



Tiago José Cunha Rodrigues
Desenvolvimento da Eletrónica de Potência
para um Sistema Microeólico Isolado com Baterias

UMinho | 2014

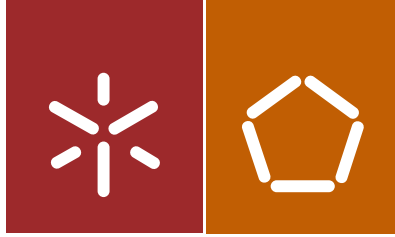


Universidade do Minho
Escola de Engenharia

Tiago José Cunha Rodrigues

Desenvolvimento da Eletrónica de Potência
para um Sistema Microeólico Isolado com
Baterias

novembro de 2014



Universidade do Minho
Escola de Engenharia

Tiago José Cunha Rodrigues

Desenvolvimento da Eletrónica de Potência
para um Sistema Microeólico Isolado com
Baterias

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

Trabalho efetuado sob a orientação do
Professor Doutor José Gabriel Oliveira Pinto

novembro de 2014

DECLARAÇÃO

Tiago José Cunha Rodrigues

Endereço eletrónico: tjcr0408@gmail.com

Telefone:932828053

Número do Bilhete de Identidade: 13760055

Título da Tese:

Desenvolvimento da Eletrónica de Potência para um Sistema Microeólico Isolado com Baterias

Orientador:

Doutor José Gabriel Oliveira Pinto

Ano de conclusão: 2014

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

É AUTORIZADA A REPRODUÇÃO INTEGRAL DESTA DISSERTAÇÃO/TRABALHO
APENAS PARA EFEITOS DE INVESTIGAÇÃO, MEDIANTE DECLARAÇÃO ESCRITA
DO INTERESSADO, QUE A TAL SE COMPROMETE;

Universidade do Minho, ___/___/_____

Assinatura: _____

Aos meus pais e à minha irmã

Agradecimentos

A realização do trabalho descrito neste documento não seria possível sem o apoio e ajuda de algumas pessoas, às quais quero deixar o meu sincero agradecimento.

Ao meu orientador Doutor José Gabriel Oliveira Pinto, pela dedicação, disponibilidade e empenho, demonstradas durante o decorrer desta dissertação que me permitiu ultrapassar diversas dificuldades durante a realização do mesmo.

Ao Doutor João Luiz Afonso por me possibilitar o desenvolvimento da minha dissertação em eletrónica de potência no laboratório do GEPE (Grupo de Eletrónica de Potência e Energia) e pelos incentivos prestados na fase inicial do projeto.

Aos meus colegas do GEPE, bolseiros de investigação Bruno Exposto, Delfim Pedrosa, Raul Almeida e Vítor Monteiro por toda a disponibilidade e paciência demonstrada na resolução de problemas durante o trabalho.

Aos meus colegas que me acompanharam ao longo do curso e desta dissertação Bruno Duarte, Bruno Silva, Hugo Peixoto, Fernando Pinto, Jorge Carvalho, José Ferreira, Paulo Mota, Pedro Carvalho, Ricardo Silva, Ricardo Vasco, Rui Rodrigues e Simão Almeida por todos os bons momentos proporcionados e pela entajuda demonstrada ao longo deste projeto.

Aos técnicos das Oficinas do Departamento de Eletrónica Industrial, Ângela Macedo, Carlos Torres e Joel Almeida pela boa disposição sempre demonstrada e disponibilidade para ajudar na resolução de problemas.

Finalmente, um especial agradecimento a toda a minha família, especialmente aos meus pais e irmã, por me proporcionarem tudo que poderia desejar e por me ajudarem em todos os momentos da minha vida.

Resumo

A energia elétrica é um bem essencial para a evolução da indústria e conseqüentemente para o desenvolvimento de um país. Assim sendo, como conseqüência da necessidade de desenvolvimento dos países, as necessidades de energia elétrica têm aumentado muito nos últimos anos. Atualmente grande parte da energia é obtida a partir de combustíveis fósseis, os quais durante o processo de transformação provocam grandes níveis de poluição. Dessa poluição, um dos problemas mais visíveis é o aumento de CO₂ na atmosfera, o que resulta em alterações climáticas. Para combater os efeitos nefastos da utilização de combustíveis fósseis, e dar resposta à procura cada vez maior de energia elétrica, é necessário apostar na produção deste bem essencial a partir de fontes renováveis. Para obter melhorias ambientais a nível global será necessário uma grande disseminação da utilização de energia de fontes renováveis. No sentido de contribuir para a disseminação e para o melhoramento da tecnologia que permita aumentar a produção de energia elétrica a partir de fontes renováveis, esta dissertação versa sobre o desenvolvimento de um sistema microeólico para uma rede elétrica isolada. Este sistema deve permitir a extração otimizada da energia de uma turbina microeólica para alimentar um conjunto de recetores de forma ininterrupta e com boa qualidade de energia. Sendo para isso necessário que a energia elétrica produzida em excesso durante certos períodos seja armazenada em baterias, para tornar possível alimentar as cargas mais prioritárias mesmo na ausência de vento. Dos diversos geradores eólicos estudados, para o sistema proposto foi escolhido o gerador síncrono de ímanes permanentes. A topologia dos conversores de potência é composta por um retificador trifásico, um conversor CC/CC ponte completa do tipo *buck* que otimiza a extração de energia da turbina microeólica e gere o carregamento das baterias e um inversor monofásico que produz uma tensão alternada sinusoidal com a frequência e amplitude pretendidas. Durante a dissertação foram desenvolvidos modelos computacionais e efetuadas simulações do sistema descrito, para validar o funcionamento das topologias dos conversores de potência e dos algoritmos de controlo desenvolvidos. Foi também construído um protótipo laboratorial do sistema com a topologia proposta e foram realizados diversos ensaios para aferir o desempenho do sistema.

Palavras-Chave: Energias Renováveis, Energia Eólica, Eletrónica de Potência, Conversor CC/CC Ponte Completa, Conversor *Buck*, Rede Isolada.

Abstract

Electric energy is an essential resource to the industrial activity and, consequently, to the development of a country. Considering that development and energy consumption are linked, the energy needs have risen in the last few years in several world countries. Today, most of the electric energy is produced resorting to fossil fuels, which results in high levels of pollution. The most visible problem caused by the use of fossil fuels is the increase in CO₂ in the atmosphere, which results in the climate change. To reduce the harmful effects caused by the use of fossil fuels, and to answer the increasingly electric energy needs, it is necessary to invest in the production using renewable sources of energy. To produce global environmental improvements it will be necessary to disseminate the use of renewable sources of energy. To contribute to the dissemination and improvement of the technology that allows a growth in the production of electric energy originated from renewable sources, this MSc dissertation focuses in the development of a micro wind generator system for an isolated grid. This system must allow the optimized extraction of energy from a micro wind turbine to supply a group of receptors, uninterruptedly, and with high levels of power quality. To achieve this, it is necessary that the surplus of electric energy produced during certain periods of time is stored in batteries, making it possible to supply priority loads in the absence of wind. From the several equated wind turbine generators, it was proposed a permanent magnet synchronous generator for the system. The proposed topology is composed by a three-phase rectifier, a DC/DC full-bridge buck type converter which optimizes the extraction of energy from the micro wind turbine and manages the charging process of the batteries, and a single phase inverter that produces a sinusoidal alternated voltage with the required amplitude and frequency. During this MSc dissertation, were developed computational models and were performed simulations to validate the operation of the topology of the power converters and the developed control algorithms. It was also implemented a laboratory prototype of the system with the proposed topology and several tests were conducted to assess the system performance.

Keywords: Renewable Energy, Wind Energy, Power Electronics, dc/dc Full-Bridge Converter, Buck Converter, Isolated Grid

Índice

Agradecimentos	vii
Resumo	ix
Abstract	xi
Lista de Figuras	xv
Lista de Tabelas	xxi
Lista de Siglas e Acrónimos	xxiii
Nomenclatura	xxv
CAPÍTULO 1 Introdução	27
1.1. Situação Atual da Produção de Energia	27
1.2. Produção de Energia Eólica na Europa	29
1.3. Produção de energia eólica em Portugal	32
1.4. Enquadramento	33
1.5. Motivações.....	35
1.6. Objetivos.....	36
1.7. Organização e Estrutura da Tese.....	36
CAPÍTULO 2 Turbinas Eólicas	39
2.1. Introdução	39
2.2. Energia do Vento	39
2.3. Classificação das Turbinas.....	40
2.3.1. Tipos de Turbinas	40
2.3.2. Classificação das Turbinas	42
2.4. Componentes da Turbina Eólica	42
2.4.1. Rotor.....	43
2.4.2. Pás	44
2.4.3. <i>Yaw</i>	45
2.4.4. Gerador.....	45
2.4.5. Caixa de Velocidades	46
2.4.6. Anemómetro	46
2.4.7. Sistema de Travagem	48
2.4.8. Painel de Controlo	48
2.4.9. Torre	48
2.5. Sistemas de Armazenamento	49
2.5.1. Bombagem	49
2.5.2. Ar comprimido	51
2.5.3. Baterias.....	52
2.5.3.1. Bateria de Ácido Chumbo	52
2.5.3.2. Alta Temperatura Sódio-Beta	53
2.5.3.3. <i>Flow Battery</i>	54
2.5.4. Células de Combustível	55
2.5.5. <i>Flywheel</i>	56
2.6. Sistemas Eólicos <i>On-Shore</i>	58
2.6.1. Sistemas Ligados à Rede Elétrica.....	58
2.6.2. Sistemas Isolados.....	59
2.6.3. Sistemas Híbridos.....	60
2.7. Sistemas Eólicos <i>Off-Shore</i>	60
2.8. Microeólicas no Mercado.....	62
2.9. Conclusão.....	63
CAPÍTULO 3 Eletrónica de Potência para Sistemas Microeólicos	65
3.1. Introdução	65
3.2. Geradores Elétricos	65
3.2.1. Gerador de Corrente Contínua.....	66
3.2.2. Gerador Assíncrono.....	67
3.2.2.1. Gerador de Indução com Rotor em Gaiola de Esquilo (SCIG).....	68
3.2.2.2. Gerador de Indução de Rotor Bobinado (WRIG)	68
3.2.3. Gerador Síncrono.....	69
3.2.3.1. Gerador Síncrono de Rotor Bobinado (WRSG)	69
3.2.3.2. Gerador Síncrono de Imanes Permanentes (PMSG).....	70

3.3.	Topologias Utilizadas nos Diferentes Tipos Geradores Elétricos	70
3.3.1.	Gerador de Indução de Rotor em Gaiola de Esquilo (SCIG)	71
3.3.2.	Gerador de Indução de Rotor Bobinado (WRIG).....	72
3.3.3.	Gerador Síncrono de Rotor Bobinado (WRSB).....	74
3.3.4.	Gerador Síncrono de Ímanes Permanentes (PMSG)	75
3.4.	Conversores de Potência	76
3.4.1.	Conversor CA/CC.....	76
3.4.2.	Conversor CC/CC	77
3.4.3.	Conversor CC/CA.....	79
3.5.	Topologia Proposta para o Sistema Microeólico Aplicado a uma Rede Isolada	82
3.5.1.	Gerador Síncrono de Ímanes Permanentes (PMSG)	82
3.5.2.	Conversor CA/CC Trifásico Não Controlado	84
3.5.3.	Conversor Ponte Completa do Tipo <i>Buck</i>	84
3.5.4.	Baterias de Ácido Chumbo	86
3.5.5.	Inversor VSI Monofásico.....	86
3.6.	Conclusão.....	88
CAPÍTULO 4 Simulação do Sistema Microeólico Isolado		89
4.1.	Introdução	89
4.2.	Modelo de Simulação do Sistema	89
4.2.1.	Modelo de Simulação da Turbina Eólica	89
4.2.2.	Modelo de Simulação dos Conversores de Potência	90
4.2.3.	Modelo de Simulação do Controlo	91
4.3.	Resultados de Simulação.....	92
4.3.1.	Conversor CC/CC Ponte Completa do Tipo <i>Buck</i>	92
4.3.2.	Inversor Monofásico	94
4.3.3.	Sistema Completo	98
4.4.	Conclusão.....	101
CAPÍTULO 5 Implementação do Sistema Microeólico Isolado		103
5.1.	Introdução	103
5.2.	Sistema de Emulação da Unidade Microeólica	103
5.2.1.	Variador de Velocidade	103
5.2.2.	Motor de Indução.....	104
5.2.3.	Gerador Síncrono de Ímanes Permanentes.....	105
5.3.	Circuito de Potência	105
5.3.1.	Retificador Trifásico	107
5.3.2.	Conversor CC/CC Ponte Completa do Tipo <i>Buck</i>	108
5.3.3.	Inversor Monofásico	112
5.4.	Sistema de Controlo	114
5.4.1.	Sensor de Tensão	114
5.4.2.	Sensor de Corrente.....	116
5.4.3.	Placa de DSP.....	117
5.4.4.	Placa de Condicionamento de Sinal	119
5.4.5.	Placa DAC	119
5.4.6.	Placa de Comando Monofásica e Trifásica	120
5.4.7.	Placa de <i>Driver</i> dos Semicondutores	121
5.5.	Conclusão.....	122
CAPÍTULO 6 Resultados Experimentais do Protótipo Desenvolvido		123
6.1.	Introdução	123
6.2.	Ensaio ao Gerador Síncrono de Ímanes Permanentes.....	124
6.2.1.	Ensaio do Gerador em Vazio	124
6.2.2.	Ensaio com Carga Linear (Resistiva).....	125
6.2.3.	Ensaio com Carga Não-Linear (Retificador e Carga Resistiva)	126
6.3.	Resultados Experimentais	127
6.3.1.	Conversor CC/CC Ponte Completa do Tipo <i>Buck</i>	128
6.3.2.	Inversor Monofásico	130
6.3.3.	Conversor CC/CC Ponte Completa do Tipo <i>Buck</i> e Inversor Monofásico em Conjunto	132
6.4.	Conclusão.....	134
CAPÍTULO 7 Conclusões e Trabalho Futuro		135
7.1.	Conclusão.....	135
7.2.	Trabalho Futuro.....	138
Referências.....		139

Lista de Figuras

Figura 1.1 – Duração estimada das reservas de petróleo, carvão e gás natural em relação ao consumo existente em cada ano desde 1980 até 2006 [1].....	27
Figura 1.2 – Variação da temperatura média global ao longo dos últimos anos [1].	28
Figura 1.3 – Aumento do nível da água no mar ao longo dos últimos anos [1].....	28
Figura 1.4 – Potência instalada na União Europeia por ano em MW e percentagem de RES [2].....	30
Figura 1.5 – Potência total instalada na União Europeia em MW e percentagem dos diferentes tipos de produção de energia: (a) No ano 2000;(b) No ano 2013 [2].....	30
Figura 1.6 – Potência instalada pelos membros da União Europeia durante o ano de 2013 em MW e percentagem [2].....	31
Figura 1.7 – Potência instalada dos diferentes tipos de energia renovável em 2013 na União Europeia [2].	31
Figura 1.8 – Total de potência de origem eólica instalada: (a) Na Europa; (b) Países da União Europeia [2].	32
Figura 1.9 – Evolução da potência eólica total instalada em Portugal [3].	33
Figura 1.10 – Percentagem dos diferentes tipos de energia consumidos em Portugal [3].	33
Figura 2.1 – Tipos de turbina eólica: (a) Turbina de eixo horizontal (HAWT); (b) Turbina de eixo vertical (VAWT) [9].	41
Figura 2.2 – Componentes da turbina eólica [8].	43
Figura 2.3 – Tipos de configuração do rotor em relação à direção do vento: (a) <i>Upwind</i> ; (b) <i>Downwind</i> [8].....	44
Figura 2.4 – Tipos de anemómetros usados em turbinas eólicas: (a) Anemómetro de copo; (b) Anemómetro de hélice; (c) Sensor sónico [11].	47
Figura 2.5 – Tipos de torre utilizados para elevar turbinas eólicas: (a) Torre Tubular; (b) Torre de Treliça; (c) Torre Guyed [10].	49
Figura 2.6 - Os dois modos de funcionamento do sistema de bombagem: (a) Geração de energia; (b) Armazenamento de energia [13].	50
Figura 2.7 – Os dois modos de funcionamento do GPM: (a) Geração; (b) Armazenamento [15].	51
Figura 2.8 – Funcionamento do sistema CAES [8].....	52
Figura 2.9 – Componentes da bateria de ácido chumbo [17].....	53
Figura 2.10 – Componentes da bateria de sódio-enxofre [18].	54
Figura 2.11 – Diagrama de funcionamento da <i>flow battery</i> [18].	54
Figura 2.12 – Diagrama de funcionamento de uma célula de combustível.....	55
Figura 2.13 – Fontes de obtenção de hidrogénio [12].....	56
Figura 2.14 – <i>Flywheel</i> e seus componentes [12].	57
Figura 2.15 – Dois tipos de sistemas possíveis de usar com a <i>flywheel</i> : (a) Esquema com duas máquinas elétricas, um motor para armazenar a energia e um gerador para gerar a energia; (b) Esquema com uma máquina elétrica, a máquina funciona como motor e gerador [18].	57
Figura 2.16 - Diagrama de blocos de um sistema ligado à rede elétrica.	59
Figura 2.17 – Diagrama de blocos de um sistema isolado.	60
Figura 2.18 – Diagrama de blocos de um sistema híbrido.	61
Figura 2.19 – Turbinas eólicas usadas num sistema <i>off-shore</i> [9].	61
Figura 2.20 – Unidade eólica do projeto <i>Windfloat</i> [19].....	62

Figura 2.21 - Turbinas eólicas no mercado: (a) Bergey Excel 1 kW [20]; (b) Endurance S-434 5 kW [21]; (c) UGE Eddy [22]; (d) T-Urban H2.5 [23]; (e) Windgenerator Silentwind 48 V [24]; (f) Omniflow [25].	63
Figura 3.1 – Gerador de corrente contínua (Ligação Paralelo).	66
Figura 3.2 – Gerador de indução gaiola de esquilo.	67
Figura 3.3 – Gerador síncrono de ímanes permanentes.	69
Figura 3.4 – Gerador de indução de rotor em gaiola de esquilo (SCIG) ligado diretamente à rede elétrica.	72
Figura 3.5 – Gerador de indução de rotor em gaiola de esquilo (SCIG) ligado à rede elétrica através de conversores de potência.	72
Figura 3.6 – Exemplo de um esquema elétrico do circuito de potência dos conversores para ligar um gerador de indução de rotor em gaiola de esquilo (SCIG) à rede elétrica num sistema de velocidade variável.	72
Figura 3.7 - Gerador de indução de rotor bobinado (WRIG) ligado diretamente à rede elétrica.	73
Figura 3.8 - Gerador de indução com dupla alimentação (DFIG) ligado diretamente à rede elétrica com controlo da corrente aplicada ao rotor a partir de conversores de potência.	73
Figura 3.9 – Exemplo do esquema do circuito de potência dos conversores para um gerador de indução com dupla alimentação (DFIG) ligado diretamente à rede elétrica com controlo da corrente aplicada ao rotor a partir de conversores de potência.	74
Figura 3.10 – Gerador síncrono com rotor bobinado (WRSG) ligado diretamente à rede elétrica.	74
Figura 3.11 – Gerador síncrono com rotor bobinado (WRSG) ligado à rede elétrica através de conversores de potência.	75
Figura 3.12 – Exemplo do esquema do circuito de potência dos conversores para um gerador síncrono com rotor bobinado (WRSG) ligado à rede elétrica através de conversores de potência.	75
Figura 3.13 – Gerador síncrono de ímanes permanentes (PMSG) ligado à rede elétrica através de conversores de potência.	76
Figura 3.14 – Exemplo do esquema do circuito de potência dos conversores de um gerador síncrono de ímanes permanentes (PMSG) ligado à rede elétrica através de conversores de potência.	76
Figura 3.15 – Conversores CA/CC a) Retificador monofásico; b) Retificador trifásico.	77
Figura 3.16 – Conversor CC/CC <i>buck</i> .	77
Figura 3.17 – Conversor CC/CC <i>flyback</i> .	78
Figura 3.18 – Conversor CC/CC ponte completa do tipo <i>buck</i> .	79
Figura 3.19 – Conversor CC/CA monofásico de meia onda.	79
Figura 3.20 – Conversor CC/CA monofásico de onda completa.	80
Figura 3.21 – Conversor CC/CA trifásico de onda completa.	81
Figura 3.22 – Esquemático da topologia do sistema proposto.	82
Figura 3.23 – Curva de potência disponível em função da velocidade de rotação [31].	83
Figura 3.24 – Tensão produzida pelo gerador em função da velocidade de rotação [31].	84
Figura 3.25 – Conversor CC/CC ponte completa do tipo <i>buck</i> .	85
Figura 3.26 – <i>Flowchart</i> do algoritmo de MPPT usado (perturbação e observação).	86
Figura 3.27 – Inverso VSI monofásico com filtro passa-baixo.	87
Figura 3.28 – Diagrama do controlo usado no inversor.	88
Figura 4.1 – Modelo de simulação da turbina eólica e do gerador síncrono de ímanes permanentes no <i>software</i> PSIM.	90
Figura 4.2 – Modelo de simulação dos conversores de potência no <i>software</i> PSIM.	90

Figura 4.3 Modelo de simulação do controlo do conversor CC/CC ponte completa do tipo <i>buck</i>	91
Figura 4.4 – Modelo de simulação do controlo do inversor.....	92
Figura 4.5 – Modelo de simulação do CC/CC ponte completa do tipo <i>buck</i>	93
Figura 4.6 – Sinais de PWM aplicados aos IGBTs (<i>vq1, vq2, vq3, vq4</i>) e tensão no primário do transformador (<i>vp</i>).	93
Figura 4.7 – Tensão do secundário do transformador retificada (<i>vsr</i>), corrente na indutância (<i>il1</i>) e tensão no barramento CC (<i>vCC</i>).	94
Figura 4.8 – Tensões no primário (<i>vp</i>) e no secundário do transformador retificada (<i>vsr</i>) para duas indutâncias de dispersão diferentes: (a) Menor indutância de dispersão; (b) Maior indutância de dispersão.	95
Figura 4.9 – Modelo de simulação do inversor com filtro passa baixo e carga linear.	95
Figura 4.10 - Tensão (<i>vo</i>) e corrente (<i>il2</i>) na saída do inversor com controlo em malha aberta e com carga linear.	96
Figura 4.11 - Tensão (<i>vo</i>) e corrente (<i>il2</i>) na saída do inversor com controlador PI e carga linear.	96
Figura 4.12 – Modelo de simulação do inversor com filtro passa-baixo e carga não linear.	97
Figura 4.13 – Tensão (<i>vo</i>) e corrente (<i>il2</i>) na saída do inversor com controlo em malha aberta e carga não linear.	97
Figura 4.14 - Tensão (<i>vo</i>) e corrente (<i>il2</i>) na saída do inversor com controlador PI e carga não linear.	98
Figura 4.15 - Tensão (<i>vo</i>) e corrente (<i>il2</i>) na saída do inversor com controlador PI usando uma bobine diferente no filtro passivo.	98
Figura 4.16 – Modelo de simulação completo do sistema.	99
Figura 4.17 – Potência extraída (<i>pextraído</i>) pelo sistema em função da potência máxima (<i>pmax</i>) possível de extrair durante variações da velocidade do vento.	99
Figura 4.18 – Tensão no barramento CC (<i>vCC</i>) e corrente a fluir para as baterias (<i>ibat</i>) durante variações da velocidade do vento.	100
Figura 4.19 – Dinâmica no barramento CC quando é colocada uma carga depois do primeiro segundo de simulação: (a) Corrente na indutância do conversor CC/CC ponte completa do tipo buck (<i>il1</i>) e nas baterias (<i>ibat</i>); (b) Tensão no barramento CC (<i>vCC</i>) e corrente à entrada do inversor (<i>itnv</i>).	101
Figura 4.20 – Tensão (<i>vcarga</i>) e corrente (<i>icarga</i>) na rede elétrica isolada com carga não linear.	101
Figura 5.1 – Sistema de emulação da unidade microeólica.	104
Figura 5.2 – Variador de velocidade <i>Bonfiglioli Vectron (ACT 401-19^a)</i> usado no sistema de emulação da unidade microeólica [36].	104
Figura 5.3 – Motor de indução trifásico <i>Seipee (JM132M2-6)</i> usado no sistema de emulação da unidade microeólica [37].	105
Figura 5.4 – Gerador síncrono de ímãs permanentes trifásico <i>Ginlong Technologies (GL-PMG-1800)</i> usado no sistema de emulação da unidade microeólica [31].	105
Figura 5.5 – Diagrama de blocos da divisão do circuito de potência.....	106
Figura 5.6 - Conversores de potência do protótipo desenvolvido e os respetivos <i>drivers</i>	106
Figura 5.7 – Ponte Retificadora <i>SEMIKRON (SKB 30/16 A1)</i> usada no protótipo desenvolvido [38].....	107
Figura 5.8 – Condensador <i>Vishay (MAL205756471E3)</i> usado no filtro capacitivo do protótipo desenvolvido.	107
Figura 5.9 – Esquema elétrico do filtro capacitivo do retificador do protótipo desenvolvido.	108
Figura 5.10 – Esquema elétrico do conversor CC/CC ponte completa do tipo <i>buck</i> usado no protótipo desenvolvido.	108

Figura 5.11 – IGBT <i>Fairchild (FGA120ANTD25N)</i> usado no conversor CC/CC ponte completa do tipo <i>buck</i>	109
Figura 5.12 – Condensador <i>Vishay (378 MKP)</i> utilizado no circuito de <i>snubber</i>	109
Figura 5.13 – Díodos <i>STMicroelectronics (STTH100W06CW)</i> usados no Conversor CC/CC ponte completa do tipo <i>buck</i>	109
Figura 5.14 – Bobine usada no conversor CC/CC ponte completa do tipo <i>buck</i>	110
Figura 5.15 – Transformador de alta frequência do conversor CC/CC do tipo <i>buck</i>	111
Figura 5.16 – Condensadores usados no barramento CC do protótipo desenvolvido: (a) Condensador de Filme <i>EPCOS (M109215032)</i> ; (b) Condensador eletrolítico <i>Vishay (Powerlytic 36DX9456)</i>	112
Figura 5.17 – Baterias de ácido chumbo <i>Power Mobility (WCG-UI – Power)</i> usadas como elemento armazenador no protótipo desenvolvido.....	112
Figura 5.18 – Esquema do inversor monofásico com filtro passa baixo implementado.	113
Figura 5.19 – MOSFET <i>Vishay (SUP85N15-21)</i> usado no inversor.....	113
Figura 5.20 – Condensador <i>Visha (379 MKP)</i> usado no circuito de <i>snubber</i> do inversor.	113
Figura 5.21 – Bobine com núcleo de ferrite usada no filtro passa baixo de saída do inversor.....	114
Figura 5.22 – Diagrama de blocos do sistema de controlo utilizado no protótipo desenvolvido.	114
Figura 5.23 – Sensor de tensão <i>ChenYang Sensors (CYHVS5-25^a)</i> : (a) Aspeto exterior do sensor; (b) Esquema de ligação do sensor.	115
Figura 5.24 – Placa do sensor de tensão utilizada no protótipo desenvolvido.	116
Figura 5.25 – Sensor de corrente <i>LEM (LA100-P)</i> : (a) Aspeto exterior do sensor; (b) Esquema de ligação do sensor.	116
Figura 5.26 – Placa do sensor de corrente utilizada no protótipo desenvolvido.	117
Figura 5.27 – DSP da <i>Texas Instruments (TMS320F28335)</i> e a placa do DSP utilizados no protótipo desenvolvido.....	118
Figura 5.28 – Fluxograma simplificado do algoritmo de controlo do sistema.	118
Figura 5.29 – Placa de condicionamento de sinal utilizada no protótipo desenvolvido.	119
Figura 5.30 – Placa DAC utilizada no protótipo desenvolvido.	120
Figura 5.31 – Placas de comando utilizadas no protótipo desenvolvido: (a) versão monofásica; (b) versão trifásica.	121
Figura 5.32 – Placa de <i>driver</i> dos semicondutores usada no protótipo desenvolvido.	121
Figura 6.1 – Protótipo completo do sistema microeólico isolado com baterias.	123
Figura 6.2 – Formas de onda da tensão produzidas pelo gerador em vazio a 600rpm.	124
Figura 6.3 – Valor eficaz das tensões compostas do gerador em vazio em função da velocidade de rotação.....	125
Figura 6.4 – Potência máxima na saída do gerador com carga linear em função da velocidade de rotação.....	125
Figura 6.5 – Tensão retificada do gerador em vazio em função da velocidade de rotação.	126
Figura 6.6 – Formas de onda produzidas pelo gerador com carga não linear:(a) Tensão; (b) Corrente.....	127
Figura 6.7 Potencia máxima à saída do gerador com carga não linear em função da velocidade de rotação.....	127
Figura 6.8 – Potência máxima à saída do gerador com carga linear (azul) e com carga não linear (vermelho) em função da velocidade de rotação.	127
Figura 6.9 – Circuito de teste do conversor CC/CC ponte completa do tipo <i>buck</i>	128
Figura 6.10 – Forma de onda da tensão obtida no primário (<i>vp</i>) e no secundário do transformador (<i>vs</i>) com problema na indutância de dispersão.....	129

Figura 6.11 – Disposição dos enrolamentos no transformador de elevada frequência: (a) Enrolamentos em locais opostos; (b) Enrolamentos sobrepostos.	129
Figura 6.12 - Forma de onda da tensão obtida no primário (v_p) e no secundário do transformador (v_s) sem problema na indutância de dispersão.	129
Figura 6.13 – Formas de onda da tensão no primário do transformador (v_p) e na saída (v_{cc}) e da corrente na bobine (i_{L1}) do conversor CC/CC ponte completa do tipo <i>buck</i>	130
Figura 6.14 - Circuito de teste do inversor monofásico.	130
Figura 6.15 – Resultados experimentais do inversor monofásico com carga linear: (a) Forma de onda da tensão (v_o) e corrente (i_{L2}) à saída do inversor e no secundário do transformador de saída (v_{carga}); (b) Espectro harmónico e THD da tensão de saída do inversor.	131
Figura 6.16 - Resultados experimentais do inversor monofásico com carga não-linear: (a) Forma de onda da tensão (v_o) e corrente (i_{L2}) à saída do inversor sem controlador PI; (b) Espectro harmónico e THD da tensão de saída do inversor sem controlador PI; (c) Forma de onda da tensão (v_o) e corrente (i_{L2}) à saída do inversor com controlador PI; (d) Espectro harmónico e THD da tensão de saída do inversor com controlador PI;	132
Figura 6.17 - Circuito de teste do funcionamento dos conversores em conjunto.	133
Figura 6.18 – Resultados experimentais obtidos durante o teste efetuado aos conversores em conjunto: (a) Forma de onda da tensão retificada no secundário do transformador (v_{sr}) e da corrente na bobine (i_{L1}) do conversor CC/CC ponte completa do tipo <i>buck</i> ; (b) Forma de onda da tensão no barramento CC (v_{cc}) e da corrente nas baterias (i_{bat}); (c) Forma de onda da tensão (v_o) e da corrente (i_{L2}) à saída do inversor monofásico; (d) Espectro harmónico e THD da tensão à saída do inversor monofásico.	133

Lista de Tabelas

Tabela 2.1 - Classificação da turbina eólica em relação à potência disponível.	42
Tabela 2.2 - Turbinas eólicas no mercado e suas características.	63
Tabela 3.1 – Estados possíveis do conversor CC/CA monofásico de meia onda.	80
Tabela 3.2 - Estados possíveis do conversor CC/CA monofásico de onda completa.	81
Tabela 3.3 - Estados possíveis do conversor CC/CA trifásico de onda completa.	81
Tabela 3.4 – Características do gerador[31].	83
Tabela 5.1 – Valor da resistência RI para os sensores de tensão.	116

Lista de Siglas e Acrónimos

ADC	<i>Analog to Digital Converter</i>
CA	<i>Corrente Alternada</i>
CAES	<i>Compressed Air Energy Storage</i>
CC	<i>Corrente Contínua</i>
CMOS	<i>Complementary Metal–Oxide–Semiconductor</i>
DAC	<i>Digital to Analog Converter</i>
DFIG	<i>Doubly Fed Induction Generator</i>
DSP	<i>Digital Signal Processor</i>
GPM	<i>Gravity Power Module</i>
HAWT	<i>Horizontal Axis Wind Turbine</i>
IGBT	<i>Insulated Gate Bipolar Transistor</i>
P&O	<i>Perturbation & Observation</i>
PCB	<i>Printed Circuit Board</i>
PMSG	<i>Permanent Magnet Synchronous Generator</i>
PSF	<i>Power Signal Feedback</i>
PWM	<i>Pulse Width Modulation</i>
MOSFET	<i>Metal–Oxide–Semiconductor Field-Effect Transistor</i>
MPPT	<i>Maximum Power Point Tracker</i>
RMS	<i>Root Mean Square</i>
SCIG	<i>Squirrel Cage Induction Generator</i>
SODAR	<i>Sound Detection and Ranging</i>
SPI	<i>Serial Peripheral Interface</i>
SPWM	<i>Sinusoidal Pulse Width Modulation</i>
THD	<i>Total Harmonic Distortion</i>
TTL	<i>Transistor-Transistor Logic</i>
VAWT	<i>Vertical Axis Wind Turbine</i>
VSI	<i>Voltage Source Inverter</i>
WRIG	<i>Wound Rotor Induction Generator</i>
WRSG	<i>Wound Rotor Synchronous Generator</i>
ZOH	<i>Zero-Order Holder</i>

Nomenclatura

Símbolo	Significado	Unidade
v_i	Tensão de entrada retificada	V
i_i	Corrente de entrada retificada	A
v_p	Tensão no primário do transformador de alta frequência	V
v_s	Tensão no secundário do transformador de alta frequência	V
i_p	Corrente no primário do transformador de alta frequência	A
i_s	Corrente no secundário do transformador de alta frequência	A
v_{CC}	Tensão no barramento CC	V
i_{L1}	Corrente na bobina do conversor CC/CC ponte completa do tipo <i>buck</i>	A
i_{bat}	Corrente de entrada da bateria	A
v_o	Tensão de saída do inversor	V
v_{carga}	Tensão na saída do transformador de saída	V
i_{L2}	Corrente na bobine do filtro de saída	A
i_{carga}	Corrente na saída do transformador de saída	A
$THD\%$	Distorção harmónica total calculada em percentagem da amplitude da fundamental.	%

CAPÍTULO 1

Introdução

1.1. Situação Atual da Produção de Energia

A energia é um elemento fundamental no crescimento de um país, sendo que, naturalmente, com o crescimento deste, a necessidade de mais energia será uma realidade indiscutível. Atualmente grande parte desta energia é produzida através de combustíveis fósseis, tais como o petróleo, o carvão e o gás natural. Infelizmente, este tipo de combustíveis apresenta dois grandes problemas: as suas reservas limitadas e a poluição causada durante a sua transformação em energia elétrica.

O limite das reservas dos combustíveis fósseis é um assunto de extrema importância, pois grande parte da produção atual de energia é centrada neste tipo de fonte de energia. Como tal, ao longo dos últimos anos, têm sido feitos imensos estudos sobre a duração destas reservas dos combustíveis fósseis. Muitos investigadores estimam que as reservas destes irão terminar em breve. É exemplo a WEO (*World Economic Outlook*) que em 2006 estimava que o petróleo iria terminar dentro de 39 a 43 anos, o gás natural dentro de 64 anos e o carvão dentro de 164 anos. Na Figura 1.1, está apresentado um gráfico da duração das reservas estimado em relação ao consumo existente em cada ano desde 1980 a 2006 [1].

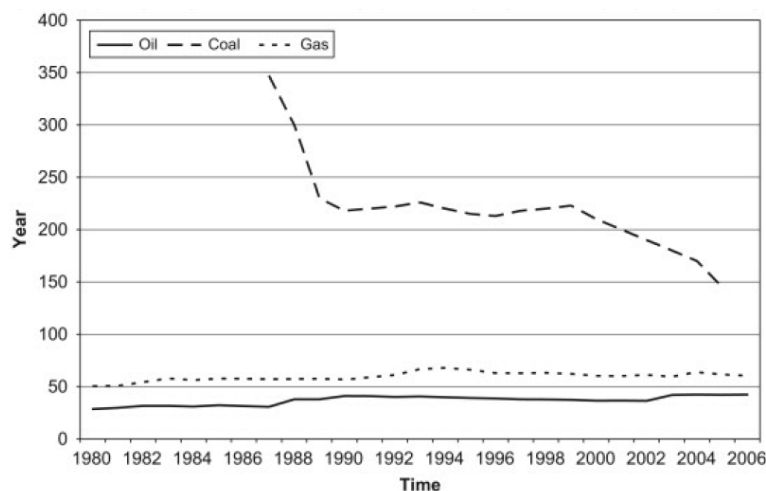


Figura 1.1 – Duração estimada das reservas de petróleo, carvão e gás natural em relação ao consumo existente em cada ano desde 1980 até 2006 [1].

Pode-se verificar que ao longo destes anos, a duração estimada do petróleo e do gás natural pouco se modificou. Isto é, as reservas existentes de petróleo e gás natural não têm demonstrado nenhuma diminuição na previsão de tempo de duração destes. Se o consumo de 2006 se mantiver, a duração destes recursos irá de encontro com o estimado pela WEO.

A poluição causada pela produção de energia através de combustíveis fósseis poderá provocar problemas ambientais como o aquecimento global ou chuvas ácidas. O aumento da temperatura média global no planeta é provocado pela elevada emissão de gases de estufa, nomeadamente o CO₂, durante o processo de obtenção de energia através de combustíveis fósseis. Na Figura 1.2 está apresentado um gráfico da variação da temperatura média global ao longo dos últimos anos

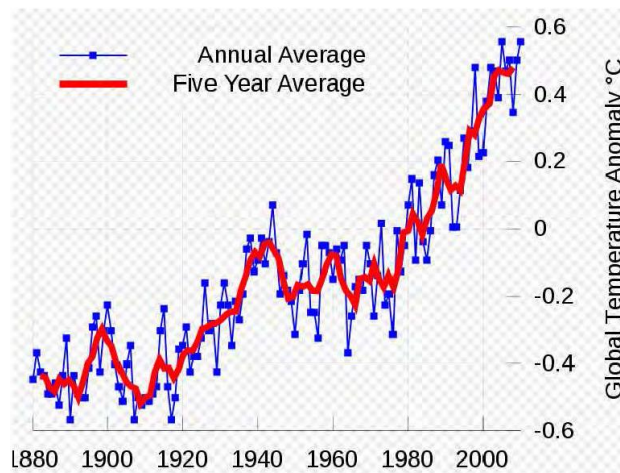


Figura 1.2 – Variação da temperatura média global ao longo dos últimos anos [1].

Este aumento de temperatura causa imensos problemas desde a destruição de habitats ao aumento do nível da água do mar derivado do descongelamento das grandes camadas de gelo. Na Figura 1.3 está apresentado um gráfico do aumento do nível da água do mar ao longo dos últimos anos.

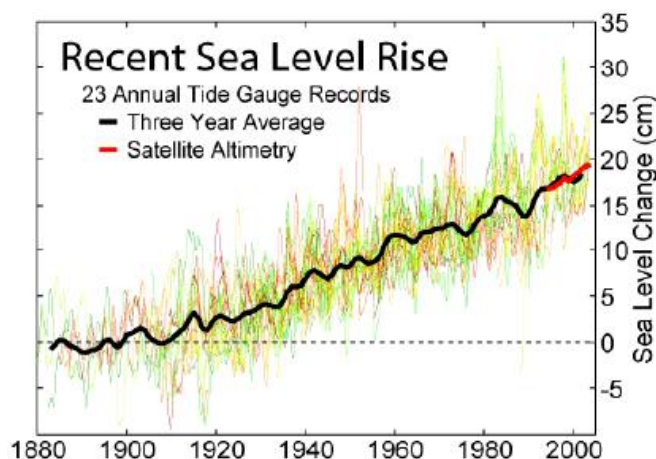


Figura 1.3 – Aumento do nível da água no mar ao longo dos últimos anos [1].

Como foi referido, os gases libertados durante o processo de obtenção de energia através de combustíveis fósseis também podem causar a ocorrência de chuvas ácidas. Estas provocam imensos danos ambientais desde a contaminação de lagos e consequente morte dos seres vivos que os habitem, bem como a destruição do solo terrestre, tornando este infértil.

De salientar, que só foram referidos alguns dos problemas causados pela produção de energia através de combustíveis fósseis. É então necessário, tentar encontrar alternativas viáveis aos combustíveis fósseis, sendo que as energias renováveis têm surgido como uma alternativa bastante interessante. Nos últimos anos, a aposta neste tipo de energia tem evoluído de forma significativa, substituindo assim em parte a energia que seria produzida através de combustíveis fósseis.

1.2. Produção de Energia Eólica na Europa

Nos últimos anos, a quantidade de potência instalada em cada ano proveniente de fonte renovável na Europa sofreu um drástico crescimento. A potência que foi instalada em 2000 rondava os 3,6 GW, sendo que em comparação com a potência instalada em cada ano desde 2010 até 2013, que compreende entre os 24,7 GW e os 35,2 GW, trata-se de um aumento de até dez vezes de potência instalada em cada ano [2].

A potência instalada em cada ano de origem renovável vem representando uma parte cada vez maior da totalidade de todos os tipos de produção de energia. Em 2000, foram instalados 3,6GW de origem renovável, os quais representavam 22,4% da potência que foi instalada nesse ano na Europa. Em 2013 cresceu para os 25 GW, constituindo 72% da potência instalada nesse ano, tratando-se um aumento bastante significativo em 13 anos. Desde 2000 até 2013 foram adicionados 385 GW de potência instalada, sendo que destes, 55% são energias renováveis e destes, 28% são de origem eólica. Na Figura 1.4 está apresentado um gráfico da potência instalada por ano na Europa e para cada tipo de energia.

Neste início do século XXI, é visível que o sector de produção de energia se está a afastar do uso de fontes de energia não-renováveis, como é o caso do petróleo e do carvão, ou de fontes potencialmente perigosas como é o caso da energia nuclear. No sentido oposto, tem havido um crescimento na potência total instalada em energia eólica e solar, de forma a responder às necessidades de energia.

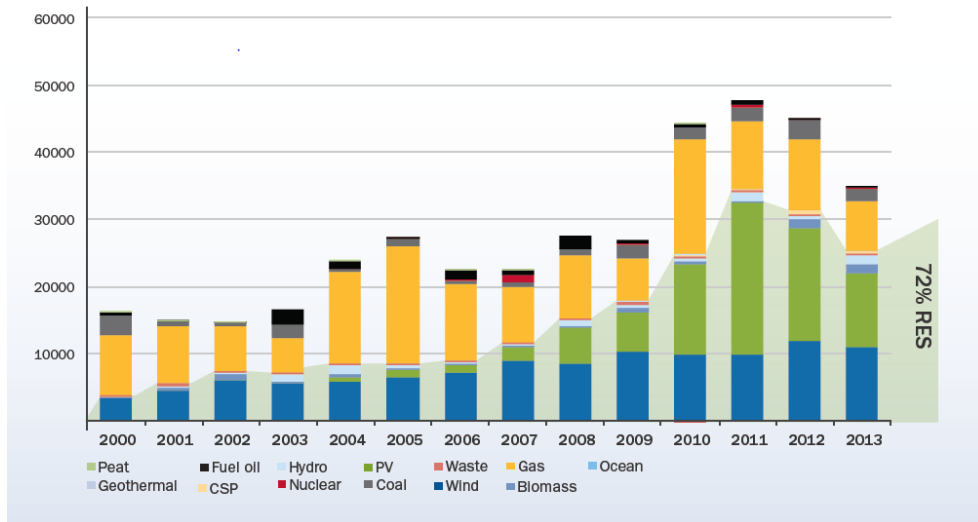


Figura 1.4 – Potência instalada na União Europeia por ano em MW e percentagem de RES [2].

A percentagem de energia eólica dentro da potência total instalada aumentou cinco vezes na última década, dos 2,4% apresentados em 2000 para 13% em 2013. Durante o mesmo período, a potência de origem renovável aumentou 61%, de 24,5% em 2000 para 39,6% em 2012. Na Figura 1.5 estão apresentados dois gráficos que demonstram a potência total instalada em MW e percentagem dos diferentes tipos de produção de energia em 2000 (a) e em 2013 (b).

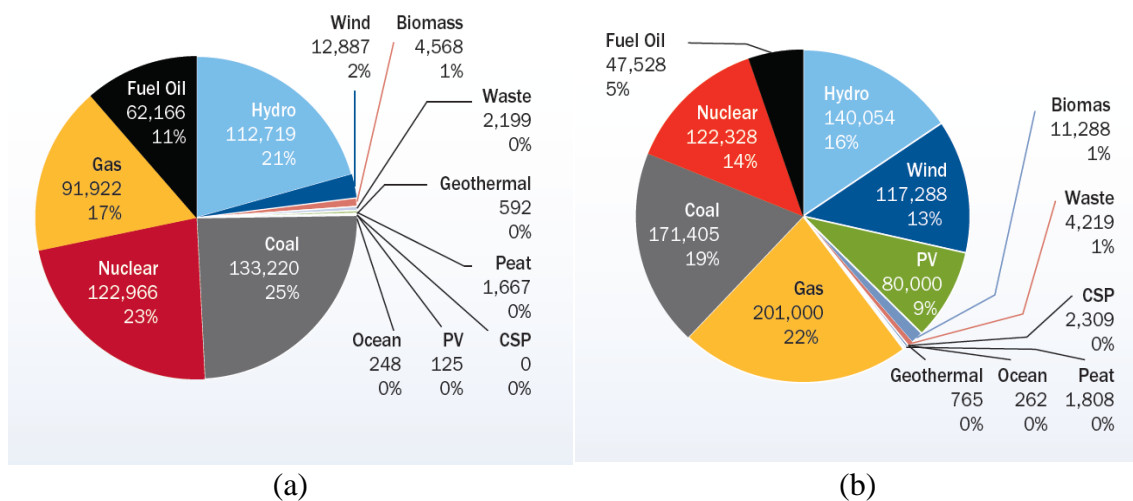


Figura 1.5 – Potência total instalada na União Europeia em MW e percentagem dos diferentes tipos de produção de energia: (a) No ano 2000;(b) No ano 2013 [2].

Durante 2013, foram instalados 12 GW de potência de origem eólica em toda a Europa, dos quais 11,2 GW foram na União Europeia. Dos 11,2 GW instalados na União Europeia, 9,6 GW foram onshore e 1,6 GW *offshore*.

Quanto às instalações de potência anuais, a Alemanha foi o país que instalou mais potência de origem eólica em 2013 com quase 3238 MW em que 240 MW são *offshore*.

Os valores apresentados por outros países estão apresentados na Figura 1.6 a qual apresenta a potência instalada pelos países da União Europeia em 2013.

Como já foi referido, a energia eólica representou 32% (11,2 GW) das novas instalações de potência em 2013, tornando-se a fonte de energia renovável com maior instalação de potência neste ano. A energia solar segue em segundo lugar na instalação de potência com 31% (11 GW). Em terceiro lugar encontra-se o gás natural com 21% (7,5 GW). Na Figura 1.7 é possível verificar as percentagens de potência instalada nas diferentes energias em 2013.

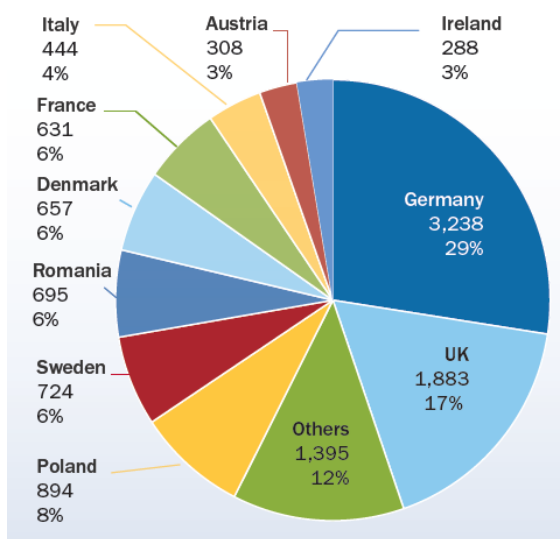


Figura 1.6 – Potência instalada pelos membros da União Europeia durante o ano de 2013 em MW e percentagem [2].

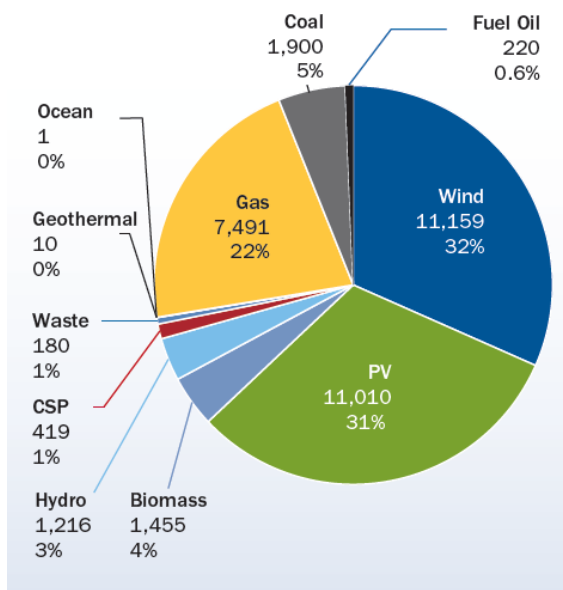


Figura 1.7 – Potência instalada dos diferentes tipos de energia renovável em 2013 na União Europeia [2].

Em 2013, a Europa apresentava um total de 117 GW de potência instalada de origem eólica. Trata-se de um crescimento de 10% em relação ao ano anterior. A Alemanha continua a ser o país com maior potência instalada, seguida pela Espanha e pelo Reino Unido. Na Figura 1.8 está apresentado o total de potência instalado nos países da Europa.

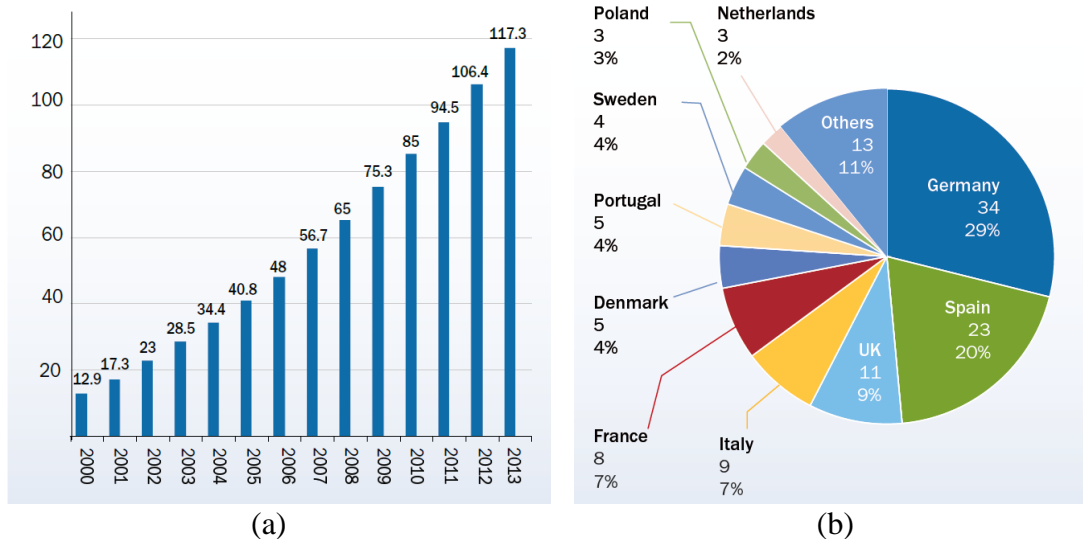


Figura 1.8 – Total de potência de origem eólica instalada: (a) Na Europa; (b) Países da União Europeia [2].

1.3. Produção de energia eólica em Portugal

A potência total instalada em Portugal, em finais de 2012, era 4194 MW, tendo obtido um crescimento de 114 MW em relação ao ano anterior (2011). De 2006 até 2009 a potencia instalada aumentou a um ritmo quase constante, registando-se uma pequena queda nesse crescimento em 2007. Nos últimos anos, a instalação de potência estagnou, sendo que em 2010 e 2011 ocorreu uma diminuição de cerca de 50% em relação aos anos anteriores. Em 2012 a potência instalada foi a mais baixa dos últimos 9 anos. Uma das razões possíveis desta queda poderá ser a condição económica atual que o país enfrenta [3]. Na Figura 1.9 está apresentado o gráfico da evolução da potência total instalada em Portugal.

Nos últimos anos, a energia total consumida em Portugal engloba uma maior percentagem de energia de origem renovável, reduzindo assim a utilização de fontes não renováveis (Figura 1.10). No ano 2012 ocorreu uma quebra significativa na produção de energia renovável, sendo que esta produção constituiu apenas 37% do total de energia consumida, uma queda de 7% em relação ao ano anterior. Apesar disso, o consumo de energia eólica aumentou para os 10 TWh em 2012, isto é, 20% do total de energia consumida, um aumento de 2% em relação ao ano anterior [3]. Em 2013, o consumo de

energia eólica continuou a aumentar, sendo que se registou um valor de 28% de energia eólica no consumo de energia total em Portugal [4].

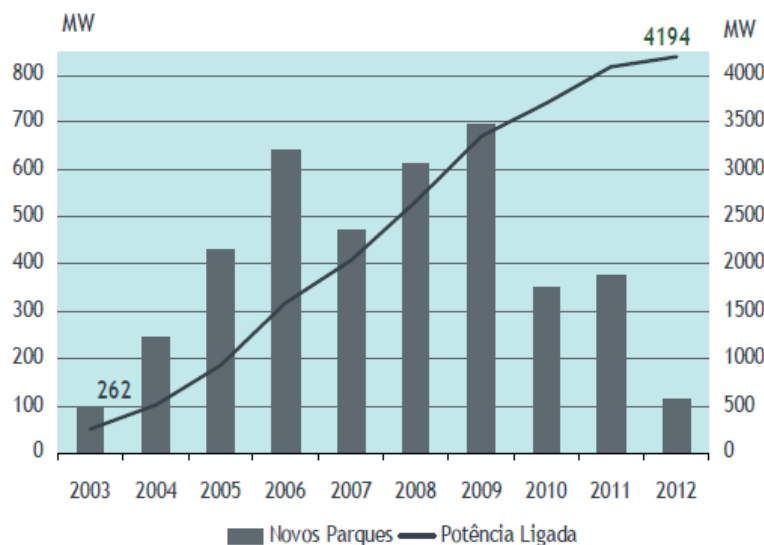


Figura 1.9 – Evolução da potência eólica total instalada em Portugal [3].

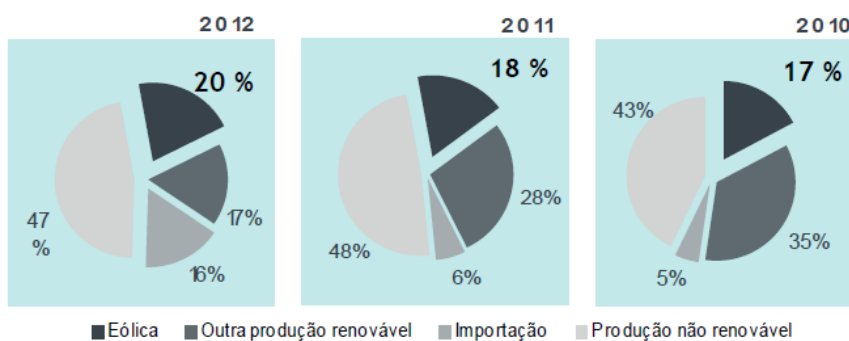


Figura 1.10 – Percentagem dos diferentes tipos de energia consumidos em Portugal [3].

1.4. Enquadramento

Atualmente, a potência utilizada em todo o mundo ronda os 16 TW, sendo que se prevê um aumento de quase 50% até 2030. Quase 90% da energia utilizada é derivada de combustíveis fósseis, sendo que desses 90%, 37% é obtida a partir de petróleo, o qual se estima que as suas reservas terminem em 2045. Outros combustíveis fósseis com grande utilização são o gás natural e o carvão. O gás natural estima-se que acabe em 2072, sendo que o carvão ainda apresenta grandes reservas, tendendo a ser usado cada vez mais nos próximos anos [5]. Durante o processo de transformação dos combustíveis fósseis em energia elétrica, libertam gases nocivos, para os seres vivos, provocam o efeito de estufa e contribuem para o aquecimento global do planeta. Por esta razão, nos últimos anos tem havido uma maior preocupação com o impacto ambiental, visto que os sinais do efeito de estufa causado por este tipo de poluição têm-se tornado mais evidentes.

Com isto, surge a necessidade de apostar em fontes de energia alternativas, como é o caso das energias renováveis limpas. Estas, para além de usarem fontes de energia inesgotáveis, não causam praticamente poluição, sendo que, a poluição causada é em grande parte no seu processo de fabrico.

Neste momento as energias renováveis constituem cerca de 8% da energia do mundo. Dentro dessa percentagem, a energia hídrica é a que possui a maior fatia de energia produzida, seguida pela energia eólica, cujo uso tem vindo a aumentar, a um ritmo de 30% ao ano, sendo bastante usada nos EUA, na Europa e na Ásia [5]. Os países da Europa com maior taxa de penetração da energia eólica em 2012 eram a Dinamarca, Portugal e Espanha, sendo que do total de energia consumida, 27,1%, 16,8% e 16,3%, respetivamente, era de origem eólica [6]. Os países com maior potência instalada são a Alemanha e Espanha com 34,3 GW e 23 GW respetivamente [2]. Outros tipos de energia renováveis são a energia solar e a biomassa. Dentro destas energias referidas, esta Dissertação de Mestrado irá ser desenvolvida em volta da energia eólica.

O processo de extração de energia elétrica que tem como fonte a energia eólica, pode ser resumido de uma forma simplificada à captação do vento a partir das pás de uma turbina eólica, que faz rodar o rotor de um gerador, que por sua vez produz energia elétrica. Atualmente, já existem unidades eólicas capazes de produzir quantidades assinaláveis de energia elétrica. A maior torre eólica disponível no mercado tem pás com um diâmetro de 127 m e tem cerca de 7,5 MW de potência nominal [7].

Para além da produção em grande escala em parques eólicos, onde são utilizadas unidades eólicas de grande potência, começa a emergir um interesse cada vez maior na microprodução. No que respeita à produção de energia em pequena escala, em habitações e edifícios de serviços, esta tem sido conseguida maioritariamente a partir de energia solar coletada por painéis fotovoltaicos. Contudo, existe um potencial muito interessante para a produção de energia elétrica a partir de unidades microeólicas, nomeadamente em locais remotos, isto é, sistemas isolados da rede elétrica, onde podem ser a fonte de energia principal ou ser combinada com a tecnologia solar fotovoltaica para uma produção de energia mais constante ao longo do dia e do ano. Ao contrário do que acontece com as unidades de grande potência que assentam numa tecnologia madura, a tecnologia das microeólicas apresenta uma margem de crescimento grande, sendo possível conseguir grandes otimizações nomeadamente ao nível dos conversores de eletrónica de potência necessários. Este último será o ponto central deste trabalho de Dissertação de Mestrado.

Para o caso de produção de energia elétrica para sistemas isolados, o desafio passa muito pela gestão de energia, isto é, para além de produzir energia de modo a alimentar os recetores da rede isolada é necessário armazenar a parcela de energia produzida que não está a ser utilizada para que possa ser utilizada quando a fonte renovável não estiver disponível. Para fornecer energia com qualidade às cargas da rede elétrica isolada, é necessário fazer uma interface do gerador com a rede, recorrendo para tal à eletrónica de potência. Para que tudo funcione corretamente é necessário que os circuitos de eletrónica de potência sejam corretamente dimensionados e os algoritmos de controlo otimizados para a operação pretendida.

1.5. Motivações

Com o consumo atual de combustíveis fósseis, nomeadamente de petróleo e carvão mineral, é previsível que as reservas destes materiais terminem muito rapidamente. Para além da escassez, estes combustíveis fósseis provocam muita poluição ambiental. Como estes combustíveis são muito usados na produção de energia elétrica, terão de ser rapidamente substituídos por outras fontes de energia mais abundantes e menos poluentes. Neste contexto surgem as energias renováveis, nomeadamente a energia eólica, com um contributo assinalável para essa solução. Esta fonte de energia têm vindo a atrair interesse em todo mundo, sendo que países como a Alemanha na Europa e China na Asia apresentam a maior potência eólica instalada nos seus respetivos continentes.

Esta dissertação aborda uma área mais específica da produção de energia eólica, isto é, microprodução em locais isolados. Este tipo de sistemas de microprodução é normalmente usado quando estender a rede elétrica apresenta mais custos do que construir uma rede isolada para satisfazer as necessidades locais. Existem várias aplicações para este tipo de sistema, sendo exemplo, as torres de telecomunicações em locais remotos, nos quais a construção de uma extensão à rede elétrica não seria viável economicamente. Normalmente nestes locais são usados sistemas compostos por um motor de combustão acoplado a um gerador elétrico, sendo que em muitos locais o transporte de combustível para os geradores se torna uma tarefa de difícil execução. A introdução da energia eólica num sistema destes facilitaria muito a logística de produção da energia e permitiria ainda poupar no combustível utilizado para alimentar o motor de combustão. Para além disto, estes tipos de sistemas apresentam uma grande potencialidade e muita margem de evolução, pois as soluções existentes atualmente no mercado são eletronicamente pouco evoluídas.

Do ponto de vista pessoal, o grande interesse na área de eletrónica de potência e energias renováveis representou uma motivação extra durante toda a dissertação.

1.6. Objetivos

O principal objetivo deste trabalho de dissertação é o desenvolvimento de um protótipo laboratorial de um sistema microeólico isolado. Este protótipo é composto por um emulador da unidade microeólica e pelos conversores de potência necessários para implementar todas as funcionalidades de uma rede isolada. O emulador da unidade microeólica é composto por um motor de indução, um variador de velocidade e um gerador síncrono de ímanes permanentes. Os conversores de potência para além da gestão do carregamento das baterias e da produção da tensão alternada sinusoidal de 230V/50Hz para alimentar a rede isolada, permitem a funcionalidade de MPPT, ou seja, a extração da máxima potência em função da velocidade do vento. Assim, nos instantes em que a potência produzida exceder o consumo dos recetores da rede isolada, armazena-se energia nas baterias. Em situações de ausência de vento a energia das baterias permite manter a alimentação da rede isolada, nomeadamente dos recetores prioritários. Para atingir os objetivos, numa primeira fase foi efetuado um estudo sobre o estado atual da energia eólica no mundo. Seguiu-se um estudo sobre os tipos de unidades eólicas existentes, bem como os seus respetivos componentes. De seguida, foram estudadas as diferentes topologias elétricas usadas para interligar os diversos tipos de geradores eólicos à rede isolada e os conversores de potência associados a essas topologias. Foram também estudados os algoritmos de MPPT (*Maximum Power Point Tracker*) usados em sistemas eólicos, os quais permitem a extração do máximo de potência disponível nos geradores eólicos. Recorreu-se a simulações computacionais para verificar o correto funcionamento dos controladores usados na topologia adotada, permitindo assim também evitar futuros erros durante a implementação do projeto. Por fim, foram desenvolvidas placas de circuito impresso e implementado o protótipo, efetuando-se ensaios experimentais ao mesmo de forma a validar a topologia.

1.7. Organização e Estrutura da Tese

No Capítulo 1 é abordado o atual panorama da energia elétrica e da energia eólica em Portugal e na Europa. É também feito o enquadramento do tema, bem como as motivações que levaram a desenvolvê-lo. São ainda apresentados os principais objetivos do trabalho de dissertação.

No Capítulo 2 são descritos os diversos tipos de turbinas eólicas existentes, bem como os componentes pelos quais são compostas. É feita uma descrição dos sistemas de armazenamento existentes. São apresentadas algumas das turbinas eólicas existentes no mercado com potencial interesse para o trabalho.

No Capítulo 3 são demonstradas as características dos diferentes geradores elétricos usados em turbinas eólicas e as suas respectivas topologias. Para além disso, é descrito o funcionamento dos diferentes conversores de potência mais relevantes para as topologias em questão. No final é descrita a topologia proposta para o sistema a desenvolver.

No Capítulo 4 são apresentados os modelos de simulação usados para verificar o funcionamento dos conversores de potência antes de se proceder à sua montagem. Estas simulações foram efetuadas em PSIM. São demonstrados os resultados das simulações efetuadas aos conversores que compõem o protótipo bem como ao sistema na sua totalidade.

No Capítulo 5 são descritos todos os componentes usados na construção do protótipo, bem como as placas de controlo necessárias para aplicar o controlo nos conversores.

No Capítulo 6 são apresentados os ensaios efetuados ao gerador usado. São também apresentados os resultados experimentais efetuados aos diferentes conversores e ao sistema na sua totalidade.

No Capítulo 7 é apresentada uma conclusão sobre o trabalho realizado durante esta dissertação. São também feitas sugestões para trabalho futuro de forma a melhorar o trabalho desenvolvido.

CAPÍTULO 2

Turbinas Eólicas

2.1. Introdução

Com a necessidade de reduzir as emissões de gases nocivos para a atmosfera, surgem as energias renováveis, mais concretamente a energia eólica, como possível solução para diminuir a geração de energia a partir de fontes que causam a emissão destes gases.

A turbina eólica é a unidade responsável pela transformação da energia cinética do vento em energia elétrica, e por esta razão, é necessário um bom entendimento do seu funcionamento. Para tal, é necessário conhecer os diferentes tipos de turbinas eólicas e os seus constituintes, tais como, o gerador, o rotor, entre outros. Além disto, é necessário conhecer os diferentes sistemas existentes, isto é, sistemas isolados, híbridos e ligados à rede elétrica. Neste capítulo serão estudados os diferentes tipos de sistemas de armazenamento, que são essenciais para os sistemas isolados e híbridos, bem como apresentadas algumas das soluções de turbinas eólicas disponíveis no mercado.

2.2. Energia do Vento

A energia do vento é a energia cinética originada pelo movimento do ar. Sendo assim, a energia contida no vento pode ser calculada pela equação 2.1:

$$E_w = \frac{1}{2} m \bar{v}^2 \quad (2.1)$$

em que m é a massa do ar e \bar{v} é a velocidade média do vento durante um certo período de tempo. Diferenciando a energia contida no vento obtém-se que:

$$P_w = \frac{dE_w}{dt} = \frac{1}{2} \dot{m} \bar{v}^2 \quad (2.2)$$

No entanto, nem toda a energia contida no vento pode ser aproveitada. Só a energia que incide na área abrangida pelas pás da turbina é utilizada. Assim sendo, o deslocamento de massa do ar, \dot{m} , pode ser traduzida da seguinte maneira:

$$\dot{m} = \rho A \bar{v} \quad (2.3)$$

em que ρ é a densidade do ar e A é a área abrangida pelas pás.

Substituindo a equação 2.3 na equação 2.2, pode deduzir-se que, a potência que se consegue extrair do vento é:

$$P_w = \frac{1}{2} \rho A \bar{v}^3 \quad (2.4)$$

Ao observar-se a equação 2.4, pode concluir-se que tanto o tamanho das pás como a velocidade do vento, influenciam de forma significativa a potência que se pode extrair, sendo que, por exemplo, se a velocidade do vento dobrar, a potência extraível aumenta oito vezes.

A eficiência máxima que uma turbina eólica pode atingir, foi deduzida por Lanchester em 1915 e por Betz em 1920 e é denominada de Limite de Lanchester-Betz. A potência máxima que se pode extrair é 16/27 (59,26%), em relação ao total teórico [8]. Assim a potência máxima que se pode extrair do vento será

$$P_w = \frac{1}{2} C_p \rho A \bar{v}^3 \quad (2.5)$$

em que C_p é o coeficiente de potência e pode ser determinado por

$$C_p = \frac{\text{Potência Extraída pela Turbina Eólica}}{\text{Potência do Vento}} \quad (2.6)$$

Atualmente, as grandes turbinas eólicas já atingem valores entre os 0,4 e 0,5, estando portanto muito próximas do valor máximo que podem atingir.

2.3. Classificação das Turbinas

As turbinas eólicas têm como objetivo captar a energia contida no vento (energia cinética) e converter em energia elétrica. Existem várias configurações para diversas situações, sendo que estas apresentam diferentes vantagens e desvantagens que as levam a ser usadas.

2.3.1. Tipos de Turbinas

Existem dois tipos de turbinas: as Turbinas de Eixo Vertical (VAWT – *Vertical-Axis Wind Turbines*) e as Turbinas de Eixo Horizontal (HAWT - *Horizontal-Axis Wind Turbines*). Estas são normalmente utilizadas em ambientes bastante diferentes, em que as vantagens que cada uma apresenta são aproveitadas ao máximo.

Nas turbinas HAWT, o rotor está disposto na direção do vento, se este for horizontal. Estas normalmente têm três pás, pois assim apresentam melhor eficiência em relação ao uso de apenas uma ou duas pás. Aumentar o número de pás para quatro, não

amplia a eficiência de forma significativa, para que sejam justificados os custos adicionais necessários. Atualmente, este tipo de turbina é a mais usada, devido a apresentar características importantes para geração de energia em grande escala. A potência que uma turbina pode extrair, está diretamente ligada com a altura a que as pás captam o vento, sendo que, quanto maior for a altura destas, maior é a velocidade do vento, traduzindo-se assim, num aumento da potência disponível. A grande desvantagem deste tipo de turbina é o facto de ser necessário controlar a direção do rotor em relação ao vento, para obter o máximo de potência possível [8]. Na Figura 2.1 (a) pode ser visualizado um exemplo deste tipo de turbinas.

Quanto às turbinas VAWT, o seu eixo de rotação encontra-se perpendicular ao solo. Estas turbinas encontram-se a uma baixa altitude em relação ao solo, devido à ausência da torre, que eleva a turbina como se verifica na turbina do tipo HAWT. Isto traduz-se em baixas velocidades do vento e por esta razão, a potência extraída não será tão elevada como no caso das HAWT [8]. Como vantagem tem o facto de não necessitar de sistemas de controlo da direção do rotor. Para além disto, todos os componentes mecânicos, por exemplo, o gerador e a caixa de velocidades, estão colocados ao nível do chão, evitando desta forma o uso de uma torre para suportar esses componentes pesados. Este tipo de turbinas é muito usado em locais em que os ventos são irregulares, como por exemplo, em montanhas ou locais urbanos. Um exemplo do tipo de turbina VAWT encontra-se demonstrado na Figura 2.1 (b).



(a)



(b)

Figura 2.1 – Tipos de turbina eólica: (a) Turbina de eixo horizontal (HAWT); (b) Turbina de eixo vertical (VAWT) [9].

2.3.2. Classificação das Turbinas

Existem turbinas eólicas com diversas potências disponíveis, isto é, várias potências máximas que podem fornecer. Estas podem ser divididas em micro, pequenas, médias, grandes e ultra-grandes dependendo da sua potência [8].

As microturbinas fornecem até alguns kW de potência nominal, sendo maioritariamente usadas em zonas em que a rede elétrica não está disponível. São também muito usadas em pequenas aplicações, como por exemplo, aplicações isoladas em autoestradas. Estas iniciam o seu funcionamento com velocidades de vento baixas e a sua velocidade nominal de funcionamento é moderada, tornando-se assim numa boa fonte de energia para qualquer zona do mundo.

Quanto às pequenas turbinas, são aquelas que têm potências nominais menores que 100 kW. Tal como as micro turbinas, são normalmente usadas para aplicações em locais isolados. Podem ser usadas para aumentar o fornecimento de eletricidade em certas regiões, que necessitem de um aumento da potência da rede elétrica.

Em relação às médias e grandes turbinas, estas são normalmente usadas em produção de maior escala, como é o caso de parques eólicos, podendo também ser usadas em sistemas híbridos em zonas isoladas. As turbinas médias têm potência entre os 100 kW e 1 MW e as turbinas grandes têm potência até aos 10 MW. Turbinas com potência superior a 10 MW são denominadas turbinas ultra-grandes e encontram-se em desenvolvimento para melhorar o seu desempenho. Na Tabela 2.1 está representada as classificações das turbinas eólicas em relação à sua potência.

Tabela 2.1 - Classificação da turbina eólica em relação à potência disponível.

Classificação da Turbina Eólica	Potência
Micro	Até alguns kW
Pequena	Menos de 100 kW
Média	Entre 100 kW e 1 MW
Grande	De 1 MW até aos 10 MW
Ultra Grande	Mais de 10 MW

2.4. Componentes da Turbina Eólica

Para a turbina eólica efetuar o processo de transformação de energia mecânica em energia elétrica necessita de alguns componentes essenciais, de forma a efetuar o

processo com a melhor eficiência possível. Na Figura 2.2 está apresentada a *nacelle* de uma turbina eólica e os seus componentes. Outros elementos como as pás e o rotor que não estão identificados na figura também são essenciais. E ainda existem para além destes, alguns elementos secundários como os sistemas de travagem que também são imprescindíveis para a segurança da turbina eólica.

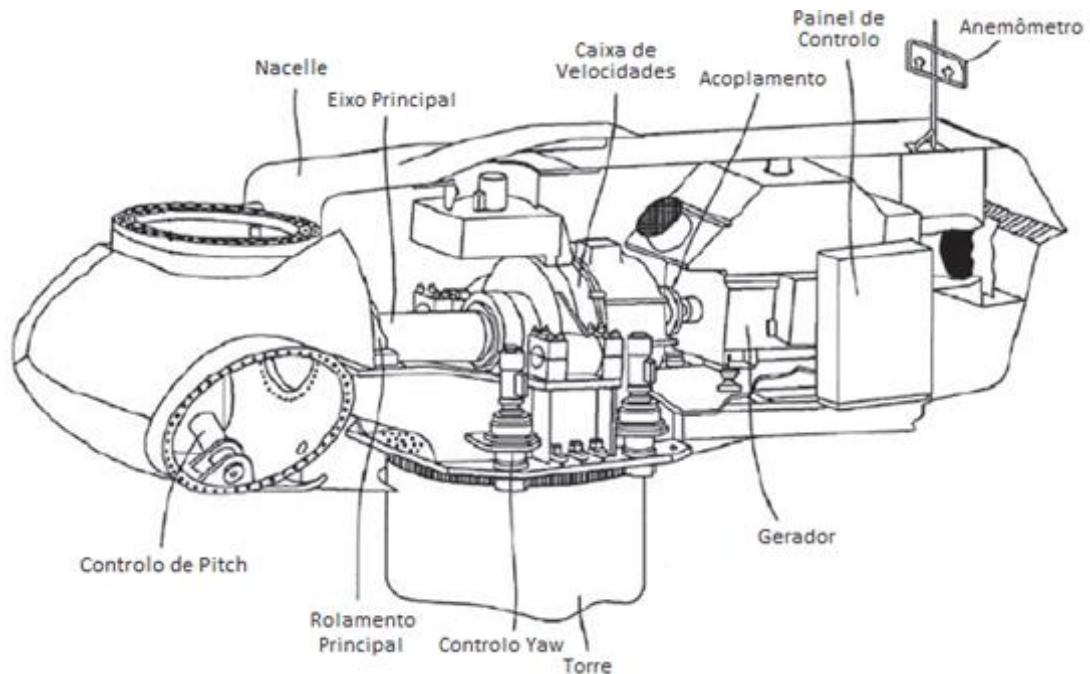


Figura 2.2 – *Nacelle* de uma turbina eólica e os seus componentes [8].

2.4.1. Rotor

A função do rotor é captar a energia cinética do vento e transforma-la em energia mecânica rotacional. Esta transformação é essencial para que o gerador, outro componente da turbina eólica, seja capaz de transformar essa mesma energia mecânica em energia elétrica. Os componentes principais do rotor são as pás sendo que estas estão diretamente relacionados com a potência que a turbina irá poder extrair, visto que, como já foi referido anteriormente, a área que for abrangida por estas afeta potência que a turbina poderá extrair.

Existem dois tipos de configurações do rotor em função da sua direção em relação ao vento: *upwind* e *downwind*. Nas turbinas *upwind*, o rotor encontra-se contra o vento. A grande vantagem deste tipo de turbina, incide no facto de o vento atingir o rotor sem interferências da *nacelle* e da torre no fluxo do vento. Este tipo de interferências no fluxo do vento pode causar perdas aerodinâmicas e introduzir maior stress nas turbinas. Para além disto, a potência gerada pela turbina irá variar bastante, devido a esta ocorrência. Esta interferência no fluxo do vento é exatamente a grande desvantagem das turbinas *downwind* que funcionam com o rotor a favor do vento [8]. Por sua vez, como

vantagem, este tipo de turbinas não necessita de controlo *yaw* (direção do rotor da turbina), visto que, a própria construção do rotor permite que a turbina se oriente sozinha (denominado de *free yaw*). Na Figura 2.3 está representado os dois tipos de configuração do rotor.

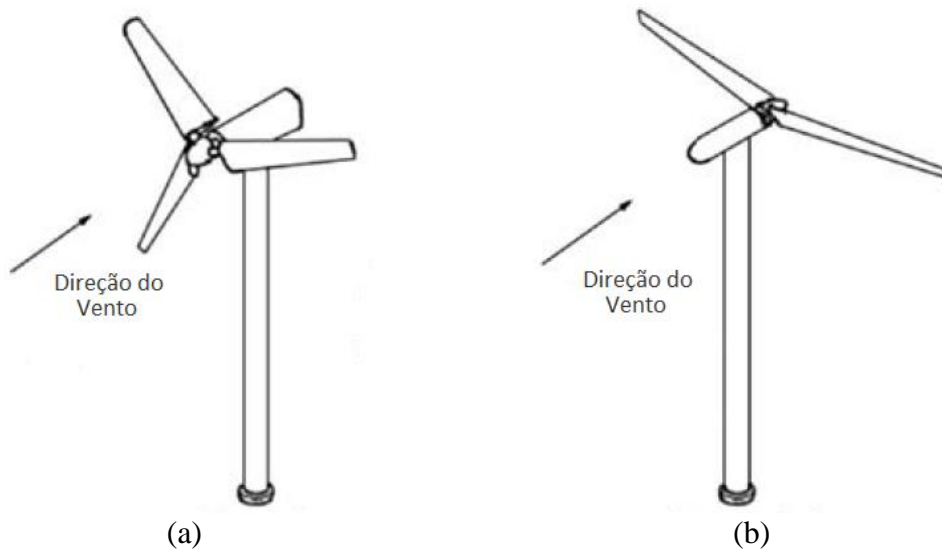


Figura 2.3 – Tipos de configuração do rotor em relação à direção do vento: (a) *Upwind*; (b) *Downwind* [8].

2.4.2. Pás

As pás são os componentes do rotor que captam a energia cinética do vento para ser transformada em energia mecânica. Como já foi referido, o tamanho das pás e a conseqüente área que abrangem, está diretamente relacionado com a potência nominal da turbina. Uma turbina normalmente apresenta três pás para uma melhor relação entre custo e performance. Os materiais atualmente usados na construção das pás são, na sua maioria, resina epóxi e fibra de vidro [9].

As pás também são parte essencial no controlo aplicado à turbina para retirar o máximo de potência possível, bem como para a proteger de ventos com velocidades superiores ao limite da turbina. Existem essencialmente dois tipos de controlo: *stall* (perda) e *pitch*.

O controlo de *pitch* é usado nas turbinas modernas e consiste num controlo do ângulo de ataque das pás. Este tipo de controlo consegue melhorar a conversão de energia e também oferecer segurança ao sistema para situações de emergência, como é o caso de ventos fortes. Como a intensidade do vento não é igual nas três pás, idealmente uma turbina deverá ter um atuador de *pitch* em cada pá. Existem essencialmente dois tipos de controlo de *pitch*: hidráulico e elétrico. O primeiro apresenta como vantagens não usar caixa de velocidades e, em possíveis emergências, como por exemplo falha na

alimentação, ser mais seguro pois irá manter-se no lugar previamente definido. O controlo elétrico surgiu como uma alternativa ao sistema hidráulico, apresentando maior eficiência e não causa poluição ambiental por derrame de fluidos [8].

O controlo *stall* é dividido em dois tipos: passivo e ativo. No primeiro, com a existência de ventos de baixa ou moderada velocidade, a turbina funciona próxima da máxima eficiência. Neste as pás estão dimensionadas de modo a criar perdas aerodinâmicas para proteger a turbina, quando a velocidade do vento ultrapassa o limite imposto pela turbina eólica. Este tipo de controlo é normalmente usado em turbinas de baixa potência. Comparando com o controlo de *pitch*, este tipo de controlo apresenta a vantagem de ter uma estrutura mais simples e de não necessitar de controlo complexo, sendo que tem menor eficiência e necessita de um grande estudo e diversos testes no momento de construção da pá [8]. Quanto ao controlo *stall* ativo, junta ao controlo passivo um sistema de controlo de *pitch* das pás. Com isto, o sistema consegue alcançar um controlo mais preciso da potência de saída, bem como, manter para ventos elevados a potência nominal. No entanto, ao ser acrescentado o controlo de *pitch* o sistema torna-se mais dispendioso monetariamente.

2.4.3. Yaw

O *yaw* é um sistema usado nas turbinas HAWT que controla a direção da turbina em relação ao vento, de forma a maximizar a potência que a turbina extrai e a diminuir as diferenças de cargas nas pás. Como acontece no controlo de *pitch*, o *yaw* pode ser acionado por um sistema hidráulico ou elétrico [8]. O sistema hidráulico foi usado durante o desenvolvimento inicial das turbinas eólicas, deixando de ser usado durante o processo evolutivo destas. Nas turbinas modernas é usado o sistema elétrico, sendo este sistema composto por um motor elétrico, em que são necessários alguns componentes mecânicos para o seu bom funcionamento, assim como um travão para maior segurança. Além desses componentes, necessita de um sensor de direção do vento, para que o sistema consiga determinar a direção na qual tem que rodar. Em turbinas de maior dimensão, pode ser usado mais que um motor elétrico.

2.4.4. Gerador

É o componente da turbina eólica responsável pela transformação da energia mecânica em energia elétrica. Os geradores usados nas turbinas eólicas são: o gerador de corrente contínua, o gerador síncrono e o gerador assíncrono (indução), sendo que destes geradores, o primeiro é o menos utilizado. A escolha normalmente recai entre o

gerador síncrono e o assíncrono, sendo que cada um possui as suas vantagens. A escolha do gerador também irá ser influenciada pela potência da turbina eólica em questão.

As principais vantagens do gerador assíncrono são a sua simplicidade, a sua robustez e o seu baixo custo, possuindo por sua vez como desvantagem, a necessidade de uma alimentação externa, para criar o fluxo magnético necessário para o seu funcionamento.

O gerador síncrono tem como vantagem, não gerar potência reativa durante o seu funcionamento. No caso do gerador síncrono de ímanes permanentes, não é necessário alimentação externa para funcionar. É também possível criar um gerador síncrono de ímanes permanentes que permita a não utilização de uma caixa de velocidades, pois este irá funcionar a velocidades angulares idênticas às de rotação do rotor da turbina [9].

2.4.5. Caixa de Velocidades

A caixa de velocidades é um elemento usado para aumentar a velocidade angular do rotor. Isto torna-se necessário devido aos geradores funcionarem a velocidades muito superiores às do rotor quando é acionado pelo vento [8]. A caixa de velocidades deverá permitir este aumento de velocidade angular sem comprometer em termos de eficiência, isto é, deverá haver poucas perdas mecânicas nesta transformação.

Nas turbinas modernas são normalmente aplicadas caixas de velocidade com dois ou três estágios, que usam engrenagens planetárias em combinação com outros tipos, como é o caso das paralelas.

2.4.6. Anemómetro

O anemómetro tem como função medir a velocidade do vento. Este processo é fundamental pois fornece informações essenciais para um controlo eficiente e seguro da turbina. A velocidade do vento é uma informação fundamental para se determinar a potência possível de se obter, sendo também muito importante para dar maior segurança ao sistema, nomeadamente durante ventos com velocidades excessivas para a turbina em causa.

Assim, existem vários tipos de anemómetros usados em turbinas eólicas: anemómetro de copo, anemómetro de hélice, anemómetro sónico e os sensores SODAR (*Sonic Detection and Ringing*) e LIDAR [10]. Na Figura 2.4 podem ser visualizados os diferentes anemómetros.

Os anemómetros de copo são o instrumento mais vulgar para medir a velocidade do vento. Normalmente são compostos por três “copos” ligados a um poste central. Estes anemómetros determinam a velocidade do vento através da sua rotação, que varia com a velocidade a que o vento se encontra. A cadência de rotação pode ser medida através de três métodos diferentes: contadores mecânicos que registam o número de rotações, alterações na tensão gerada (CA ou CC) e através de um interruptor fotoelétrico. A grande desvantagem encontra-se no facto de ser suscetível a ser danificado por alterações climatéricas, bem como acumulação de partículas no aparelho, como é exemplo, o pó e a neve.

O anemómetro de hélice tem um princípio de funcionalmente parecido com o anemómetro de copo. Através das hélices que estão ligadas a um gerador, geralmente CC, produz diferentes tensões dependendo da velocidade do vento. Este sensor permite obter os valores das três componentes do vento, apresentando as mesmas desvantagens que o anemómetro de copo.

Os sensores sónicos permitem a medição da velocidade do vento e também outras características atmosféricas, como por exemplo, a temperatura ambiente. Ao contrário dos sensores mecânicos não apresentam partes móveis, tornando-o assim impérvio a condições climatéricas. No entanto apresentam como desvantagens o seu custo e o elevado consumo de energia, do mesmo modo que apresenta uma precisão ligeiramente inferior, a um anemómetro de copo de elevada qualidade.

Os sensores SODAR e LISAR, são sensores remotos, em que o primeiro usa o som e o segundo o laser. Têm vindo a aparecer no mercado por possuírem a vantagem de não necessitar de estar colocados na turbina eólica, assim como, conseguirem uma precisão aproximada à dos anemómetros de copo.

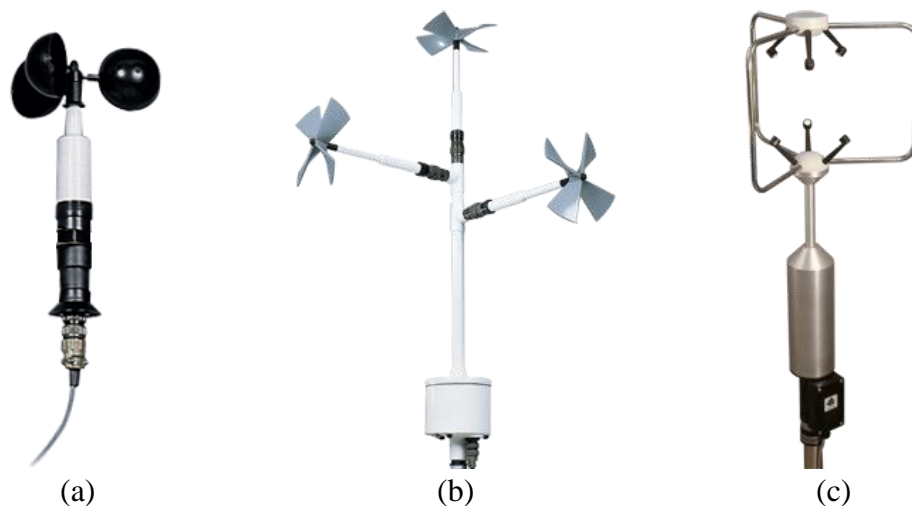


Figura 2.4 – Tipos de anemómetros usados em turbinas eólicas: (a) Anemómetro de copo; (b) Anemómetro de hélice; (c) Sensor sónico [11].

2.4.7. Sistema de Travagem

Este sistema é parte essencial na segurança da turbina, pois atua durante os momentos em que há excesso de vento, parando a turbina e assim prevenindo danos na turbina eólica.

Existem sistemas de travagem mecânicos e elétricos, sendo que, os mecânicos são muito mais utilizados [10]. Dentro dos mecânicos existem essencialmente dois tipos: travões de disco e de embraiagem. Os travões de disco funcionam de maneira idêntica aos travões usados nos automóveis, isto é, um disco está ligado ao eixo do rotor, sendo que, quando é necessário travar é aplicada uma força nesse mesmo disco, fazendo com que o eixo abraque. Os travões de embraiagem funcionam com o acionamento de molas, tornando o sistema mais seguro. Os travões elétricos funcionam com o princípio de aumentar a carga aplicada ao gerador, diminuindo assim a velocidade do rotor. Para tal são colocadas resistências e o sistema é desconectado da rede à qual estava a fornecer energia.

2.4.8. Painel de Controlo

O painel de controlo é o elemento responsável por todo o controlo que é aplicado à turbina, tendo a capacidade de gerir as informações recebidas de vários componentes, como é o caso da velocidade e direção do vento. Com os dados que obtém, atua sobre várias partes da turbina, de modo a permitir extrair o máximo de potência possível, e a proteger a turbina eólica de possíveis danos, causados por ventos excessivos. Para tal, atua sobre, por exemplo, os sistemas de controlo de *pitch* e de *yaw*.

2.4.9. Torre

A função da torre é suportar e elevar a *nacelle* da turbina eólica. A altura da torre deverá ser igual ou superior ao diâmetro do rotor. Como já foi referido, quanto maior for a altura, maior é a velocidade e estabilidade do vento, sendo que o contrário sucede a baixa altitude, em que o vento é mais turbulento e atinge velocidades menores.

Na Figura 2.5 estão representados os diferentes tipos de torres mais usadas: a torre de treliça, a torre tubular e a torre *Guyed* [10]. As torres do tipo treliça foram muito usadas inicialmente, sendo mais tarde substituídas pelas torres tubulares, devido às vantagens apresentadas pela torre tubular, em relação à de treliça. A torre tubular, ao contrário da torre de treliça, não apresenta muitas ligações em que requer aparafusamento, evitando a constante necessidade de manutenção e consequentemente

tornando o sistema mais seguro. Para além disso a torre tubular apresenta um local coberto de acesso à nacelle da turbina para manutenção.

As torres *Guyed* permitem atingir alturas elevadas e conseqüente maior potência, tornando o uso desta torre muito frequente para turbinas de pequena potência. Ao contrário das torres tubulares, o tubo principal é de menor diâmetro, sendo que este é suportado por 3 cabos, normalmente de aço trançado, que estão espaçados em volta do tubo em 120 graus. Isto traduz-se numa vantagem devido ao facto de ser necessário menos materiais na construção do tubo, diminuindo o seu custo. Este tipo de torre ocupa mais espaço em relação a uma torre tubular.

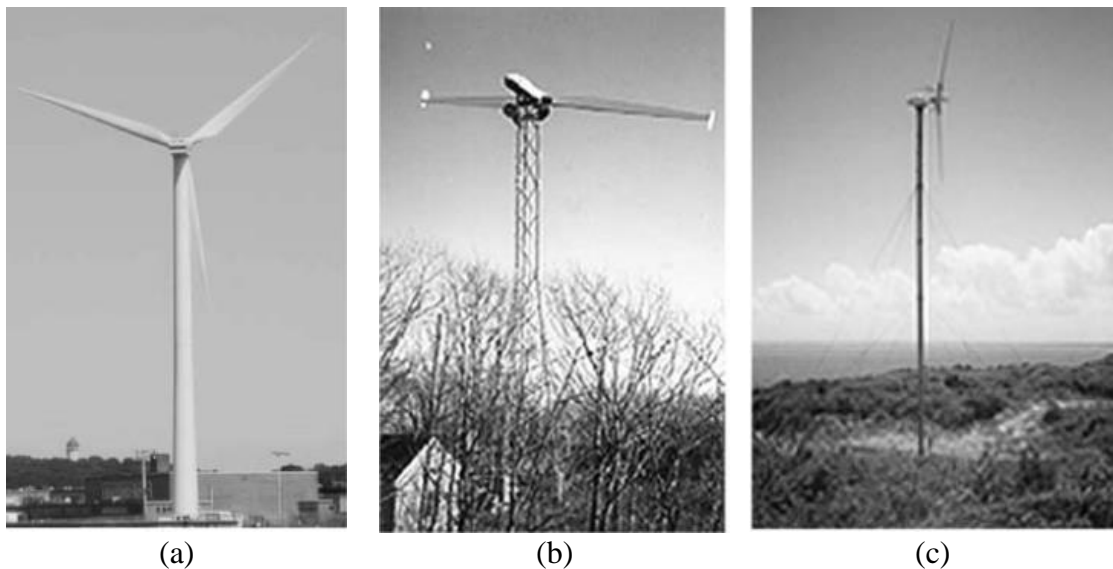


Figura 2.5 – Tipos de torre utilizados para elevar turbinas eólicas: (a) Torre Tubular; (b) Torre de Treliça; (c) Torre Guyed [10].

2.5. Sistemas de Armazenamento

Para sistemas de produção de energia isolados, é essencial a existência de sistemas que tenham a capacidade de armazenar energia. Os sistemas de armazenamento abordados são: bombagem, ar comprimido, baterias, hidrogénio e flywheel.

2.5.1. Bombagem

Este tipo de sistema de armazenamento tem como base de funcionamento, o armazenamento de água em reservatórios, com alturas diferentes. O excedente de energia elétrica produzida por fontes, normalmente de origem renovável, nas horas de vazio, isto é, períodos do dia em que há menos utilização de energia elétrica, pode ser utilizado para acionar uma bomba/gerador para deslocar água do reservatório mais baixo, para um reservatório mais alto, armazenando assim energia na forma de potência.

Nas horas de cheia, a água armazenada no reservatório superior, circula no sentido contrário ao previamente dito, fazendo acionar a bomba/gerador, produzindo assim energia elétrica de modo a colmatar a falta de energia [12]. Na Figura 2.6 está representada uma figura ilustrativa do funcionamento acima mencionado.

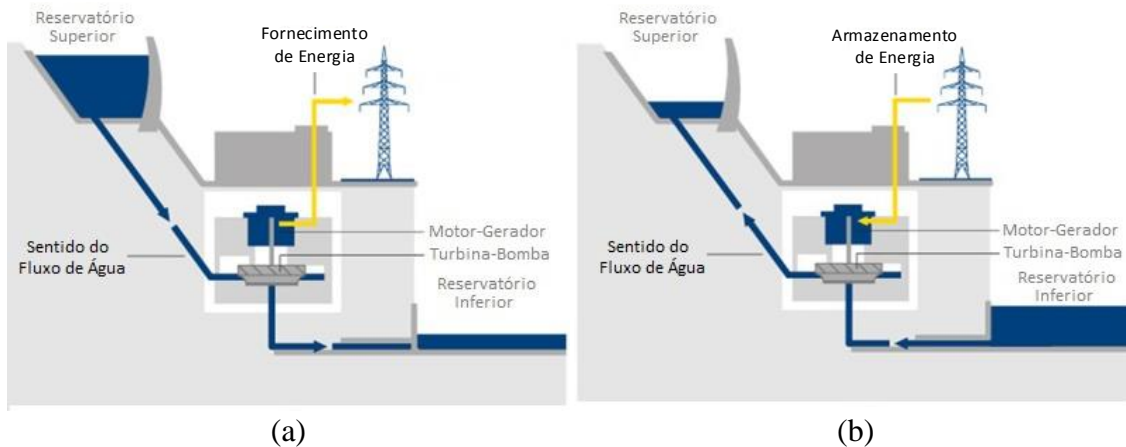


Figura 2.6 - Os dois modos de funcionamento do sistema de bombeamento: (a) Geração de energia; (b) Armazenamento de energia [13].

No entanto, este tipo de sistema não é o mais adequado para sistemas isolados devido as suas grandes restrições sobre o espaço físico que necessita bem como a necessidade de uma alteração elevada de relevo para ser funcional. Neste sentido têm surgido outras alternativas para o mesmo princípio de funcionamento, sendo que uma delas é o GPM (*Gravity Power Module*), que se encontra neste momento em fase de desenvolvimento. Na Figura 2.7 está representado este mesmo sistema.

O funcionamento é parecido com o caso do sistema anterior. Durante as horas de vazio, a energia elétrica produzida em excesso é usada para acionar um motor/gerador, que causa um fluxo de água, que irá fazer o peso subir, armazenando desta forma energia sobre forma de energia potencial. Quando é necessária energia elétrica, isto é, nas horas de cheia, o peso irá começar a descer, causando um fluxo oposto ao causado pela bomba no caso anterior. Com isto, irá ser acionada o motor/gerador, produzindo energia.

Ao contrário do sistema tradicional, este tipo de sistema não tem muitas limitações em termos de tamanho físico, visto que é construído no subsolo. Para além disto apresenta as seguintes vantagens [14]:

- Rápida entrada em funcionamento (cerca de 20 segundos);
- Boa eficiência (75% a 80%);
- Rápida construção e com materiais baratos;
- Longo tempo de vida.

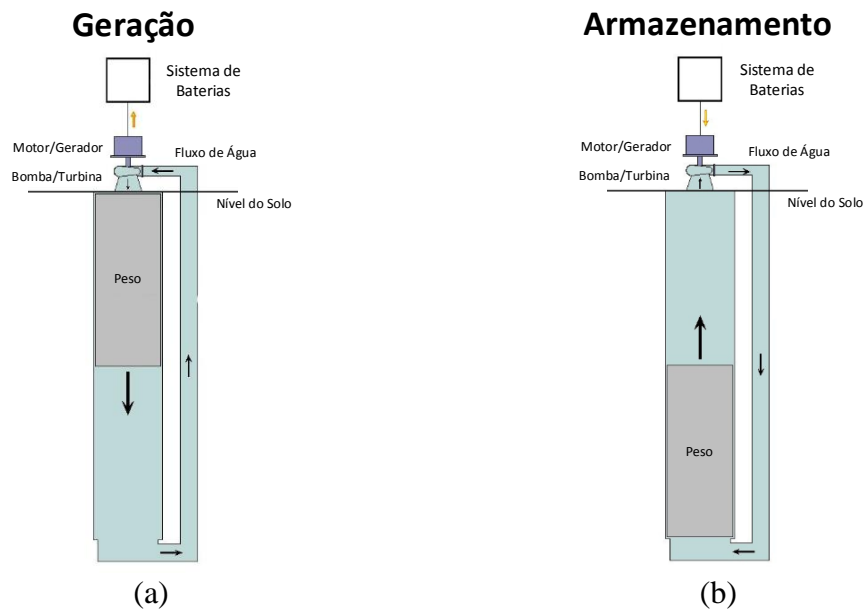


Figura 2.7 – Os dois modos de funcionamento do GPM: (a) Geração; (b) Armazenamento [15].

2.5.2. Ar comprimido

O sistema de armazenamento de energia por ar comprimido, também conhecido por CAES (*Compressed Air Energy Storage*), consiste no armazenamento de energia sobre forma de ar comprimido durante os períodos em que há excesso de energia de forma a evitar perdas de energia e usá-la mais tarde durante períodos de geração de energia mais fracos. Este processo é recorrente em todos os tipos de CAES, sendo que a maior diferença reside no uso ou não de combustível durante a conversão da energia armazenada sob forma de ar comprimido em energia elétrica através de um dispositivo apropriado para tal.

Na Figura 2.8 está representado um sistema isolado com uma fonte de energia eólica. Como referido anteriormente, a energia em excesso é armazenada sob forma de ar comprimido, sendo que é depois usada de forma a superalimentar o motor a diesel aumentando assim a sua potência e reduzindo o consumo de combustível.

Também é possível transformar a energia sob forma de ar comprimido em energia elétrica sem o uso de um combustível. Recorrendo a motores de ar comprimido é possível extrair essa mesma energia, no entanto com a tecnologia atual não é possível produzir energia suficiente para alimentar um sistema isolado de forma satisfatória. Neste momento, este tipo de sistema está a ser desenvolvido com o intuito de ser usado na indústria dos transportes, sendo a MDI (*Motor Development International*) uma das empresas envolvidas [16].

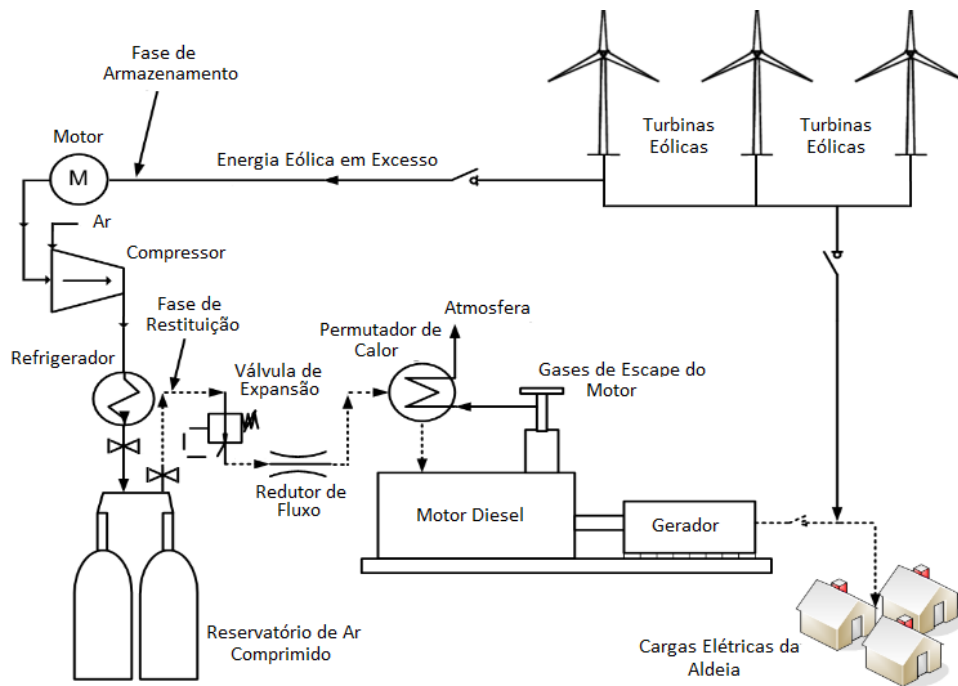


Figura 2.8 – Funcionamento do sistema CAES [8].

2.5.3. Baterias

Existem vários tipos de baterias, no entanto só algumas são interessantes do ponto de vista de armazenamento em grande escala. Aqui serão referidas três tipos de baterias mais importantes deste ponto de vista.

2.5.3.1. Bateria de Ácido Chumbo

Estas baterias são constituídas essencialmente por três partes: um cátodo, que é dióxido de chumbo, um ânodo, que é chumbo, e um eletrólito que neste caso é ácido sulfúrico. Este último tem a função de conduzir a carga entre o cátodo e o ânodo. Durante o processo de descarga da bateria, cada eletrodo é convertido para sulfato de chumbo, consumindo o ácido sulfúrico que serve de eletrólito. Durante o processo de carregamento, o sulfato de chumbo é transformado de volta para ácido sulfúrico, e no cátodo fica o dióxido de chumbo e no ânodo o chumbo puro. Na Figura 2.9 está ilustrada esta bateria bem como os seus componentes principais que a compõe.

Neste momento, as baterias de ácido de chumbo são as baterias mais baratas por kWh. No entanto, apresentam baixa densidade de energia e um ciclo de vida relativamente pequeno. O ciclo de vida refere-se ao número de ciclos de carga e descarga antes de a bateria atingir valores de carga inferiores a 80% do original [12]. Este tipo de baterias não é o mais adequado para aplicações de mobilidade elétrica, devido ao peso por energia (energia específica), no entanto são uma opção viável para aplicações de armazenamento em locais isolados. Estão a ser desenvolvidas técnicas, de

forma a aumentar os seus ciclos de vida, que se trata da maior desvantagem destas baterias.

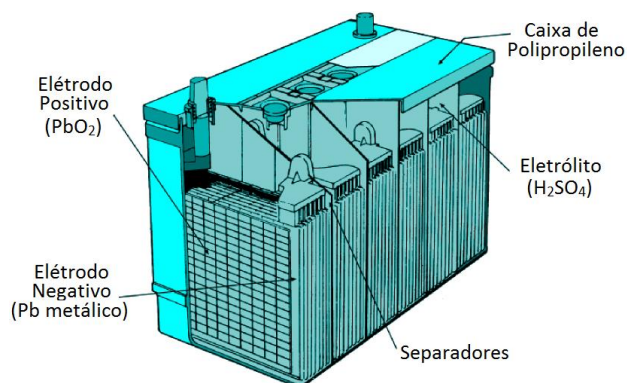


Figura 2.9 – Componentes da bateria de ácido chumbo [17].

O número de ciclos de vida é limitado pela profundidade de descarga das baterias. Caso as baterias sejam frequentemente descarregadas até aos níveis mínimos de carga, os ciclos de vida das baterias irão ser severamente limitados. Outro aspeto a ter em conta é a temperatura a que a bateria está exposta. A temperatura normal de funcionamento ronda os $27\text{ }^{\circ}\text{C}$, sendo que, se a temperatura diminuir para os $5\text{ }^{\circ}\text{C}$ ou menos, o número de ciclos de vida pode ser reduzido para 50%. Durante o funcionamento normal da bateria, esta pode atingir valores de eficiência entre os 75% e 85% [8].

2.5.3.2. Alta Temperatura Sódio-Beta

Existem dois modelos desta bateria, sendo que ambos usam como ânodo, o sódio derretido (líquido), usando os iões de sódio para transportar a carga elétrica. A diferença entre estes está no cátodo, em que num é usado o enxofre líquido, sendo este denominado de Na-S, e no outro é usado um cátodo de cloreto de níquel em estado sólido, denominando-se de Na-NiCl₂. Ambos incluem um eletrólito de cerâmica, denominado de alumina-beta. Este permite uma condutividade iónica parecida com a de um típico eletrólito líquido, mas que no entanto necessita de elevadas temperaturas. Este eletrólito garante alta eficiência e que não há auto-descarga.

O maior desafio prende-se na necessidade de manter a bateria a uma temperatura de 300°C , sendo que a falha no cumprimento deste requisito pode causar problemas à bateria, podendo mesmo causar a sua destruição. Na Figura 2.10 está apresentada a bateria referida.

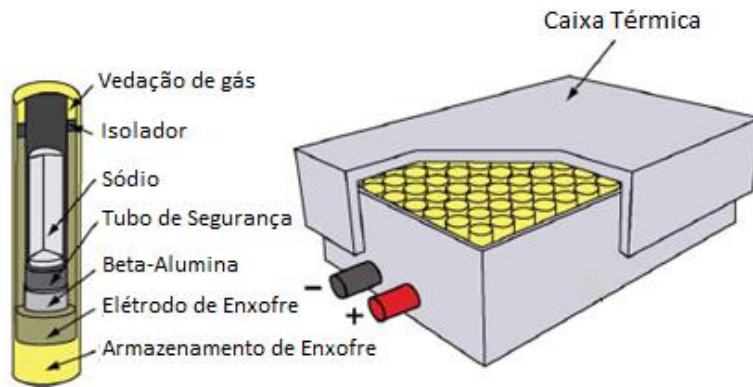


Figura 2.10 – Componentes da bateria de sódio-enxofre [18].

De realçar que este tipo de baterias apresenta uma elevada densidade de energia e potência até 4 vezes superior ao de uma bateria de ácido chumbo. Outro aspecto importante é o facto de ter um longo ciclo de vida. Utiliza matérias de baixo custo e apresenta uma boa segurança. Apresenta uma eficiência entre os 86% e os 89% [12].

2.5.3.3. Flow Battery

A bateria é composta por dois eléctrodos separados por uma membrana que permite a passagem de iões. Existindo assim dois tanques, sendo que cada um contém um eletrólito líquido diferente, sendo que estes eletrólitos irão ser bombeados entre um dos eléctrodos e a membrana anteriormente referida. Na Figura 2.11 está representado um diagrama do funcionamento deste sistema. A membrana para além de permitir o fluxo de iões, também tem a função de separar os dois eletrólitos. A energia é armazenada nos materiais ativos dissolvidos no eletrólito, que são armazenados externamente nos tanques. Este eletrólito passa pelos eléctrodos durante o processo de carga e descarga.

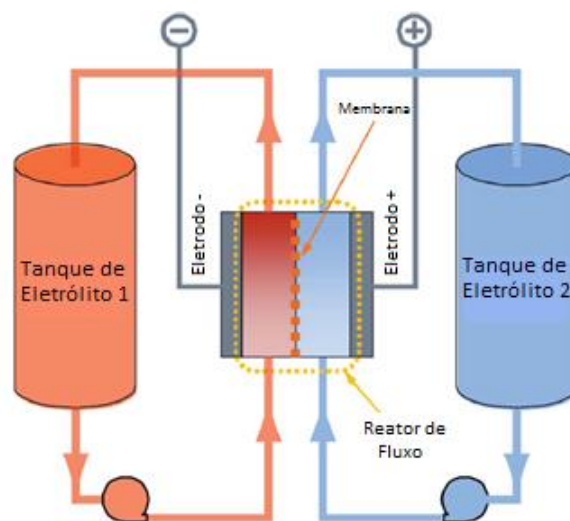


Figura 2.11 – Diagrama de funcionamento da *flow battery* [18].

A grande vantagem deste tipo de bateria é que a quantidade de energia armazenada só depende dos tanques externos, sendo que a potência que é capaz de fornecer depende da área da membrana por onde flui o eletrólito. Também apresenta um longo ciclo de vida. No entanto, também tem as suas desvantagens dando especial relevância à sua baixa densidade de energia, sendo ainda menor que a bateria de ácido chumbo. As outras desvantagens estão ligadas à complexidade do sistema, nomeadamente, o armazenamento e bombeamento do eletrólito e o controlo do sistema.

Existem várias composições possíveis destes eletrólitos usados nesta bateria, sendo que, as características variam com os diferentes eletrólitos. As eficiências destas baterias variam entre os 75% e os 80%, para os tipos existentes [12].

2.5.4. Células de Combustível

É possível utilizar o hidrogénio para obter eletricidade através de um motor de combustão ou célula de combustível, sendo que esta última têm sido alvo de maior interesse e conseqüente desenvolvimento. As células de combustível (Figura 2.12) combinam hidrogénio com oxigénio para produzir eletricidade. Também produzem calor e água através desta reação química.

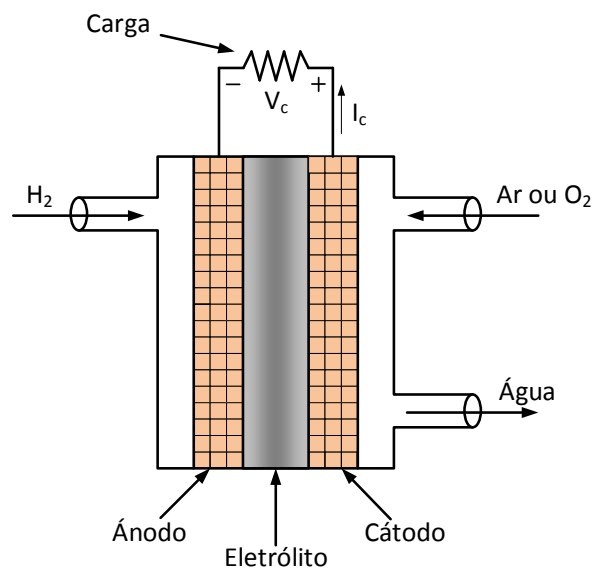


Figura 2.12 – Diagrama de funcionamento de uma célula de combustível.

Existem várias fontes que usam diversificados métodos para extrair hidrogénio. Uma das técnicas é a eletrólise, mas que no entanto é bastante dispendiosa. No entanto, juntamente com fontes de energias renováveis poderá ser uma boa solução, tornando as horas de vazio em produção de hidrogénio derivada da energia em excesso extraída por estas fontes. Recentemente, tem-se apostado na produção de eletrolisadores com elevada eficiência para que as perdas de energia durante o processo de eletrólise não

sejam grandes, e assim melhorem a eficiência, tornando esta solução ainda mais atrativa. Existem outras soluções igualmente ecológicas como é o caso da foto conversão e bio conversão, sendo que ambas se encontram em fase de desenvolvimento. Na Figura 2.13 estão representadas as várias formas de obtenção do hidrogénio.

Durante as horas de vazio é possível utilizar a energia em excesso para produção de hidrogénio recorrendo a um dos métodos referidos na Figura 2.13. Desta forma quando for necessária mais energia (horas cheias), irá ser usado o hidrogénio produzido para obter energia através de uma célula de combustível.

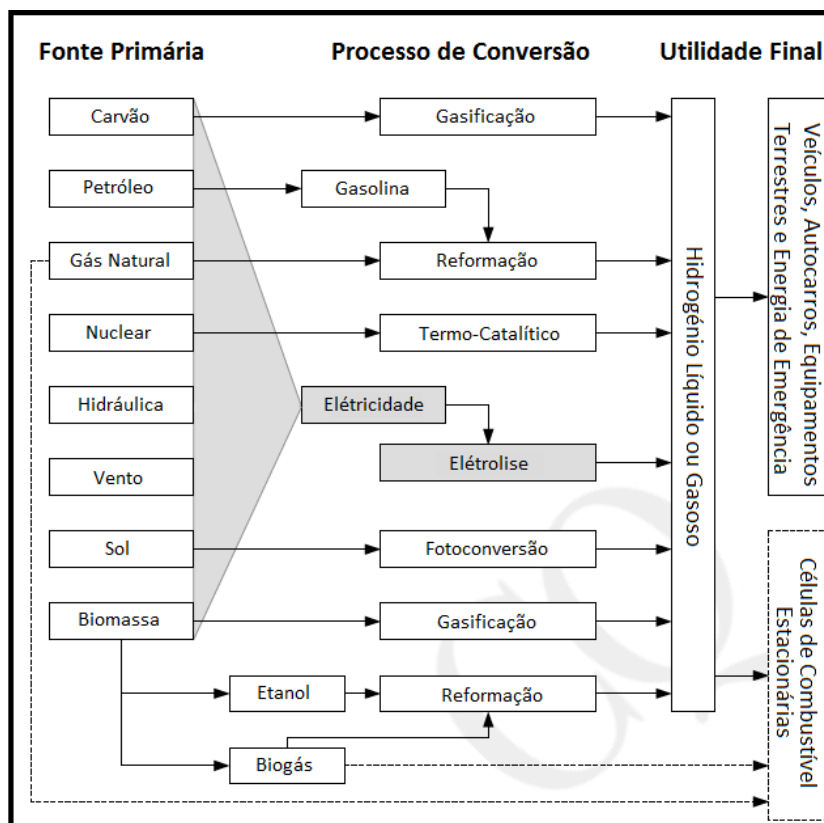


Figura 2.13 – Fontes de obtenção de hidrogénio [12].

2.5.5. Flywheel

A *flywheel*, também conhecida como volante de inércia, armazena energia cinética através da aplicação de um movimento rotacional a um disco ou cilindro, sendo essa energia cinética usada para regenerar energia eléctrica mais tarde através de um gerador eléctrico. A quantidade de energia armazenada na *flywheel* depende das suas dimensões, da sua massa e da velocidade de rotação. Este último é o fator mais importante, visto que se a velocidade de rotação duplicar, a energia armazenar quadruplica. Na Figura 2.14 está apresentada uma *flywheel* e os seus componentes.

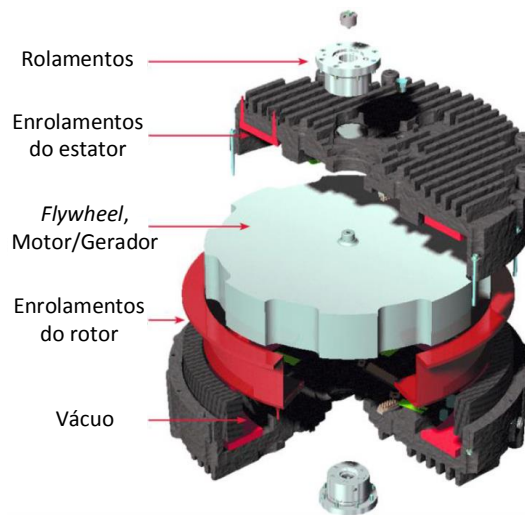


Figura 2.14 – *Flywheel* e seus componentes [12].

As *flywheels* têm elevada potência e densidade de energia, bem como, um número de ciclos de vida extremamente elevado. São tipicamente usadas em aplicações de qualidade de energia e de transporte, que necessitam de um número elevado de ciclos de carga e descarga. A eficiência deste sistema ronda os 80%, sendo que, pode atingir valores de 90% [12]. Na Figura 2.15 estão apresentados dois sistemas diferentes no qual é usada a *flywheel*.

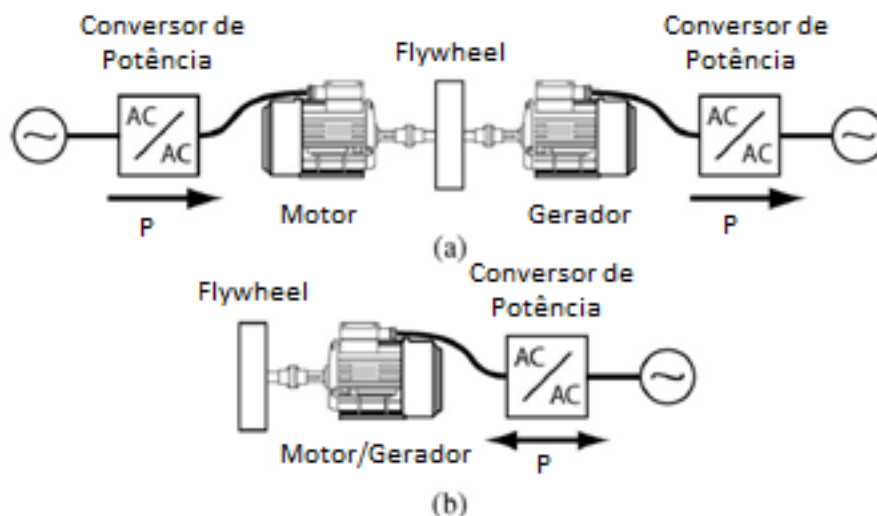


Figura 2.15 – Dois tipos de sistemas possíveis de usar com a *flywheel*: (a) Esquema com duas máquinas elétricas, um motor para armazenar a energia e um gerador para gerar a energia; (b) Esquema com uma máquina elétrica, a máquina funciona como motor e gerador [18].

A grande dificuldade deste tipo de sistemas é diminuir a fricção nas peças mecânicas e a resistência do ar, que são a maior causa de perda de energia do sistema. Para contornar isto, têm vindo a ser desenvolvidos várias soluções, como por exemplo, o uso de vácuo no local onde há rotação do volante.

2.6. Sistemas Eólicos *On-Shore*

A grande maioria dos sistemas eólicos existentes está incluída nesta categoria. Este tipo de sistemas apresenta a vantagem de as estruturas de suporte da turbina eólica serem mais baratas e de mais fácil instalação, que num sistema *off-shore*. Para além disso, existe maior facilidade na integração com a rede elétrica e tem um acesso mais conveniente à turbina para manutenção. Assim sendo existem três tipos de sistemas on-shore: sistemas ligados à rede elétrica, sistemas híbridos e sistemas isolados.

2.6.1. Sistemas Ligados à Rede Elétrica

Este trata-se do género de sistema mais frequentemente usado, atualmente. A obtenção de energia pode ser feita tanto em grande escala, como em pequena escala. No primeiro caso, normalmente a extração de energia ocorre em parques eólicos com turbinas de grande potência. Nos últimos anos, as turbinas eólicas têm vindo a permitir a extração de cada vez mais potência e têm atingido eficiências próximas do limite teórico (aproximadamente 59% do total de energia que o vento pode fornecer). Isto resulta em parques eólicos com cada vez maior potência instalada. Quanto ao segundo caso, isto é, a produção de energia em pequena escala é feita através de unidades microeólicas que podem ser colocadas em qualquer local. Estas ligadas à rede elétrica em grande número acabam por produzir quantidades significativas de energia, sendo esta injetada na rede elétrica, reduzindo assim o uso de outras fontes não renováveis. Em ambos os casos, a energia que as turbinas eólicas poderão extrair está ainda limitado pelo tamanho das pás, sendo que o controlo do angulo de ataque das pás (*pitch*) e o controlo da direção do rotor da turbina (*yaw*) irão influenciar a energia que se pode extrair do vento.

Na Figura 2.16 encontra-se um diagrama de blocos de um sistema microeólico ligado à rede elétrica. O conversor de corrente alternada (CA) para corrente contínua (CC) tem como função, transformar a corrente alternada, vinda da turbina eólica, em corrente contínua de modo a ser possível aplicar o controlo no conversor CC/CC. Este conversor CC/CC permite aplicar um algoritmo de controlo denominado de Seguidor do Ponto Máximo de Potência (MPPT - *Maximum Power Point Tracker*) e tem como função a extração máxima de potência possível através do controlo da velocidade do gerador. O próximo bloco de potência, isto é o conversor CC/CA, tem como objetivo disponibilizar tensão alternada com os parâmetros da rede elétrica de baixa tensão, isto é, 230 V com frequência de 50 Hz.

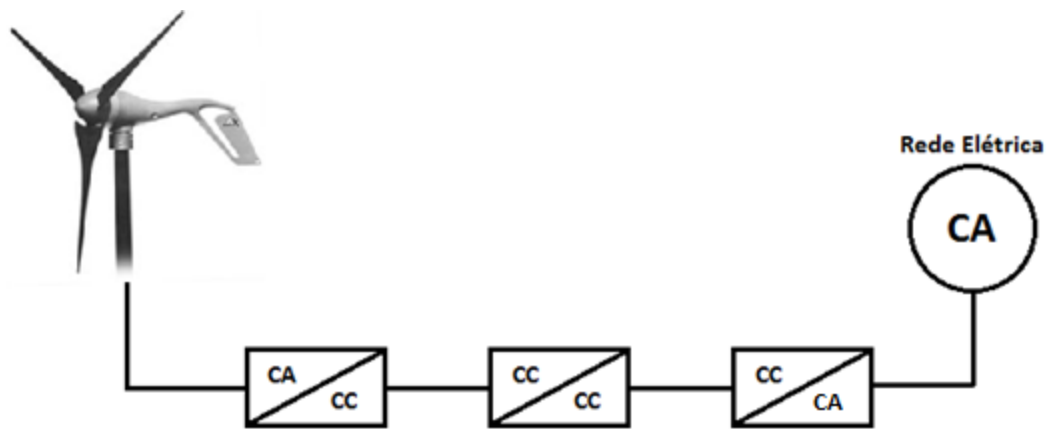


Figura 2.16 - Diagrama de blocos de um sistema ligado à rede elétrica.

2.6.2. Sistemas Isolados

Um sistema é denominado de isolado quando se encontra sem ligação à rede elétrica, normalmente verificado em locais remotos.

Em locais como ilhas ou zonas rurais, por vezes não existe a possibilidade de ligação à rede elétrica, surgindo assim a necessidade da criação de um sistema isolado dessa mesma rede. Recorrendo a uma fonte de energia renovável, como é o caso da energia eólica, é possível a criação desse sistema. No entanto, ao contrário do que se sucede no sistema ligado à rede elétrica, este tipo de sistema necessita de um sistema de armazenamento de energia para tornar o sistema mais estável. Isto verifica-se, devido à irregularidade de produção de energia renovável, isto é, para produção de energia é necessário que a fonte energética da energia renovável esteja disponível, caso contrário não haverá produção de energia durante esse período de tempo, interrompendo o funcionamento dos recetores. Com o sistema de armazenamento, durante esses períodos de tempo em que não há produção de eletricidade, o sistema pode continuar a alimentar os recetores.

Um diagrama de blocos de como é composto este sistema pode ser visualizado na Figura 2.17. O conversor CA/CC tem como finalidade transformar corrente alternada em corrente contínua, de modo, a que o conversor CC/CC possa aplicar o controlo MPPT. Para além disso, é necessário respeitar os limites de operação das baterias e do gerador para não os danificar. O conversor CC/CA tem como objetivo produzir uma tensão alternada para alimentar os recetores de acordo com as especificações usualmente requeridas. Caso existam recetores de corrente contínua, estes podem ser ligados antes desta última conversão.

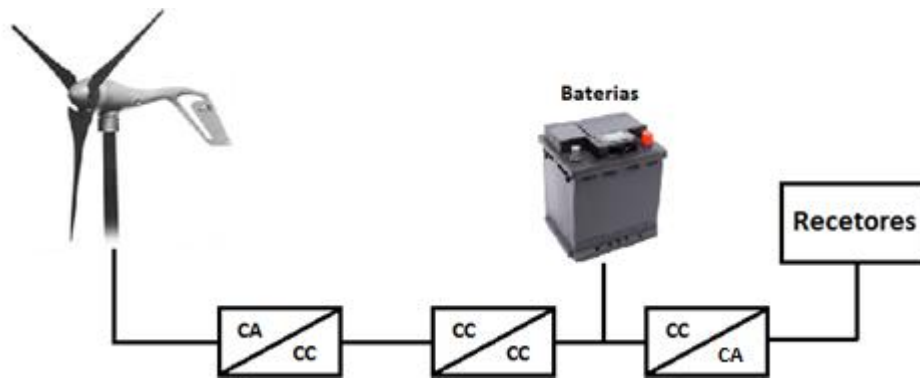


Figura 2.17 – Diagrama de blocos de um sistema isolado.

2.6.3. Sistemas Híbridos

Este tipo de sistema é normalmente usado em locais sem ligação à rede elétrica. São compostos por vários tipos de fontes de energias, como são exemplo, a energia solar e a energia eólica. Em conjugação com a turbina eólica pode ser adicionado outro tipo de energia renovável, como por exemplo a energia solar, e também um motor a *diesel*. Isto torna o sistema mais fiável pois permite a inexistência de produção de energia por parte das fontes renováveis durante um certo período de tempo, visto que o motor a *diesel* irá compensar essa falta de energia. Para além disto neste tipo de sistemas também são utilizados sistemas de armazenamento.

O diagrama de blocos da Figura 2.18 é semelhante ao diagrama de um sistema isolado. A diferença prende-se na adição de uma fonte de energia e a respetiva eletrónica de potência que pode ser necessária.

2.7. Sistemas Eólicos *Off-Shore*

Os sistemas eólicos off-shore são sistemas eólicos que são instalados normalmente no oceano ou por vezes em lagos. Estes têm vindo a tornar-se cada vez mais uma nova opção de produção de energia elétrica, através do vento. Este sistema apresenta como grande vantagem o facto de os ventos nestes locais possuírem maior velocidade e também serem mais constantes. Com isto consegue-se obter maior potência durante maiores intervalos de tempo do que num sistema on-shore. De referir que, o potencial de energia eólica off-shore na europa seria suficiente para satisfazer sete vezes os requisitos de energia em toda a europa [14]. Os problemas relacionados com o barulho produzido pelas turbinas, também deixam de estar em causa, devido à localização destas. Na Figura 2.19 estão apresentadas turbinas eólicas em funcionamento off-shore.

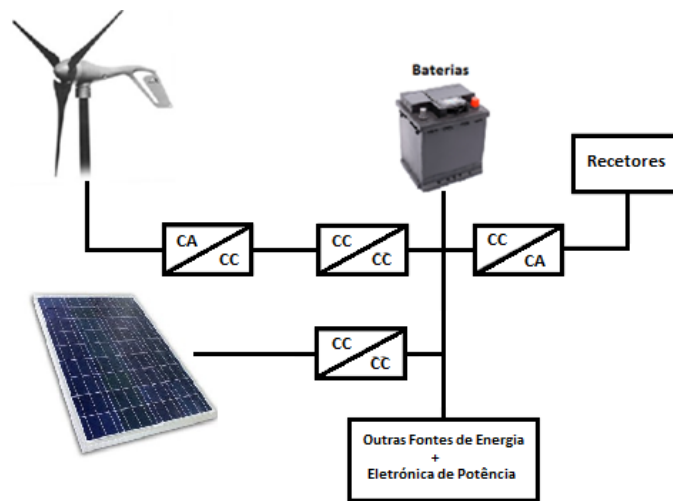


Figura 2.18 – Diagrama de blocos de um sistema híbrido.

No entanto, este sistema também apresenta algumas desvantagens. O facto de as turbinas terem que ser instaladas em oceanos ou lagos leva a maiores dificuldades de instalação, bem como problemas relacionados com a corrosão dos materiais, sendo por isso necessário especial atenção aos materiais usados. Outros aspetos a ter em conta, são a maior dificuldade na manutenção e transporte da energia elétrica produzida devido a localização.



Figura 2.19 – Turbinas eólicas usadas num sistema *off-shore* [9].

Em Portugal, mais concretamente na Aguçadoura, encontra-se em estudo um projeto pioneiro denominado de *WindFloat* que tem como intuito a extração de energia eólica em águas profundas. Está ser desenvolvido por uma parceria entre diversas empresas com principal destaque para a *EDP* e a *Principle Power*. Este projeto apresenta a vantagem de funcionar independentemente da profundidade das águas, bem como a possibilidade de construção do equipamento em solo, facilitando o seu fabrico.

A energia extraída é enviada para uma subestação na costa continental, através de cabos estendidos ao longo do fundo do mar. Na Figura 2.20 está apresentada uma unidade eólica do projeto *Windfloat*.



Figura 2.20 – Unidade eólica do projeto *Windfloat* [19].

2.8. Microturbinas Eólicas no Mercado

Nos últimos anos, tem-se tornado cada vez mais fácil a aquisição de turbinas eólicas para microprodução. Atualmente existe um número elevado de possibilidades no mercado no que se refere a turbinas de pequena potência.

É essencial conhecer alguns conceitos nas características das turbinas de modo a perceber melhor as suas propriedades:

- *Cut-in wind speed* – Velocidade mínima do vento à qual a turbina irá fornecer potência útil;
- *Rated wind speed* – Velocidade do vento à qual é atingida a potência nominal do gerador;
- *Cut-out wind speed* – Máxima velocidade do vento à qual a turbina pode fornecer potência;
- *Survival wind speed* – Velocidade máxima que a turbina suporta sem ser danificada.

Na Tabela 2.2 estão algumas turbinas eólicas disponíveis no mercado, bem como as suas características e na Figura 2.21 o seu respetivo aspeto físico.

Tabela 2.2 - Turbinas eólicas no mercado e suas características.

Turbina	Bergey Excel 1kW [20]	Endurance S-343 5 kW [21]	UGE Eddy [22]	T-Urban H2.5 [23]	Windgenerator SilentWind 48V [24]	Omniflow [25]
Tipo de Turbina	HAWT	HAWT	VAWT	HAWT	HAWT	VAWT
Potência Nominal (kW)	1	5,4	0,6	2,5	0,5	2
Número de Pás	3	3	---	3	3	---
Cut-in Wind Speed (m/s)	2,5	4,1	3,5	3,5	2,2	3
Rated Wind-Speed (m/s)	11	11	12	13	14,5	14
Cut-out Wind Speed (m/s)	Não Tem	25	32	25	Sem informação	Sem informação
Survival Wind Speed (m/s)	54	52	50	Sem informação	Sem informação	Sem informação
Tipo de Gerador	Síncrono de ímanes permanentes trifásico	Indução (Assíncrono)	Síncrono de ímanes permanentes trifásico	Síncrono de ímanes permanentes monofásico	Síncrono de ímanes permanentes trifásico	Síncrono de ímanes permanentes
Tensão de Saída	12-48 V CC	120/240 V CA 60 Hz	24 V CC	220/240 V CA 50 Hz	48 V CC	230 V CA 50 Hz

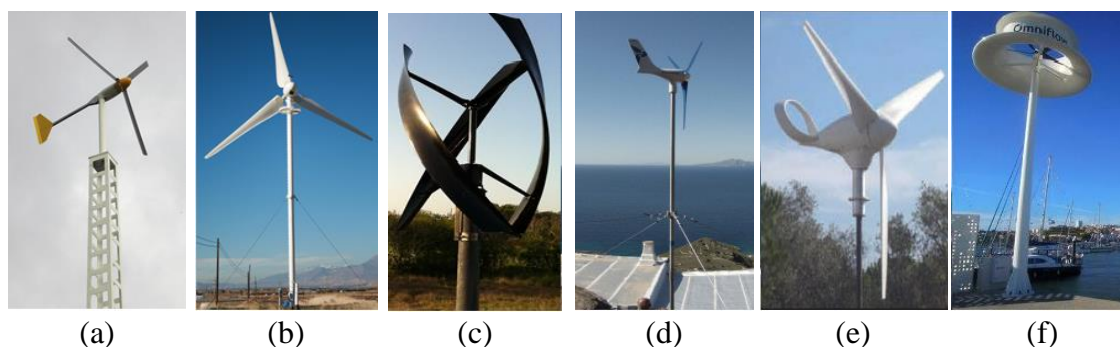


Figura 2.21 - Turbinas eólicas no mercado: (a) Bergey Excel 1 kW [20]; (b) Endurance S-343 5 kW [21]; (c) UGE Eddy [22]; (d) T-Urban H2.5 [23]; (e) Windgenerator Silentwind 48 V [24]; (f) Omniflow [25].

2.9. Conclusão

Neste capítulo foram abordados vários aspetos ligados às turbinas eólicas. As turbinas mais utilizadas são as turbinas de eixo horizontal devido à sua maior eficiência e maior potência gerada. As turbinas de eixo vertical são mais vantajosas para serem usadas em locais com ventos mais irregulares. Os diversos componentes usados nas turbinas eólicas afetam o desempenho final da turbina de diversas formas, isto é, o tamanho, a potência, a eficiência, entre outros.

Quanto aos sistemas de armazenamento, que são essenciais em sistemas isolados e híbridos, pode-se concluir após o estudo efetuado que as baterias de ácido chumbo são o

sistema mais interessante, devido ao seu custo por unidade de kWh e ao facto de não ter outras grandes limitações além de um espaço para as instalar. Instalar uma grande quantidade de baterias permite evitar descargas profundas das baterias, resultando num maior tempo de vida útil das baterias. Grande parte dos sistemas apresentados contém limitações físicas não viáveis para um sistema isolado, como é o caso do sistema de bombeamento que requer dois reservatórios com tamanho considerável em altitudes diferentes.

Salienta-se também a quantidade de soluções existentes no mercado, no que respeita as turbinas eólicas, sendo que, a maioria destas possui geradores síncronos ou assíncronos, sendo o gerador de corrente contínua cada vez menos utilizado.

CAPÍTULO 3

Eletrônica de Potência para Sistemas Microeólicos

3.1. Introdução

Neste capítulo pretende-se expor as duas partes essenciais que compõem o processo de conversão da energia mecânica absorvida pelas pás da turbina eólica em energia elétrica. Estas duas partes são o gerador elétrico e a eletrônica de potência.

O gerador elétrico é responsável pela conversão da energia mecânica em energia elétrica, sendo que os conversores de potência têm como função permitir a extração da máxima potência possível do gerador, bem como permitir que a energia seja usada pelos receptores ligados à rede elétrica isolada. No caso do sistema isolado, estes conversores devem também permitir gerir o fluxo de energia nas baterias, evitando que estas sejam sobrecarregadas ou descarregadas em demasia, aumentando assim o tempo de vida destas.

Existem diversas topologias para efetuar a interligação entre o gerador eólico e o sistema a que se pretende fornecer a energia extraída. Assim neste capítulo serão abordadas as topologias usadas, bem como os conversores de potência normalmente usados nestas aplicações.

3.2. Geradores Elétricos

O gerador elétrico é o elemento responsável por transformar a energia mecânica recebida pelas pás da turbina eólica em energia elétrica. Para a aplicação em questão existem diversos tipos de geradores elétricos adequados, sendo que cada um tem as suas vantagens e desvantagens em relação aos outros.

Neste subcapítulo vão ser abordados os geradores de corrente contínua (CC), os geradores síncronos e os geradores assíncronos (ou de indução). O gerador CC paralelo foi muito usado nas primeiras turbinas eólicas, sendo que atualmente este tipo de geradores raramente é usado [10]. Dentro dos geradores de indução, existem essencialmente dois tipos usados: Gerador de Indução de Rotor em Gaiola de Esquilo (*SCIG – Squirrel Cage Induction Generator*) e o Gerador de Indução de Rotor Bobinado (*WRIG – Wound Rotor Induction Generator*). Quanto aos geradores síncronos, existem

também essencialmente dois tipos de geradores usados: Gerador Síncrono de Rotor Bobinado (*WRSG – Wound Rotor Synchronous Generator*) e o Gerador Síncrono de Ímanes Permanentes (*PMSG – Permanente Magnet Synchronous Generator*).

3.2.1. Gerador de Corrente Contínua

Os geradores de corrente contínua (CC) foram muito usados durante o período inicial de produção de energia eólica. Estes eram essencialmente usados em pequenas aplicações, como é exemplo o carregamento de baterias. Com o passar do tempo, estes foram substituídos pelos geradores de corrente alternada (CA), pois os geradores CC apresentam grandes custos de construção, bem como constantes manutenções causadas pelas escovas do gerador [10]. Na Figura 3.1 está apresentado um exemplo de um gerador CC.

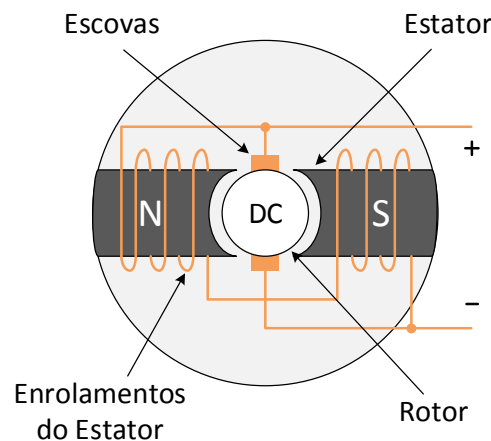


Figura 3.1 – Gerador de corrente contínua (Ligação Paralelo).

Neste gerador os pólos encontram-se no estator, sendo que os enrolamentos encontram-se em volta do mesmo. No rotor são colocados condutores em ranhuras ao longo da superfície de forma a criar espiras. Estas estão ligadas a um anel comutador que existe no eixo do rotor e que permite a retificação da tensão proveniente do gerador. A ligação elétrica dos condutores do rotor para o exterior é feita através das escovas anteriormente referidas [26].

Para funcionamento como gerador, é necessário ser aplicada uma tensão contínua aos enrolamentos do estator. De seguida é necessário aplicar um movimento de rotação ao rotor do gerador, como é o caso do movimento gerado pelas turbinas eólicas. Com esta rotação, as linhas de campo magnético produzidas no estator atravessam alternadamente as espiras no rotor, induzindo assim tensão elétrica que é dada pela seguinte equação:

$$e = v B l \quad (3.1)$$

em que e é a tensão induzida nos condutores, v é a velocidade dos condutores no rotor, B é o fluxo magnético produzido pelo estator e l é o comprimento dos condutores no rotor. A velocidade nos condutores do rotor é dada por:

$$v = \omega r \quad (3.2)$$

em que ω é a velocidade angular do rotor e r o raio do rotor [26].

3.2.2. Gerador Assíncrono

O gerador assíncrono, também conhecido como gerador de indução, é o gerador mais comum nos sistemas eólicos. É também usado noutros tipos de sistemas de produção de energia elétrica, como é exemplo, os sistemas hídricos. Este tipo de gerador tem como grande vantagem a sua simples construção, bem como a sua robustez. Para além disso apresenta baixos custos, o que o torna uma opção ainda mais interessante. A grande desvantagem deste gerador é o facto de consumir energia reativa para a excitação dos enrolamentos, sendo que se torna importante compensar este consumo com um banco de condensadores, tornando o sistema mais caro na totalidade [27]. Na Figura 3.2 está ilustrado um gerador de indução.

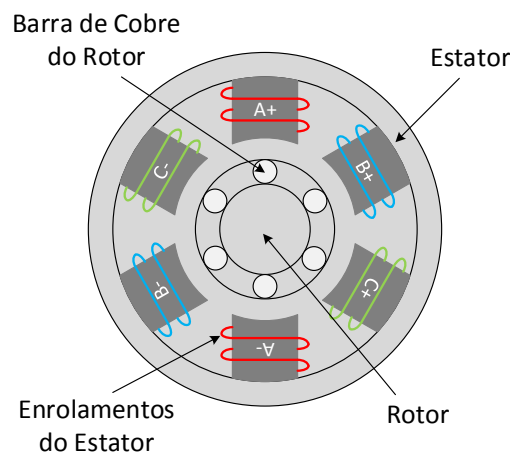


Figura 3.2 – Gerador de indução gaiola de esquilo.

Este tipo de gerador apresenta uma característica denominada de deslizamento (s). Esta refere-se à diferença entre a velocidade de rotação do rotor e a velocidade de sincronismo. Pode ser calculada por:

$$s = \frac{n_s - n}{n_s} \quad (3.3)$$

em que n_s é a velocidade de sincronismo e n é a velocidade do rotor. A velocidade de sincronismos é dada por:

$$n_s = \frac{f p}{60} \quad (3.4)$$

em que f é a frequência da tensão gerada e p é o número de pares de polos [26].

3.2.2.1. Gerador de Indução com Rotor em Gaiola de Esquilo (SCIG)

Ambos os tipos de geradores de indução referidos apresentam enrolamentos no estator, sendo que a grande diferença entre ambos encontra-se no rotor. No caso do gerador de rotor em gaiola de esquilo, o rotor é composto por barras de condutor, embebidas num núcleo laminado. Isto torna o gerador mais simples e robusto devido ao simples facto de não ter enrolamentos os quais podem ser danificados a velocidades superiores à especificada pelo gerador [10].

Este tipo de gerador tanto pode ser usado em turbinas eólicas de velocidade variável e de velocidade constante. No caso das turbinas eólicas de velocidade variável existe a necessidade de ser usado um conversor de potência bidirecional *back-to-back*, de forma a ser possível controlar os diversos parâmetros das tensões geradas (amplitude e frequência), que caso contrário seriam irregulares devido à variação na velocidade de rotação do gerador. Para funcionamento em velocidade constante, é necessário garantir que a velocidade de rotação corresponde à frequência desejada na tensão gerada, sendo que por isto é sempre necessário o uso de caixa de velocidades [27].

3.2.2.2. Gerador de Indução de Rotor Bobinado (WRIG)

Neste tipo de gerador de indução o rotor possui enrolamentos semelhantes ao estator, tornando desta forma o sistema menos robusto a excessos que sejam cometidos, por exemplo, aplicar uma velocidade rotação excessiva ao rotor pode danificar os enrolamentos.

Neste gerador é possível aceder-se aos enrolamentos do rotor, sendo assim também possível alterar as características elétricas do mesmo. Desta forma, colocando resistências variáveis nos enrolamentos do rotor é possível provocar o deslizamento ótimo para a situação de operação do gerador. Com isto, durante rajadas de vento é possível atenuar o stress mecânico causado, bem como evitar grandes flutuações de potência gerada [27].

Existe também outra topologia usando uma variante do WRIG, o Gerador de Indução com Dupla Alimentação (*DFIG – Doubly Fed Induction Generator*). Nesta

topologia, os enrolamentos do estator encontram-se ligados diretamente à rede elétrica, enquanto o rotor encontra-se ligado à rede elétrica através de um conversor de potência *back-to-back*¹ bidirecional. Isto permite um maior controlo sobre o deslizamento do gerador [27].

3.2.3. Gerador Síncrono

Este tipo de gerador possui uma construção mais complexa e é mais caro que um gerador de indução. No entanto, o facto de não necessitar de corrente de magnetização indutiva torna-se uma grande vantagem em relação ao gerador de indução [27]. Na Figura 3.3 está apresentado um exemplo de um gerador síncrono.

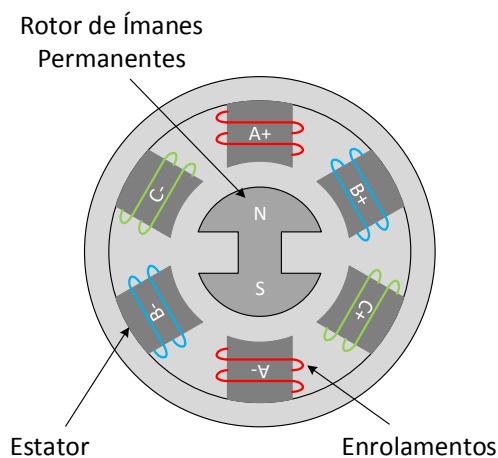


Figura 3.3 – Gerador síncrono de ímanes permanentes.

Os tipos de geradores síncronos mais usados em turbinas eólicas são: o gerador síncrono com rotor bobinado e o gerador síncrono de ímanes permanentes. Dependendo do número de pólos usados nestes geradores é possível não usar uma caixa de velocidades pois a velocidade de sincronismo irá estar próxima da velocidade de rotação das pás da turbina eólica [27].

3.2.3.1. Gerador Síncrono de Rotor Bobinado (WRSG)

Neste tipo de gerador, os pólos que se encontram no rotor são criados a partir de enrolamentos. Por cada par de pólos no rotor existem três enrolamentos no estator desfasados de 120° entre eles.

Para funcionar como gerador é necessário aplicar uma corrente no rotor e aplicar movimento rotacional no rotor, sendo que este pode ser proveniente de, por exemplo, a turbina eólica. Assim é criado um campo magnético que irá atravessar os enrolamentos

¹ Conversor de potência que permite interligar dois sistemas elétricos com características diferentes

do estator, criando tensões nos terminais do gerador, com uma frequência dependente do número de polos e da velocidade da rotação [27]. A frequência pode ser calculada usando a Equação 3.4.

Este tipo de gerador pode ser usado num sistema de velocidade variável ou constante. No caso do sistema de velocidade constante é obrigatório o uso de uma caixa de velocidades de forma a aplicar ao rotor a velocidade desejada para que a frequência das tensões geradas seja a desejada. Quanto ao sistema de velocidade variável, é necessário o uso de conversores de potência à saída dos terminais do gerador, para que estes possibilitem a transformação da frequência variável de saída do gerador na frequência desejada. Neste tipo de sistema não é obrigatório o uso de caixa de velocidades, sendo desta forma diminuídas as perdas mecânicas e reduzidos os custos totais do sistema [27].

3.2.3.2. Gerador Síncrono de Imanes Permanentes (PMSG)

Neste tipo de gerador os pólos do rotor são compostos por ímanes permanentes. Com isto, não é necessário o uso de corrente de excitação no rotor, aumentando a eficiência do sistema. O seu elevado custo em relação aos outros geradores são o grande problema. Isto sucedesse devido ao facto de os ímanes serem materiais caros e difíceis de trabalhar durante o fabrico. Existem dois tipos de rotor: rotor de polos salientes e rotor de polos lisos. O rotor de polos lisos é mais adequado para geradores de elevada velocidade, contrastando com o rotor de polos salientes, que é mais adequado para geradores de velocidades mais reduzidas, sendo que por isso é o mais usado em sistemas eólicos [27].

Este tipo de gerador é usado em turbinas de velocidade variável, sendo que por isso requerem o uso da eletrónica de potência para efetuar a interligação do gerador com a rede elétrica de forma a obter energia elétrica com boa qualidade.

3.3. Topologias Utilizadas nos Diferentes Tipos Geradores Elétricos

Os dois tipos de geradores mais usados, síncrono e assíncrono, obrigam à existência de diferentes topologias. Como foi referido anteriormente, alguns geradores necessitam de excitação externa para o seu funcionamento, tornando-os menos atrativos para sistemas isolados.

Existem duas possibilidades de ligação aos recetores: direta e indireta. Na ligação direta, não são usados conversores de potência para fazer a interligação, isto é, a tensão produzida pelo gerador é aplicada diretamente ao recetor. Com isto evitam-se as perdas

causadas pelo uso de semicondutores, sendo que o sistema desta forma não apresenta nenhum controlo sobre a potência produzida pelo gerador. Na ligação indireta, são usados conversores de potência de forma a controlar as características da tensão gerada pelo gerador. Desta forma é possível controlar o sistema da melhor forma, mas que no entanto apresenta maiores custos para o sistema, bem como introduz perdas neste.

As topologias associadas ao gerador de indução são mais usadas com o intuito de extração de energia para injetar na rede elétrica. Como tal, estes geradores não são os mais adequados para funcionamento em sistemas isolados. Como já foi referido, existem basicamente dois tipos de geradores normalmente usados em sistemas eólicos: gerador de indução de rotor bobinado (WRIG) e gerador de indução de gaiola de esquilo (SCIG).

Em relação aos geradores síncronos normalmente utilizados, um dos dois tipos abordados, o gerador síncrono de rotor bobinado (WRSG), requer excitação externa e como tal não é o mais adequado para sistemas no qual a rede elétrica não está disponível. Contrastando com este, o gerador síncrono de ímanes permanentes (PMSG), é o ideal para sistemas isolados pois não necessita de excitação externa para produzir energia para uma rede elétrica isolada.

De referir que todos estes geradores podem ser utilizados numa rede isolada, sendo que alguns poderão criar maiores dificuldades devido à necessidade de fontes de energia externas, por exemplo, para excitação dos enrolamentos do rotor do gerador de indução de rotor bobinado.

3.3.1. Gerador de Indução de Rotor em Gaiola de Esquilo (SCIG)

Este gerador permite a operação do sistema eólico tanto a velocidade constante como a velocidade variável. Consequentemente, existem dois tipos base de topologias para este gerador.

Na Figura 3.4 está representada a topologia para funcionamento a velocidade constante. Esta topologia obriga o uso de caixa de velocidades para manter a velocidade de rotação do rotor o mais constante possível. Tem como vantagem não necessitar de conversores de potência e assim evitar perdas nos semicondutores. É também importante corrigir o fator de potência causado pelo uso de um gerador de indução através de um banco de condensadores.

Para funcionamento com velocidade variável é necessário o uso de conversores de potência nos terminais do gerador de forma a alterar a amplitude e frequência para os valores desejados. Isto apresenta um custo acrescido para o sistema bem como introduz

perdas derivadas dos semicondutores. No entanto, permite um maior nível de controlo sobre o sistema. Na Figura 3.5 encontra-se representada uma topologia que utiliza o gerador de indução de rotor em gaiola de esquilo num sistema de velocidade variável.

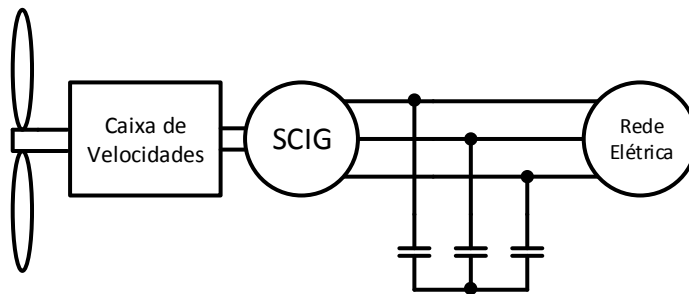


Figura 3.4 – Gerador de indução de rotor em gaiola de esquilo (SCIG) ligado diretamente à rede elétrica.

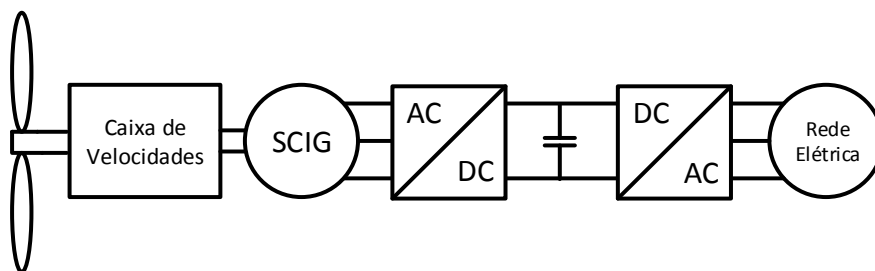


Figura 3.5 – Gerador de indução de rotor em gaiola de esquilo (SCIG) ligado à rede elétrica através de conversores de potência.

Na Figura 3.6 está apresentado o esquema elétrico do circuito de potência dos conversores usados nesta topologia.

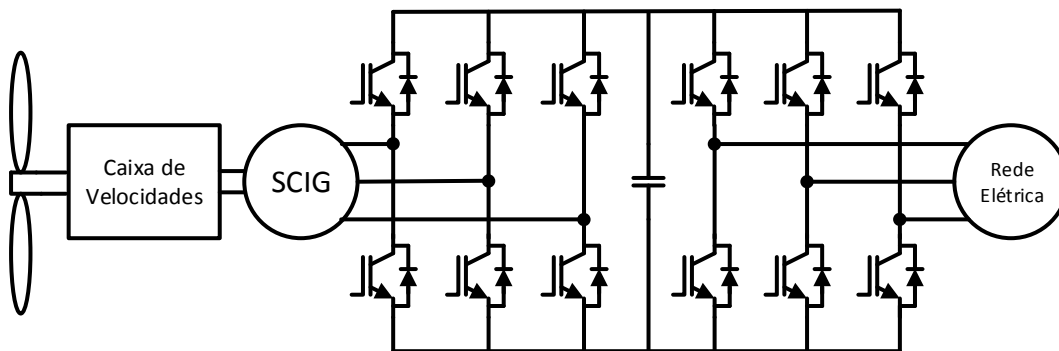


Figura 3.6 – Exemplo de um esquema elétrico do circuito de potência dos conversores para ligar um gerador de indução de rotor em gaiola de esquilo (SCIG) à rede elétrica num sistema de velocidade variável.

3.3.2. Gerador de Indução de Rotor Bobinado (WRIG)

Da mesma forma que o SCIG, o WRIG permite o funcionamento a velocidade constante e velocidade variável. Assim existem dois tipos de topologias para este tipo de gerador.

Na Figura 3.7 apresenta-se a topologia para funcionamento a velocidade constante. Para usar este tipo de topologia é imperativo o uso de uma caixa de

velocidades para manter a velocidade de rotação do rotor constante. Também são colocadas resistências variáveis nos enrolamentos do rotor de modo a conseguir ajustar o deslizamento do gerador de forma a funcionar da forma mais otimizada em termos de extração de potência [27]. Este tipo de topologia não apresenta perdas em semicondutores dos conversores de potência normalmente usados em sistemas de velocidade de variável, no entanto a introdução de resistências pode introduzir perdas no sistema.

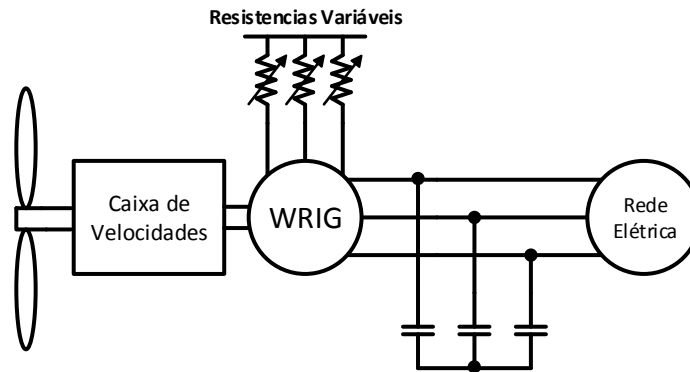


Figura 3.7 - Gerador de indução de rotor bobinado (WRIG) ligado diretamente à rede elétrica.

No sistema de velocidade variável é usado o DFIG, sendo que tanto o estator como o rotor necessitam de estar ligados à rede elétrica. De referir que é colocado um conversor de potência entre os enrolamentos do rotor e a rede elétrica. O conversor de potência permite o controlo da corrente que percorre o rotor, sendo que desta forma consegue controlar as características da tensão geradas. Este conversor também permite a correção do fator de potência que normalmente é realizado por recurso a filtros capacitivos [28]. Na Figura 3.8.apresenta-se a topologia do DFIG ligado diretamente à rede elétrica com controlo da corrente aplicada ao rotor a partir de conversores de potência

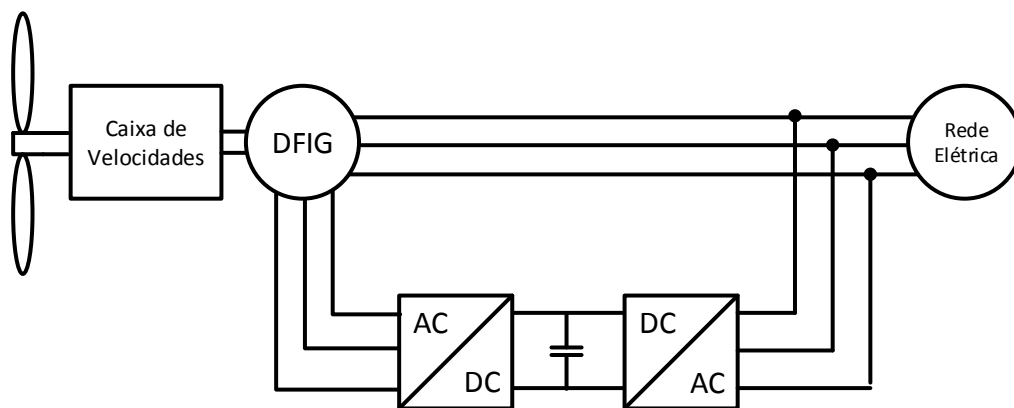


Figura 3.8 - Gerador de indução com dupla alimentação (DFIG) ligado diretamente à rede elétrica com controlo da corrente aplicada ao rotor a partir de conversores de potência.

Na Figura 3.9 está apresentado um exemplo dos conversores de eletrônica de potência que podem ser usados nesta topologia.

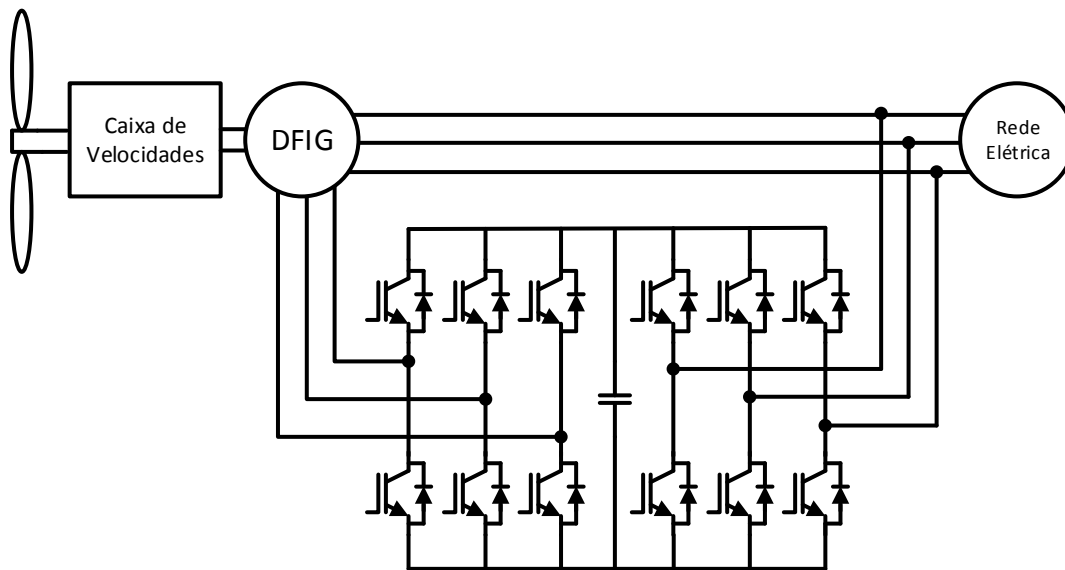


Figura 3.9 – Exemplo do esquema do circuito de potência dos conversores para um gerador de indução com dupla alimentação (DFIG) ligado diretamente à rede elétrica com controle da corrente aplicada ao rotor a partir de conversores de potência.

3.3.3. Gerador Síncrono de Rotor Bobinado (WRSG)

Este tipo de gerador pode ser usado em dois tipos de topologias diferentes: direta e indireta. Em ambos os casos necessita de alimentação de corrente contínua (CC) para o seu funcionamento. Esta corrente é normalmente produzida a partir da rede elétrica, utilizando um retificador controlado.

Na Figura 3.10 está representada a topologia de ligação direta. Nesta topologia não são usados conversores de potência entre o gerador e a rede elétrica. É utilizado um controlado para excitar os enrolamentos do rotor do gerador.

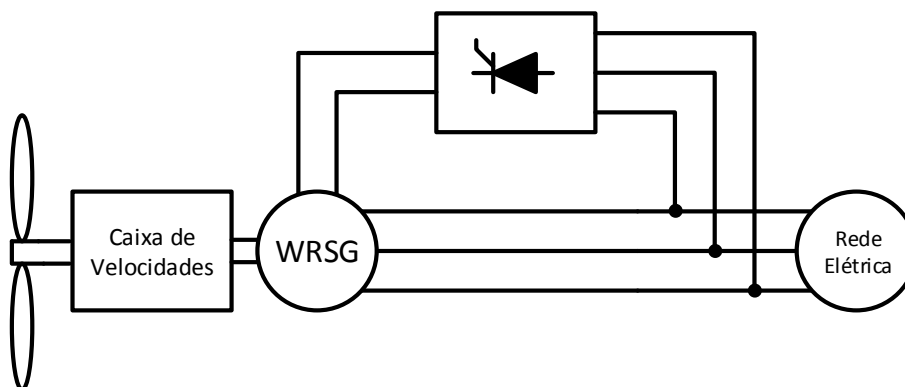


Figura 3.10 – Gerador síncrono com rotor bobinado (WRSG) ligado diretamente à rede elétrica.

Quanto à ligação indireta, são colocados conversores de potência entre o gerador e a rede elétrica. Estes têm como função colocar a tensão de saída do sistema com a

amplitude e frequência desejada. Neste tipo de topologia pode ou não ser usado uma caixa de velocidades. Na Figura 3.11 está apresentada a topologia do WRSG ligado à rede elétrica através de conversores de potência.

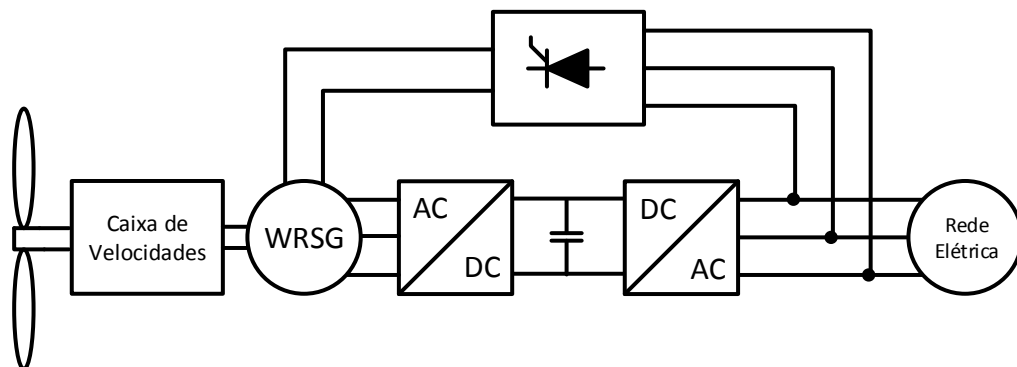


Figura 3.11 – Gerador síncrono com rotor bobinado (WRSG) ligado à rede elétrica através de conversores de potência.

Na Figura 3.12 está apresentado um exemplo da eletrônica de potência usada para se desenvolver esta topologia.

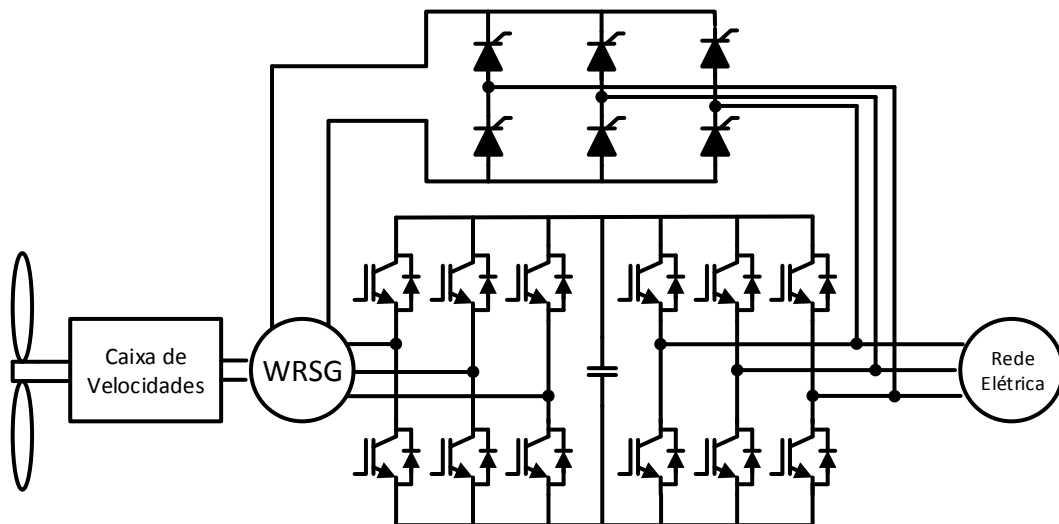


Figura 3.12 – Exemplo do esquema do circuito de potência dos conversores para um gerador síncrono com rotor bobinado (WRSG) ligado à rede elétrica através de conversores de potência.

3.3.4. Gerador Síncrono de Ímanes Permanentes (PMSG)

A topologia usada neste tipo de geradores consiste na utilização de conversores de potência entre o gerador e a rede elétrica. Este tipo de gerador não necessita de excitação externa para o rotor, sendo que por esta razão é o gerador com melhores características para sistemas isolados. Dependendo do número de pólos do gerador, pode não ser usada caixa de velocidades. Na Figura 3.13 está representada a topologia normalmente usada com este tipo de gerador.

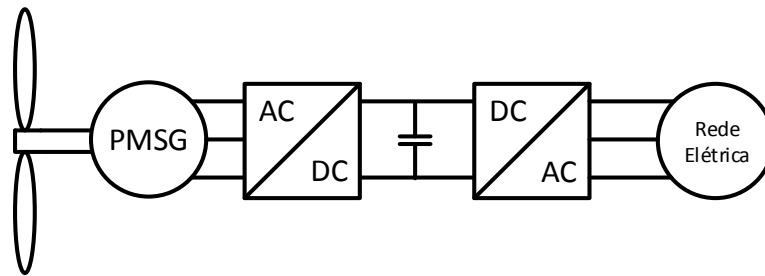


Figura 3.13 – Gerador síncrono de ímãs permanentes (PMSG) ligado à rede elétrica através de conversores de potência.

Na Figura 3.14 está representado um exemplo básico da constituição deste tipo de topologia.

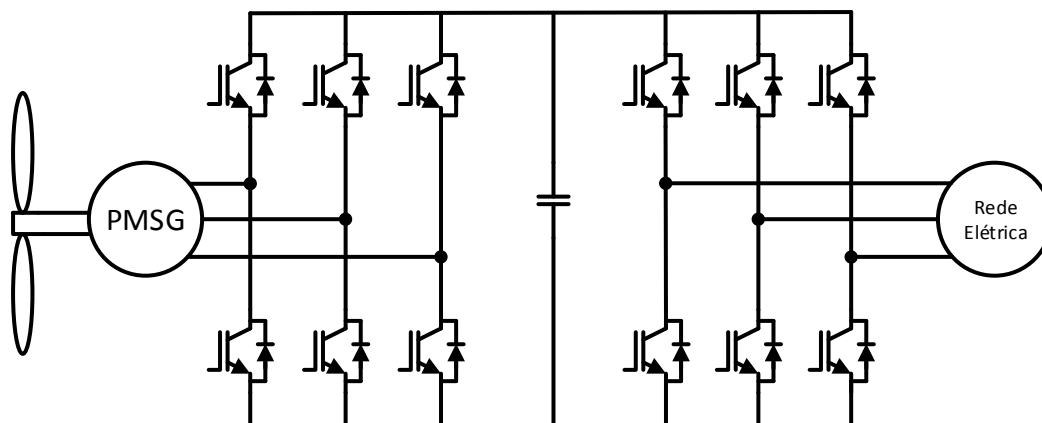


Figura 3.14 – Exemplo do esquema do circuito de potência dos conversores de um gerador síncrono de ímãs permanentes (PMSG) ligado à rede elétrica através de conversores de potência.

3.4. Conversores de Potência

Os conversores de potência são parte essencial em muitas das topologias já referidas. Estes permitem a conversão da energia extraída do gerador da turbina eólica para a forma pretendida no sistema no qual são usados. Estes podem ser divididos em 3 tipos: conversor CA/CC (também conhecido por retificador); conversor CC/CC; e conversor CC/CA (também conhecido por inversor).

3.4.1. Conversor CA/CC

O conversor CA/CC, também conhecido por retificador, permite a conversão de corrente alternada para corrente contínua. Estes conversores podem ser monofásicos ou trifásicos dependendo da aplicação. Na Figura 3.15 estão representados estes dois tipos de retificadores.

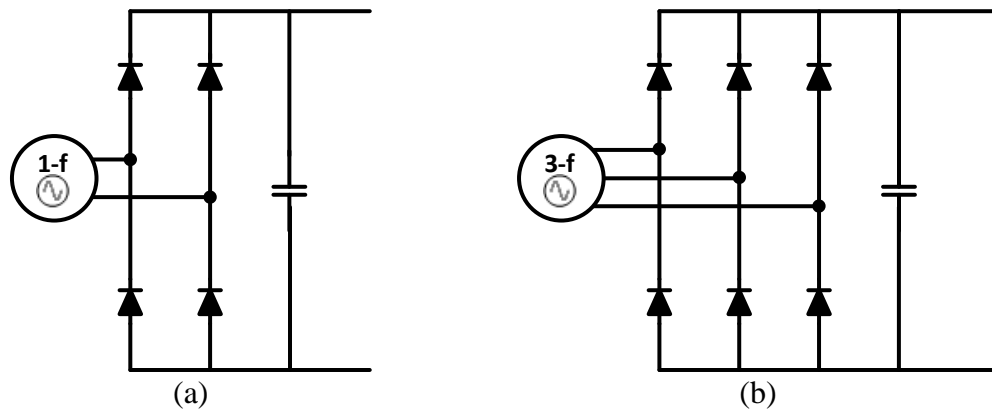


Figura 3.15 – Conversores CA/CC a) Retificador monofásico; b) Retificador trifásico.

3.4.2. Conversor CC/CC

Os conversores CC/CC têm como função regular o nível da tensão, isto é, reduzir ou aumentar a tensão conforme os requisitos do sistema no qual está inserido. Existem diversos tipos de conversores CC/CC, cada um com as suas vantagens, como por exemplo, a potência à qual apresentam melhor funcionamento. Na aplicação em desenvolvimento é necessária a redução do nível da tensão, pois a tensão produzida pelo gerador é elevada em relação a tensão das baterias. Mais informação sobre o gerador está descrita no subcapítulo 3.5. Assim sendo só conversores que permitam a redução do nível de tensão são interessantes para o sistema. Assim foram estudadas 3 possibilidades: o conversor *buck*; o conversor *flyback*; e o conversor ponte completa do tipo *buck*.

Na Figura 3.16 está apresentado o circuito elétrico do conversor *buck*. O *duty-cycle* do sinal de PWM (*Pulse Width Modulation*) aplicado ao semiconductor irá definir a tensão de saída do conversor (V_o), que pode ser calculado por:

$$V_o = V_i \delta \tag{3.5}$$

em que V_i tensão de entrada e δ o duty cycle aplicado. De referir que isto só se aplica caso o conversor esteja a trabalhar no regime contínuo, sendo que para tal a indutância do sistema terá que ter um valor suficiente para que a corrente nela não atinja valor zero.

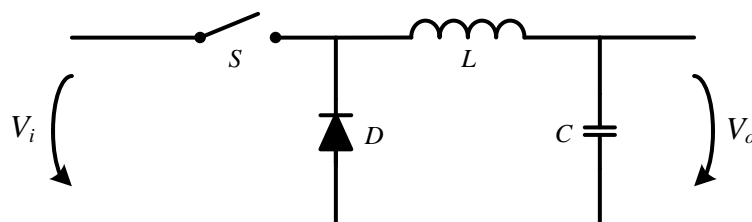


Figura 3.16 – Conversor CC/CC *buck*.

O circuito elétrico do conversor *flyback* encontra-se representado na Figura 3.17. Ao contrário do conversor *buck* este permite a redução ou aumento do nível de tensão a partir do *duty-cycle* aplicado ao semiconductor responsável pela comutação. Para além disso, também é constituído por um transformador que para além de possuir a função de isolamento também acrescenta outro elemento que permite a alteração no nível de tensão.

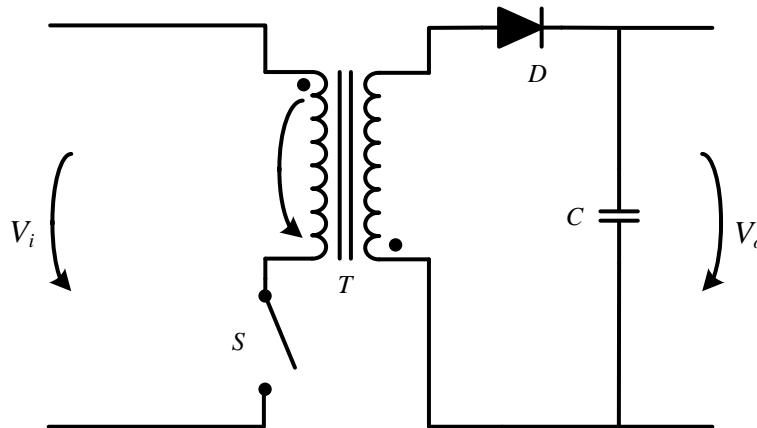


Figura 3.17 – Conversor CC/CC *flyback*.

A tensão de saída do sistema pode ser calculada partir da seguinte expressão:

$$V_o = \frac{\delta V_i}{n(1 - \delta)} \quad (3.1)$$

em que V_i é a tensão de entrada, δ o *duty-cycle* aplicado ao semiconductor e n a relação de espiras do transformador. Tal como no conversor *buck*, é necessário o conversor trabalhar em regime contínuo para isto se verificar.

Por ultimo, na Figura 3.18 está representado o circuito elétrico do conversor ponte completa do tipo *buck*.

Este conversor permite unicamente reduzir a tensão, sendo que, como no conversor anterior apresenta um transformador para isolamento e melhor controlo sobre o nível de tensão. A tensão de saída pode ser calculada pela seguinte equação:

$$V_o = \frac{\delta V_i}{2n} \quad (3.1)$$

em que V_i é a tensão de entrada, δ o *duty-cycle* e n a relação do número de espiras do transformador. Isto só é verdadeiro caso o conversor esteja a trabalhar no regime contínuo. Comparando com o conversor *flyback*, este tipo de conversor pode ser usado em aplicações de maior potência [29].

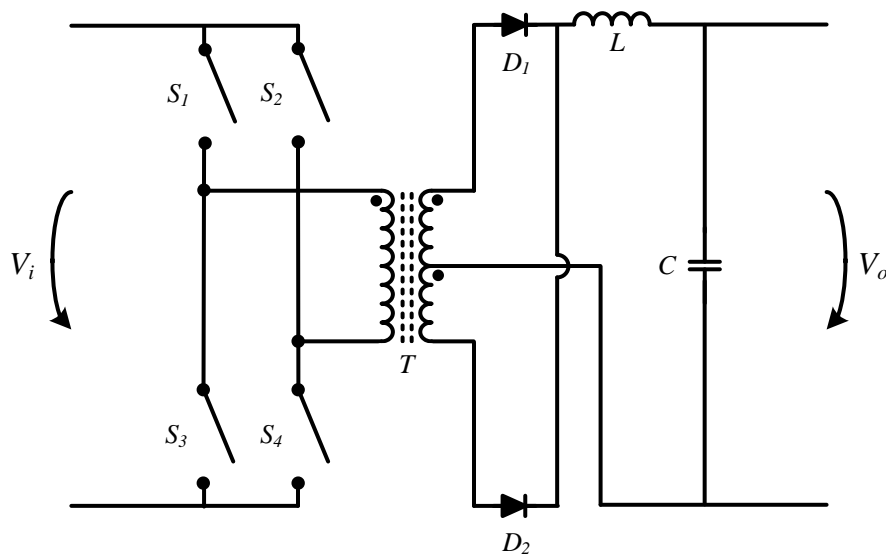


Figura 3.18 – Conversor CC/CC ponte completa do tipo buck.

3.4.3. Conversor CC/CA

Os conversores CC/CA, também conhecidos por inversores, permitem a conversão de corrente contínua para corrente alternada. Esta deverá possuir as características desejadas pelo sistema, quer seja para injetar na rede ou para funcionar como uma rede isolada, isto é, a tensão deverá apresentar a amplitude e frequência adequada para o sistema. Tal como no conversor CA/CC existem dois tipos de inversores: meia ponte e ponte completa. Para além disto os inversores podem ser monofásicos ou trifásicos.

Na Figura 3.19 está apresentado o circuito elétrico do inversor monofásico de meia onda. Este é constituído por dois semicondutores, normalmente MOSFETs ou IGBTs, e dois condensadores que tem como função a criação de um ponto neutro necessário para o funcionamento do inversor.

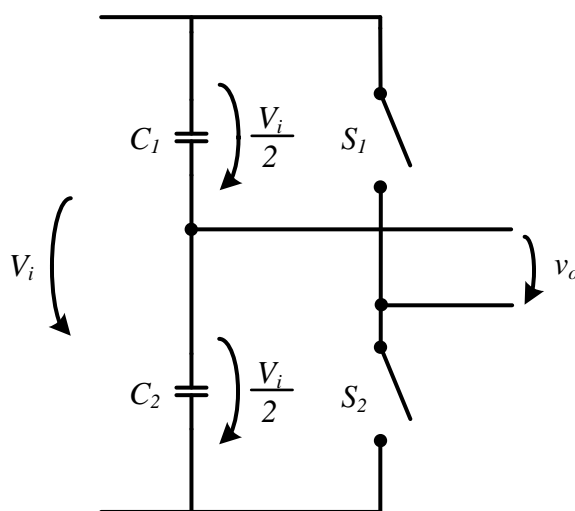


Figura 3.19 – Conversor CC/CA monofásico de meia onda.

Na Tabela 3.1 estão representados os possíveis estados do inversor monofásico. Para além destes estados é importante garantir que os dois semicondutores não se encontram em condução no mesmo instante pois originaria um curto-circuito. Também não é recomendado que durante as comutações os dois semicondutores fiquem desligados pois o estado em que irão ficar é indefinido [30].

Tabela 3.1 – Estados possíveis do conversor CC/CA monofásico de meia onda.

Estado	S ₁	S ₂	V _o
1	ON	OFF	$-\frac{V_i}{2}$
2	OFF	ON	$\frac{V_i}{2}$
3	OFF	OFF	INDEF

Na Figura 3.20 está representado o circuito elétrico do inversor monofásico de onda completa. Este é constituído por quatro semicondutores, podendo ser usado também um condensador na entrada do conversor de forma a filtrar a tensão.

As grandes vantagens deste inversor são o facto de não necessitar de ponto neutro e assim conseguir obter tensões mais elevadas na saída. Tem como desvantagem o aumento de perdas nos semicondutores devido a introdução de mais semicondutores. Para além disso, em comparação com o inversor de meia onda, a tensão de saída produzir apresenta maior qualidade. Na Tabela 3.2 estão apresentados os estados possíveis do inversor, sendo que novamente não é aconselhado ter os semicondutores todos desligados ou os dois semicondutores do mesmo braço ligados ao mesmo tempo pelas mesmas razões do inversor de meia onda [30].

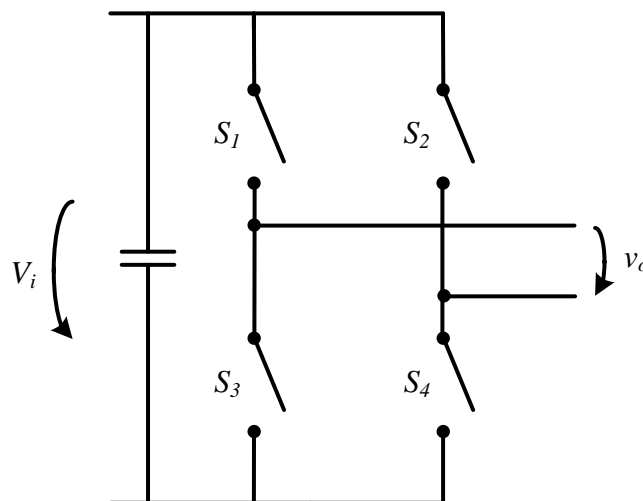


Figura 3.20 – Conversor CC/CA monofásico de onda completa.

Tabela 3.2 - Estados possíveis do conversor CC/CA monofásico de onda completa.

Estado	S ₁	S ₂	S ₃	S ₄	V _o
1	ON	OFF	OFF	ON	V _i
2	OFF	ON	ON	OFF	-V _i
3	ON	ON	OFF	OFF	0
4	OFF	OFF	ON	ON	0
5	OFF	OFF	OFF	OFF	INDEF

Quanto ao inversor trifásico, este apresenta ainda mais dois semicondutores devido ao facto de existirem três fases nas quais são produzidas tensões alternadas. Na Figura 3.21 está representado o inversor trifásico.

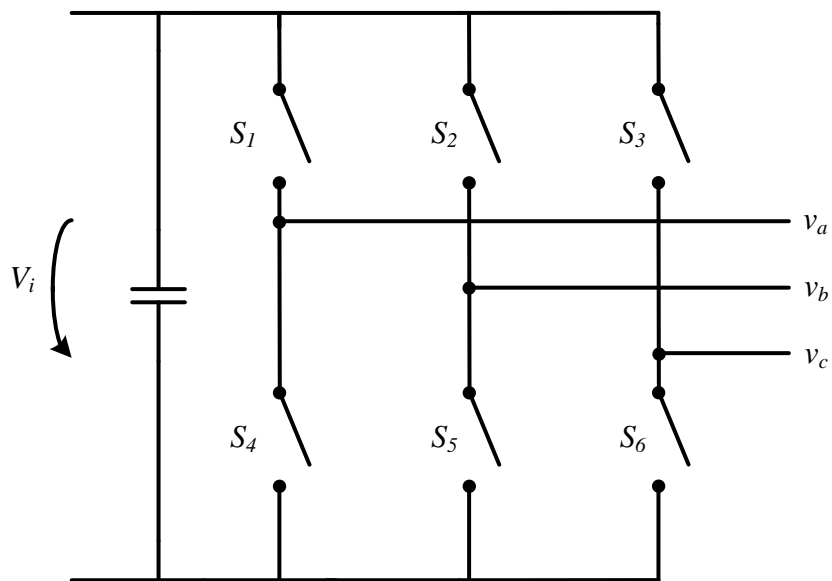


Figura 3.21 – Conversor CC/CA trifásico de onda completa.

Tal como no inversor monofásico os semicondutores do mesmo braço não podem estar ligados ao mesmo tempo de forma a não causar curto-circuito. Na Tabela 3.3 estão representados os estados possíveis do inversor [30].

Tabela 3.3 - Estados possíveis do conversor CC/CA trifásico de onda completa.

Estado	S ₁	S ₂	S ₃	S ₄	S ₅	S ₆	V _{ab}	V _{bc}	V _{ca}
1	ON	OFF	OFF	OFF	ON	ON	V _i	0	-V _i
2	ON	ON	OFF	OFF	OFF	ON	0	V _i	-V _i
3	OFF	ON	OFF	ON	OFF	ON	-V _i	V _i	0
4	OFF	ON	ON	ON	OFF	OFF	-V _i	0	V _i
5	OFF	OFF	ON	ON	ON	OFF	0	-V _i	V _i
6	ON	OFF	ON	OFF	ON	OFF	V _i	-V _i	0
7	ON	ON	ON	OFF	OFF	OFF	0	0	0
8	OFF	OFF	OFF	ON	ON	ON	0	0	0

3.5. Topologia Proposta para o Sistema Microeólico Aplicado a uma Rede Isolada

Neste subcapítulo é descrita a topologia a desenvolver. Na Figura 3.22 está apresentada a topologia proposta.

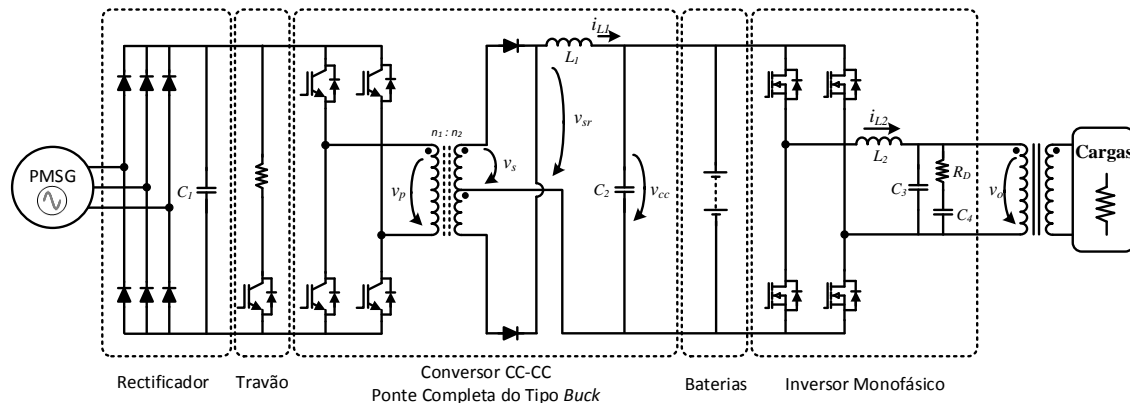


Figura 3.22 – Esquemático da topologia do sistema proposto.

A topologia a desenvolver é baseada num gerador PMSG. Esta é composta essencialmente por três conversores de potência: um conversor CA/CC (retificador), um conversor CC/CC e um conversor CC/CA (inversor). Comparando com a topologia previamente mencionada no subcapítulo 3.3.4, esta topologia não apresenta um retificador controlável. Em seu lugar é usado um retificador trifásico não controlável e um conversor CC/CC. O retificador permite a conversão da corrente alternada proveniente do gerador em corrente contínua. Esta é modificada por um conversor CC/CC que permite controlar o nível da tensão no barramento CC. Para além de controlar o nível da tensão no barramento CC, também permite implementar o controlo MPPT. Este controlo MPPT tem como intuito a extração da máxima potência possível do gerador através da alteração do *duty-cycle* do conversor CC/CC e consequente variação da velocidade do gerador. O inversor permite transformar a corrente contínua em corrente alternada com as características obrigatórias para alimentar cargas da rede isolada.

3.5.1. Gerador Síncrono de Ímanes Permanentes (PMSG)

Como já foi referido, foi usado um gerador síncrono de ímanes permanentes, mais concretamente o modelo *GL-PMG-1800* da *Ginlong Technologies*. As características disponibilizadas no *datasheet* deste gerador estão disponíveis na Tabela 3.4.

Tabela 3.4 – Características do gerador[31].

Parâmetros	Valor	Unidade
Potência Nominal	1800	W
Velocidade de Rotação Nominal	480	rpm
Corrente Nominal Retificada	6	A
Torque Nominal Requerido	44.5	N.m
Resistência na Fase	5	Ω
Isolamento	3.6	Class H
Configuração do Gerador	3 fases (estrela)	CA
Tempo de Vida	>20	anos

No mesmo *datasheet* é fornecido o gráfico da potência gerada em função da velocidade de rotação ao qual é acionado o gerador (Figura 3.23). Esta curva é essencial para verificar o funcionamento do MPPT, sendo também imprescindível em alguns tipos de controlo existentes.

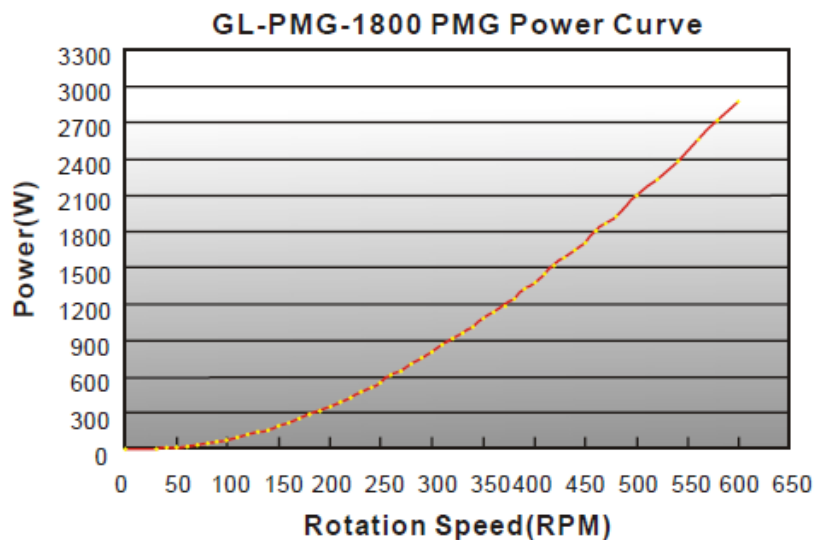


Figura 3.23 – Curva de potência disponível em função da velocidade de rotação [31].

O número de polos do gerador não é disponibilizado pelo fabricante, sendo que para o obter é necessário efetuar ensaios ao gerador. Os resultados dos ensaios efetuados estão demonstrados no Capítulo 6.

É também fornecido um gráfico da tensão produzida em vazio pelo gerador em função da velocidade de rotação ao qual é acionado o gerador (Figura 3.24). No entanto, não é referido se trata-se da tensão composta ou retificada, sendo que é necessário efetuar ensaios para o averiguar, os quais estão também demonstrados no Capítulo 6.

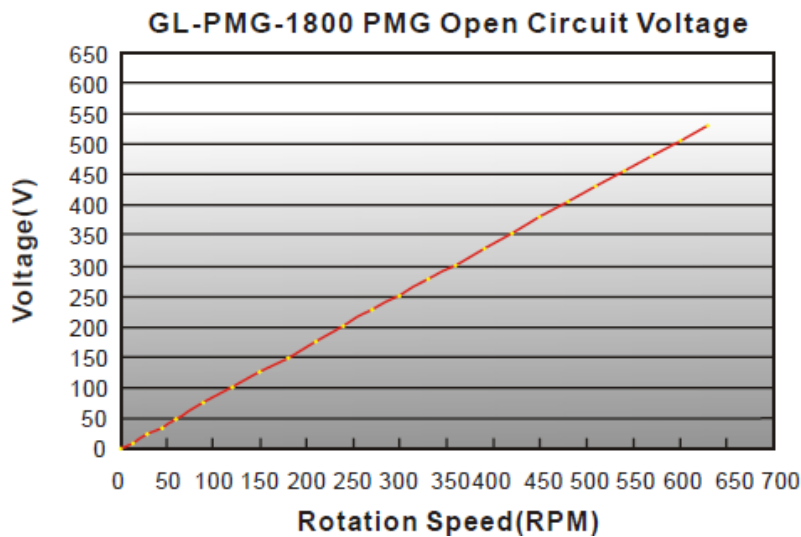


Figura 3.24 – Tensão produzida pelo gerador em função da velocidade de rotação [31].

3.5.2. Conversor CA/CC Trifásico Não Controlado

Este conversor permite transformar a corrente alterada produzida pelo gerador, em corrente contínua. Isto é essencial pois permite o uso do conversor CC/CC. O facto de ser trifásico permite um menor *ripple* na tensão contínua produzida. Outro aspeto importante neste conversor é o filtro capacitivo. Este permite reduzir o *ripple*, o que torna o sistema na sua totalidade mais estável devido à menor variação na tensão a ser aplicada ao conversor CC/CC. Este conversor está representado anteriormente na Figura 3.15 b).

3.5.3. Conversor Ponte Completa do Tipo *Buck*

Dentro dos conversores CC/CC equacionados, o conversor ponte completa do tipo *buck* foi o escolhido (Figura 3.25).

Tendo em conta que as tensões produzidas pelo conversor são aplicadas a baterias de baixa tensão, as tensões elevadas geradas pelo PMSG têm que ser reduzidas significativamente. Assim, este conversor através do transformador consegue aplicar uma redução no nível de tensão produzido. Para além disto, este conversor é mais adequado para a potência nominal em questão (1800W) que o conversor *flyback*, que é normalmente usado em potências a rondar entre os 200W e os 300W [29]. Assim sendo, o objetivo deste conversor é a regulação da tensão no barramento CC sendo que com isto permite a implementação do controlo MPPT no sistema.

Este conversor é controlado através de sinais PWM aplicados aos IGBTs de forma a obter uma onda de tensão quadrada de *duty-cycle* variável à saída da ponte completa formada pelos 4 IGBTs. Estes sinais de PWM são gerados através da comparação de um sinal de referência com uma onda triangular portadora de elevada

frequência. Destes sinais de PWM aplicados aos IGBTs resulta uma tensão quadrada que é aplicada ao transformador que possui um ponto médio no secundário. A amplitude da tensão é reduzida de acordo com a relação de espiras. Na saída do transformador são usados dois diodos de forma a retificar a onda quadrada quer quando ela se encontra no ciclo positivo quer no ciclo negativo. O valor da tensão à saída do conversor é calculado através da Equação 3.7.

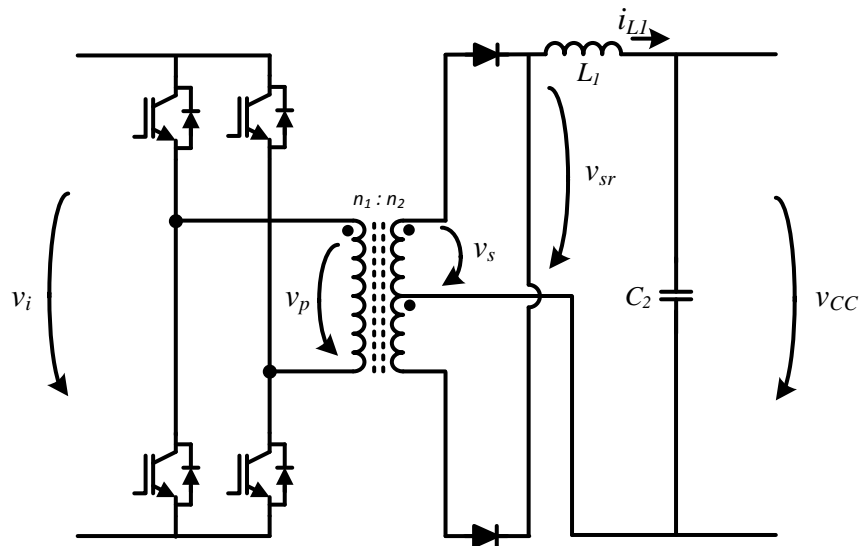


Figura 3.25 – Conversor CC/CC ponte completa do tipo buck.

Como já foi referido, este conversor deverá permitir extrair o máximo de potência disponível pelo gerador. Assim sendo, existem diversos algoritmos de MPPT, tais como Perturbação e Observação (*P&O – Perturbation and Observation*) e Realimentação do Sinal de Potência (*PSF – Power Signal Feedback*)[32]. Neste sistema decidiu-se implementar o P&O. Este é um algoritmo de controlo mais simples mas que permite ao sistema ter uma boa eficiência de extração da máxima potência do gerador. Como ponto forte, este tipo de algoritmo não precisa de saber qualquer informação sobre o gerador, sendo que se torna simples usar este algoritmo para diferentes geradores.

Na Figura 3.26, está representado o algoritmo de controlo P&O. Este controlo provoca uma alteração no *duty-cycle* do conversor (Perturbação) e verifica como é que o sistema reage (Observação). Esta perturbação no *duty-cycle* pode ser positiva (aumentar o *duty-cycle*) ou negativa (diminuir o *duty-cycle*). Se depois de uma perturbação positiva a potência extraída aumenta, a próxima perturbação irá no mesmo sentido, isto é aumentará o *duty-cycle* outra vez. No entanto, se o contrário se verificar (a potência diminuir), uma perturbação negativa irá ser aplicada ao sistema, e continuará até que a potência extraída volte a diminuir.

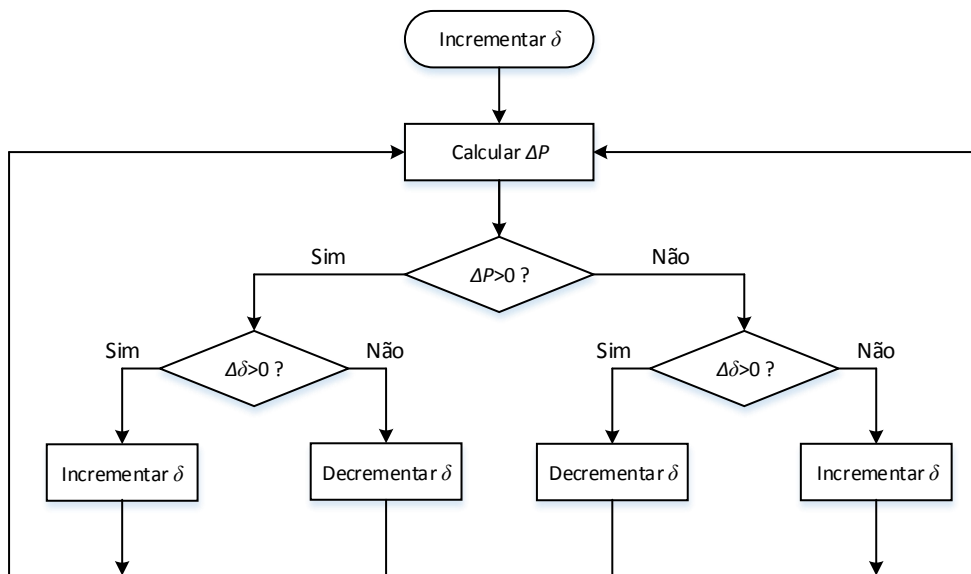


Figura 3.26 – Flowchart do algoritmo de MPPT usado (perturbação e observação).

3.5.4. Baterias de Ácido Chumbo

São parte essencial num sistema isolado, pois permitem uma maior fiabilidade ao sistema. Como já foi referido, a energia eólica não estará sempre disponível pois o vento trata-se de um recurso irregular. Utilizar as baterias no sistema permite que quando o sistema extrai energia em excesso, parte desta seja usada para carregar baterias e assim, quando esta for necessária irá ser usada para colmatar a falta de energia devido à falta de vento.

Assim sendo, as baterias usadas no sistema são baterias de ácido chumbo. A escolha recaiu nestas baterias devido ao facto de serem de baixo custo em relação à energia armazenada. Para além disso, são bastante resistentes em relação as restantes baterias, sendo mais uma razão para escolher este tipo de baterias em detrimento das outras equacionadas.

3.5.5. Inversor VSI Monofásico

O conversor CC/CA escolhido para o sistema foi o inversor monofásico de onda completa, pois este satisfaz as necessidades do sistema. Este conversor em conjunto com um transformador de saída permite obter uma tensão de saída com as características necessárias a ser aplicada às cargas ligadas a redes isolada. De referir que à saída do inversor é necessário colocar um filtro passa baixo para que a tensão de saída do conversor contenha pouca distorção harmónica. Na Figura 3.27 está representado inversor VSI monofásico com filtro passa-baixo.

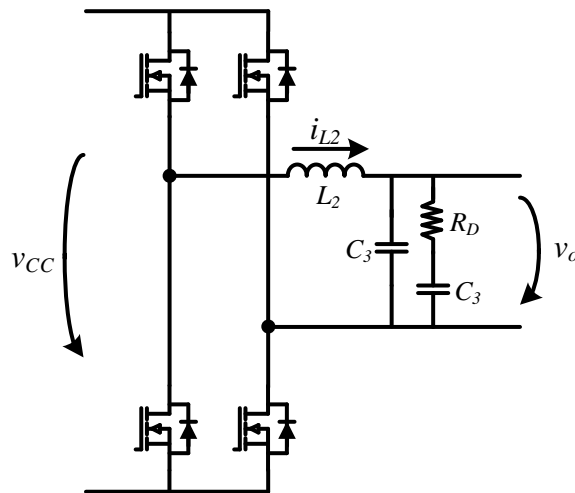


Figura 3.27 – Inverso VSI monofásico com filtro passa-baixo.

A técnica de comutação usada para obter os pulsos aplicados aos MOSFETs foi a *unipolar sinusoidal pulse-width modulation* (SPWM) [33]. Esta técnica compara uma onda triangular portadora de alta frequência com uma onda de referência sinusoidal, sendo que o sinal resultante da comparação é aplicado à gate do MOSFET superior de um braço e a negação lógica da comparação aplicada ao MOSFET inferior do mesmo braço. Para o outro braço é usada a mesma onda de referência sinusoidal mas desfasada 180° , sendo os sinais resultantes da comparação aplicados aos MOSFETs do segundo braço. A onda sinusoidal de referência deverá ter a frequência pretendida para tensão de saída do inversor. Quanto à amplitude da tensão de saída do inversor, esta será influenciada pela amplitude da onda de referência em relação à onda portadora e pode ser calculada por:

$$V_{OP} = m_a V_{CC} \quad (3.2)$$

onde V_{OP} é a amplitude da tensão de saída, m_a o índice de modulação e V_{CC} a tensão no barramento CC. O índice de modulação pode ser calculado por:

$$m_a = \frac{V_{RP}}{V_{TP}}, \quad (3.3)$$

onde V_{TP} é a amplitude da onda portadora e V_{RP} é a amplitude da onda de referência. Na prática, a amplitude da onda portadora triangular irá corresponder ao valor da tensão do barramento CC e onda de referência a tensão desejada na saída do inversor. Para além destes pormenores, é também necessário introduzir um *deadtime* (tempo morto) entre os sinais aplicados aos MOSFETs do mesmo braço, de forma a evitar que os dois MOSFETs conduzam em simultâneo, provocando um curto-circuito ao barramento CC. No entanto, a introdução do *deadtime* em conjunto com certos tipos

de cargas (por exemplo, cargas não lineares), causam distorções significativas na tensão de saída do inversor.

Com isto, é necessário introduzir algumas mudanças no controlo base do SPWM. A Figura 3.28 mostra o diagrama de controlo do inversor. Este é baseado num controlador PI com uma malha *feedforward* que permite uma resposta mais rápida do sistema ao controlo aplicado. Basicamente, este controlo compara a tensão atual na saída do inversor com a tensão esperada e altera a referência de controlo de forma a este compensar a diferença existente. Para tal, é importante que a bobine do filtro passa baixo não apresente uma indutância muito elevada, pois as quedas de tensão irão ser maiores, provocando uma maior distorção na tensão de saída do inversor, principalmente com cargas não lineares, dificultando a correção da mesma. É possível verificar este problema nas simulações efetuadas no subcapítulo 4.3.2. Uma boa escolha dos valores do filtro passa baixo irá permitir que o inversor gere uma tensão com baixa distorção harmónica.

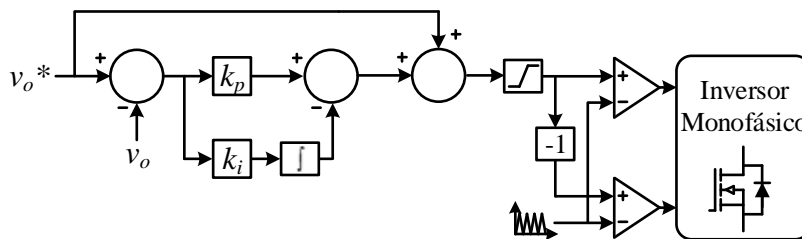


Figura 3.28 – Diagrama do controlo usado no inversor.

3.6. Conclusão

Neste capítulo foram apresentados os diversos geradores que são utilizados nas turbinas eólicas, bem como as respetivas topologias dos conversores de potência. Os diferentes geradores têm as suas vantagens e desvantagens, sendo que estas influenciam a sua escolha, nomeadamente em função da potência e tipo de sistema eólico pretendido. No caso dos sistemas eólicos para redes isoladas, o gerador síncrono de ímanes permanentes é a escolha mais apropriada devido ao facto de não necessitar de excitação externa dos enrolamentos.

Finalmente, foi apresentada a topologia proposta para este trabalho, acompanhada por uma descrição de todos os circuitos do sistema na sua totalidade. Durante a descrição dos circuitos foram discutidas as razões das escolhas efetuadas, bem como justificados os algoritmos de controlo selecionados. Foi também apresentado e descrito o algoritmo de MPPT perturbação e observação que irá ser usado com o intuito de extrair a máxima potência do gerador em função da velocidade do vento.

CAPÍTULO 4

Simulação do Sistema Microeólico Isolado

4.1. Introdução

Depois de estudada e definida a composição do sistema que vai ser desenvolvido, é necessário verificar o funcionamento das diversas partes que o compõem, bem como o sistema na sua totalidade, sendo que para tal recorre-se normalmente à simulação do projeto. Neste projeto para efetuar as simulações necessárias, foi usado o *software* PSIM 9.0 desenvolvido pela empresa *Powersim inc.*. Com recurso a estas simulações é possível perceber melhor o funcionamento das diversas partes do sistema, bem como evitar problemas que poderiam surgir no desenvolvimento do protótipo de *hardware*.

Neste capítulo são demonstrados os diversos modelos de simulação usados bem como os resultados obtidos das simulações efetuadas através destes mesmos modelos.

4.2. Modelo de Simulação do Sistema

Para tornar possível a simulação do sistema foi necessário criar os vários modelos que compõem o sistema, nomeadamente: o modelo da turbina eólica, o modelo da eletrónica de potência e o modelo do controlo.

4.2.1. Modelo de Simulação da Turbina Eólica

Na Figura 4.1 está apresentado o modelo da turbina eólica. Este modelo é composto por duas partes essenciais a turbina eólica e o gerador síncrono de ímanes permanentes (PMSG). O PSIM disponibiliza um elemento que permite a simulação da turbina eólica. Neste elemento é possível definir a potência nominal da turbina, a velocidade do vento nominal e a velocidade de rotação nominal. Através das duas entradas disponibilizadas por este elemento (velocidade do vento e ângulo de ataque das pás) é possível controlar a velocidade de rotação a ser aplicada ao gerador. Quanto ao PMSG, é possível definir diversos parâmetros, entre os quais, o número de polos e a tensão de saída quando o gerador roda a uma velocidade de 1000rpm.

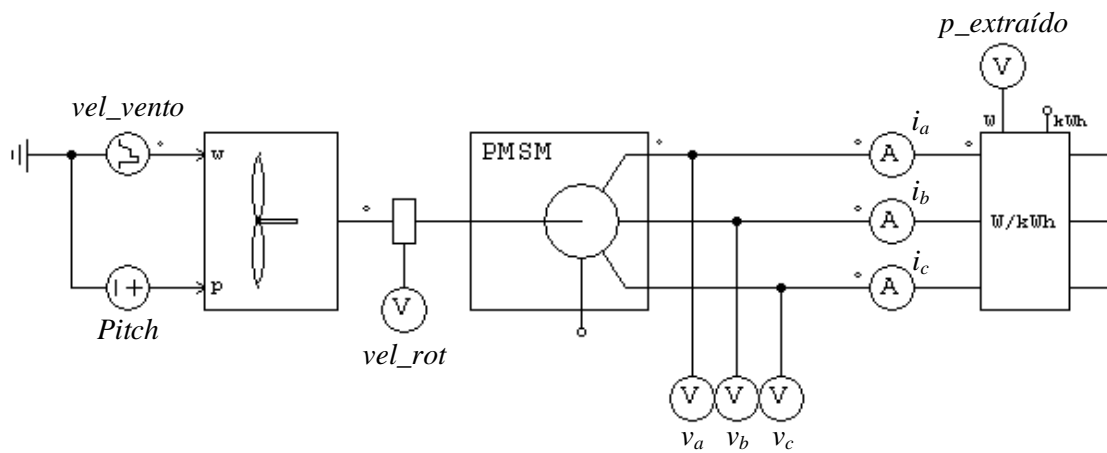


Figura 4.1 – Modelo de simulação da turbina eólica e do gerador síncrono de ímãs permanentes no software PSIM.

4.2.2. Modelo de Simulação dos Conversores de Potência

Este modelo é composto pelos três conversores referidos no subcapítulo 3.5 e as baterias. Nesta simulação é usado o modelo simples de simulação de baterias (fonte constante em série com um condensador e uma resistência). Na Figura 4.2 apresenta-se uma vista geral sobre o modelo de simulação de conversores de potência.

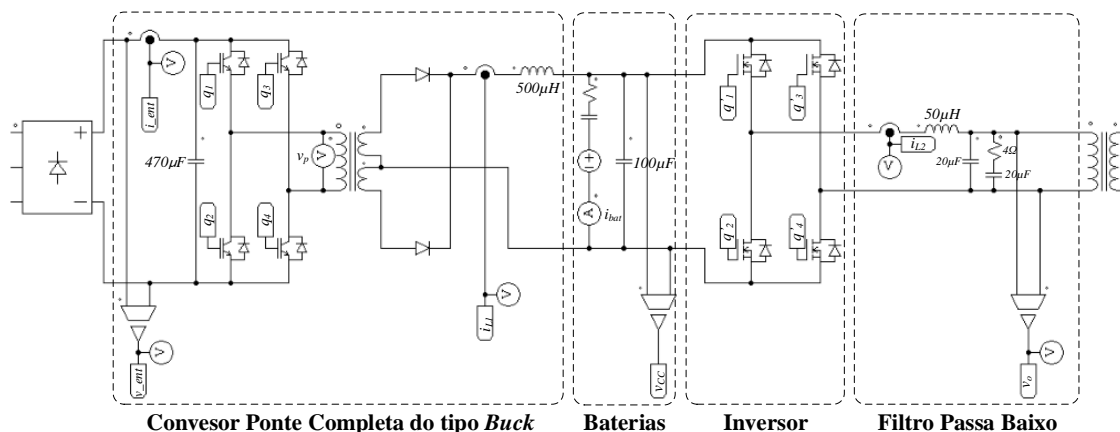


Figura 4.2 – Modelo de simulação dos conversores de potência no software PSIM.

As tensões geradas pelo PMSG são aplicadas ao retificador trifásico de forma que estas sejam retificadas, e aplicadas ao conversor CC/CC. Como já foi referido, ao ser usado um retificador trifásico, a forma de onda gerada à saída deste apresenta um *ripple* reduzido, no entanto, para que o conversor CC/CC funcione da melhor forma, este *ripple* terá que ser ainda mais reduzido. Para tal, é colocado um filtro capacitivo de 470 µF.

Quanto ao conversor CC/CC, são usados IGBTs na ponte completa. O transformador usado possui uma relação de espiras de 1,5:1. A bobina usada tem um

valor de $500 \mu\text{H}$, satisfazendo os requisitos do conversor, evitando que o conversor entre em algum instante entre no modo descontínuo.

O semiconductor usado no inversor foi o MOSFET. O filtro passa-baixo é composto por uma bobine de aproximadamente $50 \mu\text{H}$ e dois condensadores em paralelo, em que num destes é colocada uma resistência de *damping* de 2Ω . O transformador de saída é de $30 \text{ V}/230 \text{ V}$, isto é, tem uma relação de espiras de 1:7,67.

4.2.3. Modelo de Simulação do Controlo

São necessários dois controladores independentes neste sistema. Estes são o controlador do conversor CC/CC e do inversor. Estes controladores foram implementados digitalmente no PSIM de forma a que se aproximem ao máximo do que irá acontecer na realidade, sendo que, para tal, os parâmetros usados nestes são o mais próximo possível da realidade.

O controlador do conversor CC/CC é composto por um bloco C o qual permite a implementação do código necessário na linguagem C. Este contém o algoritmo MPPT referido no capítulo anterior (Figura 4.3). Para tal necessita de duas entradas essenciais de forma a calcular a potência extraída no momento: a tensão e a corrente à saída do retificador. Estas são obtidas a uma frequência de amostragem de 40 kHz a qual é definida pelo bloco ZOH disponível no PSIM. Este bloco C devolve um sinal de referência como saída que é comparada com uma onda triangular de valor médio zero. Desta comparação resulta um sinal de PWM com a mesma frequência da onda triangular e *duty-cycle* definido pelo sinal de referência. Neste caso a onda triangular possui uma frequência de 20 kHz .

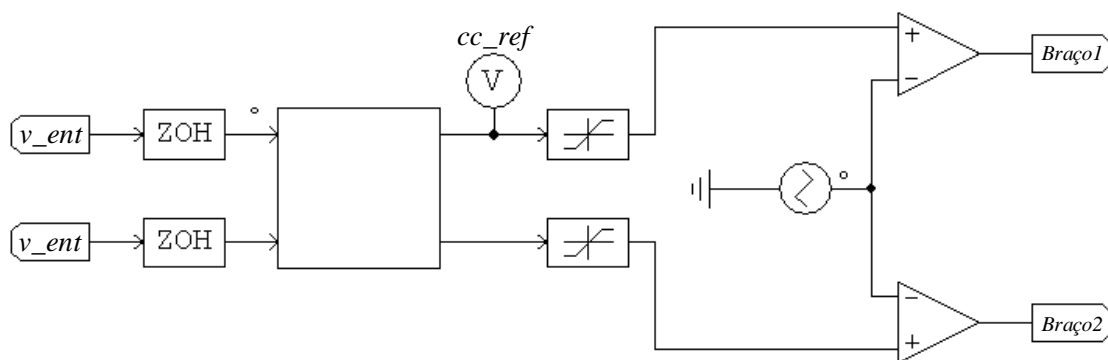


Figura 4.3 - Modelo de simulação do controlo do conversor CC/CC ponte completa do tipo *buck*.

O sinal de PWM resultante da comparação é aplicado ao IGBT superior de um braço e um sinal obtido a partir da negação lógica deste é aplicado ao IGBT inferior desse mesmo braço. Para obter o sinal de PWM do outro braço, foi usado o mesmo sinal

de referência invertido e comparado com a mesma onda triangular portadora. Este sinal de PWM resultante é aplicado ao IGBT superior, sendo que no IGBT inferior é aplicada a negação lógica deste sinal.

O modelo do controlador do inversor é também composto por um bloco C. Dentro deste bloco está implementado o código C necessário para efetuar o controlo apresentado no diagrama da Figura 3.28. Este tem duas entradas essenciais: tensão de saída filtrada do inversor e a tensão no barramento CC. Estes valores são também obtidos a uma frequência de 40 kHz.

À saída do bloco C, são devolvidos dois sinais de referência, os quais são comparados com uma onda triangular, originando dois sinais de PWM com a frequência da onda triangular (60 kHz). Estes são aplicados aos MOSFETs superiores dos braços. Aos MOSFETs inferiores são aplicados os resultantes da negação lógica desses sinais. Na Figura 4.4 está representado o modelo de controlo do inversor em PSIM.

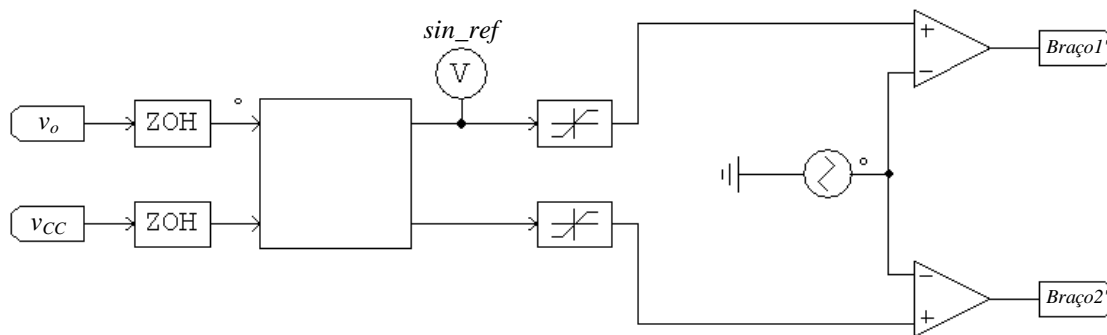


Figura 4.4 – Modelo de simulação do controlo do inversor.

4.3. Resultados de Simulação

Neste subcapítulo são demonstrados os resultados das simulações efetuadas às diversas partes do sistema individualmente, bem como as que foram realizadas ao sistema a operar em conjunto. Estas simulações foram de extrema importância pois permitiram verificar o funcionamento destas partes bem como entender um pouco melhor o seu funcionamento.

4.3.1. Conversor CC/CC Ponte Completa do Tipo Buck

Na Figura 4.5 está apresentado o modelo de simulação do conversor CC/CC ponte completa do tipo *buck* que é usado no sistema.

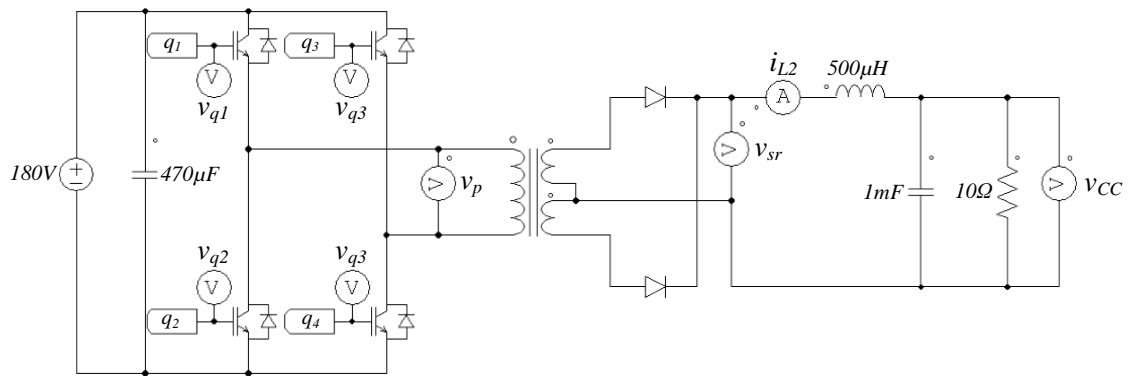


Figura 4.5 – Modelo de simulação do CC/CC ponte completa do tipo buck.

Como se trata de simulações para testar o conversor e perceber melhor o seu funcionamento, numa primeira instancia não foi usado o algoritmo de MPPT.

Os sinais de PWM resultantes do controlo bem como a tensão aplicada ao transformador estão apresentados na Figura 4.6. A tensão aplicada ao primário transformador (v_p) é reduzida conforme a relação de transformação. No secundário, os díodos retificam a tensão criando uma tensão positiva (v_{sr}) com o *duty-cycle* imposto pelo sistema.

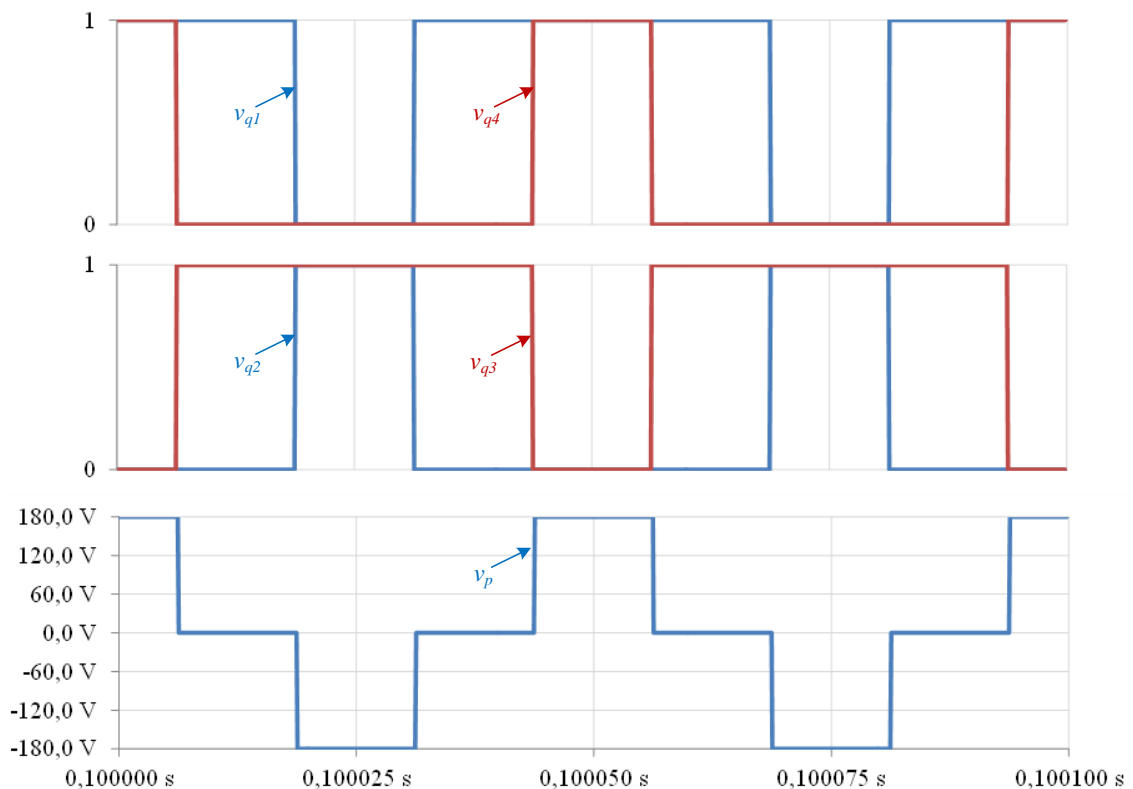


Figura 4.6 – Sinais de PWM aplicados aos IGBTs (v_{q1} , v_{q2} , v_{q3} , v_{q4}) e tensão no primário do transformador (v_p).

Esta tensão (v_{sr}), bem como a corrente na indutância (i_{L1}) e a tensão no barramento CC (V_{CC}) estão apresentadas na Figura 4.7. É possível verificar que a

corrente se encontra sempre positiva e como tal o conversor está a funcionar no modo contínuo, o que é o desejado. A tensão no barramento CC também tem o valor esperado.

Durante as simulações foi possível verificar que a indutância de dispersão do transformador poderia causar problemas no *duty-cycle* definido. Isto é, se a indutância de dispersão tivesse um valor demasiado elevado iria causar uma redução no *duty-cycle* definido. Na Figura 4.8 está apresentado este mesmo fenómeno, em que para um mesmo *duty-cycle* e indutâncias de dispersão diferentes, o conversor reagia de maneira diferente do esperado, o que causa problemas na tensão esperada no barramento CC.

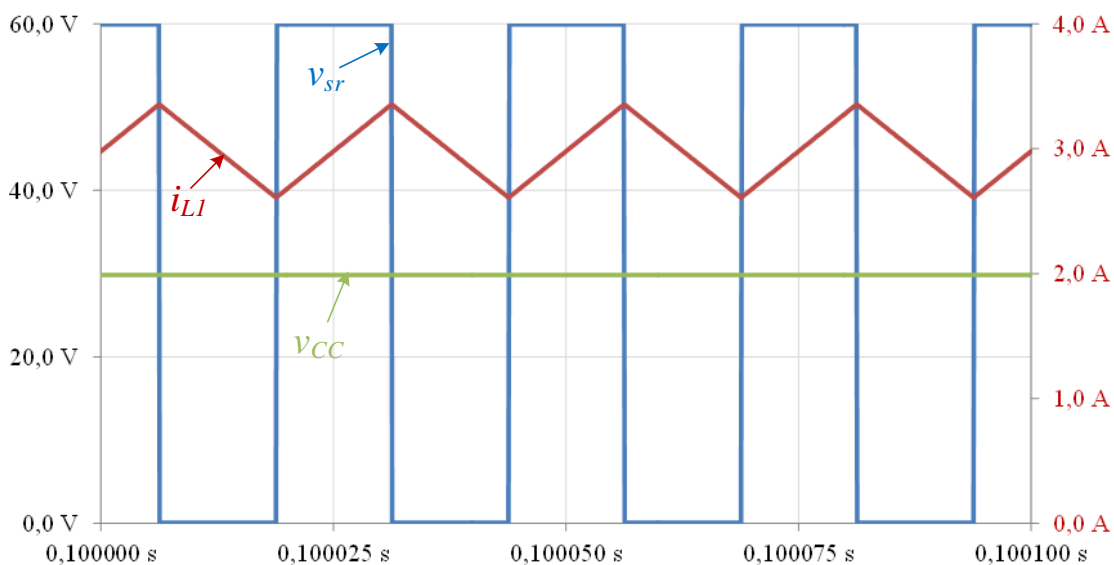


Figura 4.7 – Tensão do secundário do transformador retificada (v_{sr}), corrente na indutância (i_{L1}) e tensão no barramento CC (v_{cc}).

4.3.2. Inversor Monofásico

Na Figura 4.9 está apresentado o modelo de simulação do inversor usado no sistema. Nas primeiras simulações efetuadas foi usada uma carga linear puramente resistiva.

Através das simulações efetuadas foi possível verificar uma pequena distorção na onda de tensão à saída do inversor. Esta distorção deve-se ao uso do *deadtime* nas comutações dos MOSFETs. No caso da carga linear, a queda de tensão na bobine do filtro passa baixo não irá distorcer a forma de onda da tensão, causando apenas uma diminuição na amplitude da tensão. Na Figura 4.10 está apresentado o resultado da simulação efetuada utilizando o modelo referido quando não é aplicada malha de realimentação ao controlo do inversor, isto é, não é aplicado o controlador PI.

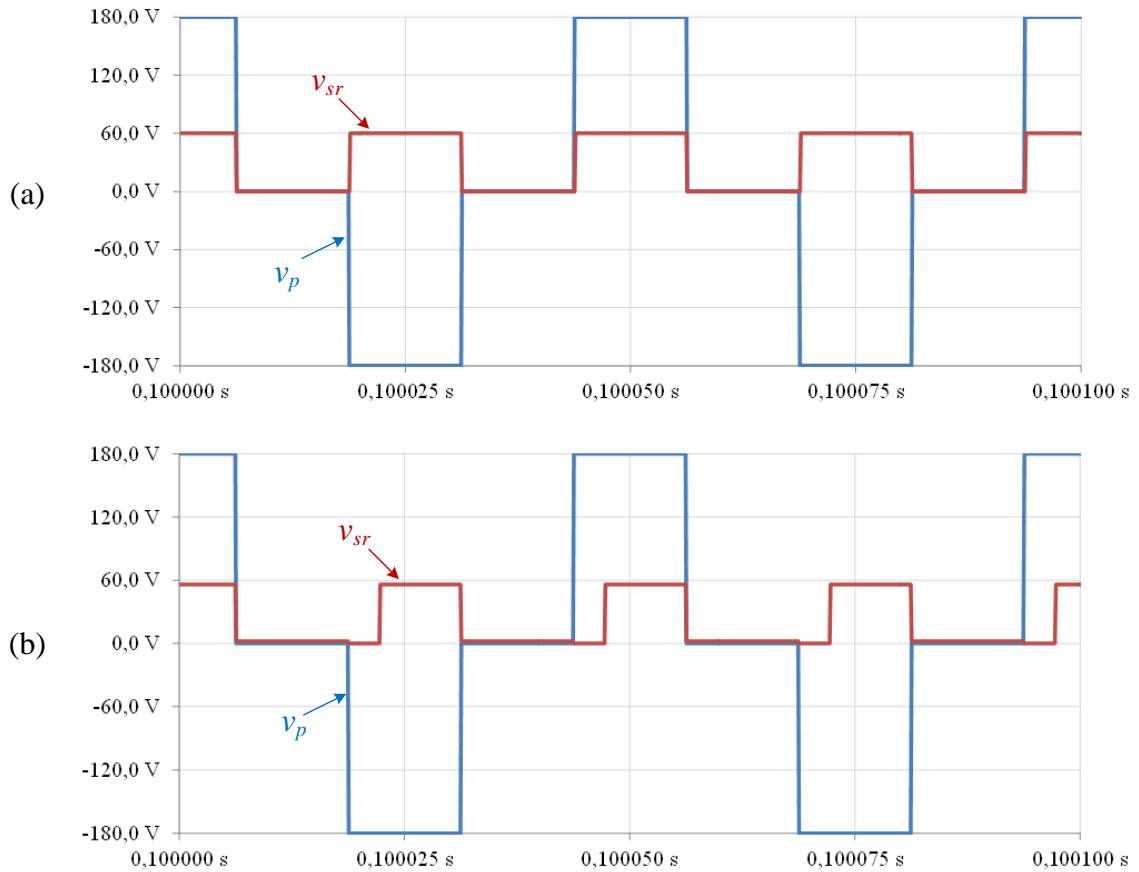


Figura 4.8 – Tensões no primário (v_p) e no secundário do transformador retificada (v_{sr}) para duas indutâncias de dispersão diferentes: (a) Menor indutância de dispersão; (b) Maior indutância de dispersão.

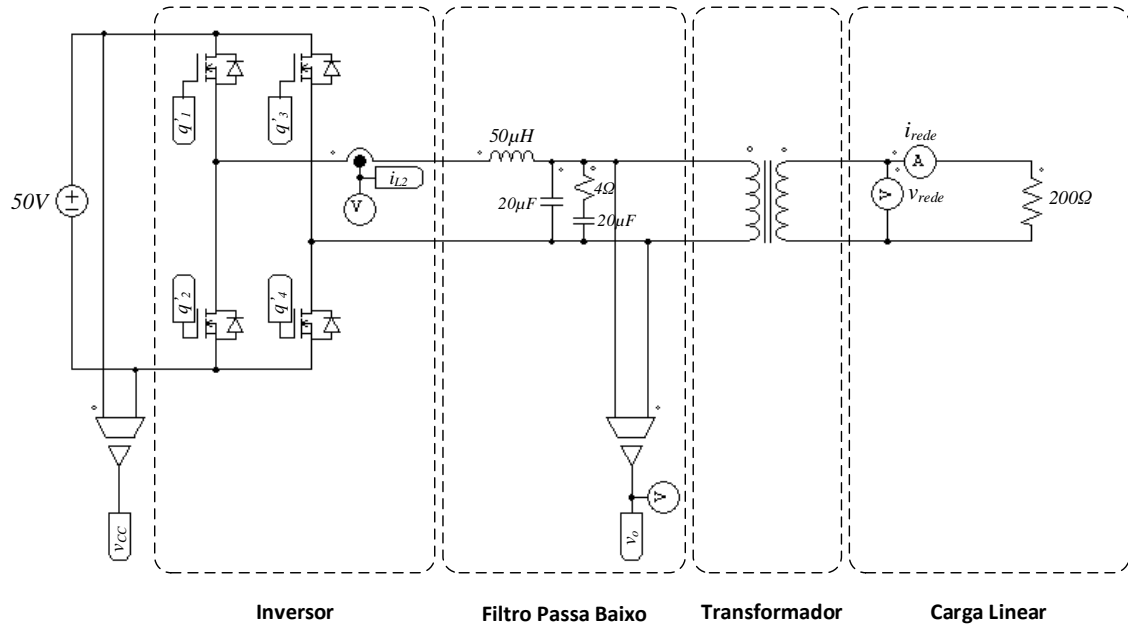


Figura 4.9 – Modelo de simulação do inversor com filtro passa baixo e carga linear.

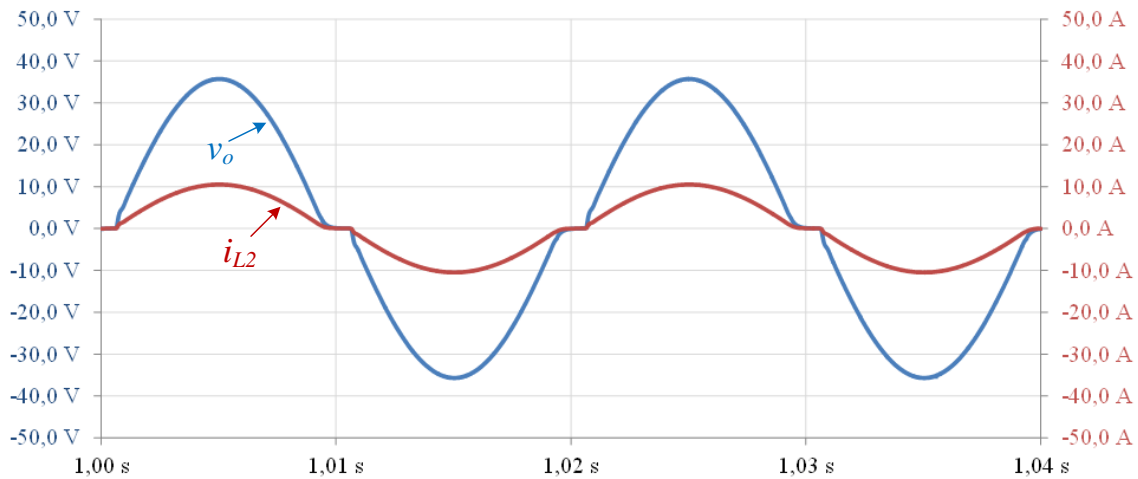


Figura 4.10 - Tensão (v_o) e corrente (i_{L2}) na saída do inversor com controle em malha aberta e com carga linear.

Com o uso de um controlador PI é possível melhorar a forma de onda da tensão. Na Figura 4.11 está apresentado o resultado de uma simulação efetuada ao inversor com o controlador em malha fechada.

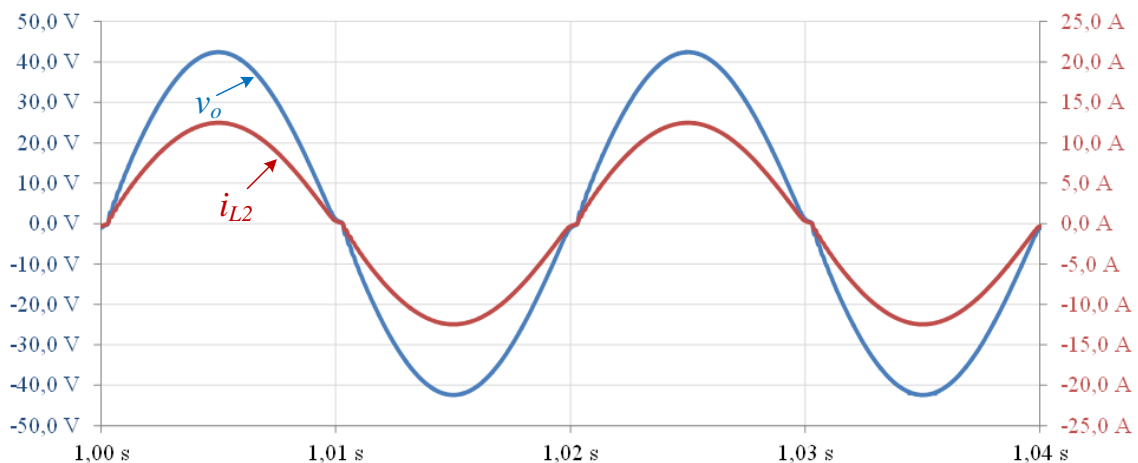


Figura 4.11 - Tensão (v_o) e corrente (i_{L2}) na saída do inversor com controlador PI e carga linear.

Na Figura 4.12 está apresentado o modelo de simulação do inversor quando este alimenta uma carga não linear. Nas simulações efetuadas foi usado um controle igual ao especificado na Figura 3.29. Nesta situação existem diversos elementos que causam distorção da onda de tensão de saída do inversor. O *deadtime*, como já foi referido anteriormente, irá causar uma distorção na tensão de saída. A outra fonte trata-se da queda de tensão na bobine do filtro passa baixo. Esta queda de tensão será também distorcida devido à distorção na corrente que passa na bobine, provocando uma tensão de saída ainda mais distorcida quando são usadas cargas não lineares como recetores.

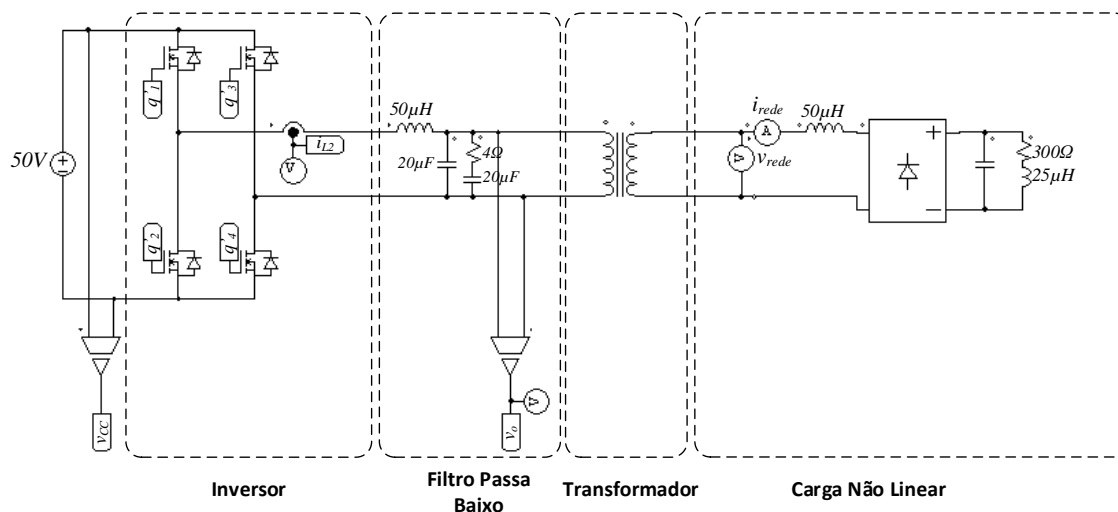


Figura 4.12 – Modelo de simulação do inversor com filtro passa-baixo e carga não linear.

Na Figura 4.13 é apresentada uma simulação deste mesmo problema quando não é aplicada malha de realimentação ao controlo do inversor, isto é, não é aplicado o controlador PI.

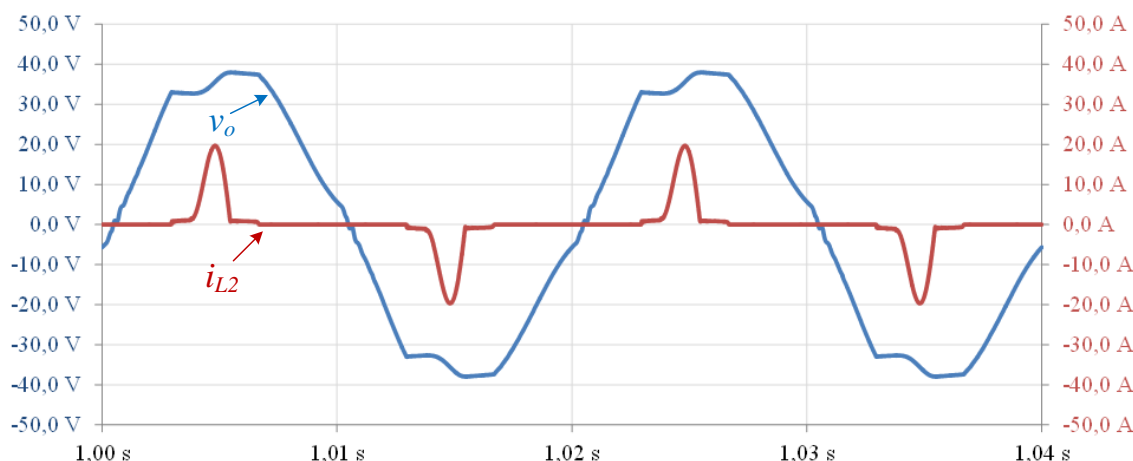


Figura 4.13 – Tensão (v_o) e corrente (i_{L2}) na saída do inversor com controlo em malha aberta e carga não linear.

A distorção na tensão de saída não é aceitável para alimentar algumas cargas mais sensíveis à distorção na forma de onda da tensão. Para além disso, este trabalho tem como intuito fornecer energia elétrica que obedeça às normas especificadas para redes elétrica, por exemplo, distorção harmónica da tensão inferior a 5% [34]. Assim sendo, aplicando a malha de realimentação é possível melhorar esta tensão produzida pelo inversor. Na Figura 4.14 está apresentada a tensão de saída (v_o) quando é aplicado o controlo PI.

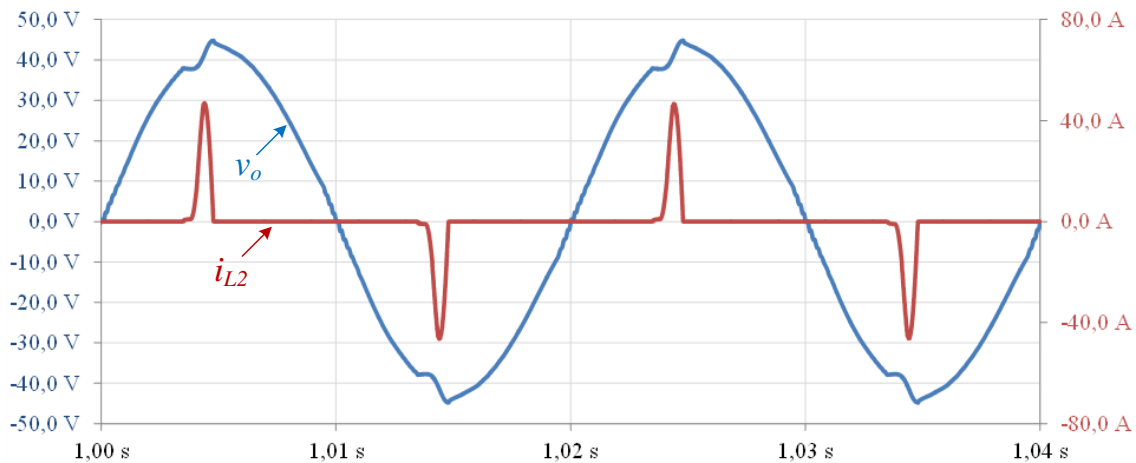


Figura 4.14 - Tensão (v_o) e corrente (i_{L2}) na saída do inversor com controlador PI e carga não linear.

De referir que, nesta simulação foi usada uma carga não linear que consome uma corrente muito distorcida, como se poder verificar pela Figura 4.13. Ainda assim, embora a tensão não seja perfeitamente sinusoidal, esta apresenta um THD inferior a 5%.

Um aspeto importante que influencia o desempenho do controlador é o valor da indutância usada no filtro passa-baixo [35]. Na Figura 4.15 está apresentada uma simulação usando um filtro diferente do usado na simulação anterior, com os mesmos parâmetros usados no controlador PI. Neste novo filtro foi usado uma bobine com um coeficiente de autoindução maior que anteriormente de 200 μH , mantendo o mesmo valor dos condensadores e da resistência. Verifica-se que a forma de onda da tensão na saída do inversor apresenta uma maior distorção.

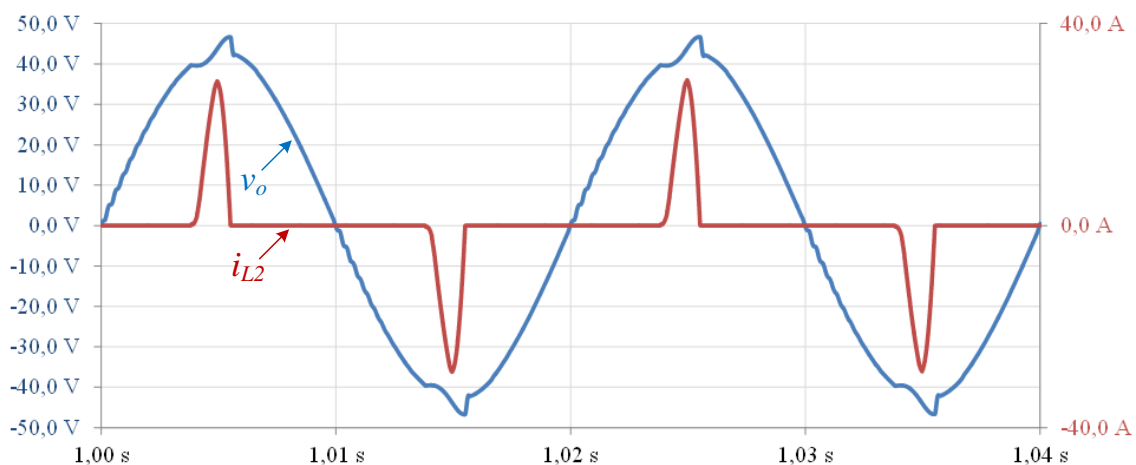


Figura 4.15 - Tensão (v_o) e corrente (i_{L2}) na saída do inversor com controlador PI usando uma bobine diferente no filtro passivo.

4.3.3. Sistema Completo

Na Figura 4.16 está apresentado o modelo do sistema completo.

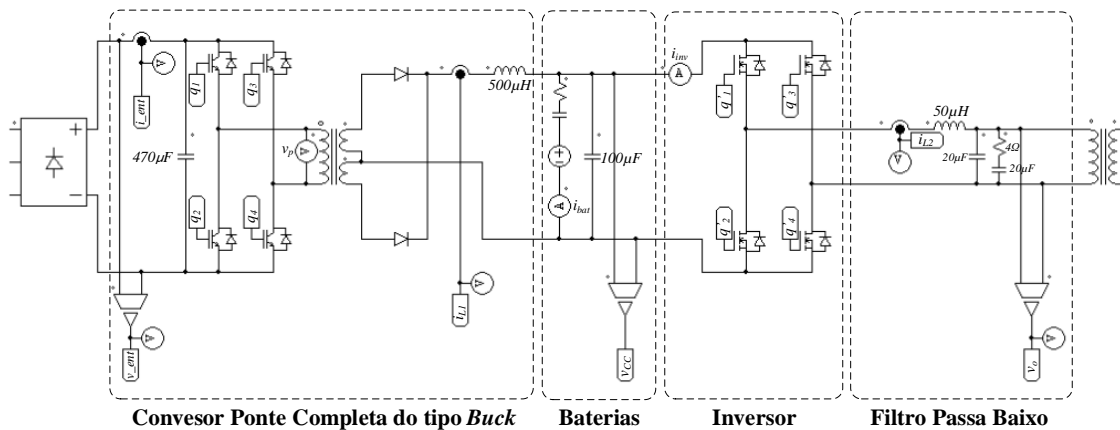


Figura 4.16 – Modelo de simulação completo do sistema.

Neste sistema, o controlo aplicado ao conversor CC/CC e ao inversor são independentes. O controlo usado no conversor CC/CC tem dois objetivos: reduzir a tensão de forma a tornar possível armazenar energia nas baterias e aplicar o algoritmo de MPPT. Quanto ao inversor, o controlo deste tem como objetivo colocar à saída do sistema uma tensão com 230 V/50 Hz com baixa distorção harmónica (menor que 5%). Como tal, a maior variante introduzida nesta simulação completa do sistema foi a inclusão do algoritmo de MPPT no sistema. Na Figura 4.17 está apresentado um resultado obtido em simulação onde é possível comparar a potência extraída ($p_{extraído}$) pelo sistema com a potência máxima disponível (p_{max}), para diferentes velocidades do vento.

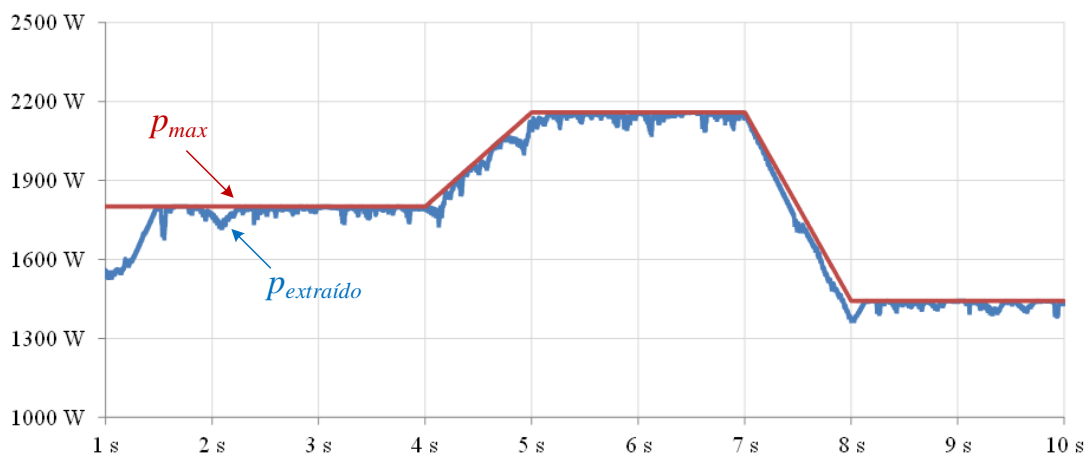


Figura 4.17 – Potência extraída ($p_{extraído}$) pelo sistema em função da potência máxima (p_{max}) possível de extrair durante variações da velocidade do vento.

Pode verificar-se que o sistema tenta aproximar-se da potência máxima que o gerador disponibiliza, sendo que, como se trata de um algoritmo à base de incrementos/decrementos aplicados ao *duty-cycle*, existem variações na potência que é extraída mesmo quando a velocidade do vento é constante. Durante este intervalo de

tempo foram também verificadas as alterações de corrente que flui para a bateria e da tensão no barramento CC. Na Figura 4.18 estão demonstradas as variações de tensão e corrente referidas, podendo se verificar que as baterias estão a ser carregadas com diferentes valores de corrente dependentes da potência fornecida pelo gerador. Também é possível verificar que a tensão no barramento CC varia ligeiramente com a corrente que carrega as baterias, esta variação é devida á resistência interna e ao aumento do estado de carga da bateria.

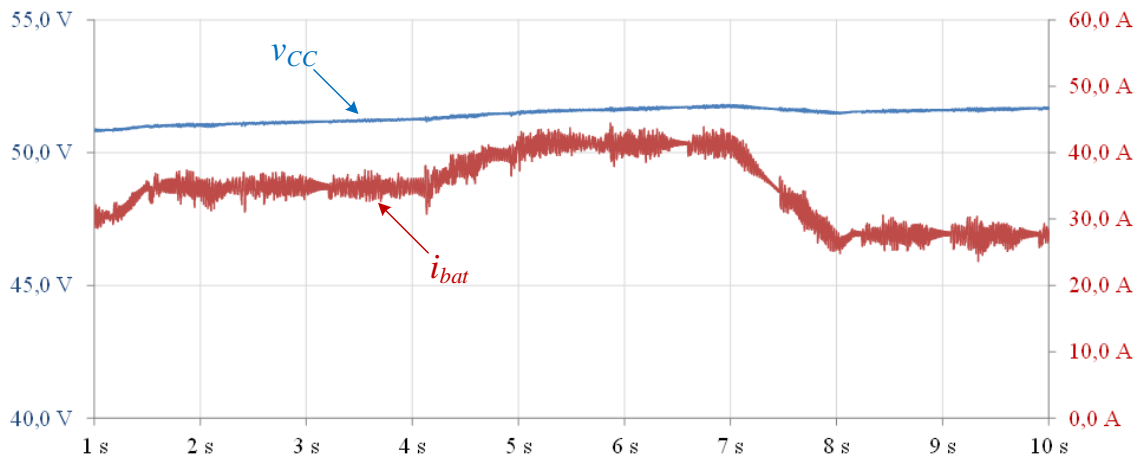


Figura 4.18 – Tensão no barramento CC (v_{CC}) e corrente a fluir para as baterias (i_{bat}) durante variações da velocidade do vento.

Foi também efetuada uma simulação de forma a verificar como reage o sistema quando é ligada uma carga à saída do inversor. Na Figura 4.19 estão apresentados os resultados obtidos quando é ligada uma carga à saída do inversor no instante $t = 1,00$ s. Na Figura 4.19 (a) pode-se verificar que até ao primeiro segundo de simulação, toda a corrente fluía para as baterias, sendo que depois do primeiro segundo de simulação a corrente começa a fluir no sentido oposto, isto é, para o inversor que alimenta a carga. Na Figura 4.19 (b) pode verificar-se que a partir do primeiro segundo de simulação a corrente começa a fluir para o inversor, sendo que consequentemente a tensão no barramento CC começa a diminuir.

Na Figura 4.20 está apresentada a tensão (v_{rede}) à saída do transformador que é aplicada às cargas ligadas ao sistema isolado e a respetiva corrente (i_{rede}). A distorção na tensão é derivada do uso de cargas não lineares, sendo que esta distorção é atenuada devido ao uso do algoritmo de controlo anteriormente referido, obtendo-se um baixo THD na tensão da rede. A corrente irá depender das cargas ligadas, sendo que poderá ser bastante distorcida.

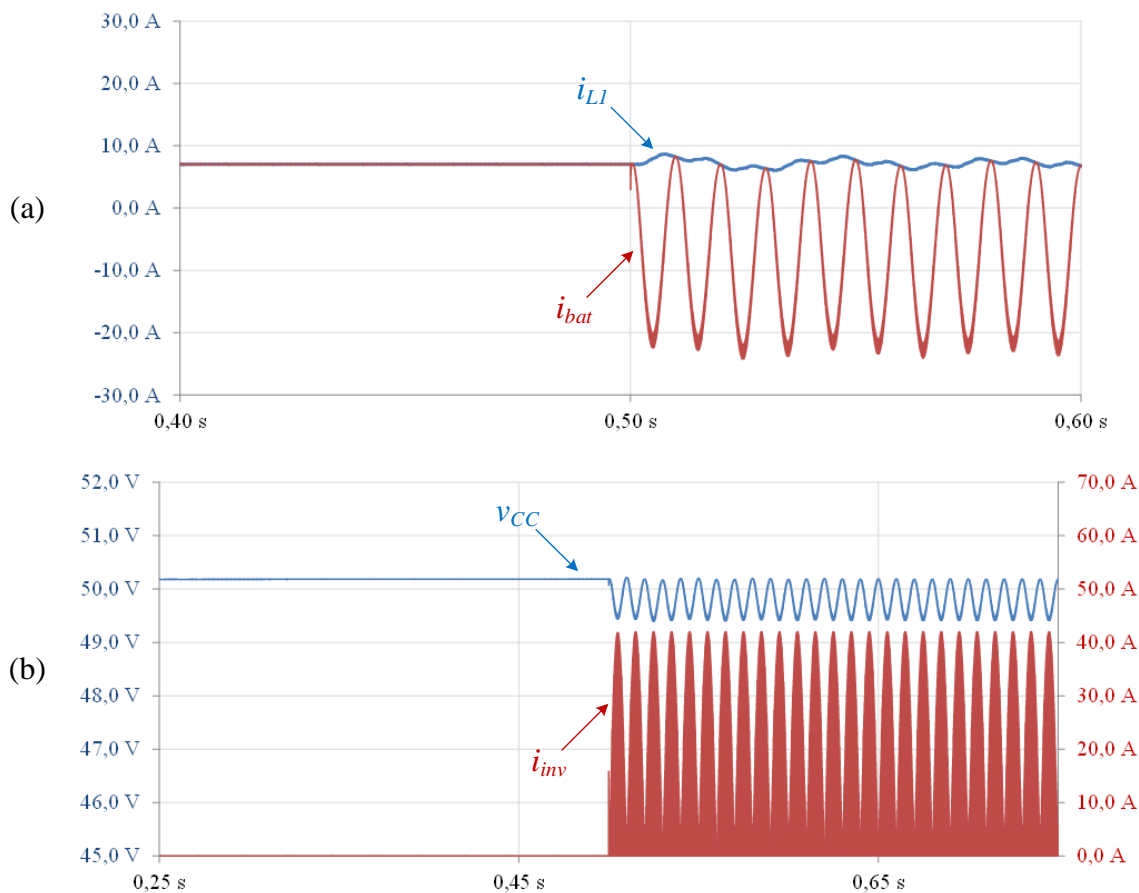


Figura 4.19 – Dinâmica no barramento CC quando é colocada uma carga depois do primeiro segundo de simulação: (a) Corrente na indutância do conversor CC/CC ponte completa do tipo buck (i_{L1}) e nas baterias (i_{bat}); (b) Tensão no barramento CC (v_{CC}) e corrente à entrada do inversor (i_{inv}).

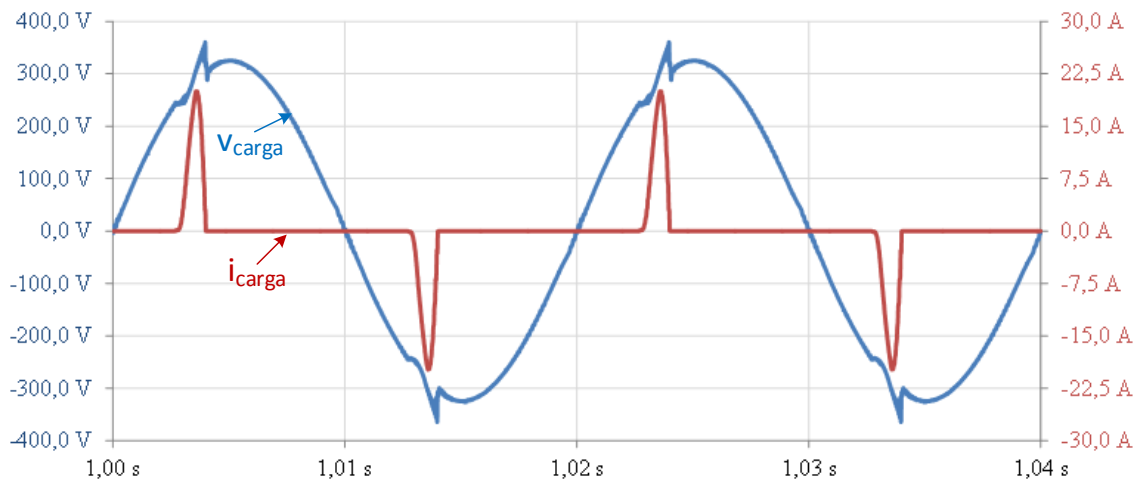


Figura 4.20 – Tensão (v_{carga}) e corrente (i_{carga}) na rede elétrica isolada com carga não linear.

4.4. Conclusão

Neste capítulo foram demonstrados os resultados das simulações efetuadas ao sistema, sendo que foram descritos os diversos passos efetuados para obter os resultados apresentados. Foi necessário criar os modelos de simulação, quer da parte de potência (modelo da turbina eólica e modelo da eletrónica de potência), quer da parte de

controlo. Estes foram criados de modo a demonstrarem um comportamento o mais próximo possível da realidade.

Depois da criação dos modelos, foram efetuadas diversas simulações. Inicialmente foram feitas simulações dos conversores em separado de forma a perceber melhor o seu funcionamento bem como a melhorar o seu desempenho, evitando erros que poderiam aparecer durante o desenvolvimento do protótipo. Finalmente, foram efetuadas simulações do sistema completo. Estas últimas simulações permitiram verificar que o sistema extraia o máximo de potência possível da turbina eólica, validando o algoritmo de MPPT. Permitia também alimentar os recetores da rede isolada com uma tensão praticamente sinusoidal (THD inferior a 5%) com um valor eficaz de 230 V e frequência constante de 50 Hz.

CAPÍTULO 5

Implementação do Sistema Microeólico Isolado

5.1. Introdução

Neste capítulo é descrito o desenvolvimento do sistema microeólico isolado. O sistema implementado pode ser dividido em quatro partes essenciais: o emulador da turbina microeólica, o gerador síncrono de ímanes permanentes, o circuito de potência e o sistema de controlo.

O emulador turbina microeólica é composto por um motor de indução de rotor em gaiola de esquilo e um variador de velocidade. O circuito de potência é composto por três conversores de potência: o retificador, o conversor CC/CC ponte completa do tipo *buck* e o inversor monofásico. Neste capítulo são descritos os componentes que compõem estes conversores bem como o sistema de e as placas necessárias para aquisição de dados e envio de sinais de comando para os conversores.

5.2. Sistema de Emulação da Unidade Microeólica

Para tornar possível emular o funcionamento de uma turbina microeólica em laboratório, recorreu-se a um sistema composto por um motor e um variador de velocidade. Neste sistema usou-se motor de indução no qual a velocidade é controlada por um variador de velocidade, o qual irá acionar o gerador síncrono de ímanes permanentes. Com isto é possível simular variações da velocidade do vento através do variador de velocidade, de forma a verificar o funcionamento da totalidade do sistema, mais especificamente do algoritmo de MPPT. Na Figura 5.1 pode visualizar-se o conjunto motor de indução/gerador síncrono utilizado para emular a unidade microeólica.

5.2.1. Variador de Velocidade

O variador de velocidade usado no sistema emulação da unidade microeólica foi o modelo *ACT 401-19A* da empresa *Bonfiglioli Vectron*, o qual possui uma potência de 5,5kW. Este permite alterar a velocidade de rotação do motor de indução, permitindo assim simular o vento e as suas variações de velocidade. O variador de velocidade

possui uma consola na qual é possível programar diversos parâmetros entre os quais a frequência da tensão aplicada ao motor de indução. Esta frequência é a responsável pelas variações de velocidade. Na Figura 5.2 está apresentado o variador de velocidades usado no sistema.

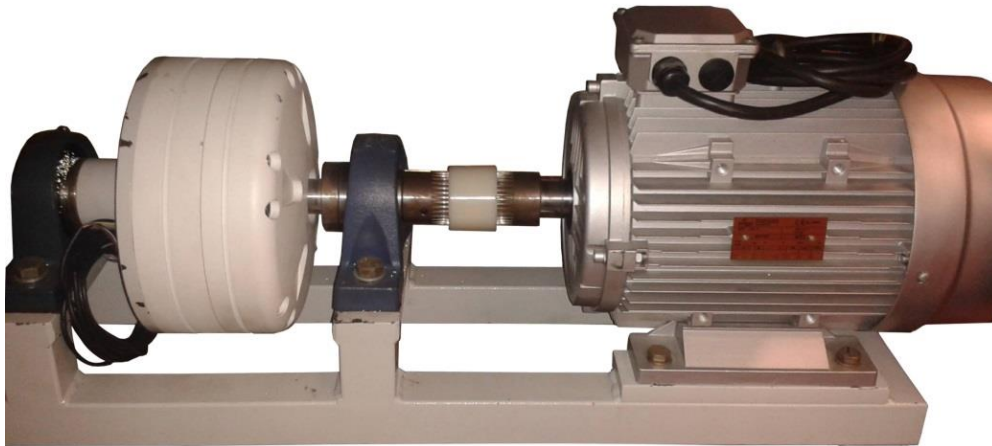


Figura 5.1 – Sistema de emulação da unidade microeólica.



Figura 5.2 – Variador de velocidade *Bonfiglioli Vectron (ACT 401-19ª)* usado no sistema de emulação da unidade microeólica [36].

5.2.2. Motor de Indução

Foi usado um motor de indução trifásico para acionar o gerador da unidade microeólica. O motor usado foi o *JM132M2 6* da empresa *Seipex* e pode ser visualizado na Figura 5.3. Este possui uma potência de 5,5 kW e uma velocidade de rotação nominal de 920 rpm. Estas características satisfazem as necessidades do gerador pois este permite a operação numa gama de velocidades de rotação até aos 920 rpm, bem como possui uma potência nominal bastante superior à do gerador.



Figura 5.3 – Motor de indução trifásico *Seipex (JM132M2-6)* usado no sistema de emulação da unidade microeólica [37].

5.2.3. Gerador Síncrono de Imanes Permanentes

Neste projeto foi usado um gerador síncrono de ímanes permanentes (PMSG) trifásico, cujo modelo é o *GL-PMG-1800* fabricado pela empresa *Ginlong Technologies*. Este possui uma potência nominal de 1800 W a uma velocidade de rotação de 480 rpm, aos quais fornece uma tensão retificada de 300 V e uma corrente, também retificada de 6 A. Na Tabela 3.4 estão apresentadas as características disponibilizadas pelo *datasheet* do gerador. Na Figura 5.4 está apresentado o gerador referido.



Figura 5.4 – Gerador síncrono de ímanes permanentes trifásico *Ginlong Technologies (GL-PMG-1800)* usado no sistema de emulação da unidade microeólica [31].

5.3. Circuito de Potência

Foi desenvolvido um protótipo do sistema de forma a verificar o funcionamento do sistema proposto. Para uma organização mais lógica dos diversos componentes eletrônicos que compõem os conversores de potência, optou-se por dividir o circuito de potência em duas placas principais. Uma primeira placa que contém o filtro capacitivo do retificador trifásico e os IGBTs da ponte completa do primário do conversor CC/CC ponte completa do tipo *buck* e uma segunda placa que contém os díodos do retificador

de onda completa do secundário do conversor CC/CC e os MOSFETs da ponte completa do inversor de saída. Na Figura 5.5 apresenta-se um diagrama de blocos que ilustra a forma como o circuito de potência foi dividido.

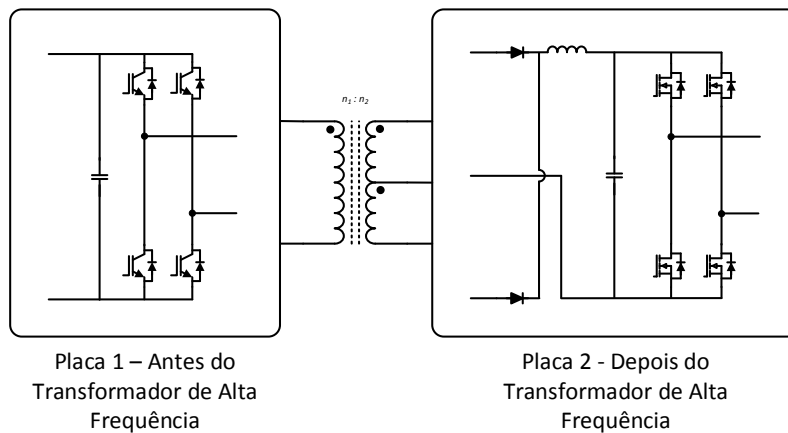


Figura 5.5 – Diagrama de blocos da divisão do circuito de potência.

Por se tratar de um protótipo em que os elementos magnéticos (transformador de alta-frequência e bobinas) foram projetados e construídos propositadamente para esta aplicação, optou-se por não incluir estes elementos nas placas de circuito impresso. Desta forma seria mais fácil alterar ou fazer ajustes a estes elementos. Na Figura 5.6 apresenta-se uma vista geral do protótipo do circuito de potência desenvolvido. Nessa figura para além das duas placas principais, já montadas e com os seus respetivos dissipadores, é possível visualizar o transformador de alta frequência, os circuitos de *driver* do IGBTs e dos MOSFETs. De referir que o retificador trifásico, o filtro de saída do inversor e o transformador de saída não estão apresentados nesta imagem.

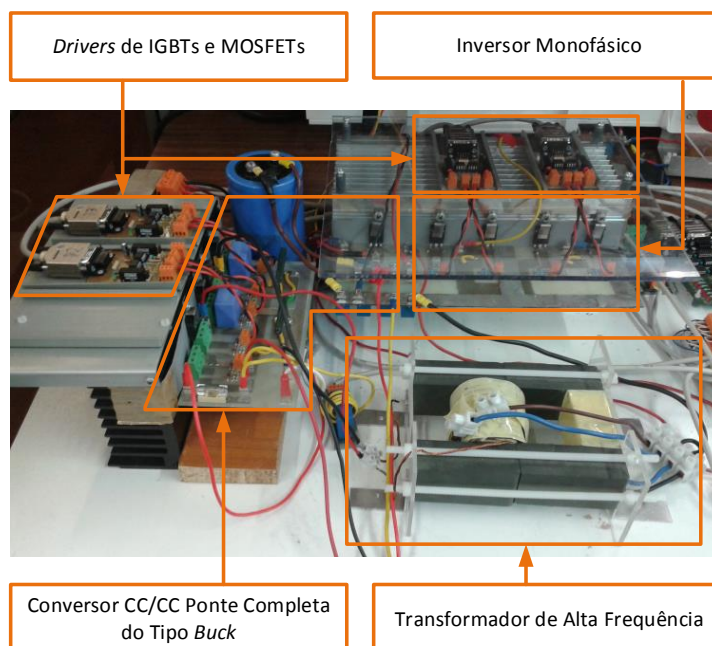


Figura 5.6 - Conversores de potência do protótipo desenvolvido e os respetivos *drivers*.

5.3.1. Retificador Trifásico

Foi usado um modelo comercial de uma ponte retificadora trifásica para satisfazer as necessidades do sistema. O modelo usado foi o SKB 30/16 A1 da empresa *Semikron*. Este permite que sejam aplicadas tensões até 1600 V e correntes até 30 A. Na Figura 5.7 está apresentada uma imagem da ponte retificadora utilizada no projeto.



Figura 5.7 – Ponte Retificadora *SEMIKRON* (SKB 30/16 A1) usada no protótipo desenvolvido [38].

Foi também usado um filtro capacitivo à saída da ponte retificadora de forma a reduzir o *ripple* da tensão no primário do conversor CC/CC ponte completa do tipo *buck*. O filtro foi dimensionado para suportar a tensão máxima retificada que o gerador irá produzir. Esta tensão máxima verifica-se quando o gerador trabalha em vazio e à velocidade de rotação máxima, o que em condições normais não deverá acontecer, no entanto, ao dimensionar o filtro desta forma fica salvaguardado que este não irá ser danificado. Para o filtro foi usado o condensador modelo *MAL205756471E3* da empresa *Vishay*. Na Figura 5.8 está apresentado este mesmo condensador.



Figura 5.8 – Condensador *Vishay* (*MAL205756471E3*) usado no filtro capacitivo do protótipo desenvolvido.

Este condensador possui uma capacidade de 470 μF e suporta tensões até 400 V. Como o valor da tensão suportada pelo condensador não é suficiente para suportar a tensão do gerador em vazio, que pode ultrapassar os 600V, foram usados quatro condensadores de forma a aumentar o valor de tensão suportada mantendo o mesmo valor de capacidade. Na Figura 5.9 está apresentado o circuito do filtro implementado.

Assim obtém-se um filtro capaz de suportar tensões até 800 V com uma capacidade equivalente de 470 μF . De forma a equalizar o valor da tensão em cada um dos condensadores, foram colocadas duas resistências em paralelo com os condensadores.

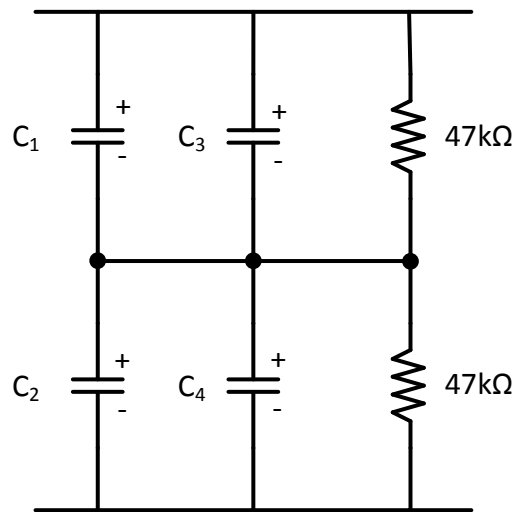


Figura 5.9 – Esquema elétrico do filtro capacitivo do retificador do protótipo desenvolvido.

5.3.2. Conversor CC/CC Ponte Completa do Tipo *Buck*

O esquemático do conversor CC/CC ponte completa do tipo *buck* projetado está apresentado na Figura 5.10.

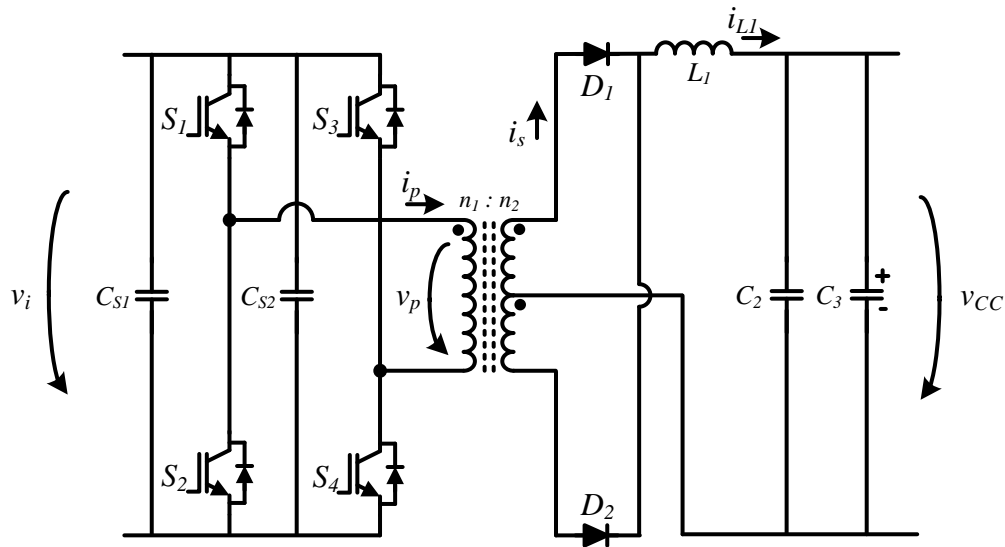


Figura 5.10 – Esquema elétrico do conversor CC/CC ponte completa do tipo *buck* usado no protótipo desenvolvido.

Os semicondutores usados na ponte completa no primário deste conversor são IGBTs (S_1, S_2, S_3, S_4). O modelo dos IGBTs usados é *FGA120ANTD25N* da empresa *Fairchild*. Estes IGBTs suportam tensões contínuas até aos 1200 V e correntes de 25 A. Na Figura 5.11 está apresentado este mesmo IGBT que foi usado na ponte completa.



Figura 5.11 – IGBT *Fairchild (FGA120ANTD25N)* usado no conversor CC/CC ponte completa do tipo *buck*.

Para evitar sobretensões transitórias sobre os IGBTs, foram usados condensadores de *snubber* em cada braço de IGBTs. Estes permitem reduzir os picos de tensão originados pelas comutações. Os condensadores (C_{S1} , C_{S2}) usados no circuito de *snubber* são de polipropileno, modelo *378 MKP* fabricados pela empresa *Vishay*. Têm uma capacitância de 220 nF e suportam tensões de 1000 V. Na Figura 5.12 está apresentado um destes condensadores.



Figura 5.12 – Condensador *Vishay (378 MKP)* utilizado no circuito de *snubber*.

Os dois díodos (D_1 , D_2) usados para retificar a tensão do secundário do transformador estão incluídos no modelo *STTH100W06CW* da *STMicroelectronics*. Estes são díodos de recuperação ultra rápida que permitem tensões reversas de 600 V e correntes de 50 A. Na Figura 5.13 estão apresentados os díodos referidos.



Figura 5.13 – Díodos *STMicroelectronics (STTH100W06CW)* usados no Conversor CC/CC ponte completa do tipo *buck*.

A bobina (L_1) usada neste conversor tem de valor coeficiente de autoindução de $500 \mu\text{H}$ e permite a passagem de corrente até aos 20 A de forma contínua sem sobreaquecer. Este valor de corrente é inferior ao necessário no entanto permite testar o funcionamento do sistema. Na Figura 5.14 está apresentada a bobine referida.

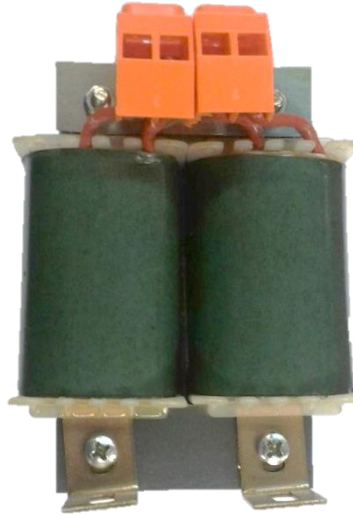


Figura 5.14 – Bobine usada no conversor CC/CC ponte completa do tipo *buck*.

O transformador de alta frequência necessário para o conversor CC/CC ponte completa do tipo *buck* foi desenvolvido no laboratório de forma a satisfazer as necessidades do conversor. Foi usado um núcleo ETD 120/80/40 da empresa *HengChuang*. O núcleo escolhido permite facilmente construir um transformador de 1800 VA para uma frequência de 20 kHz, ficando na realidade bastante sobredimensionado. De seguida foi necessário determinar a secção do fio usado nos enrolamentos do transformador. Durante as simulações efetuadas ao sistema, verificou-se que a corrente máxima que percorre o primário é aproximadamente 15 A e a corrente máxima que percorre cada um dos secundários é aproximadamente 30 A. Estas correntes verificam-se quando a tensão nas baterias é mais baixa (baterias descarregadas), sendo neste sistema definido um valor mínimo de 40 V de tensão nas baterias. Assim sendo, para calcular a secção do fio foi usada uma densidade de corrente de 5 A/mm^2 , resultando numa secção de 3 mm^2 para o fio do enrolamento do primário e uma secção de 6 mm^2 para o fio dos enrolamentos do secundário.

Com a secção dos fios calculada, é necessário calcular também o número de espiras necessárias para o funcionamento correto do transformador. Para isto, é necessário calcular primeiro os volts por segundo que são aplicados ao primário do transformador através da seguinte equação:

$$\lambda = \frac{V_{MAX} \delta}{f} \quad (5.1)$$

em que V_{MAX} é a tensão máxima aplicada ao primário do transformador, δ é o duty-cycle usado e f a frequência. A tensão máxima será para o funcionamento nominal do gerador que é 315 V. Este valor foi obtido através de ensaios efetuados ao gerador e que podem ser verificados no Capítulo 6. A frequência é de 20 kHz e no pior dos casos o *duty-cycle* será 0,5. Com isto o valor de volts por segundo é 0,01575. Sabendo este valor é possível calcular o número de espiras do primário através da seguinte equação:

$$n_1 = \frac{\lambda}{2 \Delta\beta A_e} 10^4 \quad (5.2)$$

em que $\Delta\beta$ é a variação de densidade de fluxo e A_e é a área efetiva do núcleo do transformador. A variação de densidade de fluxo escolhida foi 0,1 T e a área efetiva do núcleo é 12 cm². Assim, aplicando a equação sabe-se que têm que ser usadas 33 espiras no primário, sendo que cada enrolamento do secundário tem 3 vezes menos espiras (11) de forma a satisfazer a relação desejada

Na Figura 5.15 está apresentado o transformador desenvolvido.



Figura 5.15 – Transformador de alta frequência do conversor CC/CC do tipo *buck*.

À saída do conversor CC/CC ponte completa do tipo *buck*, para além das baterias foram também colocados condensadores de polipropileno (C_2) modelo *M109215032* fabricados pela empresa *EPCOS* com uma capacidade de 22 μ F e uma tensão de funcionamento até 100 V. Estes permitem filtrar as variações de tensão no barramento CC causadas pelo funcionamento do inversor (Figura 5.16 (a)). Foi ainda usado um condensador eletrolítico (C_3), modelo *Powerlytic 36DX9456* fabricado pela

Vishay. Este permite tensões até aos 75 V e tem uma capacidade de 30 mF (Figura 5.16 (b)).

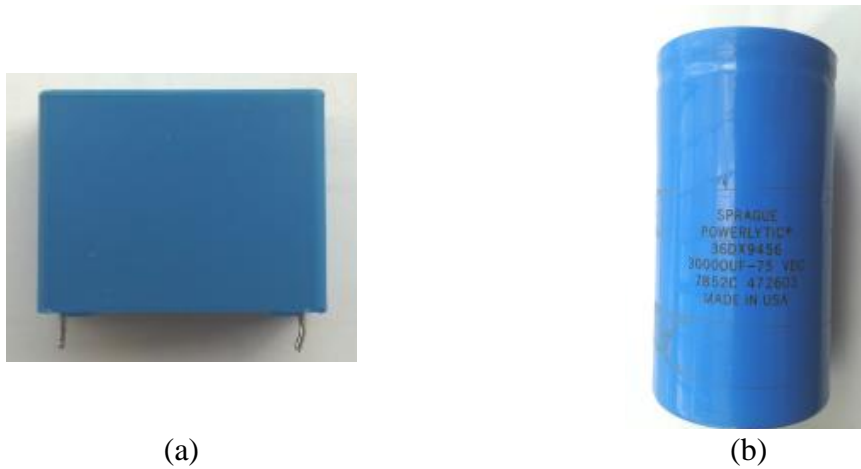


Figura 5.16 – Condensadores usados no barramento CC do protótipo desenvolvido: (a) Condensador de Filme *EPCOS (M109215032)*; (b) Condensador eletrolítico *Vishay (Powerlytic 36DX9456)*.

Como sistema de armazenamento, foram ligadas ao barramento CC baterias de ácido chumbo de 12 V. As baterias usadas são o modelo *WCG-UI* da empresa *Power Mobility*. Na Figura 5.17 estão apresentadas duas das baterias referidas.



Figura 5.17 – Baterias de ácido chumbo *Power Mobility (WCG-UI – Power)* usadas como elemento armazenador no protótipo desenvolvido.

5.3.3. Inversor Monofásico

O esquemático do inversor projetado está apresentado na Figura 5.18. Na ponte completa do inversor foram usados MOSFETs (S_5, S_6, S_7, S_8). devido ao facto de ser usada uma frequência de comutação elevada (60 kHz), a qual não é adequada para o uso de IGBTs. O modelo do MOSFET usado foi o *SUP85N15-21* da empresa *Vishay* que

suporta uma tensão de 150 V e uma corrente de 85 A. Na Figura 5.19 está apresentado este mesmo MOSFET.

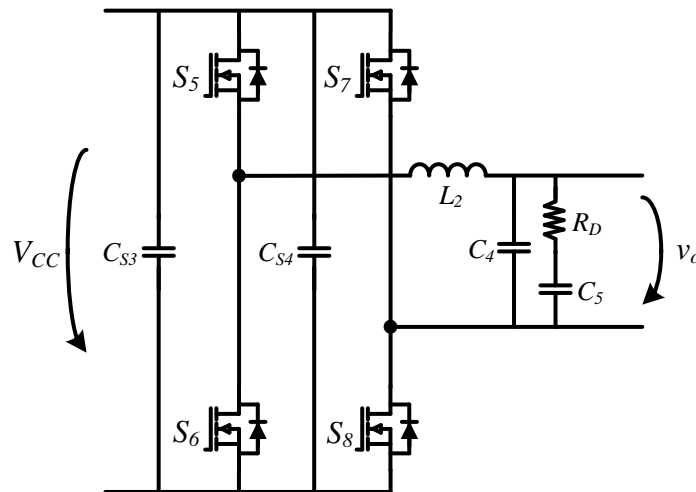


Figura 5.18 – Esquema do inversor monofásico com filtro passa baixo implementado.



Figura 5.19 – MOSFET Vishay (*SUP85N15-21*) usado no inversor.

Tal como na ponte completa do conversor CC/CC, também foram usados condensadores *snubber* (C_{S3} , C_{S4}) em cada braço de MOSFETs. Os condensadores usados são o modelo 379 MKP fabricados pela empresa Vishay (Figura 5.20).



Figura 5.20 – Condensador Visha (379 MKP) usado no circuito de *snubber* do inversor.

No filtro passa-baixo de saída do inversor foi usada uma bobine (L_2) de 50 μH (Figura 5.21) e dois condensadores (C_4 , C_5) de 22 μF em paralelo. Os condensadores usados são o modelo M109215032 fabricados pela empresa EPCOS e suportam tensões

até aos 100 V. Foi ainda usada uma resistência de 2Ω em serie com um desses condensadores para amortecer possíveis ressonâncias no filtro passivo.

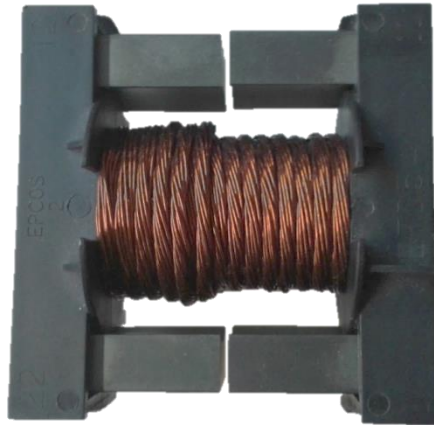


Figura 5.21 – Bobine com núcleo de ferrite usada no filtro passa baixo de saída do inversor.

5.4. Sistema de Controlo

Neste subcapítulo são apresentadas as diferentes placas e componentes utilizados no sistema de controlo do protótipo desenvolvido. Estes incluem elementos essenciais desde a aquisição de dados até ao acionamento dos semicondutores. Todas as placas referidas neste subcapítulo foram desenvolvidas pelo GEPE. Na Figura 5.22 está apresentado um diagrama de blocos do sistema de controlo implementado.

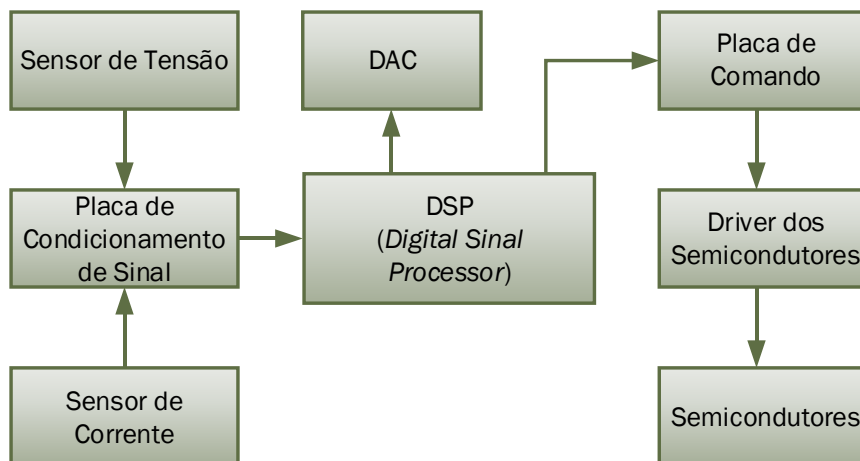


Figura 5.22 – Diagrama de blocos do sistema de controlo utilizado no protótipo desenvolvido.

5.4.1. Sensor de Tensão

De forma a obter os valores de tensão em diversos pontos do sistema de forma isolada foram usados sensores de tensão de efeito de Hall, mais concretamente o modelo *CYHVS5-25A* da empresa *ChenYang Sensors*. A tensão de medida nominal deste sensor é 1500 V, sendo que está preparado para uma tensão máxima de 2000 V. A corrente nominal deste sensor no primário é 5 mA e no secundário 25 mA, sendo que possui uma

relação de espiras de 5000:1000. Na Figura 5.23 está representado o sensor bem como o esquemático de montagem deste, para que seja possível efetuar medições.

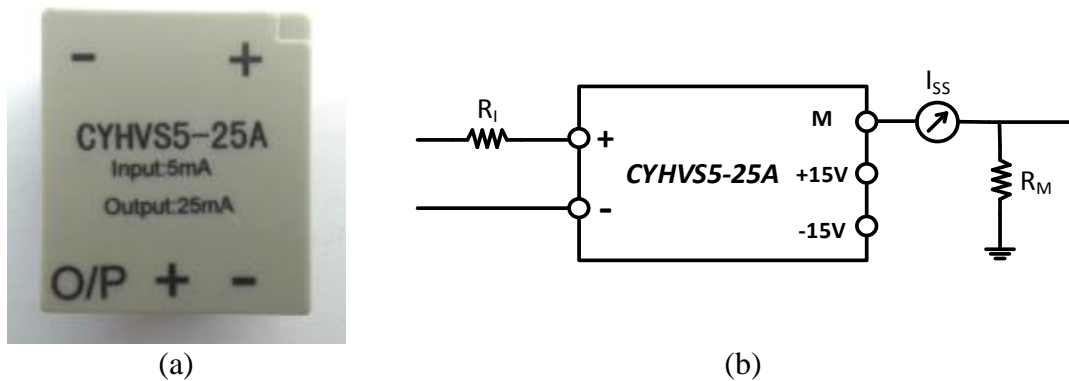


Figura 5.23 – Sensor de tensão *ChenYang Sensors (CYHVS5-25^a)*: (a) Aspetto exterior do sensor; (b) Esquema de ligação do sensor.

Para utilizar o sensor de tensão corretamente, é necessário calcular as resistências R_I e R_M . Para calcular R_I é necessário definir a tensão máxima que se pretende medir no sistema. Assim é possível calcular R_I a partir da seguinte equação:

$$R_I = \frac{V_{MM}}{I_{PS}} \quad (5.3)$$

em que V_{MM} é a tensão máxima que irá ser medida no sistema e I_{PS} a corrente nominal no primário do sensor, que neste caso é 5 mA. Quanto à resistência R_M , esta depende do valor de tensão máximo que se pretende obter à saída do sensor. Assim, R_M pode ser calculado por:

$$R_M = \frac{V_{MS}}{I_{SS}} \quad (5.4)$$

em que V_{MS} é a tensão máxima de saída do sensor e I_{SS} a corrente nominal no secundário do sensor, que neste caso é 25 mA. A tensão máxima de saída do sensor desejada para todos os sensores é 2,5 V, sendo que desta forma R_M terá o valor de 100 Ω . Esta resistência está montada na placa de condicionamento de sinal. No sistema foram usados três sensores de forma a medir a tensão de entrada do sistema (v_i), a tensão no barramento CC (v_{CC}) e a tensão de saída (v_o). Na Tabela 5.1 estão apresentadas as características definidas para os sensores.

Tabela 5.1 – Valor da resistência R_I para os sensores de tensão.

Sensores	Tensão máxima	Valor de R_I
Sensor da tensão de entrada (v_i)	600 V	120 k Ω
Sensor da tensão do barramento CC (v_{CC})	100 V	20 k Ω
Sensor da tensão de saída (v_o)	100 V	20 k Ω

Na Figura 5.24 está apresentada a placa do sensor já montada com os componentes calculados.



Figura 5.24 – Placa do sensor de tensão utilizada no protótipo desenvolvido.

5.4.2. Sensor de Corrente

Para obter os valores de corrente em diversos pontos do sistema de forma isolada foram usados sensores de corrente de efeito de Hall, mais concretamente o modelo *LA100-P* da *LEM*. A corrente nominal no primário do sensor é 100 A e no secundário é 50 mA. Isto verifica-se devido à relação de espiras de 1:2000. Na Figura 5.25 está apresentado o sensor bem como o esquemático de montagem para que seja possível efetuar medições desejadas.

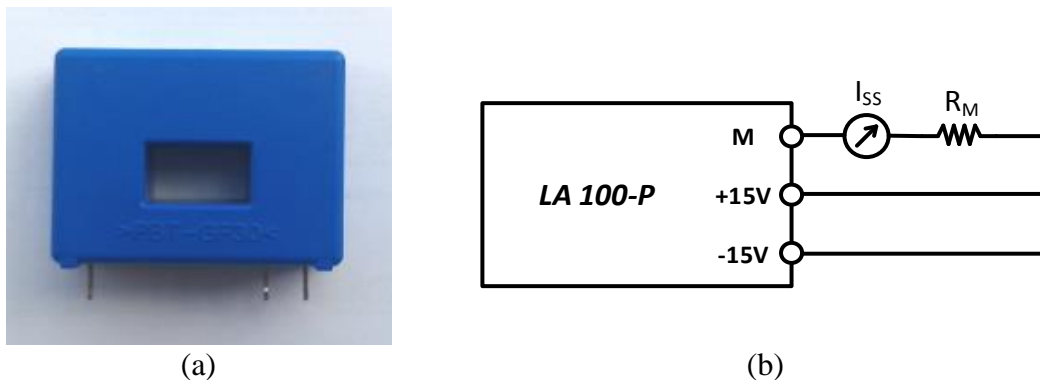


Figura 5.25 – Sensor de corrente *LEM (LA100-P)*: (a) Aspeto exterior do sensor; (b) Esquema de ligação do sensor.

Tal como no sensor de tensão é necessário dimensionar uma resistência de saída que pode ser calculada através da mesma equação do sensor de tensão (Equação 5.6). Como também se pretende uma tensão de 2,5 V, a resistência R_M terá um valor de 50 Ω . Esta resistência também se encontra montada na placa de condicionamento de sinal. Na Figura 5.26 está apresentada a placa do sensor de corrente já montada os componentes calculados.



Figura 5.26 – Placa do sensor de corrente utilizada no protótipo desenvolvido.

5.4.3. Placa de DSP

De forma a implementar o algoritmo de controlo do sistema foi utilizado o DSP (Digital Signal Processor) *TMS320F28335* desenvolvido pela *Texas Instruments*. Trata-se de um DSP de 32 bits com uma frequência de *clock* de 150 MHz. Este DSP apresenta a grande vantagem de permitir operações com vírgula flutuante por *hardware*. Além disto também possui 18 canais de PWM, o que satisfaz as necessidades dos conversores do sistema desenvolvido. Na Figura 5.27 está apresentado o DSP bem como a placa desenvolvida pelo GEPE, onde é colocado o DSP. Esta placa possui os periféricos necessários para a interligação com as outras placas do sistema de controlo.

O DSP permite a programação em linguagem C dos algoritmos necessários para controlar o sistema corretamente. De forma a executar os algoritmos de controlo, é necessário proceder à leitura dos valores de tensão e de corrente em diversos pontos do circuito. No DSP estes dados são obtidos através da leitura dos ADCs. Concluída a leitura dos ADCs, calcula-se a potência extraída pelo conversor nesse instante, sendo este valor de potência utilizado no algoritmo MPPT por forma a determinar o sentido da perturbação a aplicar no instante seguinte, expressada através da alteração do duty-cycle no conversor CC/CC ponte completa do tipo *Buck*. Como já foi referido, isto tem o intuito de extrair sempre a máxima potência possível. Os restantes valores de tensão e corrente obtidos pelo ADC, são utilizados no controlo do inversor, que utiliza um controlo PI cujo erro é a diferença entre o valor de tensão desejado na saída do inversor

e o valor atual à saída do mesmo. Na Figura 5.28 está apresentado um fluxograma simplificado do algoritmo de controlo do sistema.



Figura 5.27 – DSP da *Texas Instruments* (*TMS320F28335*) e a placa do DSP utilizados no protótipo desenvolvido.

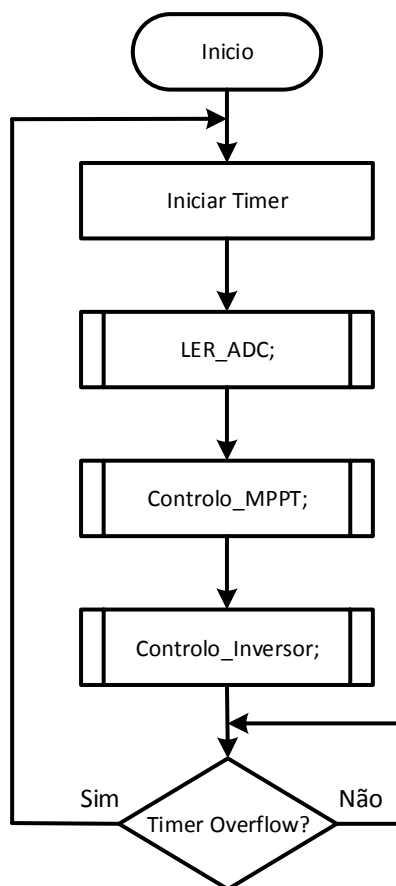


Figura 5.28 – Fluxograma simplificado do algoritmo de controlo do sistema.

5.4.4. Placa de Condicionamento de Sinal

Esta placa permite o condicionamento dos sinais provenientes dos sensores. Esta placa contém também 1 ADC externo de 8 canais com 14 Bits de resolução e uma gama de tensão de entrada de -5V a 5V. Na Figura 5.29 está apresentada a placa de condicionamento de sinal referida.



Figura 5.29 – Placa de condicionamento de sinal utilizada no protótipo desenvolvido.

A placa de condicionamento de sinal, para além de permitir a leitura dos sinais, também permite aplicar proteções ao sistema através da imposição de limites nos valores medidos. Isto é, quando são detetados valores que ultrapassem os limites, esta placa gera um sinal de erro que é aplicado às placas de comando, provocando uma paragem na comutação dos semicondutores, protegendo assim sistema.

Esta placa é ligada ao DSP através de uma flat cable de 26 pinos para transferir os valores convertidos pelo ADC. Os sinais de erro gerados são aplicados à placa de comando através de ligadores de 3,5 mm.

5.4.5. Placa DAC

A placa DAC (Digital to Analog Converter) permite converter as variáveis digitais internas do DSP em sinais analógicos de forma a ser possível visualizar a evolução destas variáveis em tempo real com o auxílio de um osciloscópio. A placa em si possui 8 saídas analógicas, permitindo assim observar 8 variáveis digitais do DSP em simultâneo. A ligação com a placa de DSP é feita a partir de uma ficha DB9, sendo que

é usada comunicação série SPI para envio de dados. Na Figura 5.30 está apresentada a placa DAC.



Figura 5.30 – Placa DAC utilizada no protótipo desenvolvido.

5.4.6. Placa de Comando Monofásica e Trifásica

As placas de comando, tanto a monofásica como a trifásica, permitem transformar os sinais provenientes do DSP de lógica TTL de 3,3 V para sinais lógicos CMOS de 15 V mais imunes aos ruídos de comutação dos semicondutores dos conversores de potência. A principal diferença entre as duas placas encontra-se no facto de a placa de comando trifásica permitir controlar mais um braço de semicondutores do que a placa monofásica. Assim sendo, a placa monofásica possui duas saídas através de fichas DB9, que permitem controlar dois braços de semicondutores e a placa trifásica possui 3 fichas DB9, permitindo acionar 3 braços de semicondutores. A placa monofásica recebe os sinais de PWM da placa de DSP através de uma flat cable de 10 pinos e a placa trifásica recebe os sinais de PWM através de uma flat cable de 14 pinos. Assim, a versão trifásica da placa permite controlar 6 semicondutores de forma independente e é usada para acionar os IGBTs do conversor CC/CC ponte completa do tipo *buck* e o travão elétrico do sistema. A versão monofásica da placa de comando permite controlar até 4 semicondutores de forma independente e é utilizada para os MOSFETs do inversor monofásico. Estas duas placas estão representadas na Figura 5.31.

Para além da conversão do nível do sinal TTL para CMOS a placa de comando também tem a função de *enable/disable* das comutações e corte das comutações quando um sinal de erro proveniente da placa de condicionamento de sinal seja ativado. O *enable/disable* das comutações é feito através de um interruptor que está ligado a um ligador de 3,5 mm. O sinal de erro também é ligado à placa de comando através de um

ligador de 3,5 mm. Quando um sinal de erro proveniente da placa de condicionamento de sinal é gerado, as placas de comando cortam as comutações, sendo que este sinal de erro é memorizado e conseqüentemente as comutações permanecem desativadas até que um sinal de *reset* seja aplicado à placa. O sinal de *reset* tem origem num botão de pressão que também está ligado a um ligador de 3,5 mm e pode ser pressionado pelo operador.

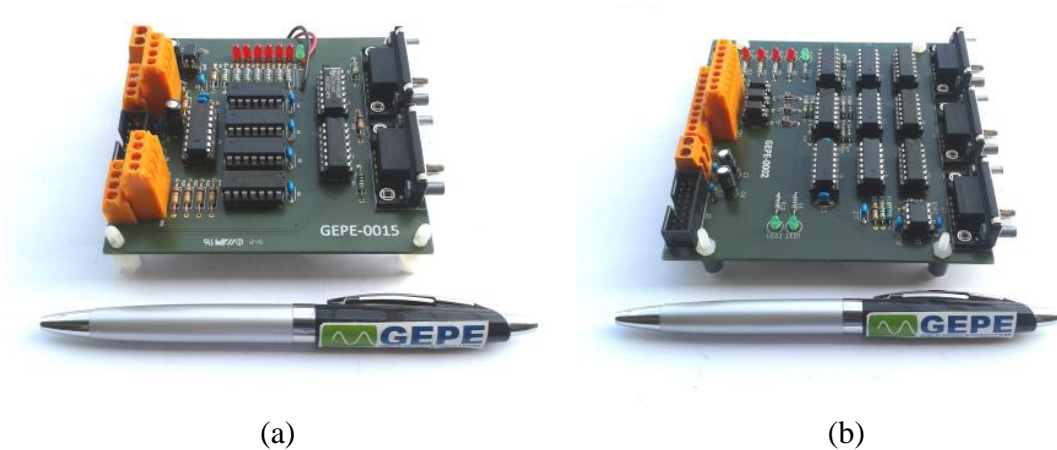


Figura 5.31 – Placas de comando utilizadas no protótipo desenvolvido: (a) Versão monofásica; (b) Versão trifásica.

5.4.7. Placa de *Driver* dos Semicondutores

A placa de *driver* recebe os sinais de PWM da placa de comando aciona os semicondutores dos conversores de potência. Esta placa recebe a alimentação e os sinais de PWM através de uma ficha DB9 e liga os semicondutores de potência através de ligadores de 3.5 mm que estão montados tanto na placa de *driver* como na placa de potência. A placa de *driver* está apresentada na Figura 5.32.



Figura 5.32 – Placa de *driver* dos semicondutores usada no protótipo desenvolvido.

A placa de *driver* utilizada permite isolar galvanicamente a parte de controlo da parte de potência do sistema, evitando assim que os problemas na potência se propaguem para a parte de controlo. Isto é realizado através do uso de um opto acoplador (HCPL 3120) e uma fonte CC/CC isolada (*TMA1515D*) que alimenta o andar de saída do *driver* com +15 V e -15 V. Esta placa permite a partilha da fonte CC isolada através de ligadores de 3.5 mm. No caso do conversor CC/CC ponte completa do tipo *buck*, é possível partilhar a alimentação dos dois IGBTs inferiores de cada braço. O mesmo se sucede na ponte completa do inversor, em que é possível partilhar a alimentação dos MOSFETs inferiores de cada braço. Isto é possível visto que, no caso dos IGBTs, os emissores apresentam o mesmo potencial e no caso dos MOSFETs as *Sources* apresentam o mesmo potencial.

5.5. Conclusão

Neste capítulo foram descritas as diversas partes que compõem protótipo do sistema microeólico isolado desenvolvido.

Foram inicialmente descritas as partes necessárias para emular a turbina microeólica. Estas são o gerador de ímanes permanentes (PMSG), o motor de indução e o variador de velocidades que permite juntamente com o motor, simular as mudanças de velocidade do vento.

Quanto à eletrónica de potência, foram descritos os diversos componentes que compõem os três conversores: retificador (conversor CA/CC), conversor CC/CC ponte completa do tipo *buck* e o inversor (conversor CC/CA). Foram também explicados os cálculos necessários ao dimensionamento do transformador de alta frequência utilizado.

Relativamente ao sistema de controlo, foi apresentado o DSP e as suas principais características diferenciadoras para este projeto. Foi apresentado o fluxograma do algoritmo principal de controlo do sistema. Foram também apresentadas as diversas placas periféricas necessárias no sistema de controlo, nomeadamente a placa de condicionamento de sinal, as placas de comando, as placas de sensores e as placas de *driver* dos semicondutores de potência.

CAPÍTULO 6

Resultados Experimentais do Protótipo Desenvolvido

6.1. Introdução

Neste capítulo são apresentados os resultados experimentais obtidos com o protótipo de sistema microeólico isolado desenvolvido.

Numa primeira fase foram efetuados ensaios ao gerador síncrono de ímanes permanentes de forma a confirmar os dados do *datasheet* disponibilizado pelo fornecedor, bem como para determinar alguns dados em falta nesse *datasheet*. Posteriormente foram efetuados testes aos conversores de potência de forma individual, para verificar o seu correto funcionamento antes de os colocar em conjunto. Concluída a verificação do funcionamento dos conversores, procedeu-se à integração do sistema e foram realizados ensaios para diferentes tipos de carga. Por motivos de segurança, os ensaios ao sistema foram efetuados com uma potência menor que a nominal, sendo que desta forma foram usadas 2 baterias de 12 V em vez de 4 como inicialmente previsto, reduzindo o nível de tensão no barramento CC e conseqüentemente à saída do inversor monofásico.

Na Figura 6.1 está apresentado o protótipo desenvolvido bem como os seus periféricos.

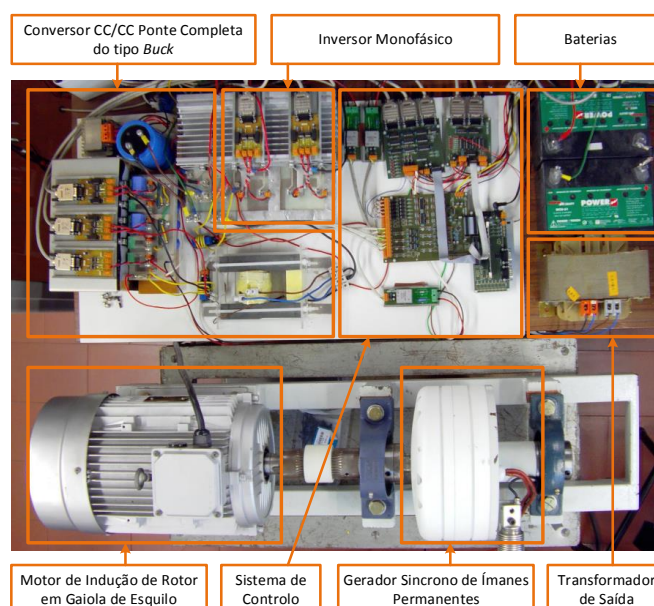


Figura 6.1 – Protótipo completo do sistema microeólico isolado com baterias.

6.2. Ensaios ao Gerador Síncrono de Ímanes Permanentes

Existiu a necessidade de efetuar alguns ensaios ao gerador síncrono de ímanes permanentes pois faltavam alguns dados que não eram fornecidos pelo *datasheet*. Os ensaios também permitiram confirmar alguns dados fornecidos pelo *datasheet*, nomeadamente as curvas de potência para diferentes situações. Para obter os dados pretendidos foram realizados ensaios com o gerador em vazio, com carga linear e com carga não linear.

6.2.1. Ensaio do Gerador em Vazio

O gerador foi colocado a funcionar a diferentes velocidades de rotação de forma a verificar as características apresentadas pelas tensões geradas para as diferentes velocidades de rotação. Na Figura 6.2 estão apresentadas as tensões à saída do gerador, sendo que se pode verificar a boa qualidade destas, bem como o desfasamento de 120° entre elas como seria esperado.

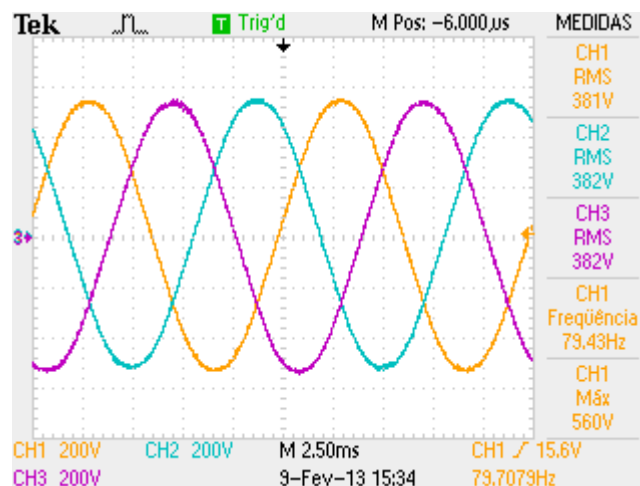


Figura 6.2 – Formas de onda da tensão produzidas pelo gerador em vazio a 600rpm.

Tendo em conta que o número de polos não é fornecido pelo *datasheet* do gerador, é possível calcular a partir da equação 3.4. Através das formas de onda apresentadas na Figura 6.2, é possível verificar que esta possui uma frequência de 80 Hz para uma velocidade de rotação de 600 rpm, substituindo estes valores na equação 3.4 pode calcular-se que o gerador possui 8 pares de pólos.

No *datasheet* do gerador é fornecido um gráfico da tensão em função da velocidade da rotação do gerador (Figura 3.25). No entanto, como já foi referido no Capítulo 3, não existe qualquer indicação se a tensão disponibilizada nos gráficos é a tensão composta ou a tensão de saída retificada. Na Figura 6.3 está apresentado um

gráfico dos valores de tensão composta medidos durante o ensaio em vazio em função da velocidade de rotação.

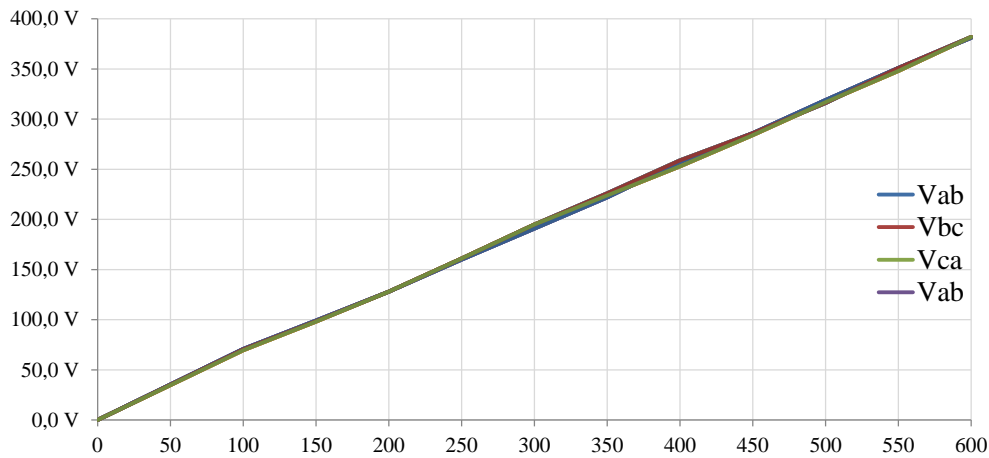


Figura 6.3 – Valor eficaz das tensões compostas do gerador em vazio em função da velocidade de rotação.

É possível verificar que os valores da tensão composta são bastante diferentes dos valores apresentados no gráfico do *datasheet* do fabricante, podendo concluir-se que os valores apresentados no gráfico fornecido não dizem respeito ao valor eficaz da tensão composta.

6.2.2. Ensaio com Carga Linear (Resistiva)

Depois de efetuado o ensaio em vazio, procedeu-se à realização de um ensaio do gerador com uma carga linear (resistiva). Para tal, foram colocadas cargas resistivas em cada fase do gerador para que este forneça o máximo de potência possível para as diferentes velocidades de rotação. Na Figura 6.4 está apresentado um gráfico com os valores de potência gerada para as diferentes velocidades de rotação.

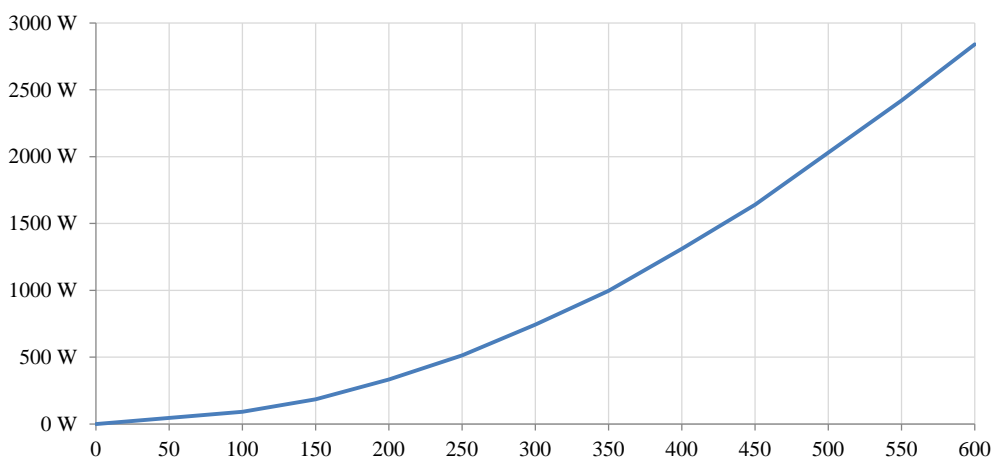


Figura 6.4 – Potência máxima na saída do gerador com carga linear em função da velocidade de rotação.

Comparando os resultados obtidos com os dados fornecidos pelo fabricante (Figura 3.23) é possível verificar que os dois gráficos apresentam uma curva de potência bastante semelhante.

6.2.3. Ensaio com Carga Não-Linear (Retificador e Carga Resistiva)

Por último, foi efetuado um ensaio utilizando uma ponte retificadora na saída do gerador. Inicialmente não foi usada qualquer carga de forma a verificar a tensão à saída da ponte retificadora com o gerador em vazio. Durante este ensaio foi registada a tensão de saída retificada para as diferentes velocidades de rotação, obtendo-se assim o gráfico da Figura 6.5.

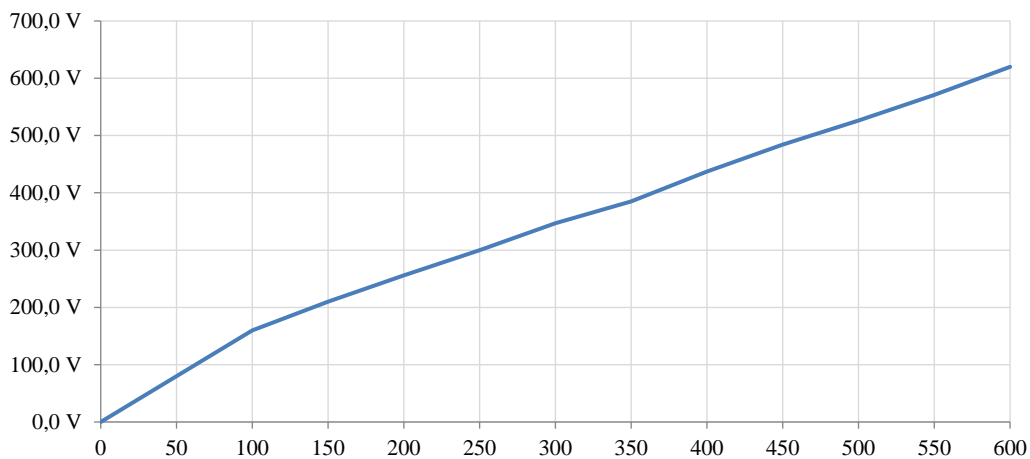


Figura 6.5 – Tensão retificada do gerador em vazio em função da velocidade de rotação.

Pode verificar-se que os valores das tensões se encontram mais próximos dos valores disponibilizados pelo *datasheet* do fabricante (Figura 3.24), supondo-se assim que os valores de tensão apresentados dizem respeito à tensão de saída do gerador retificada.

Concluídos os ensaios em vazio, colocou-se uma carga resistiva à saída do retificador. Esta carga foi dimensionada de forma a extrair o máximo de potência do gerador para as diferentes velocidades de rotação. Na Figura 6.6, estão apresentadas as formas de onda da tensão e da corrente à saída do gerador.

Na Figura 6.7 está apresentado um gráfico da potência extraída em função da velocidade de rotação usando os resultados obtidos no ensaio realizado. Pode verificar-se que em relação ao teste efetuado com uma carga linear, a potência extraída apresenta uma curva de potência similar, divergindo um pouco a partir dos 400 rpm como se pode verificar na Figura 6.8.

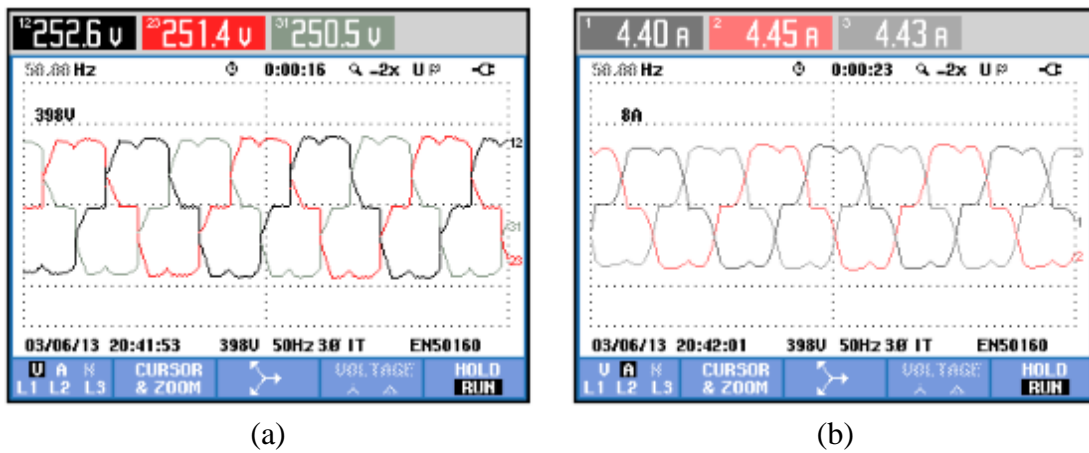


Figura 6.6 – Formas de onda produzidas pelo gerador com carga não linear:(a) Tensão; (b) Corrente.

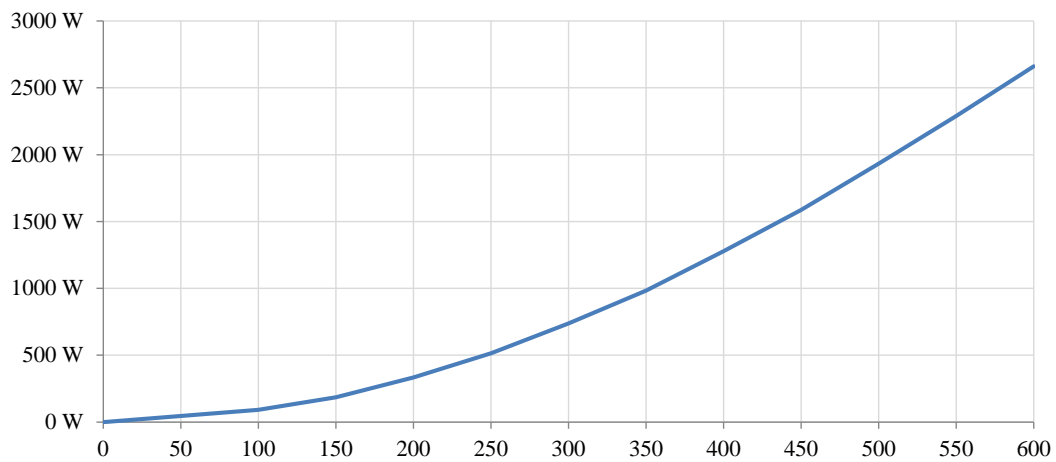


Figura 6.7 Potencia máxima à saída do gerador com carga não linear em função da velocidade de rotação.

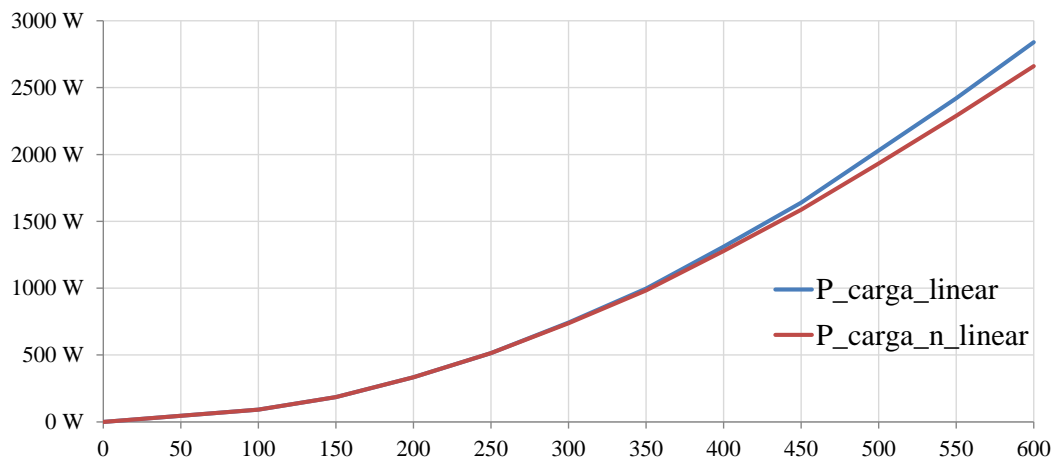


Figura 6.8 – Potência máxima à saída do gerador com carga linear (azul) e com carga não linear (vermelho) em função da velocidade de rotação.

6.3. Resultados Experimentais

Com o protótipo completo, foram realizados testes em separado aos conversores de potência de forma a verificar o seu correto funcionamento. Assim, neste subcapítulo

são demonstrados os passos efetuados durante os testes experimentais, bem como os resultados obtidos.

6.3.1. Conversor CC/CC Ponte Completa do Tipo *Buck*

O conversor CC/CC ponte completa do tipo *buck* foi primeiramente testado usando uma fonte de alimentação de laboratório para aplicar uma tensão constante de 60V na entrada do conversor. Na saída deste foi colocada uma resistência. Na Figura 6.9 está representado o circuito usado para testar o conversor.

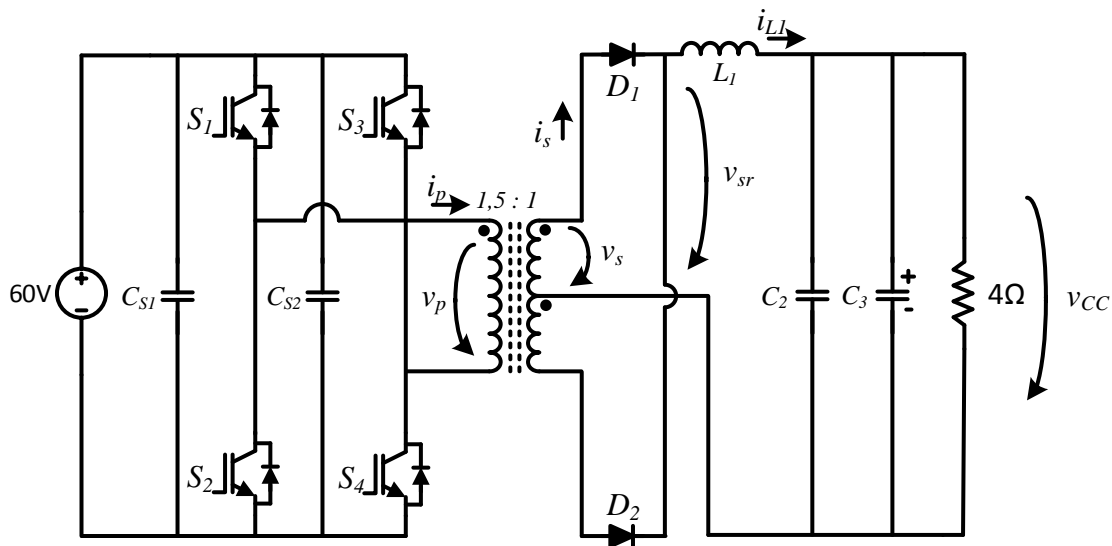


Figura 6.9 – Circuito de teste do conversor CC/CC ponte completa do tipo *buck*.

Com o início dos testes, verificou-se que estava a ocorrer o fenómeno discutido no subcapítulo 4.3.1, isto é, a indutância de dispersão do transformador era demasiado elevada, causando um problema no *duty-cycle* no secundário do transformador. Na Figura 6.10 pode-se verificar este fenómeno.

Para resolver este problema, os enrolamentos do transformador de alta frequência foram colocados de forma sobreposta, isto é, como se verifica na Figura 6.11 (b). Estes inicialmente encontravam-se colocados locais opostos no núcleo, causando o aumento da indutância de dispersão (Figura 6.11 (a)).

Aplicando estas modificações ao transformador, foram obtidos melhores resultados pois o *duty-cycle* da tensão aplicada ao primário mantinha-se quase inalterado no secundário do transformador. Na Figura 6.12 está apresentado o resultado obtido durante o teste efetuado com a nova configuração do transformador.

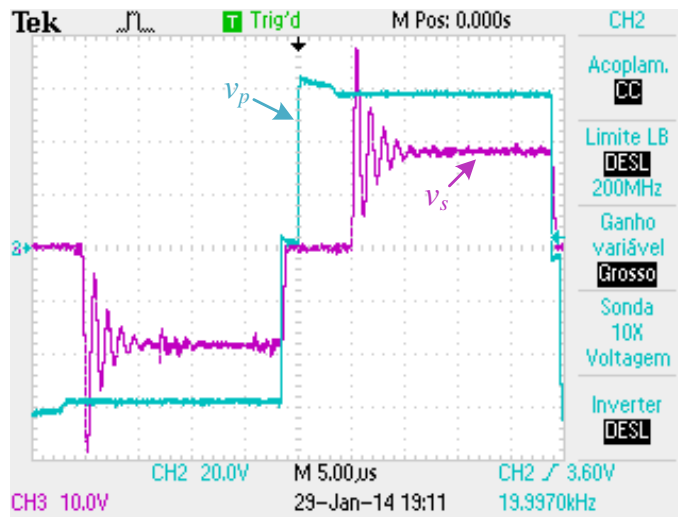


Figura 6.10 – Forma de onda da tensão obtida no primário (v_p) e no secundário do transformador (v_s) com problema na indutância de dispersão.

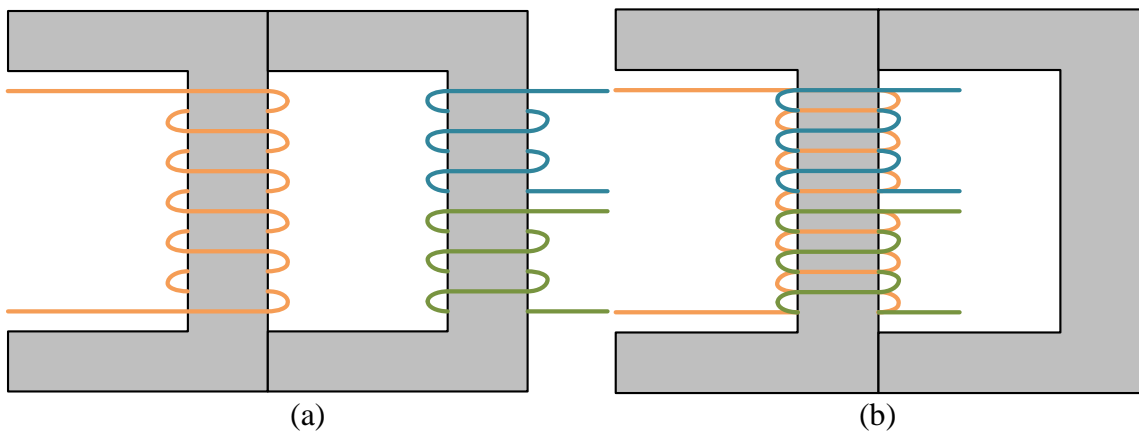


Figura 6.11 – Disposição dos enrolamentos no transformador de elevada frequência: (a) Enrolamentos em locais opostos; (b) Enrolamentos sobrepostos.

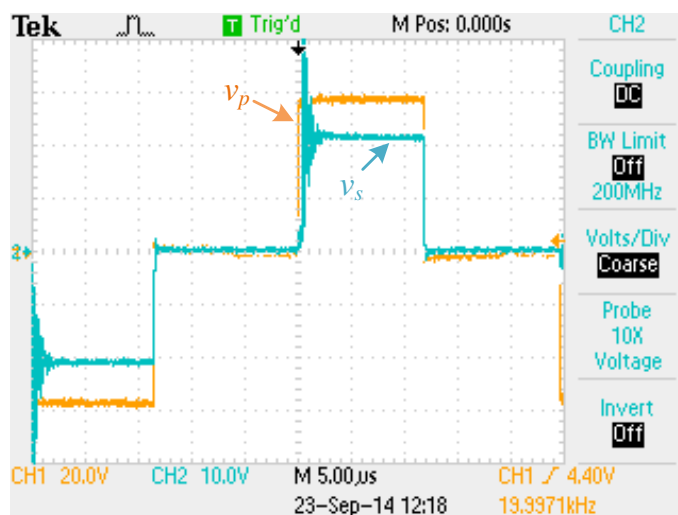


Figura 6.12 - Forma de onda da tensão obtida no primário (v_p) e no secundário do transformador (v_s) sem problema na indutância de dispersão.

Finalmente, de forma a testar o funcionamento correto do conversor, o sistema de controlo foi programado para manter uma tensão de saída constante igual a 10 V (a

que corresponderia um *duty-cycle* de aproximadamente 50%). Na Figura 6.13 pode verificar-se os resultados obtidos.

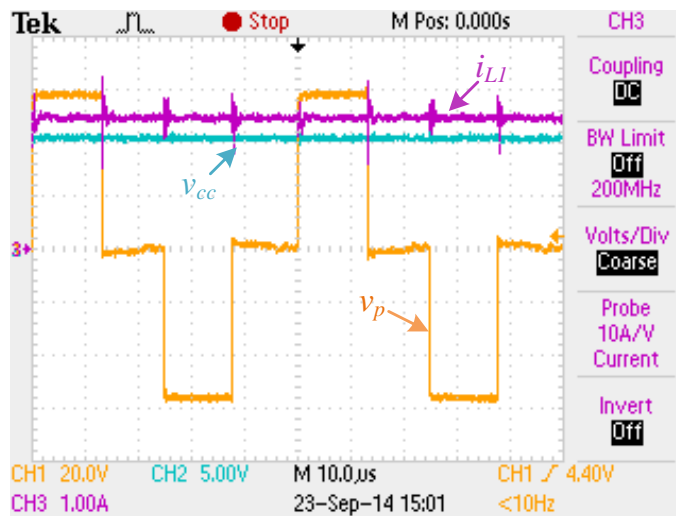


Figura 6.13 – Formas de onda da tensão no primário do transformador (v_p) e na saída (v_{cc}) e da corrente na bobine (i_{L1}) do conversor CC/CC ponte completa do tipo buck.

É possível verificar que a tensão de saída se encontra nos 10 V e consequentemente a corrente de saída tem um valor de 2,5 A.

6.3.2. Inversor Monofásico

O inversor foi inicialmente testado usando uma fonte de alimentação de laboratório, para alimentar o barramento CC do inversor. Foi utilizada uma carga linear resistiva de forma a verificar o seu correto funcionamento. O transformador utilizado na saída do inversor possui uma relação de espiras de 1:7,67. Na Figura 6.14 está apresentado o circuito usado para testar o inversor.

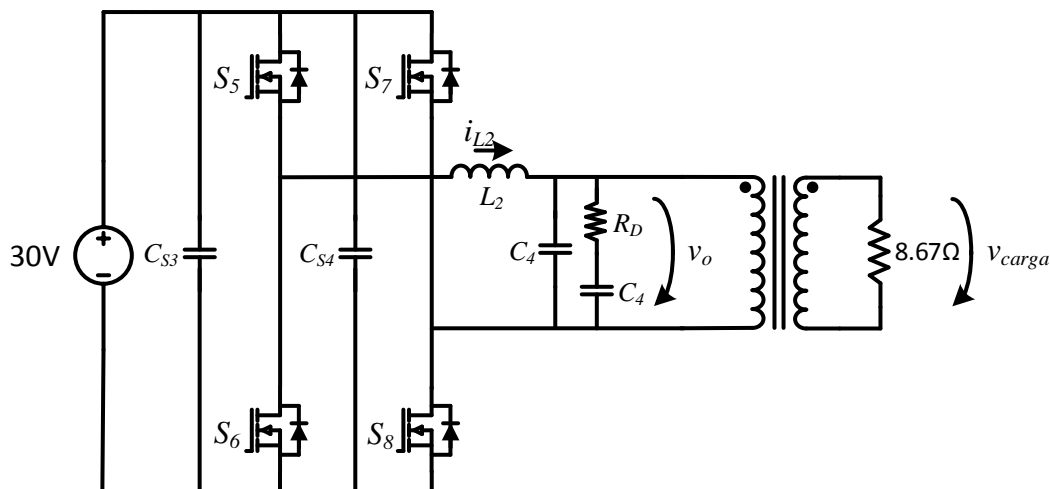


Figura 6.14 - Circuito de teste do inversor monofásico.

Na Figura 6.15 (a) estão apresentadas as formas de onda da tensão antes e depois do transformador e da corrente antes do transformador. Pode-se constatar que ambas as ondas de tensão apresentam uma THD baixa (Figura 6.15 (b)), tal como era desejado. Neste teste experimental, pretendia-se verificar se os problemas de distorção da tensão causados pelo *deadtime* são removidos pelo controlo implementado. Como é visível pelos resultados obtidos, o efeito do *deadtime* foi quase totalmente removido, resultando numa onda de tensão com THD inferior a 3%, valor bastante aceitável nesta aplicação. É possível também verificar que a amplitude da tensão à saída do inversor possui um valor de 15 V, correspondendo ao valor programado no controlador do inversor para este teste.

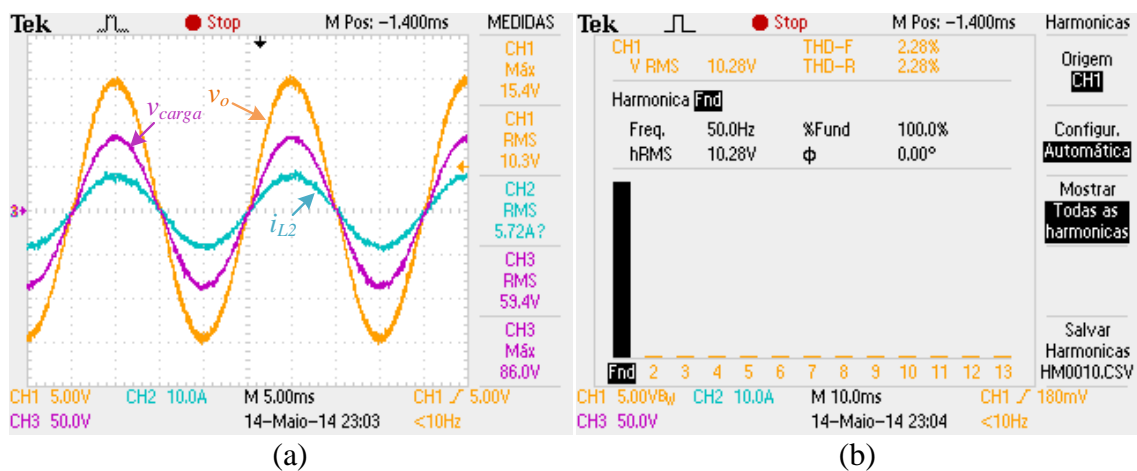
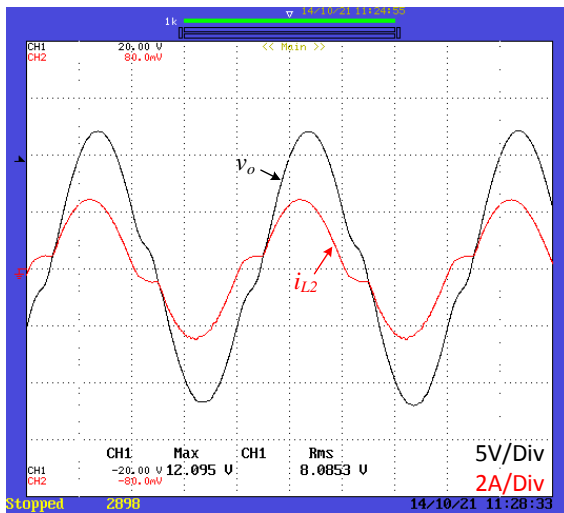
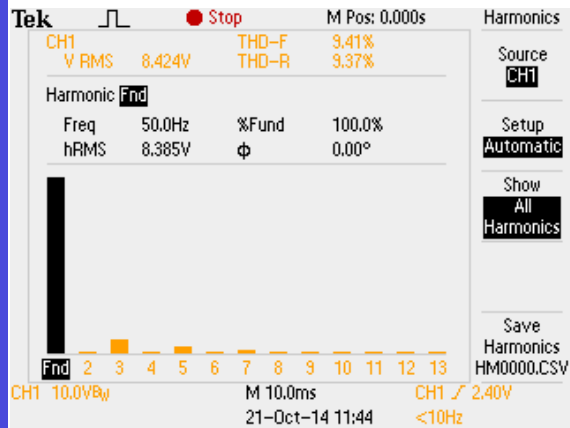


Figura 6.15 – Resultados experimentais do inversor monofásico com carga linear: (a) Forma de onda da tensão (v_o) e corrente (i_{L2}) à saída do inversor e no secundário do transformador de saída (v_{carga}); (b) Espectro harmónico e THD da tensão de saída do inversor.

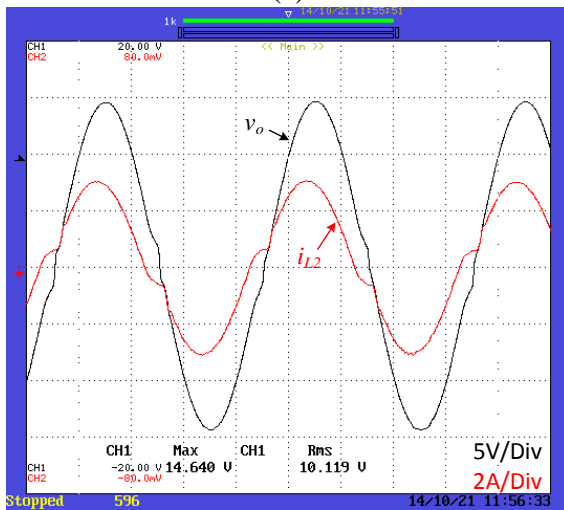
Depois de efetuados os testes com carga linear, foram efetuados diversos testes com cargas não lineares, numa primeira fase sem o transformador de saída. Num primeiro ensaio foi usada uma carga não linear composta por um retificador, um filtro capacitivo e uma resistência de 4 Ω . Na Figura 6.16 estão apresentados os resultados finais obtidos, em que na Figura 6.16 (a) está apresentada a tensão de saída sem controlador PI e na Figura 6.16 (c) a tensão de saída aplicando o controlador PI desenvolvido. São também apresentados os respetivos espectros harmónicos nas Figura 6.16 (b) e Figura 6.16 (d). A medição de corrente apresenta uma escala de 1 A por 10 mV.



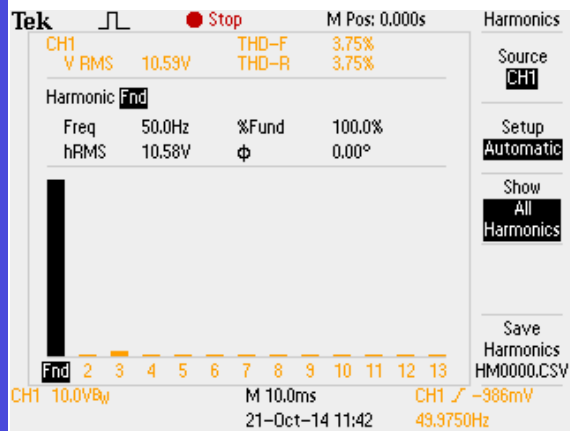
(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 6.16 - Resultados experimentais do inversor monofásico com carga não-linear: (a) Forma de onda da tensão (v_o) e corrente (i_{L2}) à saída do inversor sem controlador PI; (b) Espetro harmónico e THD da tensão de saída do inversor sem controlador PI; (c) Forma de onda da tensão (v_o) e corrente (i_{L2}) à saída do inversor com controlador PI; (d) Espetro harmónico e THD da tensão de saída do inversor com controlador PI;

6.3.3. Conversor CC/CC Ponte Completa do Tipo *Buck* e Inversor Monofásico em Conjunto

Após validação individual de cada um dos conversores, procedeu-se à integração do sistema para realizar o teste aos conversores em conjunto, juntamente com duas baterias de 12 V ligadas em serie ao barramento CC. Foi também usada uma carga não linear na saída do inversor. Na Figura 6.17 está apresentado o circuito usado para efetuar os testes.

Na Figura 6.18 estão apresentados os resultados obtidos durante este teste efetuado. O conversor CC/CC ponte completa do tipo *buck* foi colocado a funcionar em modo de controlo de corrente. De referir que a medição de corrente apresenta uma relação de 0,5 A por 10 mV.

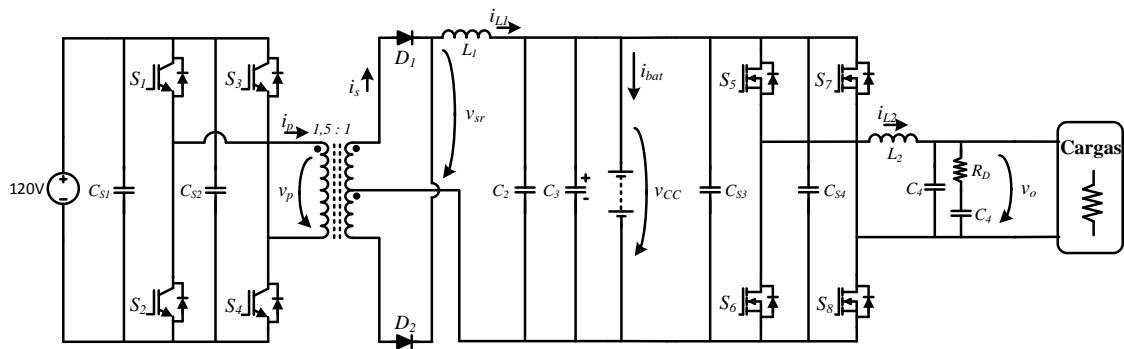


Figura 6.17 - Circuito de teste do funcionamento dos conversores em conjunto.

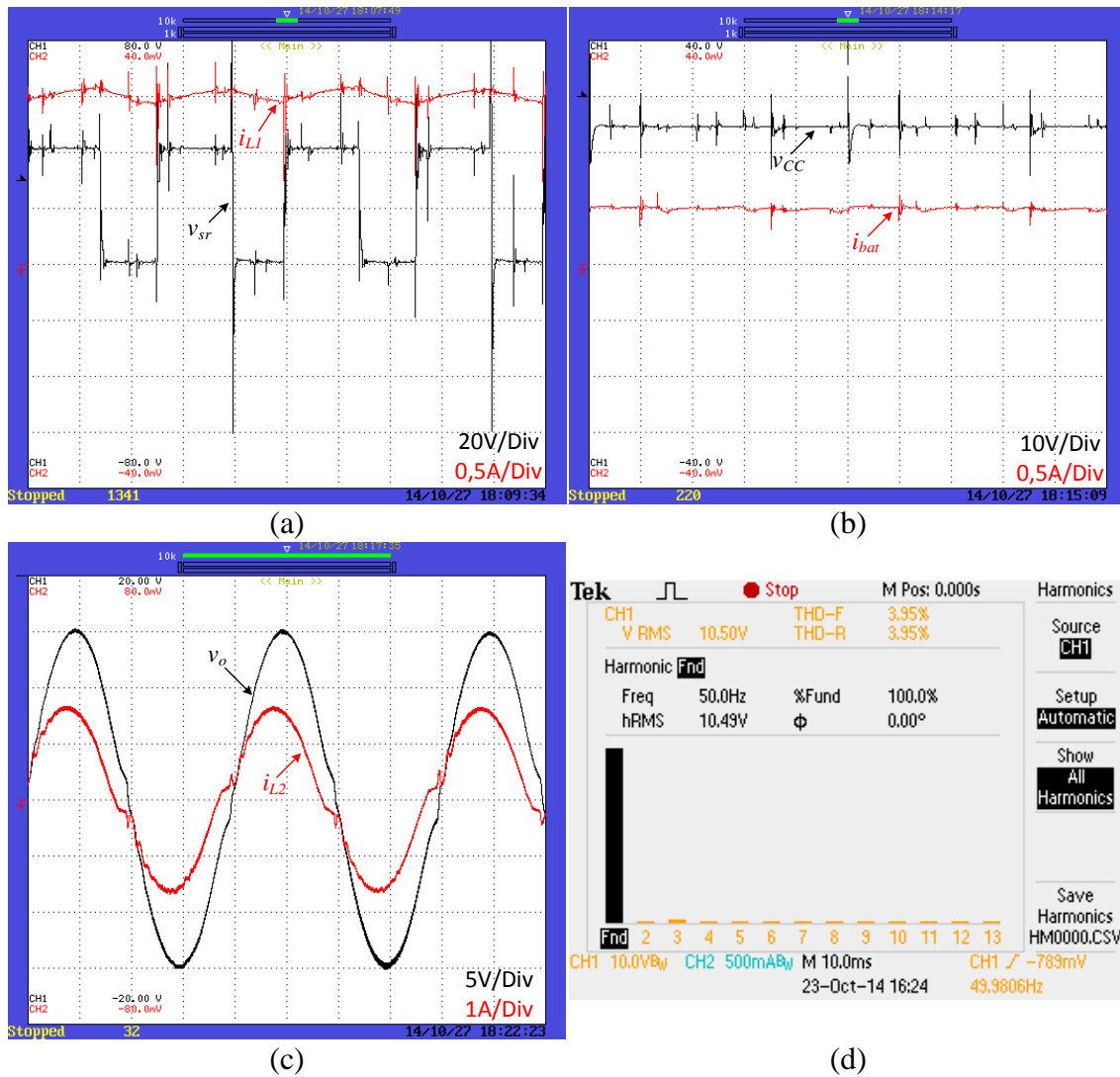


Figura 6.18 – Resultados experimentais obtidos durante o teste efetuado aos conversores em conjunto: (a) Forma de onda da tensão retificada no secundário do transformador (v_{sr}) e da corrente na bobine (i_{L1}) do conversor CC/CC ponte completa do tipo *buck*; (b) Forma de onda da tensão no barramento CC (v_{cc}) e da corrente nas baterias (i_{bat}); (c) Forma de onda da tensão (v_o) e da corrente (i_{L2}) à saída do inversor monofásico; (d) Espectro harmónico e THD da tensão à saída do inversor monofásico.

O controlo de corrente foi definido para uma corrente de referência de 1,5 A, o que se verifica na Figura 6.18 (a). A energia extraída em excesso da fonte de alimentação é usada para carregar as baterias, podendo-se verificar isto através da corrente que está a fluir para as baterias na Figura 6.18 (b). Na Figura 6.18 (c) está

apresentada a tensão e corrente antes do transformador e na Figura 6.18 (d) o espectro harmónico e a THD da tensão. A tensão à saída do inversor possui uma amplitude de 15 V, valor definido no controlo do inversor.

6.4. Conclusão

Neste capítulo foram descritos os resultados experimentais obtidos com o protótipo de sistema microeólico isolado desenvolvido neste projeto. Foram efetuados ensaios ao gerador da turbina eólica e aos conversores de potência do protótipo desenvolvido.

Os resultados obtidos durante os ensaios efetuados ao gerador da turbina eólica permitiram obter dados importantes que não eram divulgados no *datasheet* fornecido pelo fabricante.

Foram também efetuados testes experimentais aos conversores de potência em separado de forma a verificar o seu correto funcionamento. Isto permitiu evitar alguns problemas que surgiriam durante os testes do protótipo em conjunto. Durante o teste do sistema completo, foi possível verificar que o sistema cumpre os requisitos impostos à partida, isto é, permite armazenar energia nas baterias e fornecer uma tensão de boa qualidade à saída do inversor.

CAPÍTULO 7

Conclusões e Trabalho Futuro

7.1. Conclusão

Nesta dissertação foi descrito o desenvolvimento da eletrónica de potência para um sistema microeólico isolado com baterias. O protótipo final permitiu verificar o funcionamento do sistema para baixa potência, conseguindo colocar à saída uma tensão sinusoidal com a amplitude desejada e com baixo valor de THD, permitindo também armazenar o excesso de energia em baterias. Durante a realização deste trabalho foi ainda escrito um artigo técnico que descreve o desenvolvimento da topologia debatida nesta dissertação e o qual foi publicado na conferência *IECON14* [39].

No capítulo 1 foi feita uma breve abordagem ao problema energético atual. Foram demonstrados os problemas inerentes ao uso de combustíveis fósseis na produção de energia e a razão pela qual o uso de energias renováveis se apresenta como alternativa interessante. São também apresentados diversos dados sobre a atual situação das energias renováveis, mais concretamente da energia eólica na Europa e em Portugal.

No capítulo 2 foi realizado um estudo às turbinas eólicas tendo-se verificado que estas podem dividir-se em dois tipos: HAWT (*Horizontal Axis Wind Turbine*) e VAWT (*Vertical Axis Wind Turbine*). Foram também descritos os principais componentes de uma turbina eólica, sem os quais o uso destas seria bastante dificultado. Para além das turbinas eólicas em si, foram abordados os sistemas de armazenamento de energia. Dos sistemas de armazenamento descritos, as características que as baterias apresentavam eram as mais interessantes para o tipo de aplicação em questão. Dentro destas, as baterias de ácido-chumbo apresentam as melhores características, entre as quais a sua robustez e baixo custo por Wh.

No final do capítulo foram ainda analisadas algumas das opções de turbinas microeólicas existentes no mercado, destacando-se o facto de existirem bastantes opções quer para as turbinas do tipo HAWT e VAWT. As turbinas eólicas estudadas são adequadas para aplicações de baixa potência, podendo-se destacar uma grande predominância de turbinas eólicas com geradores síncronos de ímanes permanentes.

No início do capítulo 3 foram descritos os diversos tipos de geradores usados nas turbinas eólicas e as topologias associadas a cada um. Verificou-se que existem diversas topologias com características interessantes, sendo que no final prevaleceu o facto de o gerador de ímanes permanentes não necessitar de fontes de energia externas, provando ser uma vantagem importante num sistema isolado. Com base nas topologias existentes para o gerador síncrono de ímanes permanentes, verificou-se a necessidade de estudar as diferentes opções existentes para os conversores de potência que poderiam ser utilizados.

Através dos estudos efetuados, foi escolhida uma topologia composta por um retificador trifásico, um conversor CC/CC e um inversor monofásico. Dos conversores CC/CC estudados foi escolhido o conversor CC/CC ponte completa do tipo *buck* pois apresenta várias vantagens para este sistema, entre as quais permitir o isolamento galvânico entre as duas partes do sistema através de um transformador e permitir maior potência em relação aos restantes conversores estudados. Este conversor reduz o nível de tensão de forma a ser possível usar baterias de baixa tensão, permitindo também a implementação da funcionalidade de MPPT no sistema. Quanto ao inversor monofásico, tem que garantir que a tensão à sua saída apresente uma forma de onda sinusoidal com a amplitude e frequência desejada, bem como um baixo valor de THD, sendo que para tal recorreu-se a um controlador PI.

No capítulo 4 são apresentadas e descritas as simulações efetuadas. Numa primeira instância foram apresentados os modelos de simulação do conjunto motor-gerador, do circuito de potência e do sistema de controlo. De seguida foram descritas as simulações efetuadas aos diferentes conversores que compõem o sistema. Estas foram realizadas de forma a verificar o funcionamento dos conversores em separado. No final, foram apresentados os resultados das simulações efetuadas ao sistema completo, sendo possível verificar o funcionamento correto deste.

No capítulo 5 foram descritas as diferentes partes que compõem o protótipo desenvolvido. Estas foram divididas no sistema de emulação da turbina eólica, o circuito de potência e o sistema de controlo. O sistema de emulação da turbina eólica é composto por um motor controlado por um variador de velocidade, o qual permite simular o vento a acionar o gerador da microeólica. Foram também descritos os dimensionamentos dos componentes montados nas placas de circuito impresso desenvolvidas, dando especial relevância ao dimensionamento do transformador de alta frequência implementado. Foi ainda descrito o sistema de controlo usado no protótipo, o qual é centrado no uso de um DSP, que permite implementar os algoritmos de controlo

desenvolvidos. De forma a possibilitar o correto funcionamento do algoritmo de controlo implementado no DSP, este precisa de obter dados do sistema. Estes foram obtidos através de sensores de tensão e corrente de efeito de Hall, sendo que os valores lidos por estes são enviados para a placa de aquisição de sinal, a qual possui um ADC de 14 bits e que permite ao DSP ter acesso a essas grandezas. Os sinais gerados pelo DSP, nomeadamente os sinais de PWM, são enviados para placas de comando, as quais em conjunto com os circuitos de *driver* permitem aplicar os sinais aos semicondutores de potência. Esta placa de comando também permite bloquear as comutações dos semicondutores quando detetados problemas pela placa de acondicionamento de sinal.

Finalmente, no capítulo 6 foram descritos os ensaios efetuados ao gerador e os resultados experimentais obtidos com o protótipo desenvolvido. Com os ensaios efetuados ao gerador foi possível obter e confirmar dados importantes que não se encontravam disponíveis no *datasheet* do fabricante. Assim, foi possível validar experimentalmente as curvas de potência do gerador para diferentes situações. Esta informação obtida é importante para confirmar o funcionamento do sistema. De seguida foram efetuados testes experimentais aos conversores. Foi possível verificar numa fase inicial que o transformador apresentava uma indutância de dispersão demasiado elevada, o qual foi resolvido com um novo desenho do transformador, permitindo que o conversor CC/CC funcionasse corretamente. Quanto ao inversor monofásico, foram inicialmente efetuados testes com uma carga linear obtendo-se rapidamente resultados satisfatórios. Com a transição para uma carga não linear surgiram problemas e foi necessário efetuar vários testes de forma a melhorar a qualidade da tensão de saída do inversor. Com estes dois conversores funcionais, procedeu-se à integração do sistema e à realização de testes dos conversores em conjunto, já com as baterias ligadas ao barramento CC, verificando-se o carregamento das baterias quando na presença de excesso de energia e uma tensão de saída do inversor com qualidade muito aceitável.

Durante a realização deste trabalho foram desenvolvidas capacidades nas áreas de eletrónica de potência e energias renováveis. Realça-se a parte de eletrónica de potência por apresentar uma grande componente prática, a qual permitiu desenvolver capacidades de construção e resolução de problemas de *hardware*. Foram também adquiridos conhecimentos de *software*, nomeadamente na programação de DSPs e desenho de placas de circuito impresso.

7.2. Trabalho Futuro

Foi comprovado o funcionamento das diversas partes que compõem o sistema microeólico realizado durante este projeto de dissertação. No entanto, existem partes do sistema que não foram testadas experimentalmente, como é o caso do algoritmo de MPPT. Este trata-se de uma parte fundamental do sistema, tendo sido comprovado o seu funcionamento em simulações. Para além disto, ainda é possível melhorar o controlo usado no inversor de forma a obter formas de tensão com melhor qualidade para diferentes tipos de cargas.

Faltou também verificar o funcionamento do sistema com o gerador a funcionar à potência nominal. Para isso seriam necessárias baterias com uma corrente nominal muito superior às que foram utilizadas por forma a permitir correntes de carga superiores a 50 A sem se danificarem, e seria necessário delimitar uma zona para realizar esses ensaios de forma segura, o que iria afetar o funcionamento normal do laboratório.

Para além disto, a introdução de um travão elétrico no sistema iria trazer maior segurança em aplicações reais. Assim a PCB foi feita de forma a permitir colocar os componentes necessários para o travão elétrico, sendo que será apenas necessário instalar os componentes e ativar o controlo no DSP. O travão elétrico não chegou a ser implementado porque foi dada maior prioridade ao funcionamento base do sistema uma vez que em ambiente laboratorial não existia qualquer risco da turbina eólica embalar.

No futuro, o protótipo poderá ser colocado dentro de uma caixa metálica impermeável que permita a separação da parte de eletrónica de potência da parte de controlo para evitar problemas de interferência eletromagnética, e ser utilizada para realizar ensaios de campo para uma validação mais realista do sistema desenvolvido (*hardware* e algoritmos de controlo).

Referências

- [1] S. Khan, *Fossil Fuel and the Environment*: InTech, 2012, ISBN: 978-953-51-0277-9, DOI: 10.5772/2315
- [2] T. E. W. E. Association, "Wind in Power - 2013 European statistics," 2014.
- [3] REN, "A Energia Eólica em Portugal," 2012.
- [4] APREN, "As Renováveis em Portugal," 2013.
- [5] Corbis, "Energy Outlook," 2011.
- [6] T. E. W. E. Association, "Wind in Power - 2012 European statistics," 2013.
- [7] SETIS, "Strategic Energy Technologies Information System," 2011.
- [8] W. Tong, *Wind Power Generation and Wind Turbine Design*: WIT Press, 2010, ISBN: 9781845642051.
- [9] D. A. Spera, *Wind Turbine Technology: Fundamental Concepts in Wind Turbine Engineering, Second Edition*: American Society of Mechanical Engineers, 2009, ISBN: 9780791802601.
- [10] J. F. Manwell, J. G. McGowan, and A. L. Rogers, *Wind Energy Explained: Theory, Design and Application*: Wiley, 2010, ISBN: 9780470686287.
- [11] Young, "Wind Sensors". Disponível: <http://www.youngusa.com/>
- [12] P. W. Parfomak, *Energy Storage for Power Grids and Electric Transportation: A Technology Assessment*, 2012.
- [13] H. E. Association, "Pump Storage". Disponível: <http://www.thehea.org/hydropower/special-focus/>
- [14] EWEA, "Offshore Wind". Disponível: <http://www.ewea.org/policy-issues/offshore/>
- [15] G. Power, "Grid-Scale Electricity Storage Overview". Disponível: <http://www.launchpnt.com/Portals/53140/docs/Gravity-Power-Overview-October-2010.pdf>
- [16] S. S. Verma, "Latest Developments of a Compressed Air Vehicle: A Status Report " *Global Journal of Researches in Engineering Automotive Engineering*, vol. 13, 2013, ISSN: 2249-4596.
- [17] L. C. F. Nerilso Bocchi , Sonia Regina Biaggio. (2000). *Pilhas e Baterias: Funcionamento e Impacto Ambiental*. Disponível: <http://qnint.s bq.org.br/qni/visualizarConceito.php?idConceito=45>

- [18] S. Vazquez, S. M. Lukic, E. Galvan, L. G. Franquelo, and J. M. Carrasco, "Energy Storage Systems for Transport and Grid Applications," *Industrial Electronics, IEEE Transactions on*, vol. 57, pp. 3881-3895, 2010, ISSN: 0278-0046, DOI: 10.1109/tie.2010.2076414.
- [19] MarSensing, "Tecnologias Marinhas e Acústica Submarina". Disponível: <http://www.marsensing.com/pt/Noticias/>
- [20] Bergey, "1kW Bergey Excel 1". Disponível: <http://bergey.com/products/wind-turbines/bergey-excel-1>
- [21] Endurance, "Wind Turbines for Electricity". Disponível: <http://www.endurancewindpower.com/s343.html>
- [22] UGE, "UGE Eddy". Disponível: http://www.urbangreenenergy.com/sites/default/files/eddy_manual_v2.51_0.pdf
- [23] T-Hurban, "A High Efficiency And Low Cost Wind Turbine For Urban Environment". Disponível: <http://turban.ineti.pt/entrada.htm>
- [24] Silentwind, "Wind Generator 48V". Disponível: <http://www.silentwindgenerator.com/en/windgenerator-silentwind/windgenerator-48v>
- [25] Omniflow, "Omniflow - Produtos". Disponível: <http://omniflow.pt/pt/product/>
- [26] J. L. Afonso, "Apontamentos da Disciplina de Máquinas Eléctricas," Universidade do Minho.
- [27] T. Ackermann, *Wind Power in Power Systems*: Wiley, 2012, ISBN: 9781119941835.
- [28] C. Zhe, J. M. Guerrero, and F. Blaabjerg, "A Review of the State of the Art of Power Electronics for Wind Turbines," *Power Electronics, IEEE Transactions on*, vol. 24, pp. 1859-1875, 2009, ISSN: 0885-8993, DOI: 10.1109/tpe.2009.2017082.
- [29] M. K. Kazimierczuk, *Pulse-width Modulated DC-DC Power Converters*: Wiley, 2008, ISBN: 9780470694657.
- [30] H. Rashid, *Power Electronics Handbook*: Academic Press, 2001, ISBN: 9780125816502.
- [31] Ginlong. *datasheet Ginlong Technologies GL-PMG-1800*. Disponível: http://www.ginlong.com/download/200908/GL-PMG-1800_Specification_Sheet.pdf
- [32] A. Soetedjo, A. Lomi, and W. P. Mulayanto, "Modeling of wind energy system with MPPT control," in *Electrical Engineering and Informatics (ICEEI), 2011 International Conference on*, 2011, pp. 1-6.
- [33] B. M. Wilamowski and J. D. Irwin, *Power Electronics and Motor Drives*: Taylor & Francis, 2011, ISBN: 9781439802854.

- [34] T. M. Blooming and D. J. Carnovale, "Application of IEEE STD 519-1992 Harmonic Limits," in *Pulp and Paper Industry Technical Conference, 2006. Conference Record of Annual*, 2006, pp. 1-9.
- [35] J. G. Pinto, V. Monteiro, H. Goncalves, B. Exposto, D. Pedrosa, C. Couto, and J. L. Afonso, "Bidirectional battery charger with Grid-to-Vehicle, Vehicle-to-Grid and Vehicle-to-Home technologies," in *Industrial Electronics Society, IECON 2013 - 39th Annual Conference of the IEEE*, 2013, pp. 5934-5939.
- [36] B. Vectron, "Gearmotors, Gearboxes, Motors, Inverters And Electrical Motors". Disponível: <http://www.bonfiglioli.com/en/>
- [37] Seipee, "Electric Motors Production and Sale". Disponível: <http://www.seipee.it/en/>
- [38] Semikron. *datasheet SKB 30*. Disponível: <http://www.semikron.com/dl/service-support/downloads/download/semikron-datasheet-skb-30-07122020>
- [39] T. Rodrigues, J. G. Pinto, V. Monteiro, D. Pedrosa, and J. L. Afonso, "Renewable Energy System for an Isolated Micro Grid," in *Industrial Electronics Society, IECON 2014 - 40th Annual Conference of the IEEE*, 2014.