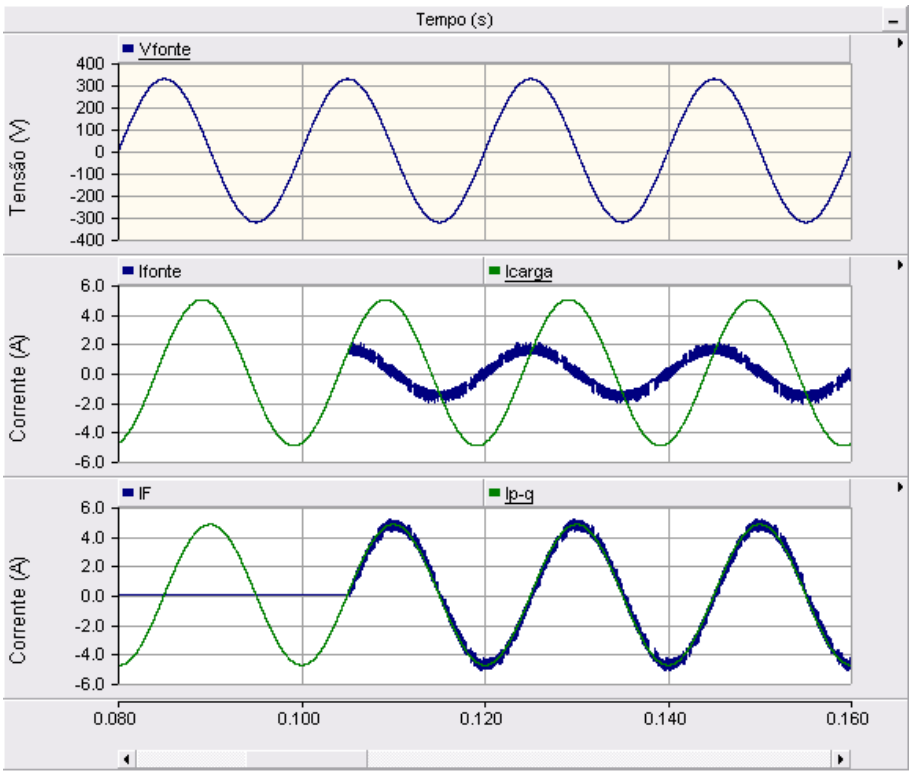


Figura 4.11 - Formas de onda para uma carga *RL*

Como se pode observar, a corrente que estava atrasada relativamente à tensão, fica em fase com a mesma a partir do instante em que se liga o filtro e a sua amplitude diminui.

Pela figura 4.12, pode constatar-se que a tensão no lado CC, atinge um valor médio de 500 V em regime permanente apresentando oscilações cuja amplitude ronda os 4 V_{pp}, o que pode ser considerado aceitável [44].

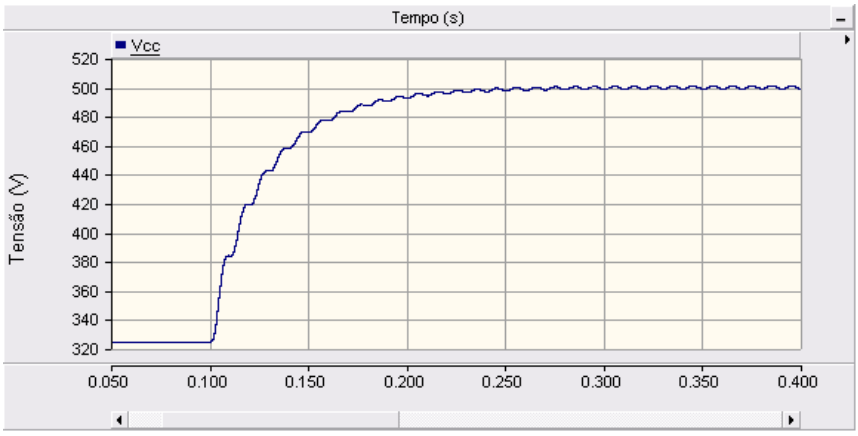


Figura 4.12 – Forma de onda no lado CC para uma carga *RL*

4.3.1.2 Carga Constituída por Rectificador Monofásico com Filtro Capacitivo, em Paralelo e Carga *RL*

Esta simulação permitiu avaliar o comportamento do filtro no caso de uma carga não-linear ligada à rede (para além da carga *RL* utilizada no caso anterior). Utilizou-se como carga um rectificador monofásico com filtro capacitivo (uma das situações mais comuns na prática), com C = 235 µF R = 18 Ω (figura 4.13)

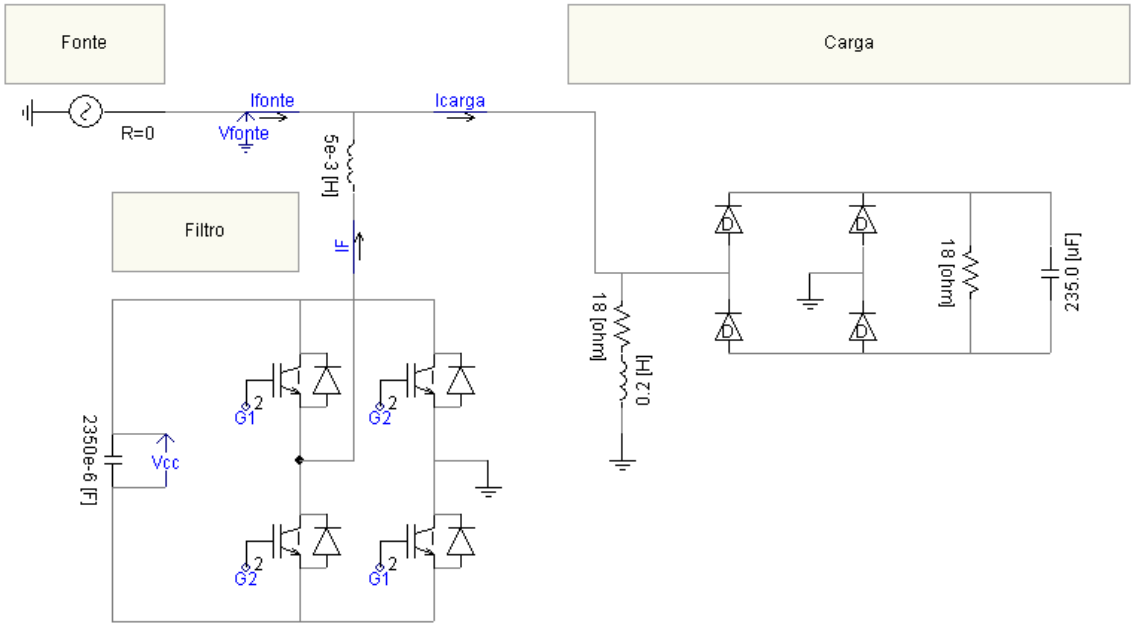


Figura 4.13 - Circuito com rectificador monofásico com filtro capacitivo paralelo e carga *RL*

Na figura 4.14 apresenta-se as formas de onda da tensão (V_{fonte}) e da corrente (I_{fonte}) na rede eléctrica, da corrente na carga (I_{carga}), da corrente injectada pelo filtro (I_F), e da corrente de referência ($I_{p\text{-}q}$).

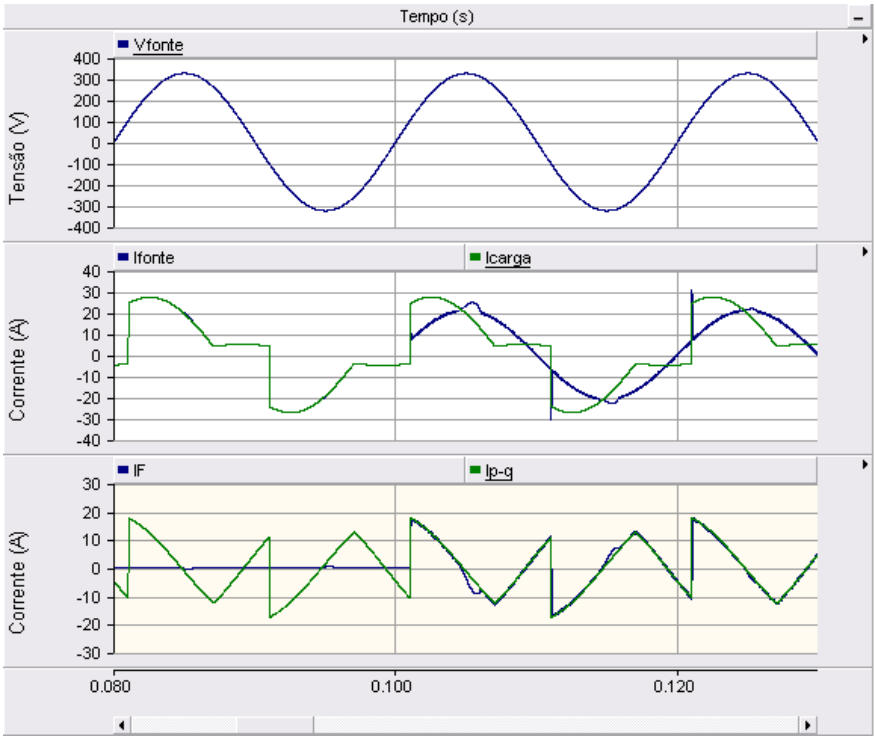


Figura 4.14 - Forma de onda para o caso de um rectificador monofásico em paralelo com uma carga *RL*

Como se pode constatar, a corrente na fonte, que se encontrava inicialmente extremamente distorcida, apresentando um factor de distorção de 47 %, passou a

apresentar uma forma de onda praticamente sinusoidal (com um factor de distorção de apenas 2,2 %) e em fase com a tensão, logo que o filtro entrou em operação.

Como pode constatar-se pela figura 4.15, a tensão no lado CC, mantém-se no valor pretendido e com uma ondulação aceitável.

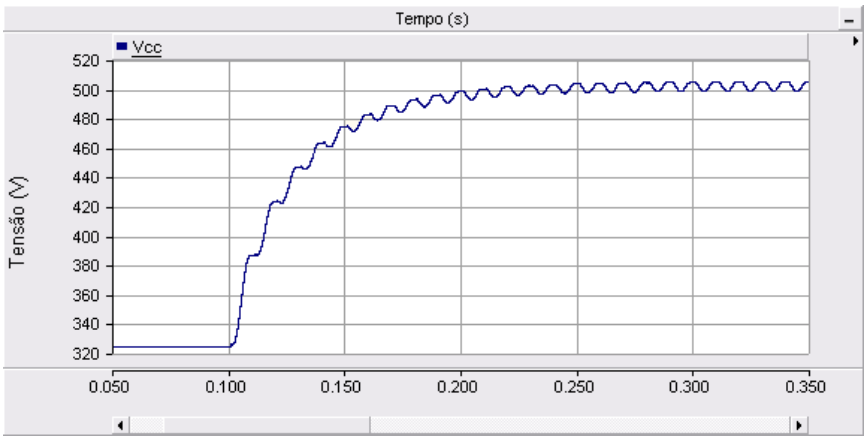


Figura 4.15 - Forma de onda do lado CC

4.3.1.3 Rectificador Monofásico com Filtro Capacitivo com Carga *RL* na Saída

Neste caso (figura 4.16) supõe-se que temos ligado à rede um rectificador monofásico com filtro capacitivo e uma carga *RL* ligada na saída.

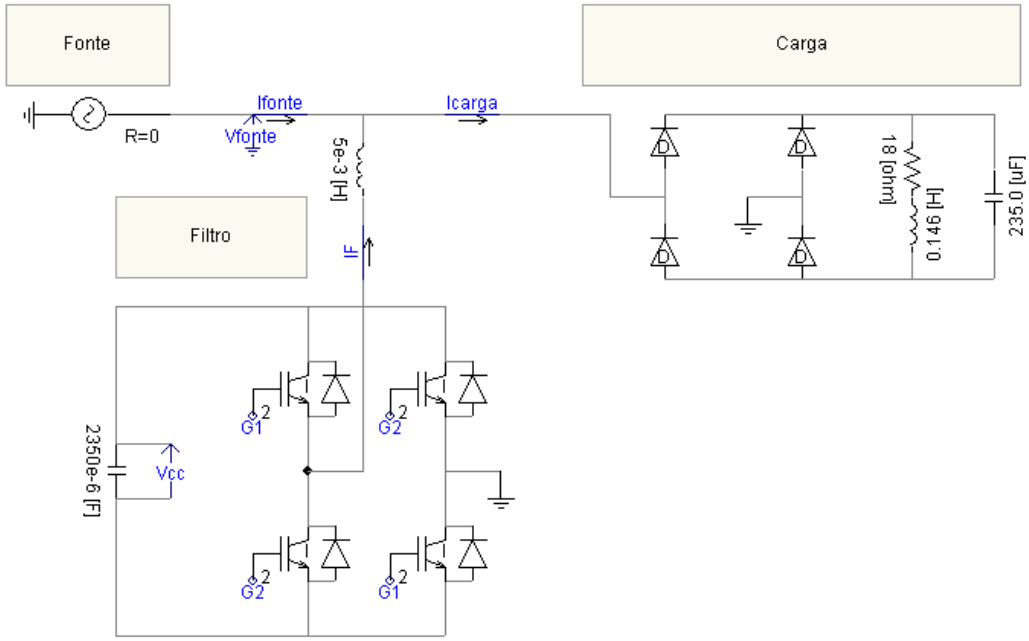


Figura 4.16 - Circuito com rectificador monofásico com filtro capacitivo e carga *RL* na saída

Na figura 4.17 apresenta-se as formas de onda da tensão (V_{fonte}) e da corrente (I_{fonte}) na rede eléctrica, da corrente na carga (I_{carga}), da corrente injectada pelo filtro (I_F), e da corrente de referência ($I_{p\text{-}q}$).

Os resultados obtidos são idênticos ao do caso anterior, tendo o conteúdo harmónico de corrente passado de 50,6 % para 1,2 % com a ligação do filtro activo.

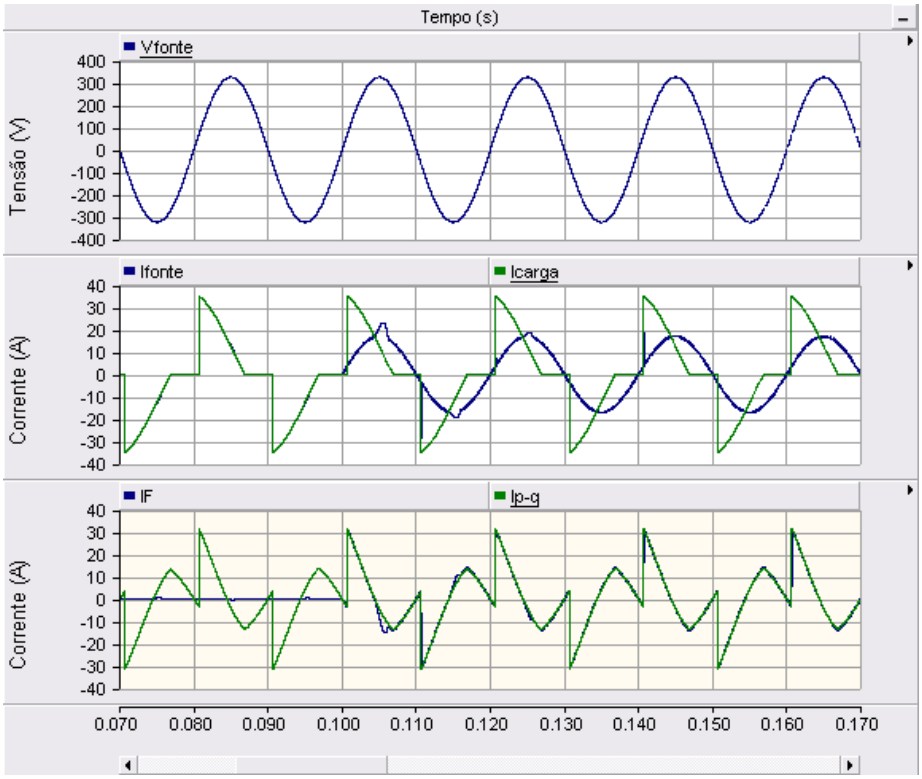


Figura 4.17 - Forma de onda para rectificador monofásico com filtro capacitivo e carga *RL*

Pode-se observar na figura 4.18 a tensão do lado CC, onde se mantém em níveis aceitáveis.

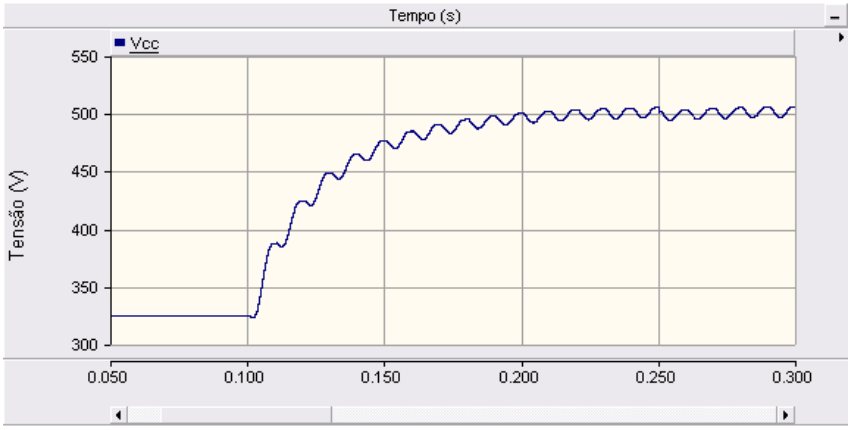


Figura 4.18 - Forma de onda da tensão no lado CC

4.4 Simulação do Sistema de Interface entre a Eólica e a Rede Eléctrica (solução completa)

Na figura 4.19, apresenta-se o esquema utilizado para simulação do sistema completo: conversor *Boost* e Filtro Activo Paralelo ligado à rede eléctrica.

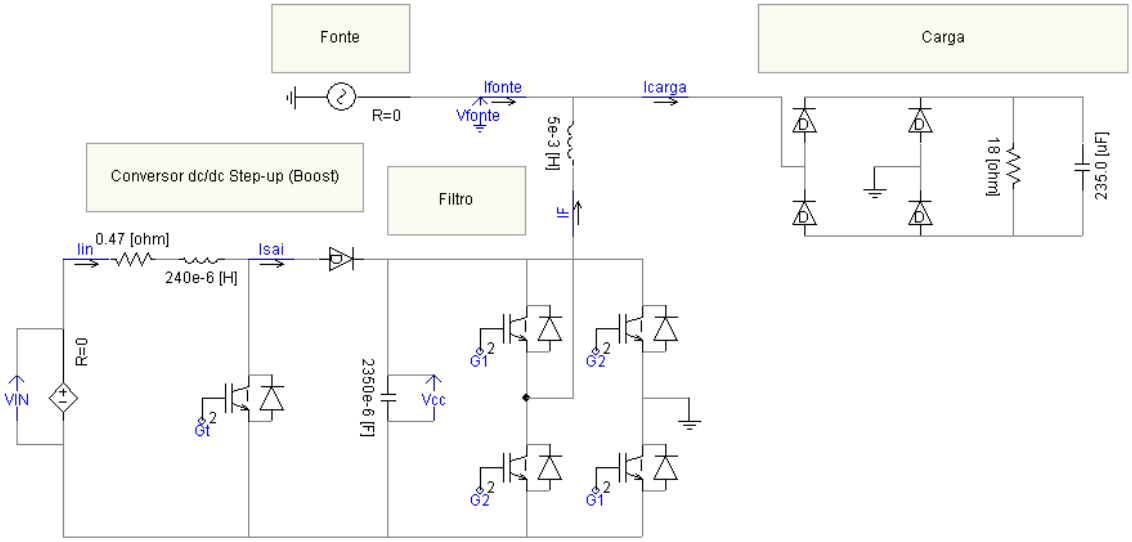


Figura 4.19 – Esquema de ligação da interface da eólica a rede eléctrica

4.4.1 Simulação do Sistema para Diferentes Tipos de Cargas

O sistema completo foi testado nas mesmas situações de carga descritas anteriormente para a simulação do Filtro Activo Paralelo Monofásico.

4.4.1.1 Funcionamento com uma Carga do Tipo *RL* Ligada à Fonte

Esta simulação corresponde ao tipo de situação que na prática é a mais comum. Seleccionou-se valores de R = 18 Ω e L = 200 mH que correspondem a uma potência de cerca de 240 W com um factor de potência de 0,3 (indutivo).

Na figura 4.20 apresenta-se as formas de onda da tensão (V_{fonte}) e da corrente (I_{fonte}) na rede eléctrica, da corrente na carga (I_{carga}), da corrente injectada pelo filtro (I_F), e da corrente de referência ($I_{p\text{-}q}$ calculada com base na teoria *p-q*).

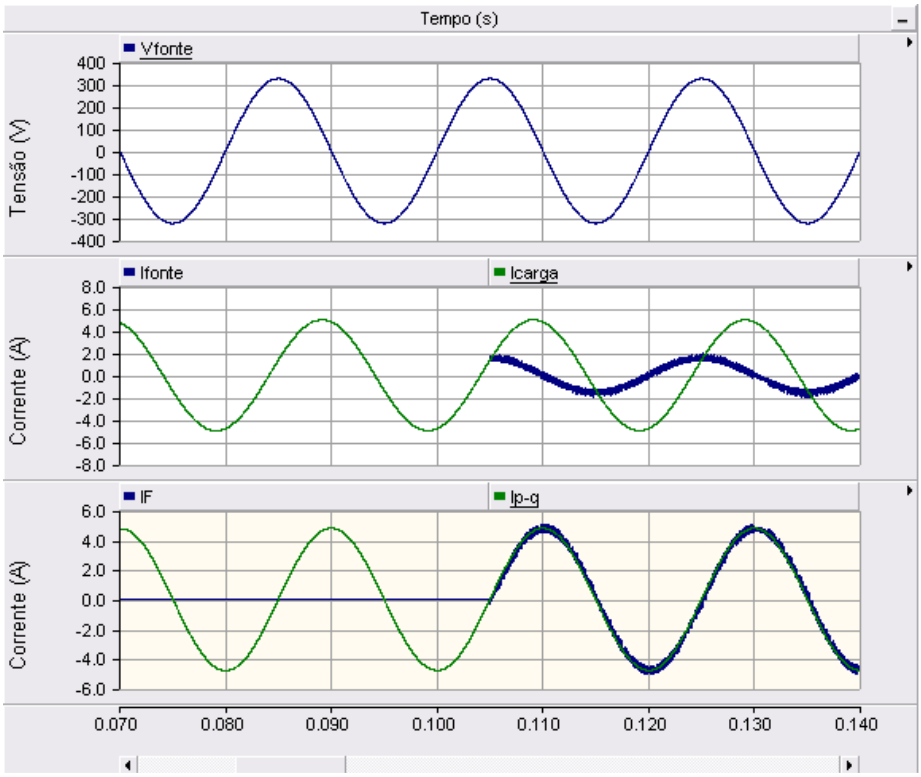


Figura 4.20 - Formas de onda da carga passiva RL

Como se pode observar, a corrente que estava atrasada relativamente a tensão, fica em fase com a mesma a partir do instante em que se liga o filtro e a sua amplitude diminui.

Na figura 4.21 pode observar-se (na situação de arranque) as formas de onda da tensão no lado CC e do valor médio da potência injectada pela fonte de energia alternativa na rede eléctrica (através do filtro).

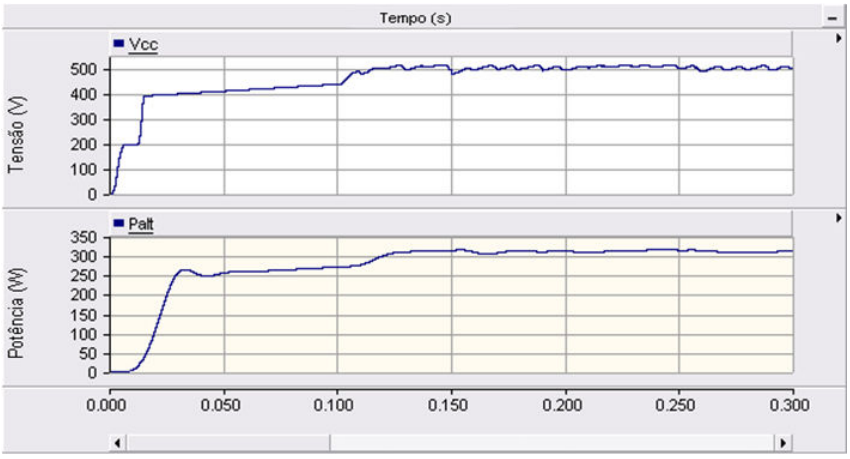


Figura 4.21 – Forma de onda da tensão do lado CC e potência média injectada pela fonte de energia alternativa

4.4.1.2 Carga Constituída por Rectificador Monofásico com Filtro Capacitivo, em Paralelo e Carga *RL*

Esta simulação permitiu avaliar o comportamento do filtro no caso de uma carga não-linear ligada à rede (para além da carga *RL* utilizada no caso anterior). Utilizou-se como carga não-linear um rectificador monofásico com filtro capacitivo (uma das situações mais comuns na prática), com C = 235 µF R = 18 Ω.

Na figura 4.22 apresenta-se as formas de onda da tensão (V_{fonte}) e da corrente (I_{fonte}) na rede eléctrica, da corrente na carga (I_{carga}), da corrente injectada pelo filtro (I_F), e da corrente de referência ($I_{p\text{-}q}$).

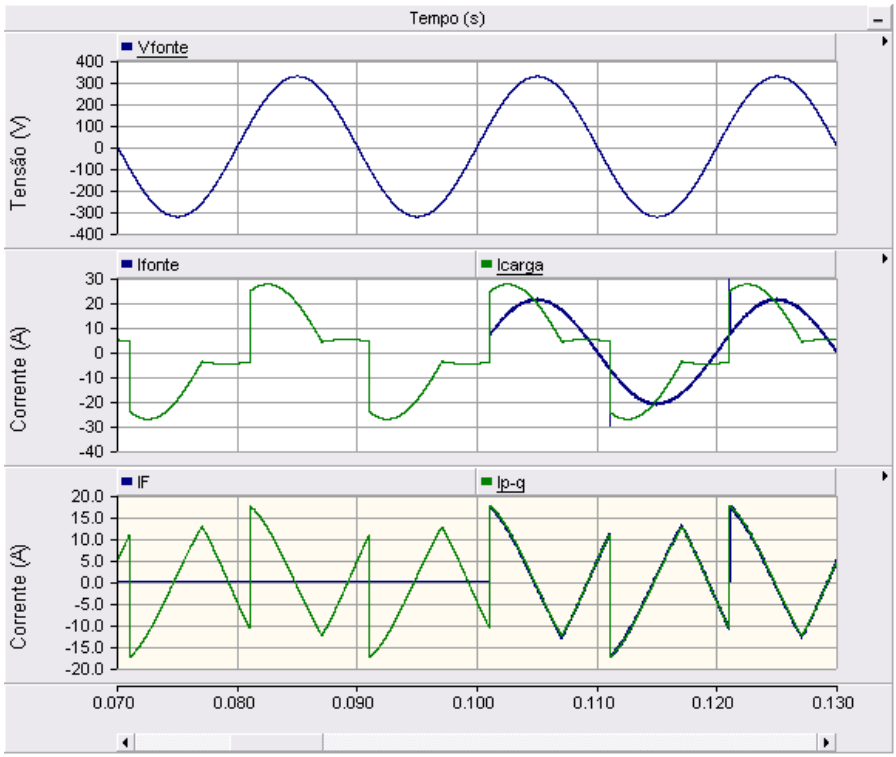


Figura 4.22 - Forma de onda para o caso de um rectificador monofásico em paralelo com uma carga *RL*

Como se pode constatar, a corrente na fonte, que se encontrava inicialmente extremamente distorcida, apresentando um factor de distorção de 47 %, passou a apresentar uma forma de onda praticamente sinusoidal (com um factor de distorção de apenas 2,2 %) e em fase com a tensão, logo que o filtro entrou em operação.

Na figura 4.23 pode observar-se (na situação de arranque) as formas de onda da tensão no lado CC e do valor médio da potência injectada pela fonte de energia alternativa na rede eléctrica (através do filtro).

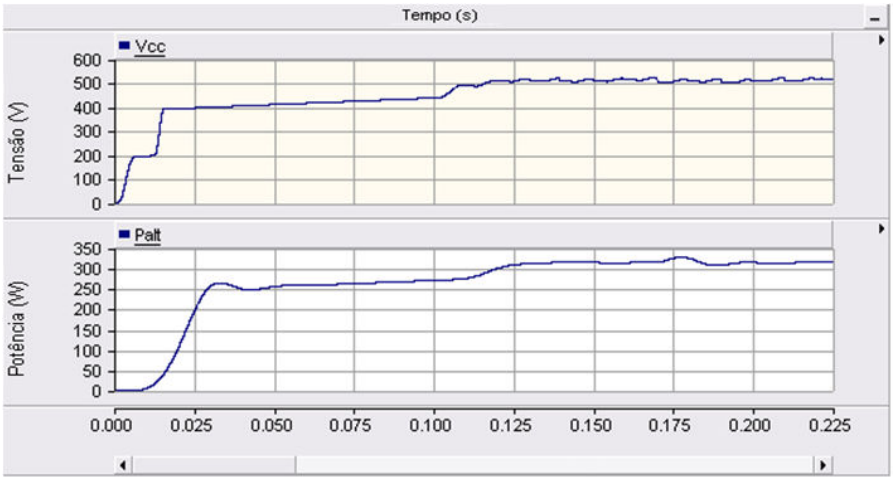


Figura 4.23 - Forma de onda da tensão do lado CC e potência média injectada pela fonte de energia alternativa

4.4.1.3 Rectificador Monofásico com Filtro Capacitivo com Carga *RL* na Saída

Neste caso supõe-se que temos ligado à rede um rectificador monofásico com filtro capacitivo e uma carga *RL* ligada na saída.

Na figura 4.24 apresenta-se as formas de onda da tensão (V_{fonte}) e da corrente (I_{fonte}) na rede eléctrica, da corrente na carga (I_{carga}), da corrente injectada pelo filtro (I_F), e da corrente de referência ($I_{p\text{-}q}$).

Os resultados obtidos são idênticos ao do caso anterior, tendo o conteúdo harmónico da corrente passado de 50,6 % para 1,2 % com a ligação do filtro activo.

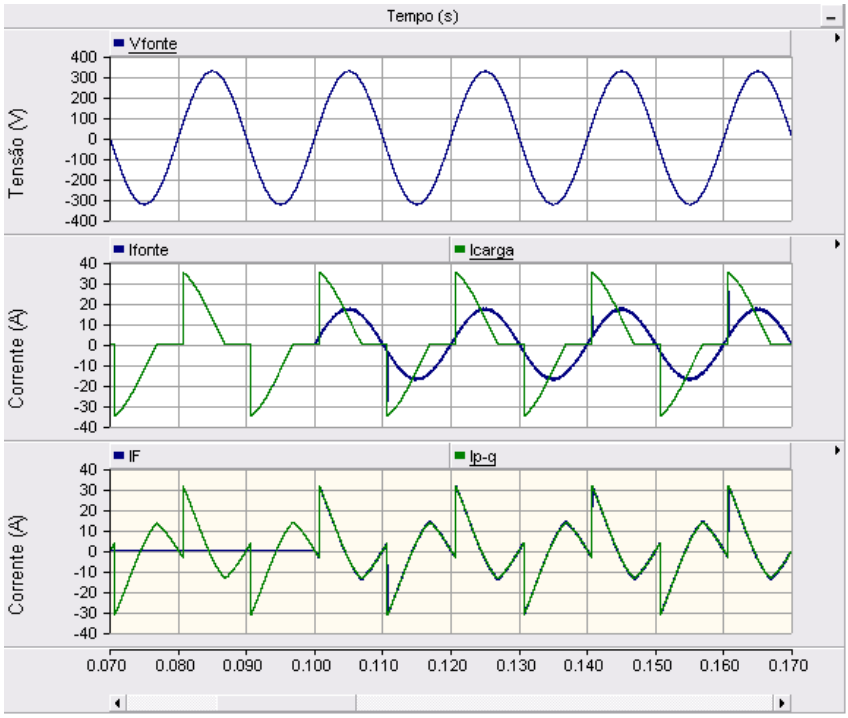


Figura 4.24 - Forma de onda do rectificador monofásico com carga RL/C

Na figura 4.25 pode observar-se (na situação de arranque) as formas de onda da tensão no lado CC e do valor médio da potência injectada pela fonte de energia alternativa na rede eléctrica (através do filtro).

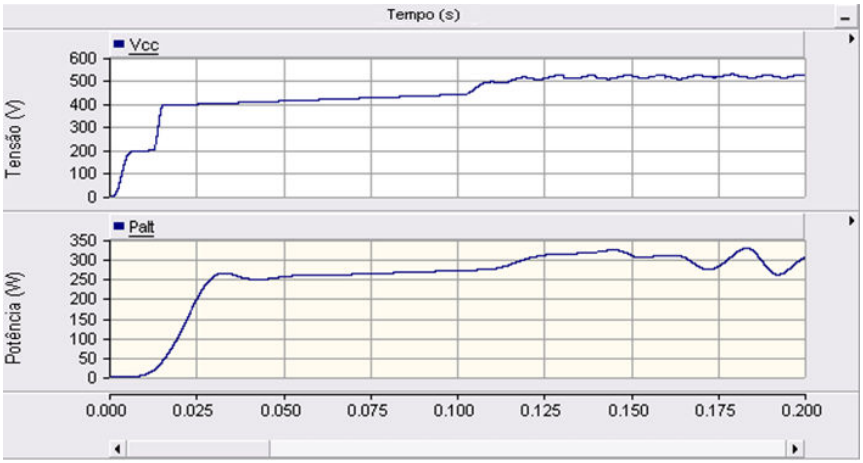


Figura 4.25 - Forma de onda da tensão do lado CC e potência média injectada pela fonte de energia alternativa

As simulações permitiram assim concluir que a solução proposta permite injectar energia na rede eléctrica, ao mesmo tempo que possibilita a solução de problemas de qualidade de energia eléctrica, nomeadamente, a correcção do factor de potência e a eliminação de harmónicos de corrente.

Capítulo 5 - Implementação

Este capítulo visa ilustrar a forma como foi implementado o conversor *Boost* e a sua integração com o Filtro Activo Paralelo Monofásico. São ainda descritos os principais componentes utilizados, bem como a forma como foram ultrapassados alguns problemas encontrados na implementação.

5.1 Conversor CC-CC *Step-up (Boost)*

O conversor CC escolhido para ajustar os níveis de tensão produzidos pelo aerogerador para valores adequados para o funcionamento do filtro activo foi o conversor *Boost*, uma vez que a sua implementação é mais simples e mais económica comparativamente com o conversor *Push-Pull* em ponte completa.

Na sua implementação, foram considerados os seguintes valores de referência, com base nos quais foram seleccionados os diversos componentes e efectuados os cálculos:

- Potência nominal de saída: 400 W
- Frequência de comutação: 5 kHz
- Tensão de entrada: entre 46 V e 56 V
- Tensão de saída: 500 V
- *Ripple* máximo na saída: ±*3* V

5.1.1 Sistema de Controlo

5.1.1.1 Dimensionamento do Circuito de Comando do IGBT

O comando do IGBT foi feito recorrendo ao circuito integrado (TL594), sendo necessário calcular os parâmetros do oscilador, o ganho do amplificador de erro para a tensão, os parâmetros relativos à limitação da corrente de saída e o *deadtime*.

Dimensionamento do Oscilador

A frequência de oscilação do oscilador interno do TL594 depende dos valores de C_T e R_T e é dada por:

$$f_{OSC} = \frac{1.1}{R_T \cdot C_T} \tag{5.1}$$

Como a frequência de comutação do IGBT pretendida é de 5 kHz, e considerando $C_T = 220$ nF

$$R_T = \frac{1.1}{5\times10^{3} \cdot 220\times10^{-9}} = 1K\Omega \tag{5.2}$$

Para permitir algum ajuste da frequência de comutação, utilizou-se um potenciómetro de 1 kΩ em série com uma resistência de 500 Ω (figura 5.1).

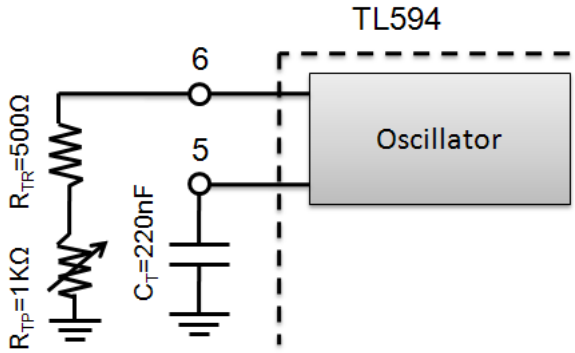


Figura 5.1 – Esquema do Oscilador

Dimensionamento do Ganho do Amplificador de Erro de Tensão

O valor de tensão de comparação V_1 (pino 1) desejado é de 1,4 V, sendo necessário ajustar o valor de tensão de saída V_{out} e V_{ref}, adicionando-se ainda um ganho de 100 (que se verificou ser adequado através da simulação). Na figura 5.2 apresenta-se o esquema montado do amplificador de erro de tensão.

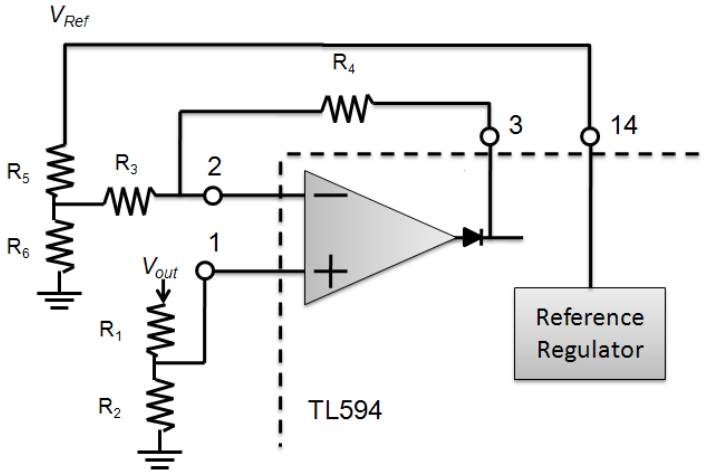


Figura 5.2 - Esquema do circuito amplificador de erro de tensão

A tensão de saída V_{out} é de 500 V, V_1 de 1,4 V. Considerando que R_1 = 370 kΩ, o valor da resistência R_2 é:

$$R_2 = \frac{R_1 \cdot V_1}{V_{out} - V_1} = \frac{370\times10^3 \cdot 1{,}4}{500 - 1{,}4} = 1K\Omega \tag{5.3}$$

A tensão de referência é fornecida pelo TL594 sendo de 5 V. Considerando que o valor V_1=V_2 e que R_5=2,6 kΩ, o valor da resistência *R6* é:

$$R_6 = \frac{R_5 \cdot V_2}{V_{ref} - V_2} = \frac{2{,}6\times10^3 \cdot 1{,}4}{5 - 1{,}4} = 1K\Omega \tag{5.4}$$

O ganho do amplificador é dado por:

$$A = \frac{R_4}{R_3} \tag{5.5}$$

Sendo o valor de R_3=10 kΩ R_4 é:

$$R_4 = 10\times10^3 \cdot 100 = 1M\Omega \tag{5.6}$$

Nota: O conversor foi testado inicialmente com uma tensão de entrada de 15 V, por questões de segurança, sendo para isso necessário ajustar os valores das resistências do amplificador do erro de tensão, que passaram a ser R_1 = 160 kΩ e R_2 = 1,5 kΩ.

Dimensionamento do Amplificador de Erro para a Corrente:

O TL594 dispõe de um circuito para limitação da corrente de saída (figura 5.3), que no caso presente se pretende que não ultrapasse 1 A.

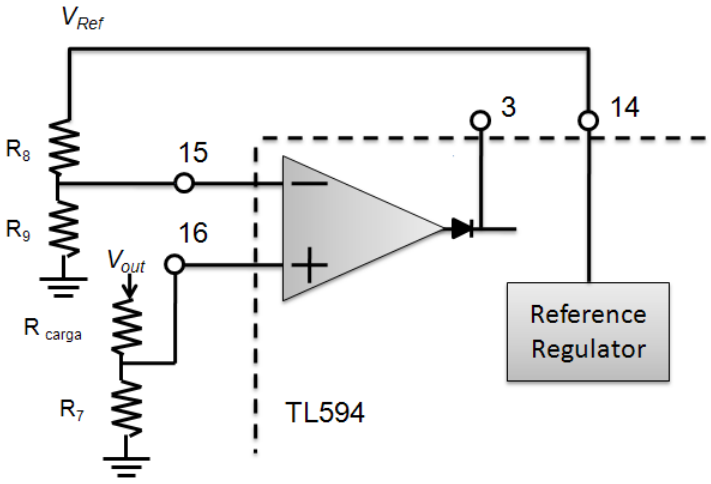


Figura 5.3 - Esquema do circuito amplificador de erro de corrente

O valor de R_7 utilizado para medir a corrente de saída é de 1 Ω. Assim, o valor da tensão no pino 16 é 1 V. A tensão de comparação do pino 15 é também 1 V e como R_8 = 20 kΩ, o valor de R_9 é:

$$R_9 = \frac{R_8 \cdot V_{15}}{V_{ref} - V_{15}} = \frac{20\times10^3 \cdot 1}{5-1} = 5K\Omega \tag{5.7}$$

Dimensionamento do Circuito *Soft Start*:

O circuito de *soft start* é um circuito de protecção que previne picos de corrente no arranque e define o valor máximo do *duty-cycle*. Na figura 5.4 é possível observar o esquema do circuito montado.

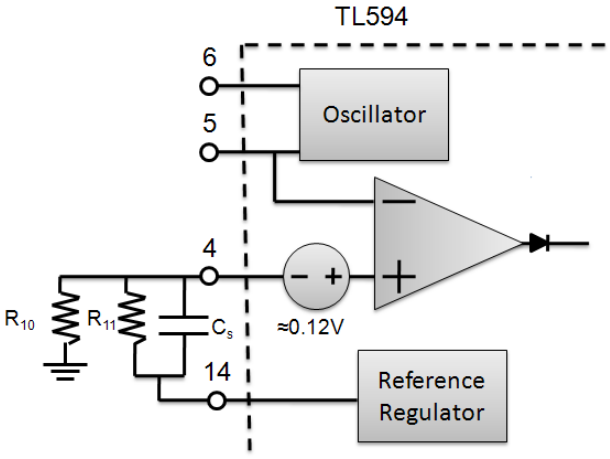


Figura 5.4 - Esquema do circuito *soft-start*

Pretende-se que o circuito estabilize no máximo em 20 ms. Considerando que R_{10} = 20 kΩ o valor de C_s :

$$C_s = \frac{\tau}{R_{10}} = \frac{20\times10^{-3}}{20\times10^3} = 1\mu F \tag{5.8}$$

Para determinar o valor de $R_{11,}$ é necessário saber o valor da tensão do pino 4 (V_4), que representa a fracção do período correspondente ao intervalo de não-condução (t_{off}) , Uma vez que se pretende que o *duty-cycle* não ultrapasse os 92 %, t_{off} corresponde a 8 %, pelo que, o valor de V_4 correspondente é dado por:

$$\begin{aligned} 3{,}3 \quad &- \quad 100\% \\ V_4 + 0.12 \quad &- \quad 8\% \end{aligned} \tag{5.9}$$

Logo V4 = 0.14 V

Sendo assim o valor de R_{11} é:

$$R_{11} = \frac{V_{ref} \cdot R_{10} - V_4 \cdot R_{10}}{V_4} = \frac{5 \cdot 20 \times 10^3 - 0{,}14 \cdot 20 \times 10^3}{0{,}14} = 566K\Omega \tag{5.10}$$

Conexão das Saídas em Modo *Single-Ended*:

Para colocar as saídas em modo *single-ended* (as duas saídas em paralelo), os pinos 9, 10 e 13 foram ligados à massa, e os pinos 8 e 11, foram ligados a 15 V através de uma resistência. Esta configuração (figura 5.5), permite duplicar a corrente de saída (ajustada para um máximo de 500 mA, neste caso).

O valor da resistência, considerando que a corrente de saída desejado é 150 mA é:

$$R = \frac{V_{cc}}{I} = \frac{15}{150 \times 10^{-3}} = 100\Omega \tag{5.11}$$

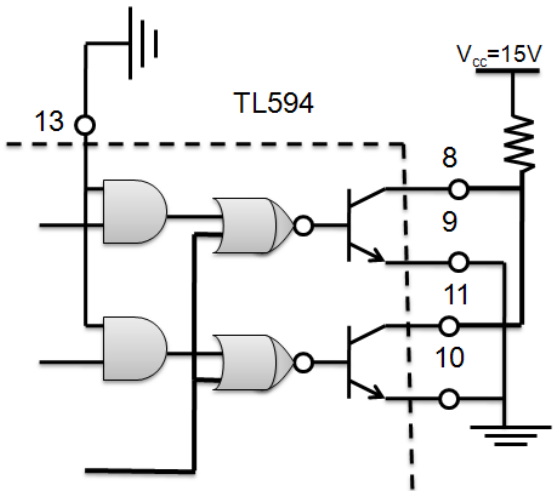


Figura 5.5 – Esquema de ligação das saídas

5.1.1.2 Regulador de Tensão

Foi necessário utilizar um regulador de tensão para manter estabilizada (em 15 V) a tensão de alimentação do sistema de controlo. O regulador seleccionado foi o LM317BT que permite ajustar a tensão entre 1,2 V e 37 V (figura 5.6).

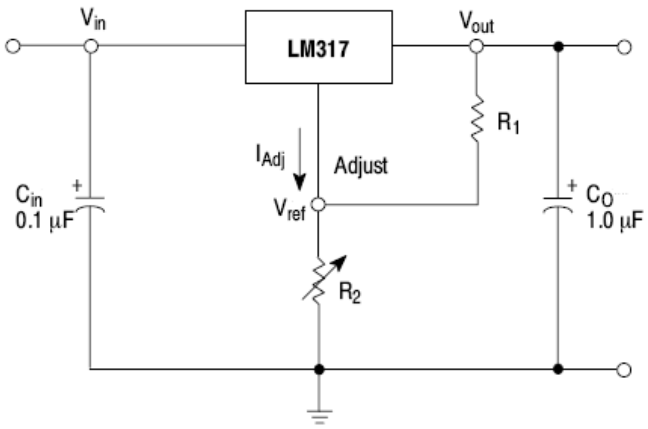


Figura 5.6 - Esquema ligação do LM 317

Desprezando a corrente I_{adj} (que tem valores típicos entre 50 µA e 100 µA), a tensão de saída do LM317BT é dada por:

$$V_{out} \approx \frac{R_1 + R_2}{R_1} \cdot V_{ref} \tag{5.12}$$

V_{ref} é uma tensão de referência gerada internamente pelo regulador, de valor igual a 1,25 V.

Pretende-se uma tensão de saída de 15V. Admitindo $R_1 = 1{,}0$ kΩ, o valor de R_2 vem:

$$V_{out} \approx \frac{R_1 + R_2}{R_1} \cdot V_{ref} \tag{5.13}$$

$$15 \approx \frac{1\times10^3 + R_2}{1\times10^3} 1{,}25 \tag{5.14}$$

$$R_2 = \frac{15 \cdot 1\times10^3 - 1{,}25 \cdot 1\times10^3}{1{,}25} \tag{5.15}$$

$$R_2 = 11K\Omega$$

Utilizou-se para R_2 um potenciómetro de 10 kΩ, em série com uma resistência de 5 kΩ. De forma a evitar oscilações, colocou-se um condensador na entrada e outro na saída, ambos de 1 µF.

5.1.1.3 Acoplamento de Sinal

Para isolar o sistema de comando do andar de potência utilizou-se um acoplamento do tipo óptico, recorrendo-se para esse efeito ao CI HCPL-3120. A ligação do TL594 (gerador de PWM) ao acoplador foi feita do modo indicado na figura 5.7.

A resistência que liga a saída o *TL594* e o ânodo do LED de entrada do *HCPL-3120*, considerando que a corrente máxima no LED é de 15 mA, é dada por:

$$R \geq \frac{V_{cc} - 1.2}{I_D} = \frac{15 - 1.2}{15 \times 10^{-3}} = 920\Omega \tag{5.16}$$

O valor seleccionado foi de 1kΩ.

A resistência que liga a saída do HCPL-3120 e a gate do IGBT, determina o valor máximo da corrente (I_{OLPEAK}) que circula na gate do IGBT, destinando-se a minimizar as perdas na comutação.

Como a corrente I_{OLPEAK} recomendada para o IGBT é 2,5 A e o fabricante do HCPL-3120 garante que para esta corrente, a tensão de saída do acoplador (*VOL*) é superior a 2 V, a resistência de gate é dada por:

$$R_G \geq \frac{V_{cc} - V_{OL}}{I_{OLPEAK}} = \frac{15 - 2}{2{,}5} = 5{,}2\Omega \tag{5.17}$$

Na prática foram utilizadas 2 resistências de 11 Ω ligadas em paralelo, perfazendo 5.5Ω. Na figura 5.7 apresenta-se o esquema da ligação do TL594 à gate do IGBT através do opto-acoplador.

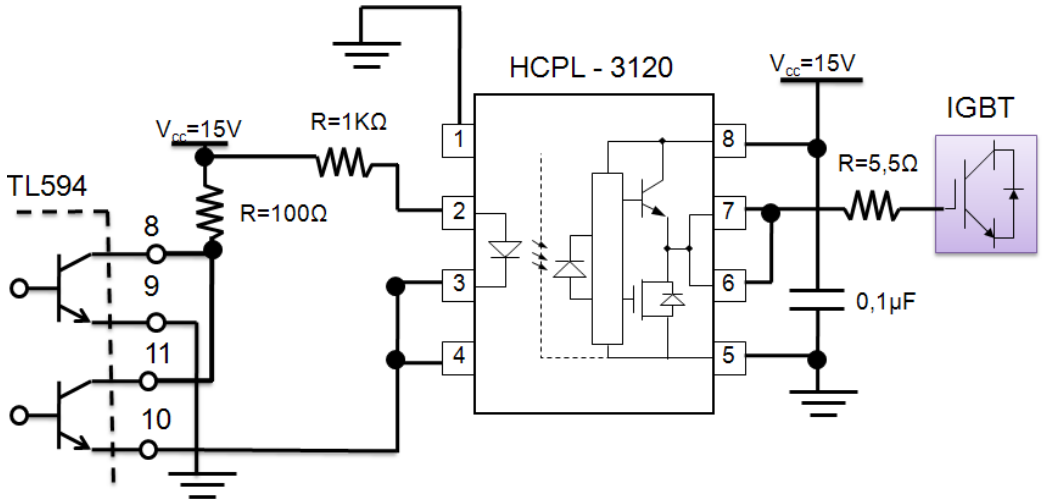


Figura 5.7 – Sistema de acoplamento

O sistema de controlo do conversor *Boost* foi montado em *breadboard* (figura 5.8), sendo possível identificar as partes acabadas de descrever: 1 - gerador de PWM; 2 - regulador de tensão; 3 - sistema de acoplamento.

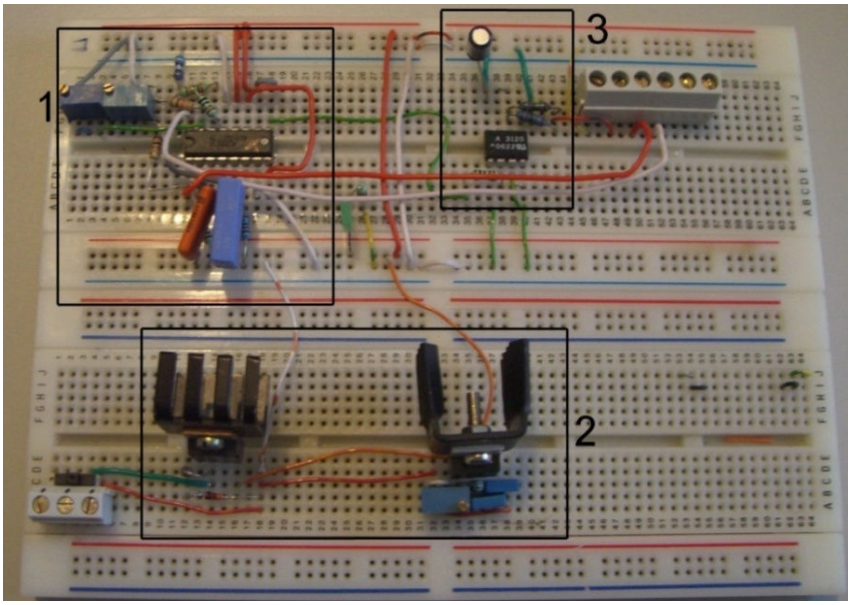


Figura 5.8 – Sistema de controlo do conversor *Boost*

5.1.2 Andar de Potência

Em seguida detalha-se o dimensionamento do andar de potência.

5.1.2.1 Dimensionamento da Bobina

De acordo com a equação 3.7, a relação entre a entrada e a saída do conversor *step-up* é dada por:

$$\frac{V_{out}}{V_{in}} = \frac{T_s}{t_{off}} = \frac{1}{1-D}$$

Uma vez que se pretende uma tensão de saída de 500 V a partir de uma tensão de entrada que no mínimo é 46 V, o valor máximo de *D* será:

$$D = 1 - \frac{V_{in}}{V_{out}} = 1 - \frac{46}{500} = 0{,}91 = 91\% \tag{5.18}$$

Assim, o valor mínimo da indutância que garantiria o funcionamento no modo de condução contínua, admitindo um valor mínimo da corrente de saída de 0,1 A e uma frequência de comutação de 5 kHz, é dada por:

$$L_{\min} \leq \frac{200\times10^{-6}\cdot 500}{2\cdot 0{,}1} 0{,}91\cdot(1-0{,}91)^2 \Leftrightarrow L_{\min} \leq 1{,}8mH \tag{5.19}$$

Este valor é relativamente elevado, pelo que na prática se optou por permitir o funcionamento no modo de condução descontínua (mantendo a tensão de saída constante), utilizando-se uma abordagem diferente para a escolha do indutor.

Assim, e no sentido de tentar ganhar algum tempo, procurou-se de entre algumas bobinas existentes no laboratório, aquela que seria mais indicada para a aplicação em causa. Para isso efectuaram-se várias medições que tiveram em atenção, não só o valor da indutância, mas também a sua resistência (incluindo o efeito pelicular), tendo sido seleccionado um indutor com uma indutância de 240 µH e uma resistência para a frequência de operação (ver figura 5.9) de 0,47 Ω.

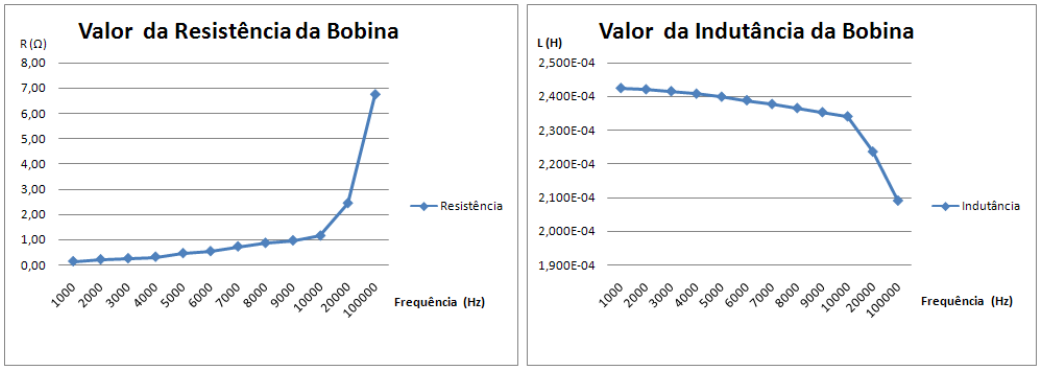


Figura 5.9 – Valores da resistência e indutância da bobina para diferentes frequências

5.1.2.2 Dimensionamento do Condensador

O valor mínimo da capacidade do condensador de saída é (equação 3.22), para um *ripple* de 3 V

$$C_{\min} \geq \frac{400}{500}\cdot\frac{0{,}91\cdot 50\times10^{-6}}{3} \Leftrightarrow C_{\min} \geq 12{,}1\mu H \tag{5.20}$$

Na prática foram utilizados 2 condensadores disponíveis no laboratório de 220 µF/400 V ligados em série.

Nas figuras 5.10 e 5.11 apresenta-se o esquema da montagem e o aspecto do conversor no final.

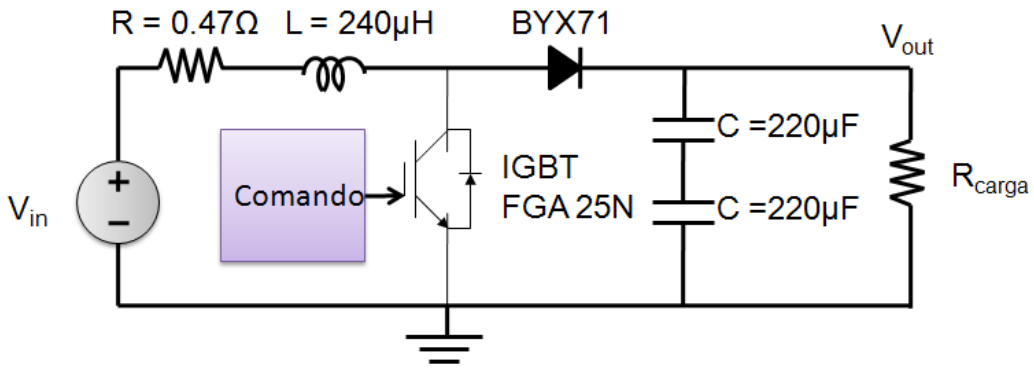


Figura 5.10 – Esquema do conversor *Boost*

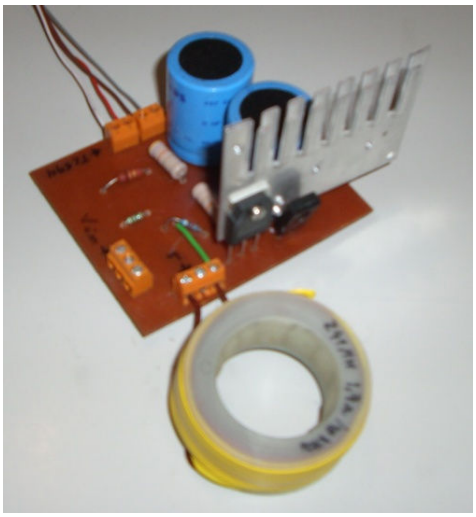


Figura 5.11 – Conversor *Step-up* (*Boost)*

Na figura 5.12 pode ver-se o aspecto da bancada de ensaios onde foram realizados os testes.

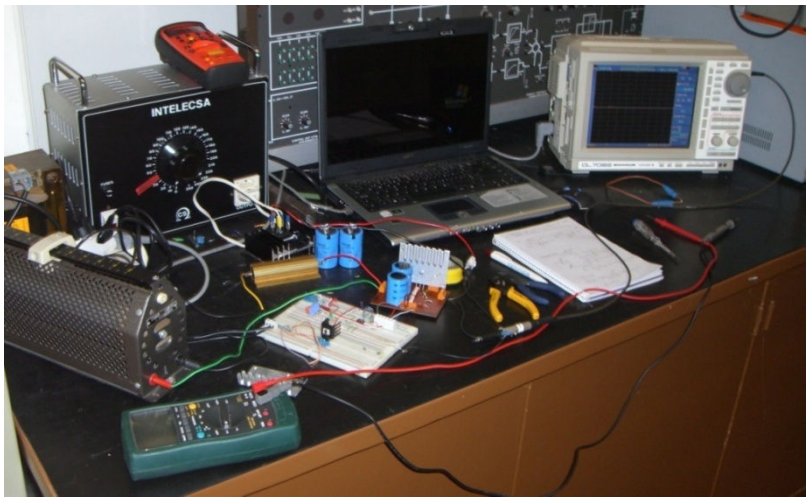


Figura 5.12 – Bancada de ensaios

5.2 Filtro Activo Paralelo Monofásico

A implementação do Filtro Activo Paralelo Monofásico foi efectuada no âmbito de outro trabalho que decorre no DEI, pelo Engenheiro Pedro Neves, não sendo por isso descrita em pormenor.

O andar de potência do Filtro Activo Paralelo consiste, basicamente, num inversor fonte de tensão com controlo de corrente monofásico. Os interruptores semicondutores utilizados foram IGBTs da *Mitsubishi* (*PM50CSD120*), que são módulos que incluem já o circuito de *gate drive*. A conexão entre o IGBT e a rede eléctrica é efectuada através de uma indutância, permitindo alisar a corrente injectada na rede.

O sistema de controlo do filtro utiliza um DSP da *Texas Instruments* (*TMS320F2812*), sendo este o responsável por adquirir o sinal (medido pelos sensores *LEM*) da tensões da rede e do lado CC do inversor, a corrente na carga e a injectada na rede, calcular o valor das correntes de referência e sintetizar os sinais de comando para ligar e desligar os interruptores semicondutores do inversor.

A medição das tensões foram feitas por meio de sensores *LEM LV 25-P*, enquanto para a medição das correntes foram utilizados sensores *LEM LA 55-P*.

Na figura 5.13 pode ver-se o aspecto do Filtro Activo Paralelo Monofásico

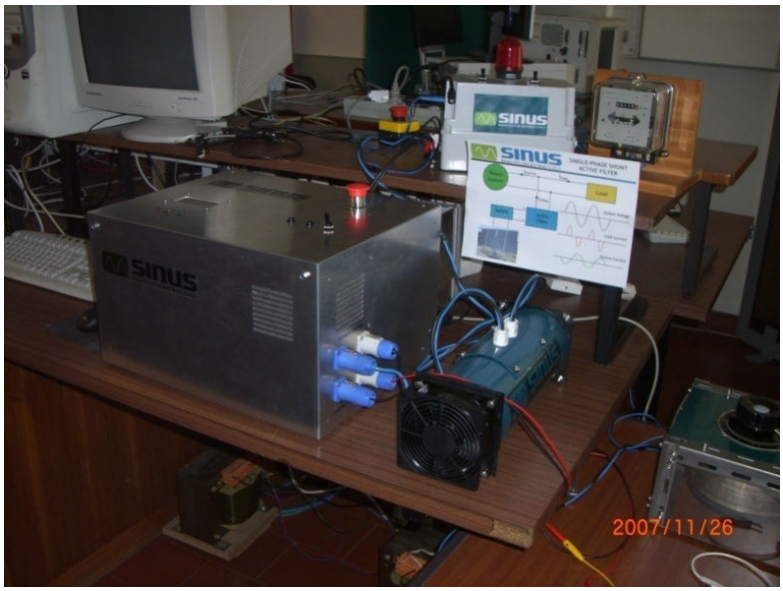


Figura 5.13 – Implementação do Filtro Activo Paralelo Monofásico

5.3 Sistema de Emulação de um Gerador Eólico

Este sistema destina-se a emular as condições de alimentação da eólica, já que esta não se encontrava disponível. O sistema (figura 5.14) é criado por um auto transformador monofásico, uma ponte de díodos e dois condensadores em paralelo de 4700µF.

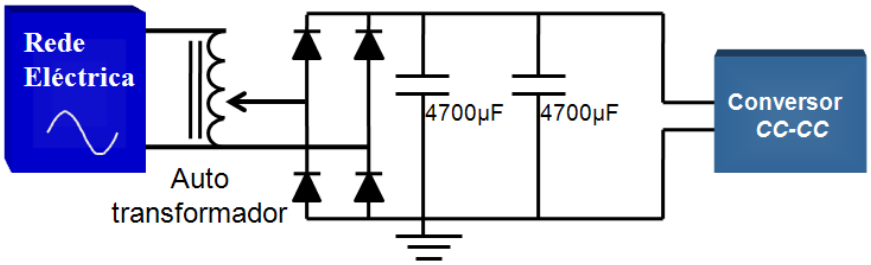


Figura 5.14 – Sistema de alimentação do conversor

Capítulo 6 - Resultados Experimentais

Neste capítulo vão ser apresentados alguns resultados experimentais do conversor *Boost* e do Filtro Activo Paralelo Monofásico.

6.1 Conversor *Step-up* (*Boost*)

Numa fase inicial, e por questões de segurança, o conversor *Boost* foi testado para uma tensão de entrada de 15 V e para 150 V de tensão de saída. No entanto, neste capítulo apresentam-se também os resultados do teste do conversor em regime nominal (tensão de entrada entre 46 V e 56 V e tensão de saída de 500 V.

6.1.1 Teste com Tensões Reduzidas

Os testes realizados para tensões mais reduzidas foram realizados para duas cargas: uma primeira de 800 Ω e uma segunda de 300 Ω, uma vez que estas cargas encontravam-se disponíveis no laboratório.

Na figura 6.1 apresenta o esquema do emulador do gerador eólico mais conversor para a primeira carga (800 Ω).

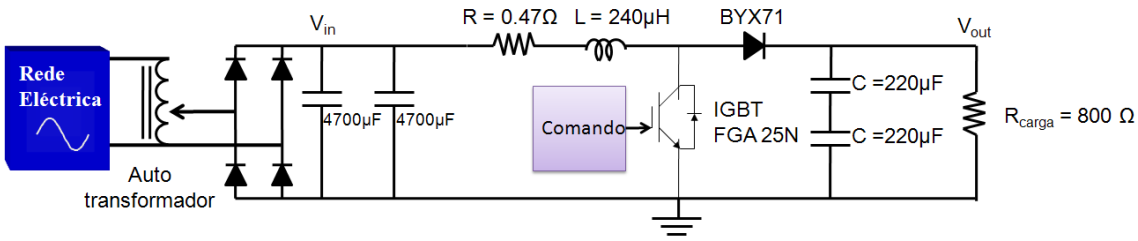


Figura 6.1 – Esquema de montagem para a primeira carga

Na figura 6.2 pode observar-se as formas de onda (tensão e corrente) de entrada do conversor, para a primeira carga, onde a tensão é de 16 V e a corrente de pico é de 7,5 A.

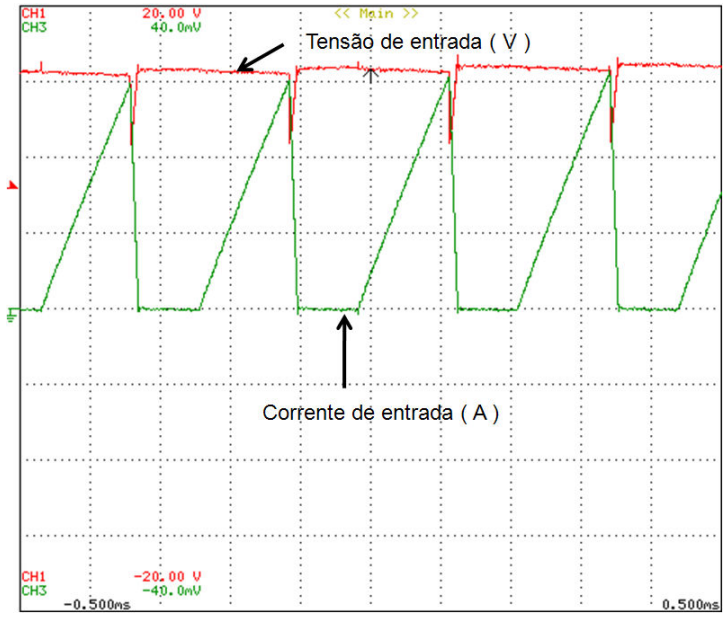


Figura 6.2 – Tensão e corrente de entrada para a primeira carga

Na figura 6.3 apresenta-se as formas de onda de tensão e de corrente da saída do conversor, onde a corrente média de saída é de 0,2 A e a tensão de saída é de 160 V, estando os resultados de acordo com o esperado.

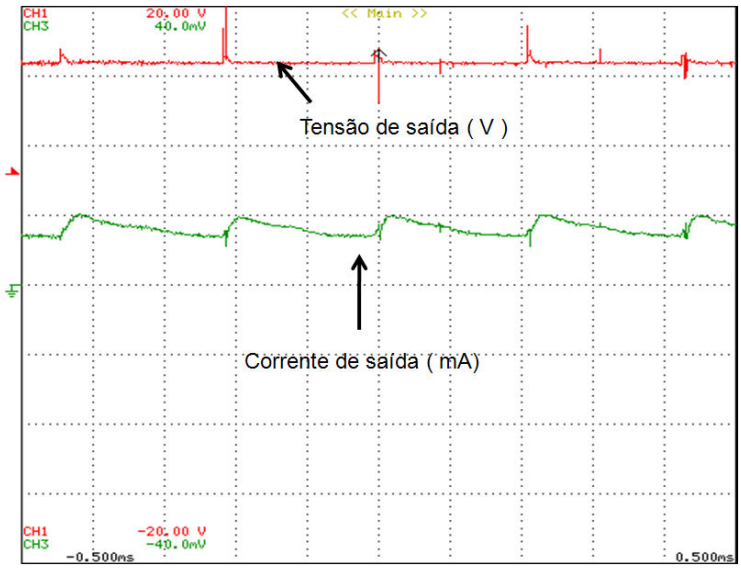


Figura 6.3 – Tensão e corrente de saída para a primeira carga

Na figura 6.2 pode observar-se o esquema do emulador do gerador eólico mais conversor para a segunda carga (300 Ω).

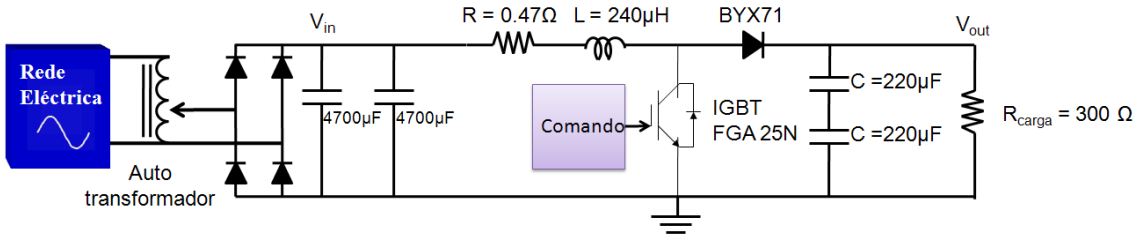


Figura 6.4 - Esquema de montagem para a segunda carga

Na figura 6.5 apresenta-se as formas de onda (tensão e corrente) de entrada do conversor, para a primeira carga, onde a tensão é de 15 V e a corrente de pico é de 11 A.

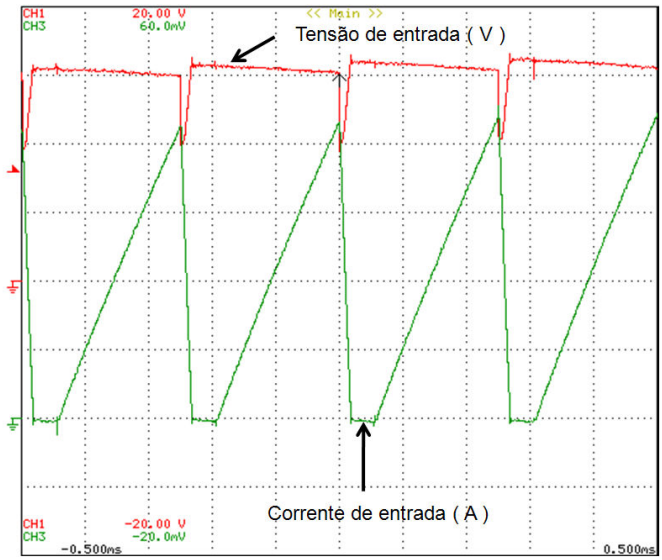


Figura 6.5 - Tensão e corrente de entrada para a segunda carga

Na figura 6.6 pode observar-se as formas de onda de tensão e de corrente de saída do conversor, onde a corrente média de saída é de 0,5 A e a tensão de saída é de 150 V, estando os resultados de acordo com o esperado.

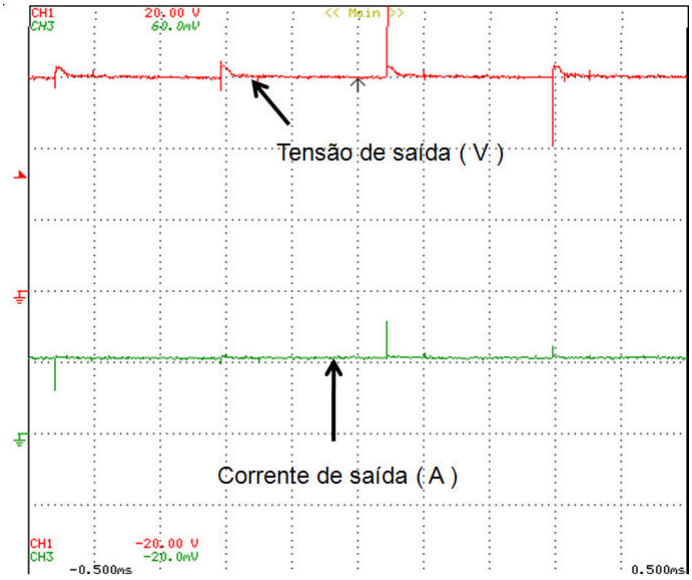


Figura 6.6 - Tensão e corrente de saída para a segunda carga

Nesta situação foi retirado os valores médios das correntes e tensões, estando estes apresentados na tabela 6.1.

Tabela 6.1 – Rendimento do conversor

V_{in} (V)	V_{out} (V)	I_{in} (A)	R_{carga} (Ω)	Potencia entrada (W)	Potencia saída (W)	Rendimento (%)
14,62	149,00	7,10	300,00	103,80	74,00	71,29
14,81	153,80	7,80	300,00	115,52	78,85	68,26
15,02	156,40	8,20	300,00	123,16	81,54	66,20

6.1.2 Teste com Tensão Nominal

Para testar o conversor para a tensão nominal foi utilizado uma carga de 2,72 kΩ, onde é possível observar o esquema da montagem na figura 6.7.

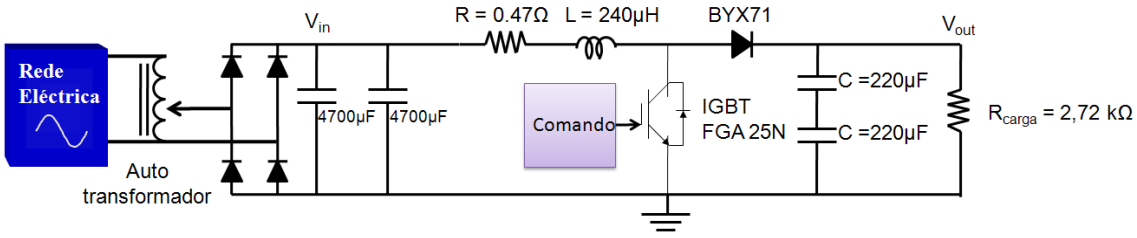


Figura 6.7 - Esquema de montagem

Na figura 6.8 apresenta-se a forma de onda (tensão e corrente) de entrada do conversor, onde a tensão é de 49 V e a corrente de pico é de 12 A.

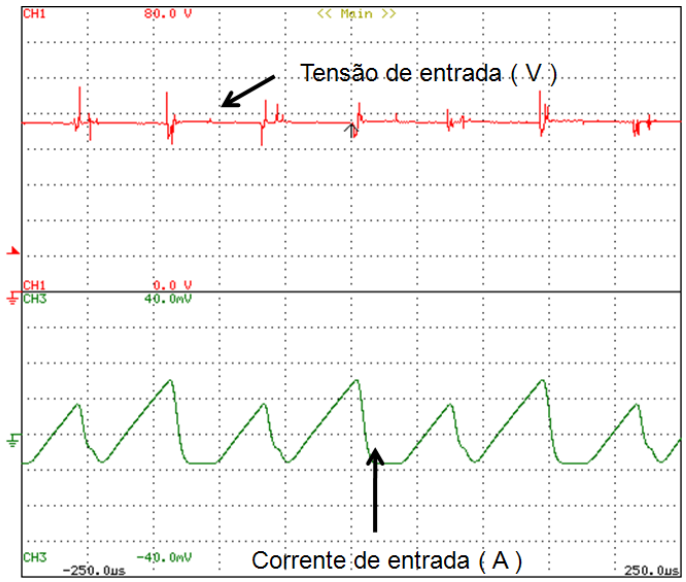


Figura 6.8 - Tensão e corrente de entrada

Na figura 6.9 pode observar-se a forma de onda de tensão e de corrente de saída do conversor, onde a corrente média de saída é de 0,2 A e a tensão de saída é de 510 V, estando os resultados de acordo com o esperado.

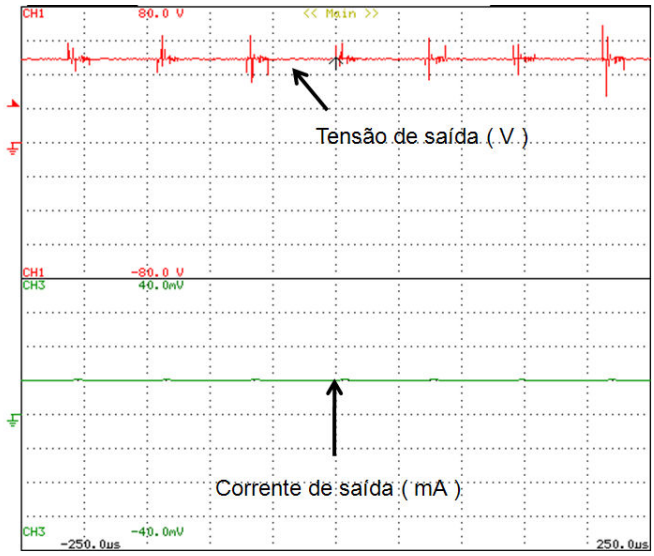


Figura 6.9 - Tensão e corrente de saída

Pelos ensaios realizados, ainda não se conseguiu obter uma potência de saída superior a 100 W, sendo necessário efectuar algumas alterações para aumentar a potência de saída, os quais ainda não foram realizados, por falta de tempo. Para aumentar a potência de saída é necessário reduzir o valor da resistência da bobina, onde este aumenta com a frequência devido ao efeito pelicular (*skin*), para tentar reduzir este efeito pode-se substituir o fio actual por vários de secção inferior e agrupados de forma a perfazer uma secção igual à actual, conseguindo assim diminuir o efeito pelicular.

6.2 Filtro Activo Paralelo Monofásico

O Filtro Activo Paralelo Monofásico foi ligado directamente à rede eléctrica, sendo apresentado os resultados para uma carga (rectificador monofásico com filtro capacitivo, em paralelo e carga resistiva). Na figura 6.10 encontra-se o diagrama de blocos do circuito testado.

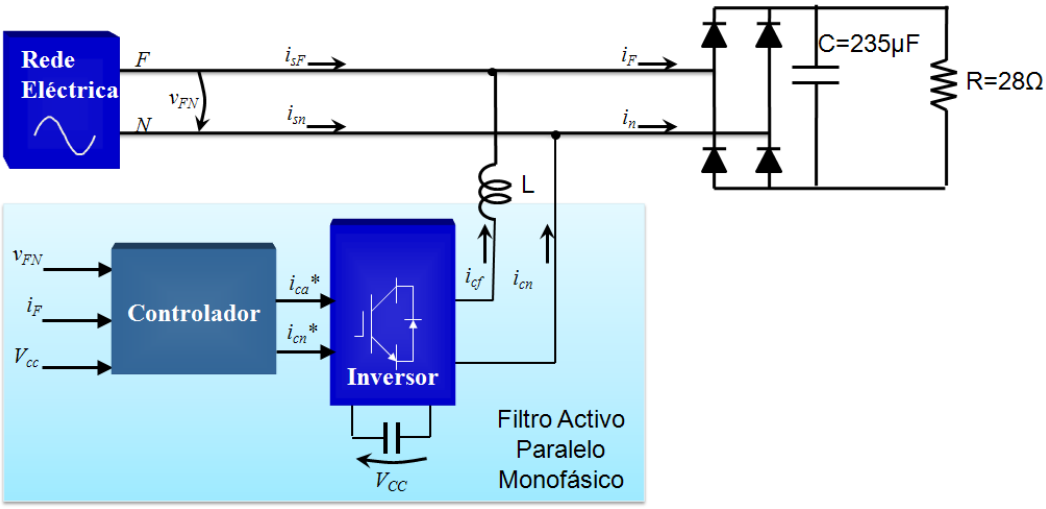


Figura 6.10 – Diagrama de blocos do Filtro Activo Paralelo Monofásico e carga com rectificador monofásico com filtro capacitivo, em paralelo e carga resistiva

A figura 6.11 apresenta a forma de onda da corrente (I_{fonte}) e da tensão (V_{fonte}) da rede, estando o filtro desligado.

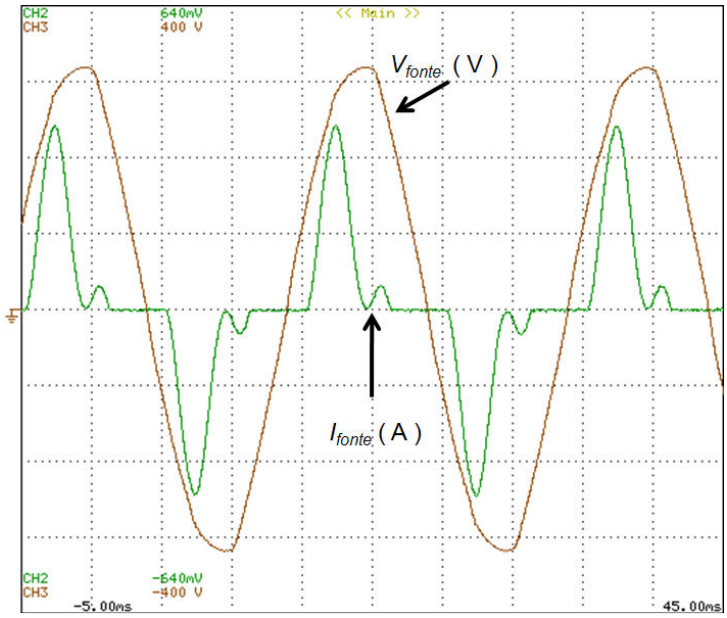


Figura 6.11 - Formas de onda da tensão e corrente da fonte com o filtro desligado

A figura 6.12 apresenta a forma de onda de corrente da rede e de referência $I_{p\text{-}q}$ (calculada com base na teoria *p*-*q*), estando o filtro desligado.

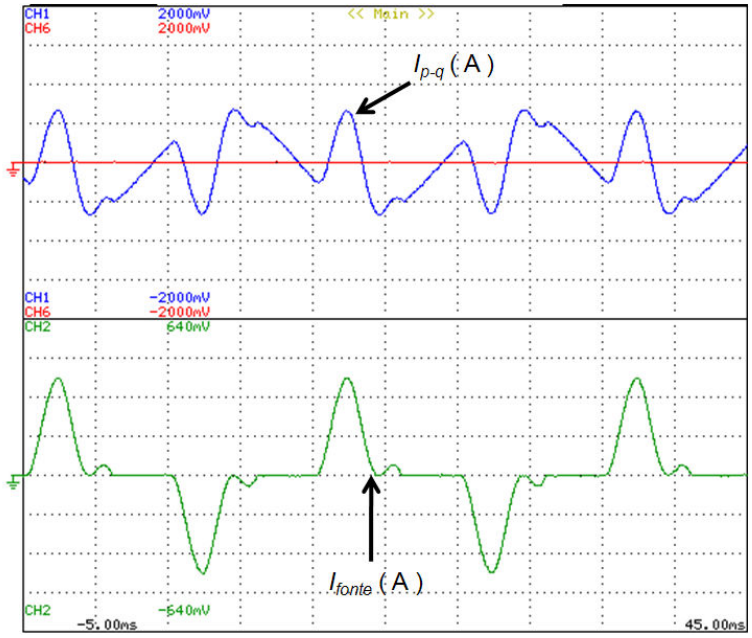


Figura 6.12 - Formas de onda da corrente da fonte e referência com o filtro desligado

A figura 6.13 apresenta a forma de onda da corrente (I_{fonte}) e da tensão (V_{fonte}) da rede, estando o filtro ligado, onde é possível observar que a corrente ficou sinusoidal e em fase com a rede.

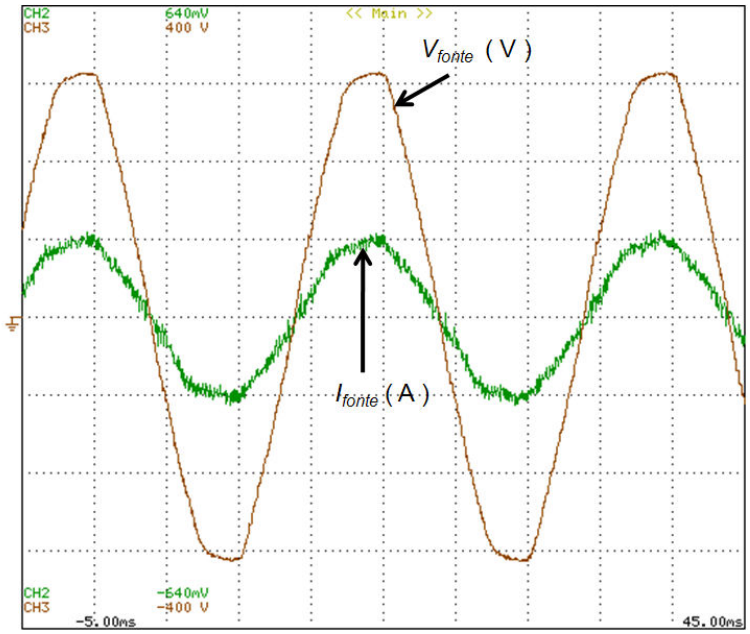


Figura 6.13 - Formas de onda da tensão e corrente da fonte com o filtro ligado

A figura 6.14 apresenta a forma de onda de corrente da rede, de referência e injectada pelo filtro (I_F), com o filtro ligado, estando estas de acordo com o esperado.

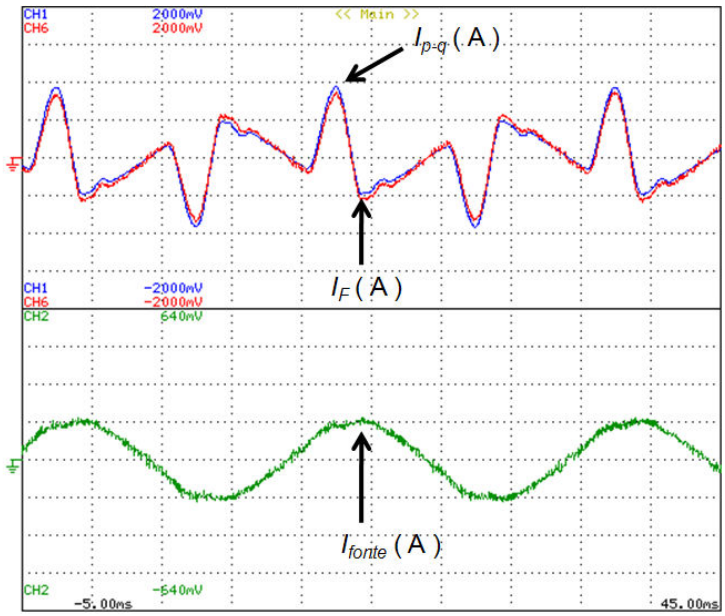


Figura 6.14 - Forma de onda da corrente da fonte, de referência e injectada com o filtro ligado

Capítulo 7 - Conclusões e Sugestões para Trabalho Futuro

7.1 Conclusões

O principal objectivo deste trabalho consistia na implementação de um sistema de interface de uma eólica de pequena potência (400 W, neste caso) com a rede eléctrica. Ao mesmo tempo, pretendia-se fazer uma revisão das energias alternativas actualmente disponíveis, bem como uma pesquisa e avaliação do que já existe disponível comercialmente em termos de aerogeradores de pequena potência e respectiva electrónica de interface.

Na solução proposta, utilizou-se um conversor CC-CC do tipo *Boost* para elevar a tensão produzida pela eólica para níveis adequados para um Filtro Activo Paralelo Monofásico, injectando-se a energia produzida na rede eléctrica. A utilização do filtro activo permite, para além de enviar energia para a rede, integrar outras fontes de energia alternativa e resolver, ao mesmo tempo, problemas de qualidade de energia eléctrica, como a correcção do factor de potência e a eliminação de harmónicos de corrente.

O filtro activo foi implementado no âmbito de um outro projecto que decorre no Departamento de Electrónica Industrial (por outro elemento da equipa), pelo que foi apenas necessário efectuar o seu estudo tendo em vista a sua integração no sistema de interface da eólica.

No desenvolvimento do projecto recorreu-se intensivamente a ferramentas de simulação (PSIM e PSCAD), como forma de testar soluções alternativas e reduzir o número de iterações na bancada, na fase de implementação. Foram testados os vários blocos constituintes do sistema de interface e a solução completa, tendo chegado a conclusão que, pelo menos do ponto de vista dos resultados obtidos das simulações, a solução proposta é viável.

Para além das simulações, foi implementado e testado o conversor CC-CC *Boost*, faltando testar a sua ligação à eólica (à entrada), e a sua integração com o filtro activo (à saída). No entanto, e uma vez que os resultados obtidos nos testes experimentais até agora efectuados se aproximaram bastante dos previstos nas simulações, é de esperar que a solução proposta funcione na prática, pelo que se pensa que, no essencial o objectivo do trabalho foi alcançado

7.2 Sugestões para Trabalhos Futuros

As principais sugestões para trabalhos futuros são as seguintes:

- Melhorar o conversor *Boost*, nomeadamente, com a construção de uma nova bobina para o conversor *Boost* tendo em vista uma melhoria de rendimento do conjunto e alcançar os 400 W de potência de saída.
- Testar a solução completa, ou seja ligar o aerogerador ao seu sistema de interface para injectar energia na rede.
- Estudar as melhores estratégias de controlo para a solução completa (eólica + conversor CC + filtro).
- Estudar a integração de mais fontes alternativas partilhando o mesmo barramento de corrente contínua do filtro activo (sendo necessário acrescentar para cada fonte alternativa um sistema de interface que garanta níveis de tensão de saída compatíveis com este barramento); desenvolver diferentes estratégias de controlo (ao nível da gestão de energia) para o conjunto (incluindo nas simulações os modelos das fontes alternativas).

Referências

[1] "Protocolo de Quioto", www: <http://europa.eu/scadplus/glossary/kyoto_protocol_pt.htm>.

[2] Rui Castro, "Introdução à Energia Eólica", Energias Renováveis e Produção Descentralizada, IST, Lisboa, Edição 3, Março 2007 www:<http://energia.ist.utl.pt/ruicastro/Pedagogia.htm>.

[3] Per Krogsgaard , Birger T. Madsen, "International Wind Energy Development World Market Update 2006 Forecast 2007-2011", 2007-03-26, BTM Consult asp, www: <http://www.btm.dk/documents/pressrelease.pdf>.

[4] REpower, "5M goes offshore", Wind Turbines, 5M, German www: <http://www.repower.de/index.php?id=369&L=1>.

[5] Jorge Martins, "Energia e Ambiente III", Universidade do Minho, Guimarães, 2007-9-24.

[6] "Produção de energia eléctrica, " Habiecológia-Aquecimento e energias renováveis", Lda, V.N. Famalicão.

[7] SunPower Corporation, "Highest Efficiency", Solar Panels for Homes, www:<http://www.sunpowercorp.com/Products-and-Services/Residential-Solar-Panels.aspx>.

[8] João L. Afonso, "Cadeira Energias Renováveis", Energia Solar, UM, Guimarães, www:<http://www.stidei.dei.uminho.pt/moodle/>.

[9] Bruno Bacci Fernandes, "Centros sociais solares (I)", ViverCidades, www:<http://www.vivercidades.org.br/publique222/cgi/cgilua.exe/sys/start.htm?infoid=1208&sid=22>.

[10] António Joyce, "Energia Fotovoltaica" INETI, Sessão 7PQ, 27-03-2007, www: <http://www.grices.mctes.pt/ >.

[11] Rui Castro, " Energia solar térmica", potencialidade da tecnologia nos diversos sectores, destaque nº3, Março 2006, www: <http://www.raplus.pt/destaque3.pdf >

[12] "Energia Solar", Política dos Recursos Geológicos, DGEG, 25 Outubro 2007, www: <http://www.dgge.pt/>.

[13] Rui M.G. Castro, "Introdução à energia mini-hídrica", Energias Renováveis e Produção Descentralizada, IST, Lisboa, Edição 3, Março 2007, www: <http://energia.ist.utl.pt/ruicastro/download/Pch_ed3.pdf> .

[14] André, "Energias Alternativas", Tema Livre, www: <http://ambiente.dec.uc.pt/~andrecc/livre.html>.

[15] Patrícia Catarina Mingacho, “Tipologia dos impactes ambientais associados às fontes de energias renováveis”, Relatório de Trabalho Final de Curso, IST, Lisboa, Julho de 2003.

[16] Mann, M. K., Spath, P. L., 1997. Life cycle assessment of a biomass gasification combined-cycle power system, E.U.A.

[17] Katrina Lyon, Mark McHenry, “Wave Energy Systems”, Fixed Generating Devices, Murdoch University, Janeiro 2006, www: <http://wwwphys.murdoch.edu.au/rise/reslab/resfiles/wave/text.html>.

[18] Nádia de Sousa, “Energias Renováveis”, Geografia - 10º ano, Escola Secundária, 30 Maio 2007, www: <http://www.notapositiva.com/trab_estudantes/trab_estudantes/geografia/geografia_trabalhos/energrenovaveis.htm>.

[19] AWS, “AWS Ocean Energy” Scotland, www: <http://www.awsocean.com/home.html>.

[20] Lagstroem, G. (2000). "Sea Power International - Floating wave power vessel, FWPV". "Wave power - Moving towards commercial viability", 4th European Wave Energy Conference, Aalborg, Denmark.

[21] DestiNet, “Offshore Wave Energy”, Pelamis Wave Power, Ocean Power Delivery Limited United Kingdom www: <http://www.oceanpd.com/default.html>.

[22] “Biomassa”, Energia da Biomassa, 2006-05 www: <http://www.energiasrenovaveis.com/html/energias/biomassa.asp>.

[23] “Energias dos Oceanos”, www:<http://www.ceeeta.pt/RIERA/ondas_mares.htm>.

[24] Fry, “O que é biodiesel?”, BioDiesel, 2006-09, www: <http://www.novaenergia.net/forum/>.

[25] Sérgio de Salvo Brito, “Energia eólica princípios e aplicações”, Centro de Referência para Energia Solar e Eólica, Cresesb, www:<http://www.cepel.br/crese/cresesb.htm>.

[26] Tony Burton, David Sharpe Nick, Jenking, Ervin Bossanyi, “Wind Energy Handrook”, England Wiley, 2001, ISBN 0 471 48997 2.

[27] Sérgio de Salvo Brito, “Energia eólica em Portugal”, 1º Semestre 2007, Ren, Julho-2007, www < http://www.ren.pt/ >.

[28] “UE converte-se à energia eólica”, Euro Info Centre, 09-11-2007, www <http://eic.aeportugal.pt/Inicio.asp?Pagina=/Aplicacoes/Noticias/Noticia&Menu=Menu&Codigo=7669>.

[29] Cláudio Monteiro, “Energia Eólica”, Sistemas de Energia Eólica, 10/08/96, www <http://power.inescporto.pt/claudio/>.

[30] "Energias Renováveis em Meio Urbano" AREAC, Miranda do Corvo -Março 2005, www <http://www.areac.pt/documentos/Fichas_energias_renovaveis.pdf>.

[31] "Info" Turby, Netherlands 2006 www <http://www.turby.nl/>.

[32] "Energia Eólica" habiecologica 2005 [consulta 2007-11-12], disponibilidade em www < http://habiecologica.com/site/shopping/>.

[33] "Southwest Windpower Products", Product Information, Southwest Windpower, 2007, www <http://www.windenergy.com/>.

[34] Henrique Braga "Eletrônica de Potência", Cap.5 - Conversores CC-CC, Universidade Federal de Juiz de Fora, www <http://www.hbraga.ufjf.br/uploads/cap5.pdf>.

[35] Ned Mohad, Tore M. Undeland, William P. Robbins, "Power Electronics", Converters, Applications and *Design*, 2ª Edition, USA, NEBC 2005, ISBN: 0-471-58408-8.

[36] H. Akagi, Y. Kanazawa, A. Nabae, "*Generalized Theory of the Instantaneous Reactive Power in Three_Phase Circuits*", IPEC'83 – Int. Power Electronics Conf., Tokio, 1983, pp. 1375-1386.

[37] H. Akagi, Y. Kanazawa, A. Nabae, "*Instantaneous Reactive Power Compensator Comprising Switching Devices without Energy Storage Components*", IEEE Trans. Industry Applic., vol. 20, Maio/Junho 1984.

[38] José Antenor Pomilio "Circuitos integrados dedicados ao acionamento e controle de fontes chaveadas", Fontes Chaveadas - Cap. 11, 3 de janeiro de 2007 [consulta 2007-11-16], disponibilidade em www <http://www.dsce.fee.unicamp.br/~antenor/htmlfile/CAP11/cap11.html>.

[39] Thomas Gsell, "Operation Principles and Practical Applications of MaxSine Active Filter", www <http://www.nokiancapacitors.com/articles.htm>.

[40] Ricardo Pregitzer, "Simulações Computacionais de Filtros Activos de Potência em Condições Reais de Operação", Tese de Mestrado, Universidade do Minho, Setembro de 2006.

[41] João Luiz Afonso, "Filtro Activo Paralelo com Controlo Digital para Melhoria da Qualidade de Energia Eléctrica", Tese de Doutoramento; Universidade do Minho; Nov. 2000.

[42] E. H. Watanabe, R. Stephan, M. Aredes, "*New Concepts of Instantaneous Active and reactive Powers in Electrical Systems with Generic Loads"*, IEEE Trans Power Delivery, vol 8, no. 2, Abril 1993, pp. 697-703.

[43] M. Aredes, E. H. Watanabe, "*New Control Algorithms for Series and Shunt Three-Phase Four-Wire Active Power Filters"*, IEEE Trans. Power Delivery, vol 10, no. 3, Julho 1995, pp. 1649-1656 Alfa Elektor.

[44] Ricardo G. Pregitzer, Tiago N. Sousa, Júlio S. Martins, João L. Afonso, "Interface entre Fontes de Energia Renovável e a Rede Eléctrica", ENER'05 – Conferência sobre Energias Renováveis e Ambiente em Portugal, 5-7 de Maio de 2005, ISBN: 972-8822-02-02, pp.Sd.

[45] Thomas Gsell, "Operation Principles and Practical Applications of MaxSine Active Filter" www <http://www.nokiancapacitors.com/articles.htm>.

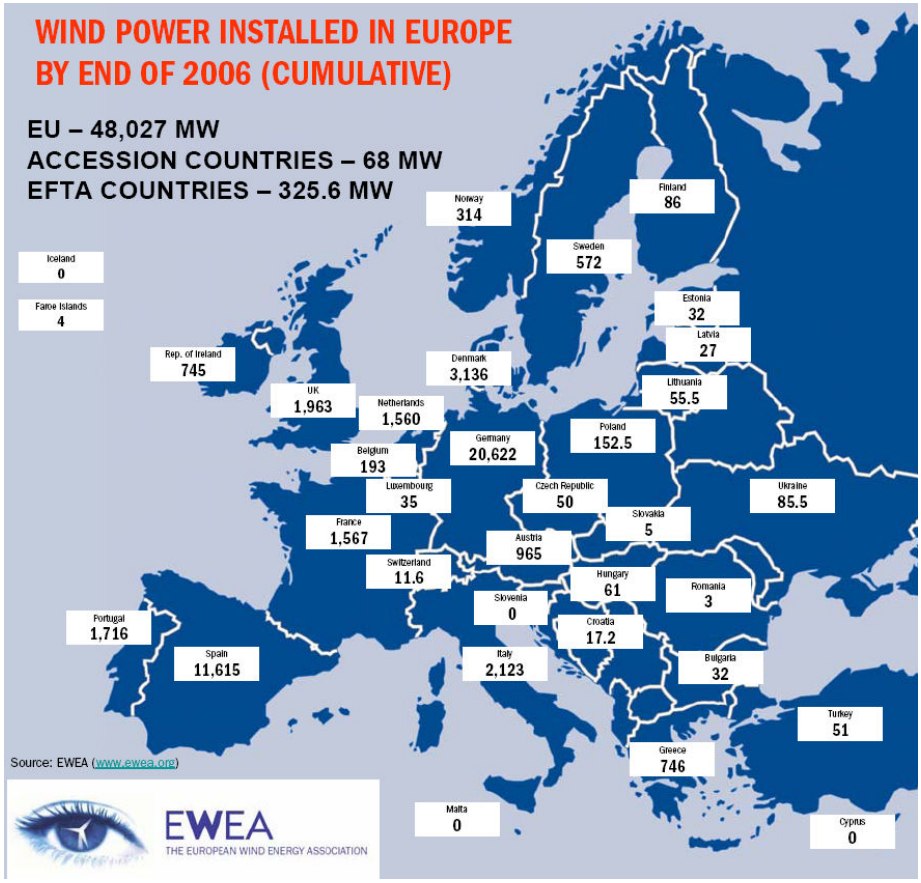
Anexo 1

Potencia Eólica instalada na União Europeia em MW (fonte: Ewea)

Países	*Total Fim 2005*	*Instalado 2006*	*Total Fim 2006*
Áustria	819	145.6	965
Bélgica	167.4	26.3	193
Bulgária	10	22	32
Cyprus	0	0	0
Czech	28	22	50
Dinamarca	3,128	11.5	3,136
Estónia	32	0	32
Finlândia	82	4	86
Franca	757	810	1,567
Alemanha	18,414.9	2,233.1	20,622
Grécia	573.3	172.5	746
Hungria	17.5	43.40	61
Ireland	495.5	249.9	745
Itália	1,718	417	2,123
Latvia	27	0	27
Lithuania	6.4	49.05	55.5
Luxemburgo	35.3	0	35
Malta	0	0	0
Netherlands	1,219	356	1,56
Polónia	83	69.3	152.5
Portugal	1,022	694.4	1,716
Roménia	1.69	1.3	3
Slovakia	5	0	5
Eslovénia	0	0	0
Espanha	10,028	1587.16	11,615
Sweden	509,5	62.15	572
UK	1,332	634.4	1,963
EU-15	**40,301**	**7,404**	**47,644**
EU-10	**199.2**	**183.7**	**383**
EU-25	**40,5**	**7,587.9**	**48,027**
EU-27	**40,511**	**7,611**	**48,062**

Anexo 2

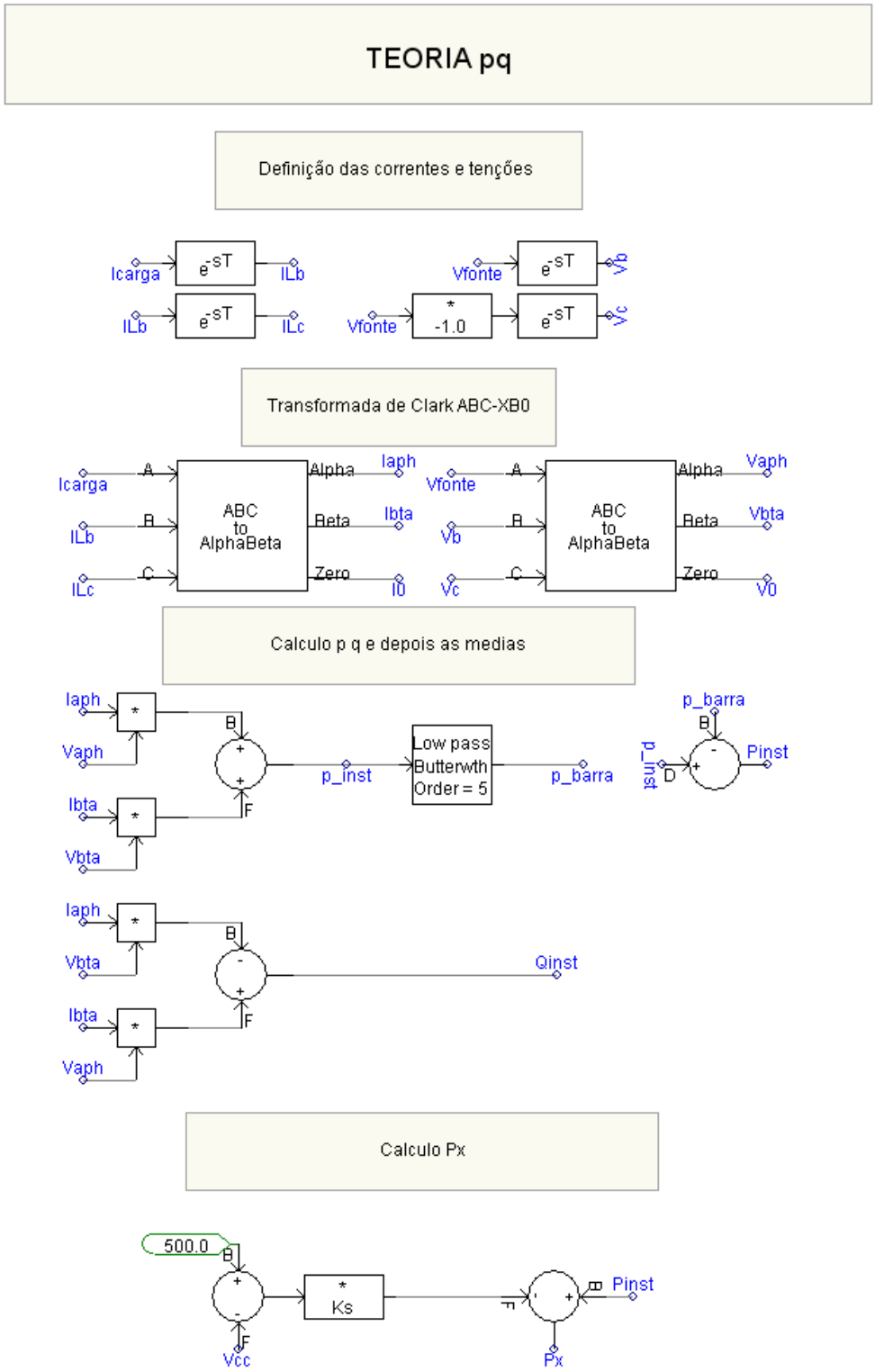
Potencia eólica instalada na União Europeia no final de 2006 (fonte: Ewea)

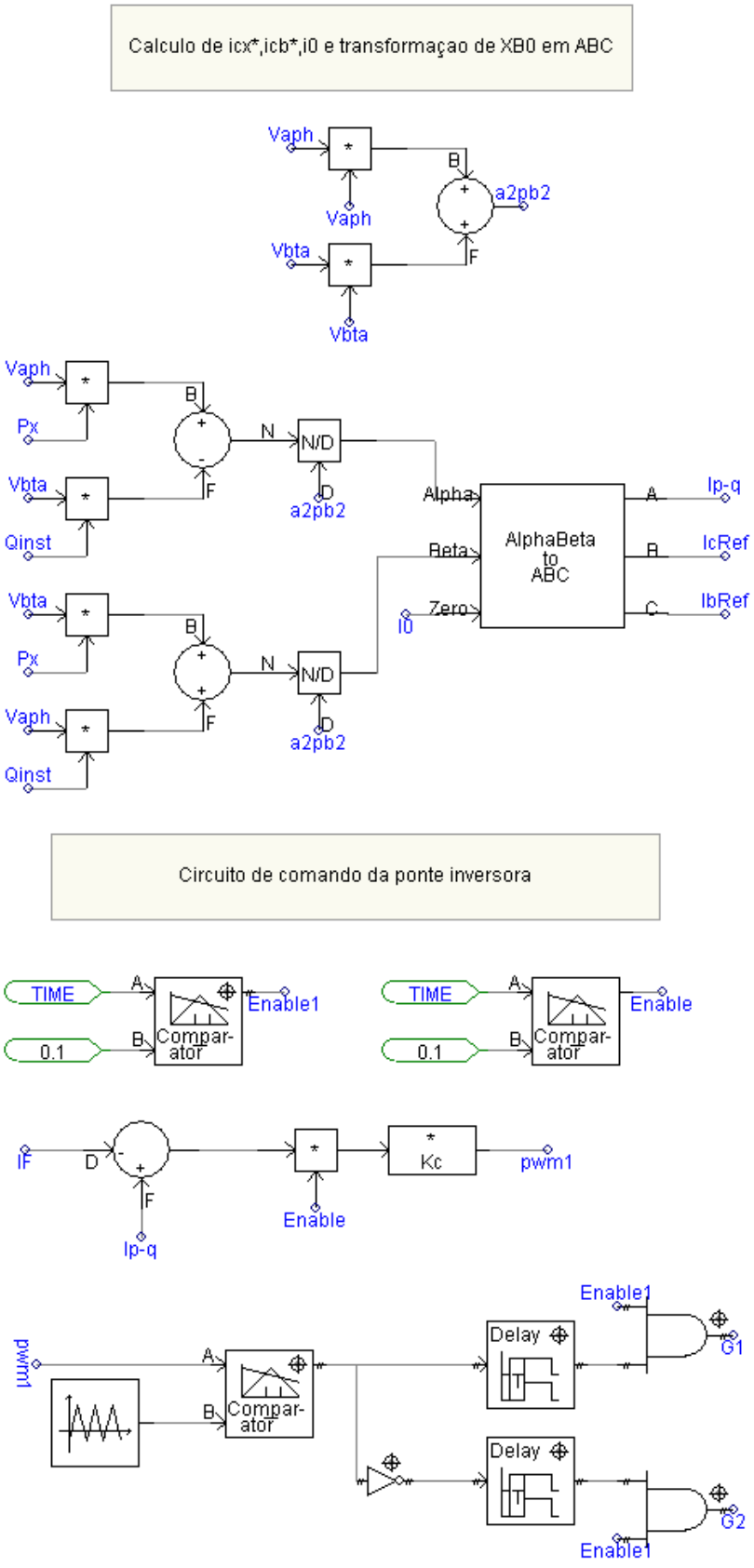


Anexo 3

Sistema de Controlo do Filtro Activo Paralelo Monofásico

Diagrama de blocos da implementação em PSCAD do controlador baseado na teoria p-q e o gerador de PWM inversor.




Calculo de icx*,icb*,i0 e transformaçao de XB0 em ABC
Vaph
Vaph
B
a2pb2
Vbta
Vbta
F
Vaph
Px
Vbta
Qinst
B
N
N/D
F
D
a2pb2
Alpha
Beta
Zero
I0
AlphaBeta
to
ABC
A
B
C
Ip-q
IcRef
IbRef
Vbta
Px
Vaph
Qinst
B
N
N/D
F
D
a2pb2
Circuito de comando da ponte inversora
TIME
0.1
A
B
Compar-
ator
Enable1
TIME
0.1
A
B
Compar-
ator
Enable
IF
D
F
Ip-q
Enable
Kc
pwm1
pwm1
A
B
Compar-
ator
Delay
Enable1
G1
Delay
G2
Enable1