



Universidade do Minho
Escola de Engenharia
Departamento de Eletrónica Industrial

Leonardo Manuel Barros Correia

**Interface de uma Fonte de Energia Renovável com
a Rede Elétrica utilizando Conversor Comutado.**

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

Trabalho de dissertação sob orientação do

Doutor **Manuel João Sepúlveda Mesquita de Freitas**

DECLARAÇÃO DE INTEGRIDADE

Declaro ter atuado com integridade na elaboração da presente dissertação. Confirmando que em todo o trabalho conducente à sua elaboração não recorri à prática de plágio ou a qualquer forma de falsificação de resultados.

Mais declaro que tomei conhecimento integral do Código de Conduta Ética da Universidade do Minho.

Universidade do Minho, __ de _____ de _____

Nome completo: Leonardo Manuel Barros Correia

Assinatura: _____

Aos meus pais, por me terem facultado as oportunidades e todo o apoio ao longo do percurso académico.

Agradecimentos

A realização do projeto demonstrado nesta dissertação apenas foi possível devido à contribuição de várias pessoas, não só em termos de conhecimento, como de apoio emocional.

Desejo agradecer ao meu orientador Manuel João Sepúlveda Mesquita de Freitas pelas sugestões, cooperação, incentivo e disponibilidade ao longo do trabalho, e também ao professor doutor Vítor Duarte Fernandes Monteiro, por toda a disponibilidade e exigência demonstradas, assim como a compreensão e a ajuda ao longo desta dissertação.

Aos técnicos das oficinas do Departamento de Eletrónica Industrial Ângela Macedo, Carlos Torres e Joel Almeida, agradeço toda a atenção e simpatia que me dispensaram ao longo deste trabalho e de toda a minha formação.

Aos meus colegas de curso e amigos, que me acompanharam ao longo desta jornada, partilhando o seu conhecimento, apoio e encorajamento, em especial, aos meus colegas Anderson Bond e João Torre pelos bons conselhos na realização da programação do controlador minha profunda gratidão. Mas, toda esta dissertação teve como ponto de partida um projeto que realizei em conjunto, com Ana Rodrigues com quem tive o prazer trabalhar.

Quero deixar, também um abraço para a professora Glória por ter sido uma excelente professora e pelo continuo acompanhamento e orientação no decorrer deste projeto.

Aos meus pais, irmã e todos os outros familiares que me escutaram, aconselharam e apoiaram incondicionalmente, deixo aqui um agradecimento especial.

A todas as pessoas que não foram aqui referidas, mas que me ajudaram direta ou indiretamente ao longo do meu percurso académico, muito obrigado!

Resumo

O possível esgotamento das energias fósseis, a poluição provocada pela utilização das mesmas, assim como o crescimento das necessidades energéticas induziram nas pessoas a consciencialização da importância de um maior investimento em energias renováveis, provenientes de fontes naturais, tais como o sol, vento, chuva, marés e energia geotérmica.

A utilização dos recursos naturais remonta à antiguidade, na verdade, o evoluir dos tempos apenas permitiu o desenvolvimento de tecnologia mais complexa.

O objetivo central desta dissertação consiste em desenvolver uma plataforma de comando que permita controlar os conversores eletrónicos de potência, aplicados no controlo do trânsito de potência do aproveitamento eólico. Para isso, desenvolveu-se um circuito constituído por um retificador monofásico de forma a obter-se uma tensão contínua para alimentar um circuito inversor de tensão monofásico, capaz de converter a tensão do retificador elétrico numa tensão alternada. O circuito inversor é constituído por IGBT é controlado por um microcontrolador, C2000 Piccolo F28027 LaunchPad, permitindo o sincronismo com a rede elétrica através do sistema *phase-locked-loop*, e a criação de o sinal injetado na rede com eliminação programada de harmónicos.

O desenvolvimento da simulação foi realizado em ambiente PSIM e os controladores dimensionados, testados e validados progressivamente, de modo a permitir um ajuste dos parâmetros de cada um deles, de forma independente.

Palavras – chave: Energia eólica, Conversor CA-CC, Conversor CC-CA, *Phase-Locked-Loop*, Eletrónica de Potência, Qualidade de Energia Elétrica.

Abstract

The possible depletion of the fossil energies and the pollution caused by their use, the increase in energy needs, have led people to become aware of the need to invest in renewable energies, which come from resources that are naturally replenished like the sun, wind, rain, tides and geothermal energy.

The use of natural resources goes back to antiquity and with time, very complex technology has been developed. Currently, the production of wind energy is not only done on a large scale, but also a micro-production of wind energy has grown more and more. The main objective of this dissertation is the development of a control system that allows controlling the electronic power converters, applied in the control of the power traffic of the wind power. In this way, a circuit constituted by a single-phase rectifier was developed so as to obtain a continuous transmission in the output of the micro-electric generator and to feed a single-phase voltage inverter circuit, capable of converting the voltage of the electric generator to an alternating voltage. The inverter circuit consists of IGBT and is controlled by a microcontroller, C2000 PICCOLO LAUNCHPAD LAUNCHXL-F28027F, allowing the synchronization with the electrical network, through the phase-locked-loop system and the creation of the signal injected into the network with programmed harmonic elimination.

The development of the simulation was performed in a PSIM environment. The controllers were dimensioned, simulated and progressively validated, in order to allow the adjustment of the parameters of each of the controls independently.

Key–Words: WindEnergy, AC-DCCConverter, DC-ACConverter, Phase-Locked-Loop, PowerElectronics, Power Quality.

Índice

Agradecimentos	vi
Resumo	viii
Nomenclatura	xxv
Capítulo 1 Introdução	1
1.1 Enquadramento e Motivações	1
1.2 Objetivos.....	2
1.3 Organização da Dissertação.....	2
1.4 Metodologias.....	3
Capítulo 2 Revisão da Literatura	5
2.1 Introdução.....	5
2.2 Conversão da Energia do Vento em Energia Mecânica.....	5
2.3 Tipos de Turbinas Eólicas.....	6
2.4 Componentes de uma Turbina Eólica.....	8
2.5 Tipos de Geradores Elétricos.....	10
2.5.1 Gerador de Corrente Contínua.....	10
2.5.2 Gerador Síncrono.....	11
2.5.3 Gerador Assíncrono.....	12
2.6 Topologias de Sistemas Eólicos.....	13
2.6.1 Tipo A: Velocidade Fixa.....	13
2.6.2 Tipo B: Velocidade Variável Limitada.....	14
2.6.3 Tipo C: Velocidade Variável com Conversor parcial de frequência.....	14
2.6.4 Tipo D: Velocidade Variável com Conversor completo de Frequência.....	15
2.7 Conversor CC/CA (Inversor).....	16
2.7.1 Inversor com Controlo PWM.....	16
2.7.2 Inversor Monofásico Em Meia-Ponte.....	18
2.7.3 Inversor Monofásico em Ponte completa.....	19
2.7.4 Inversor com Controlo de Corrente por <i>Periodic Sampling</i>	21

2.7.5	Controlo com PWM com Eliminação Programada de Harmónicos	21
2.8	Controlo de um Sistema de Geração Eólico Baseado na Máquina Síncrona de Velocidade Variável	22
2.8.1	Conversor CA/CC (Retificador).....	23
2.8.2	Condensador	24
2.8.3	Conversor CC/CA (inversor).....	24
2.8.4	Transformador	25
2.8.5	Sincronismo com a Rede	25
2.9	Conclusão.....	26
Capítulo 3	Dimensionamento e Simulações do Protótipo Laboratorial	27
3.1	Introdução	27
3.2	Ponte Retificadora.....	29
3.3	Simulação da PLL (<i>Phase-Locked Loop</i>)	30
3.3.1	<i>Phase-Locked Loop</i> com Tensões da Rede Elétrica Ideais	31
3.3.2	Simulação da PLL com Tensões da Rede Elétrica Não-Ideais	33
3.4	Inversor Com Eliminação Programada de Harmónicos	34
3.4.1	Teste do Inversor Com Eliminação Programada de Harmónicos Quando Aplicado a Uma Carga Resistiva	36
3.5	Utilização do Filtro LC no Acoplamento a Rede Elétrica.	38
3.6	Potência Fornecida pelo Sistema	41
3.7	Conclusão.....	43
Capítulo 4	Desenvolvimento do Sistema de Controlo e do Hardware de Potência	45
4.1	Introdução	45
4.2	Circuito de controlo	46
4.2.1	Sensor de Tensão	46
4.2.2	Circuito de Condicionamento de Sinal	48
4.2.3	Placa de <i>Drive</i>	48
4.2.4	Microcontrolador Utilizado	49
4.2.5	Algoritmo de Controlo	50
4.3	Circuito de Potência	52

4.3.1	Ponte Retificadora.....	53
4.3.2	Inversor em Ponte Completa.....	55
4.3.3	Filtro LC.....	57
4.3.4	Disjuntor	57
4.4	Conclusão	58
Capítulo 5	Resultados Experimentais	59
5.1	Introdução	59
5.2	Fonte de Emulação da Unidade Eólica	60
5.3	Resultados Experimentais do DSP	62
5.4	Resultados Experimentais da Placa de Drive	64
5.5	Resultados Experimentais da Placa de Potência	66
5.5.1	Teste com uma carga resistiva	67
5.5.2	Teste com injeção de energia da rede elétrica	69
5.6	Conclusão	69
Capítulo 6		71
Conclusões e Trabalho Futuro		71
6.1	Conclusões.....	71
6.2	Propostas de Trabalho Futuro	72
Referências Bibliográficas		73

Lista de Figuras

Figura 2.1 - Turbina de eixo vertical [36]	6
Figura 2.2 - Turbina de eixo horizontal, Viana do Castelo	7
Figura 2.3 - Componentes da turbina eólica [8].....	9
Figura 2.4 - Topologia de Velocidade Fixa	13
Figura 2.5 - Topologia de Velocidade Variável Limitada	14
Figura 2.6 - Topologia de Velocidade Variável com Conversor Parcial	15
Figura 2.7 - Topologia de velocidade variável com conversor completo.....	16
Figura 2.8 - Modulação PWM bipolar [7]	17
Figura 2.9 - Modulação PWM unipolar [25]	18
Figura 2.10 - Conversor CC/CA em meia-ponte	19
Figura 2.11 - Conversor CC/CA em ponte completa.....	20
Figura 2.12 - Controlador de Corrente por <i>periodic sampling</i>	21
Figura 2.13 - Exemplo de eliminação programada de harmónicos. A vermelho está representada a senoide gerada como referência e a azul o PWM criado.	22
Figura 2.14 - Topologia a implementar	23
Figura 2.15 - Retificador trifásico não controlado em ponte completa.....	24
Figura 2.16 - Diagrama simplificado do funcionamento de uma PLL.	25
Figura 3.1 - Modelo de simulação	28
Figura 3.2 - (a) Gráfico da corrente no barramento CC; (b) Gráfico da tensão no barramento CC	29
Figura 3.3 - Diagrama de funcionamento da PLL	31
Figura 3.4 - Circuito utilizado nas simulações da PLL com tensão da rede elétrica ideal.....	31
Figura 3.5 - Resultados de simulação da PLL. V _{pll} a vermelho e V _{rede} a azul, representam a senoide gerada pela PLL e a tensão da rede elétrica com condições ideais da rede elétrica.	32

Figura 3.6 - Circuito utilizado nas simulações da PLL com tensão da rede elétrica não-ideais	33
Figura 3.7 - Resultados de simulação da PLL com condições não-ideais da rede elétrica: (a) Tensão da rede elétrica e tensão geradas pela PLL; (b) Tensão geradas pela PLL.....	34
Figura 3.8 - Forma de onda do sinal de controlo, no inversor full-bridge para eliminar o 3 ^o , 5 ^o e 7 ^o , com $m = 0,85$	35
Figura 3.9 - Forma de onda na resistência da saída HEPWM, com inversor full-bridge, para eliminar o 3 ^o , 5 ^o e 7 ^o harmónico, com $m = 0,85$: (a) forma de onda da tensão: (b) forma de onda de corrente	36
Figura 3.10 - Inversor full-bridge com eliminação do 3 ^o , 5 ^o e 7 ^o harmónico. (a) – Espectro da tensão e (b) – Espectro da corrente.....	37
Figura 3.11 - Utilização do filtro LC	39
Figura 3.12 - Resultado do barramento CA com utilização do filtro: (a) gráfico da tensão, (b) gráfico da corrente	39
Figura 3.13 - Inversor full-bridge com eliminação do 3 ^o , 5 ^o e 7 ^o harmónico, com utilização do filtro LC: (a) – Espectro da tensão e (b) – Espectro da corrente	40
Figura 3.14 - Variação da potência em relação a tensão do barramento CC.....	42
Figura 3.15 - Gráfico da comparação entre a potência recebida e a fornecida.....	43
Figura 4.1 - Diagrama de blocos dos elementos constituintes da interface.....	45
Figura 4.2 - Circuito de controlo (parcial)	46
Figura 4.3 - Sensor utilizado para medições das tensões do sistema.....	47
Figura 4.4 - Esquema elétrico do componente LV25-P	48
Figura 4.5 - Placa de drive	49
Figura 4.6 - C2000 PICCOLO LAUNCHPAD LAUNCHXL-F28027F.....	50
Figura 4.7 - Vetor “Tempo” com 18 posições onde cada uma representa um intervalo de tempo	51
Figura 4.8 - Funcionamento do algoritmo de controlo	52
Figura 4.9 - Esquema do circuito de potência	53
Figura 4.10 - Díodo FFPF30UA60S	53

Figura 4.11 - Esquema do retificador trifásico não controlado	54
Figura 4.12 - Condensador 75J808	54
Figura 4.13 - IGBT IXGA12N120A3.....	55
Figura 4.14 - Esquemático do <i>snubber</i> RCD.....	56
Figura 4.15 - Condensador e bobines utilizados	57
Figura 5.1 - Bancada de trabalho.....	60
Figura 5.2 - Emulador do gerador microeólico. 1- Variac; 2- Motor série universal; 3 Máquina síncrona trifásica; 4- Fonte CC	61
Figura 5.3 - Tensão simples numa das fases do gerador	62
Figura 5.4- Resultados experimentais da saída do DSP	63
Figura 5.5 - Representação dos $2\mu\text{s}$ utilizados para o intervalo de transição dos IGBTs.....	64
Figura 5.6 - Sinal de saída dos optoacopladores	65
Figura 5.7 - Sinal de saída do sensor de tensão responsável pela leitura da tensão da rede, após o circuito de acondicionamento de sinal.....	65
Figura 5.8 - Apresentação final do circuito.....	66
Figura 5.9 - Gráfico da tensão na carga e a tensão na rede elétrica	67
Figura 5.10 - Exemplos das diferentes etapas realizadas na análise da qualidade da energia injetada	68
Figura 5.11 - Potência injetada na rede elétrica e gráfico da tensão	69
Figura 5.12 - Comparação entre o resultado obtido na simulação Psim, com o resultado obtido na implementação.....	70

Lista de Tabelas

Tabela 1 - Estados de operação do conversor CC/CA em meia-ponte.....	19
Tabela 2 - Estados de operação do conversor CC/CA em ponte completa	20
Tabela 3 - Alterações do período da onda V_{pll} devido ao desfasamento entre o mesmo e a senoide da rede elétrica	30
Tabela 4 - Variação dos valores de α em função de m	35
Tabela 5 - Percentagem de componentes harmónicos relativamente á sua componente fundamental e a sua magnitude na eliminação do 3º, 5º e 7º harmónico com carga resistiva	37
Tabela 6 - Percentagem de componentes harmónicos relativamente à sua componente fundamental e à sua magnitude na eliminação do 3º, 5º e 7º harmónico quando ligando o sistema à rede elétrica com utilização do filtro LC	40
Tabela 7 - Escala de variação do índice de modelação em relação a tensão do barramento CC.....	41

Acrónimos e Siglas

Acrônimo / Sigla	Significado
IGBT	<i>Insulated gate bipolar transistor</i>
CA	Corrente alternada
CC	Corrente contínua
SCIG	Gerador de indução com rotor em gaiola de esquilo
WRIG	Gerador de indução com rotor bobinado
DFIG	Gerador de indução duplamente alimentado
PMSG	Gerador síncrono de ímanes permanentes
WRSG	Gerador síncrono de rotor bobinado
MOSFET	<i>Metal oxide semiconductor field effect transistor</i>
<i>fp</i>	<i>Fator de potência</i>
PWM	Técnica de modulação de largura de pulso
HEPWM	<i>Harmonic elimination pulse width modulation</i>
PLL	<i>Phase-locked-loop</i>
PCB	<i>Printed circuit board</i>
FFT	<i>Fast fourier transform</i>
THD	<i>Total harmonic distortion</i>
DSP	<i>Digital signal processor</i>
ADC	<i>Analog-to-digital converter</i>

Nomenclatura

f	Frequência da tensão da rede elétrica	Hz
f_s	Frequência de amostragem	Hz
f_{sw}	Frequência de comutação	Hz
V_o	Tensão de saída	V
V_{cc}	Tensão de alimentação	V
V_{tri}	Tensão da onda triangular	V
$V_{control}$	Tensão da onda de referência	V

Capítulo 1 **Introdução**

1.1 Enquadramento e Motivações

Inicialmente, eram as fontes energéticas como o vento, a água e a madeira que dominavam a produção de calor e de força motriz. Com a industrialização, estas fontes de produção de energia foram substituídas pelas novas: carvão, petróleo, gás e nuclear. No entanto, na década de 70 do século XX, devido ao aumento dos preços do petróleo, reaparecem as energias renováveis, garantindo não só maior segurança e diversidade no seu fornecimento mas também a obrigação de proteger o ambiente[1]. As fontes de energia renovável solar, eólica, hidroelétrica assumem cada vez mais um papel relevante, contribuindo quer para a conservação do planeta, quer para o desenvolvimento económico, incluindo a criação de emprego pelo mundo inteiro. Em Portugal, parte da energia elétrica provém de centrais eólicas. No entanto, a utilização de geradores eólicos não resolve o problema da energia por si só, uma vez que estes não produzem energia elétrica com características adequadas do ponto de vista da carga, sendo necessária a utilização de sistemas conversores de potência, reduzido conteúdo harmónico e com amplitude e frequência compatíveis com a carga. Assim, é importante estudar e implementar sistemas que realizem a interface entre as fontes de energia renovável e a rede elétrica.

Esta tecnologia está em constante desenvolvimento, permitindo a construção de geradores de maior potência e rendimento. Como principal motivação da elaboração deste trabalho, surge a necessidade de estudar e desenvolver um sistema de interface capaz de efetuar a ligação de um gerador microeólico à rede elétrica.

1.2 Objetivos

Com este trabalho pretende-se apresentar um estudo de implementação da interface de um microgerador eólico para acoplamento com a rede elétrica. Consequentemente, para a realização desta dissertação são apresentados os seguintes objetivos:

- Estudo das principais soluções, das interfaces e suas particularidades implementadas no mercado;
- Análise e conceção da solução selecionada para implementar;
- Construção de uma ponte retificadora trifásica;
- Desenvolvimento de um inversor monofásico utilizando IGBT;
- Desenvolvimento de um algoritmo de eliminação programada de harmónicos;
- Implementação de um sistema de sincronização com a rede elétrica;
- Montagem do circuito, ligação a cargas isoladas e posteriormente à rede elétrica.

1.3 Organização da Dissertação

Esta dissertação cujo o tema foi autoproposto, encontra-se dividida em 6 capítulos para estruturar a disposição das diversas temáticas de forma simplificada.

O primeiro capítulo corresponde, evidentemente, à introdução, a qual inclui o enquadramento do problema, procurando demonstrar a importância do mesmo, e o porquê desta escolha. Também são apresentados os objetivos que se pretendem atingir, assim como os procedimentos a realizar.

No segundo capítulo refere-se o conhecimento mais relevante para a realização e compreensão desta dissertação, que consiste num estudo sobre uma das formas de aproveitamento da energia eólica. Assim, numa primeira fase são introduzidos alguns aspetos sobre as unidades eólicas, nomeadamente os diferentes tipos existentes, respectivo gerador utilizado e topologia apresentada. Segue-se uma secção sobre conversores CC/CA, algumas topologias e sistemas de controlo. Finalmente apresenta-se uma primeira abordagem teórica sobre alguns assuntos particulares ao projeto, como por exemplo, o sistema de captura de malha ou as características do gerador, e a topologia de eólica, para a qual a plataforma foi planeada.

No terceiro capítulo descreve-se um dimensionamento da plataforma num ambiente de simulação. Com o auxílio do programa PSIM é construído um esquema de circuito e implementado o sistema de controlo, recorrendo a algoritmos de programação em linguagem C. Também são apresentadas as variáveis mais relevantes que foram estudadas através do programa, assim como o seu comportamento em função do tempo, e ainda uma abordagem detalhada do sistema de controlo.

O estudo do hardware utilizado, componentes e suas características surgem no quarto capítulo. Neste capítulo são também abordados alguns aspetos que levaram à escolha e dimensionamento de alguns dos componentes.

O quinto capítulo demonstra os resultados experimentais obtidos, comprovando a correta implementação e verificação do correto funcionamento da interface.

Por fim, o capítulo seis apresenta as conclusões, assim como as propostas de trabalho que podem ser realizados futuramente, tendo por base o trabalho desenvolvido.

1.4 Metodologias

Inicialmente, realizou-se uma pesquisa no sentido do enquadramento do tema proposto, com um levantamento pormenorizado de todas as informações relevantes para o desenvolvimento do mesmo, começando por uma abordagem sobre o aproveitamento da energia eólica e das diferentes técnicas utilizadas no controlo do fluxo de potência.

Como método de trabalho a adotar, procurou-se, sempre que possível, redigir o texto em simultâneo com as demais tarefas a executar.

Numa segunda etapa validou-se o sistema de controlo, utilizando uma ferramenta de simulação, PSIM. Após a validação de toda a simulação, verificou-se o seu funcionamento na prática, implementando o circuito desenvolvido num circuito impresso.

Por fim, foram realizados ensaios, em condições reais de funcionamento, de modo a obter os resultados experimentais previstos e retirar as diversas conclusões acerca do projeto.

Capítulo 1 – Introdução

Capítulo 2 Revisão da Literatura

2.1 Introdução

Em primeiro lugar é preciso perceber bem o funcionamento dos componentes e das técnicas que irão ser utilizadas no projeto. Neste capítulo apresentou-se uma análise teórica sobre os conteúdos a abordar. Posteriormente, proceder-se-á à sua implementação, iniciando-se por uma abordagem sobre as turbinas eólicas, passando aos geradores elétricos e às diferentes tipologias em que estes são implementados. Também é referido neste capítulo algum conhecimento teórico necessário para a compreensão do sistema de controlo aplicado.

2.2 Conversão da Energia do Vento em Energia Mecânica

Uma coluna de ar, que se descola a velocidade uniforme e constante, forma energia cinética, também conhecida como vento [2]. A energia cinética pode ser calculada da seguinte forma:

$$E = \frac{1}{2} m v^2$$

Onde: E = energia cinética (*joules*); m = massa do ar (*Kg*); v = velocidade do vento (*m/s*) [3]. A existência da energia cinética do vento proporciona o funcionamento das centrais eólicas. O vento, quando em contato com a superfície das pás da turbina, converte a sua energia cinética em energia mecânica no rotor.

2.3 Tipos de Turbinas Eólicas

Na produção da energia elétrica, as turbinas eólicas utilizadas podem ser classificadas consoante a sua orientação do eixo do seu rotor. Assim, temos turbina de eixo vertical, como se pode observar na Figura 2.1 e outra de eixo horizontal, ilustrada na Figura 2.2 [4].



Figura 2.1 - Turbina de eixo vertical
[36]



Figura 2.2 - Turbina de eixo horizontal, Viana do Castelo

A turbina de eixo vertical tem como principais vantagens [5]:

- A captação da energia eólica sem precisar de alterar a posição do rotor independentemente da mudança da direção dos ventos;
- Os seus componentes como, por exemplo o gerador, encontram-se mais próximos do chão, facilitando a montagem e a respetiva manutenção, exigindo uma menor resistência estrutural do poste;
- A redução do ruído.
- Não necessitam de sistemas para orientação, conforme a direção do vento.

Como inconvenientes, salientam-se:

- O não aproveitamento de ventos muito intensos, devido à baixa altura da estrutura de suporte da mesma;
- A exigência de uma área maior de pás para a mesma potência (uma componente normalmente cara).
- Binário pulsante;
- Dificuldade de arranque;

Por sua vez, a turbina de eixo horizontal tem como principais vantagens:

- A exposição a ventos mais intensos;
- Binário mais estável;
- A necessidade de ocupação de pouca área no solo.

Como inconvenientes:

- A dificuldade de manutenção devido à altura elevada onde é normalmente colocada a turbina, exigindo uma maior resistência estrutural;
- A existência de grandes forças no caso de mudanças de direção do vento, visto que o movimento das pás e do rotor funcionam como um giroscópio;
- Maior ruído no funcionamento do sistema.
- Os componentes mais pesados – gerador e caixa de engrenagens – encontram-se no topo da estrutura.

2.4 Componentes de uma Turbina Eólica

A energia cinética da deslocação do ar é absorvida parcialmente pelas pás, cujo ângulo de orientação pode ser verificado por um sistema de controlo, podendo assim controlar o rendimento do sistema. O movimento de rotação na caixa de velocidades está diretamente relacionado com o movimento de rotação das pás, uma vez que os dois estão interligados por um eixo. A energia mecânica presente no gerador através da rotação do rotor é convertida em energia elétrica. Na Figura 2.3, pode-se observar um esquema dos componentes de uma turbina eólica [6][7].

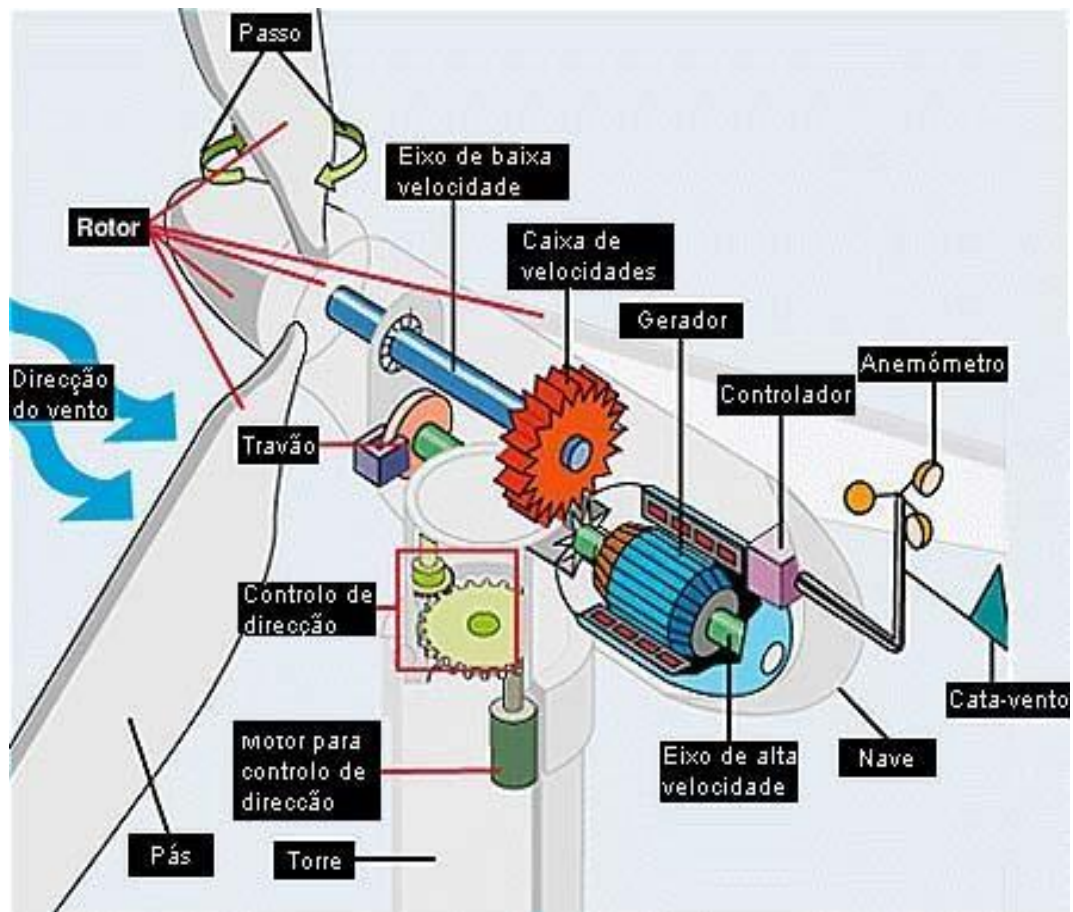


Figura 2.3 - Componentes da turbina eólica [8]

A turbina eólica pode ser dividida em três componentes principais: a nave (ou cabine) dentro da qual são instalados a maior parte dos componentes, o rotor ao qual estão fixadas as pás e a torre.

O rotor é o componente responsável pela transição da energia cinética do vento, desde as pás, presas a ele, até ao eixo do gerador. É de salientar a existência de transição de energia de forma direta, ou através de uma caixa de velocidades.

A nave destina-se a alojar o gerador, a caixa de velocidades (quando existente) e o sistema de travagem, entre outros [6].

A torre tem a função de elevar a nave, possibilitando a instalação do rotor em alturas em que a velocidade do vento é maior e menos sujeita a perturbações [9][1].

2.5 Tipos de Geradores Elétricos

O gerador é o componente responsável por converter a energia mecânica disponível em energia elétrica. De acordo com o objetivo da aplicação podem ser utilizados dois tipos de geradores[10]:

- Gerador de corrente contínua.
- Gerador de corrente alternada:
 - Gerador síncrono (alternador);
 - Gerador assíncrono (indução).

2.5.1 Gerador de Corrente Contínua

A utilização de geradores de corrente contínua tem diminuído. Os seus principais constituintes são o estator e o rotor. O circuito de um gerador de corrente contínua constitui de uma tensão induzida numa resistência e numa indutância, e uma carga [11].

O estator é constituído por pares de polos de ímanes permanentes ou bobinas. Através do mesmo é aplicada uma tensão contínua aos seus enrolamentos provocando a circulação de corrente, que produz um campo magnético, o qual atravessará o rotor.

Por sua vez, o rotor é constituído por condutores dispostos em ranhuras ao longo da sua superfície, ligados aos segmentos do anel comutador que existe no próprio eixo. A ligação elétrica do rotor com o exterior da máquina é feita por escovas, contactadas ao anel comutador [12].

2.5.2 Gerador Síncrono

O gerador síncrono, também designado por alternador, é um dos tipos de gerador mais usados em sistemas de conversão de energia eólica em elétrica uma vez que apresenta um rendimento superior aos restantes [13].

O gerador síncrono pode ser de dois tipos:

- Rotor bobinado;
- Ímanes permanentes.

2.5.2.1 Gerador Síncrono de Rotor Bobinado

Os enrolamentos do estator encontram-se ligados diretamente à rede elétrica, daí a velocidade de rotação ser fixa. Os enrolamentos do rotor são excitados com corrente contínua usando anéis comutados com escovas. Existe a possibilidade de variar a resistência colocada em série com o rotor da máquina e, conseqüentemente, a gama de variação de velocidade do rotor [14][15].

2.5.2.2 Gerador Síncrono de Ímanes Permanentes

O rotor deste gerador é composto por ímanes permanentes que geram o campo magnético principal da máquina, no estator estão alojados enrolamentos de bobinas que podem ser trifásicas ou monofásicas e onde será induzida tensão pelo movimento do rotor. No estator será induzida uma tensão alternada, a qual produzirá uma corrente igualmente alternada quando o mesmo se encontra sobre carga [15]. Este é o tipo de gerador mais utilizado, comparativamente ao gerador síncrono de rotor bobinado, devido à sua característica de autoexcitação, que permite a operação com elevado fator de potência e com eficiência superior.

A utilização de ímãs permanentes para a excitação exige a utilização de um conversor capaz de ajustar a tensão e a frequência produzida para a tensão e frequência das linhas de transmissão [14].

2.5.3 Gerador Assíncrono

Comparativamente aos sistemas com geradores síncronos, os geradores assíncronos ou geradores de indução caracterizam-se por não possuírem um campo de excitação. Para produções menores de energia são aconselhadas máquinas assíncronas pois são mais simples, fornecem robustez, confiabilidade e economia. Outra grande vantagem é a relação potência/peso (W/Kg) que é maior [16][17]. Também estes podem ser de dois tipos:

- Rotor em gaiola de esquilo;
- Rotor bobinado.

2.5.3.1 Gerador Assíncrono com Rotor em Gaiola de Esquilo

Neste gerador o movimento do rotor provoca um campo magnético girante, induzindo assim, uma energia em corrente alternada sobre o estator. Neste tipo de máquina o rotor consiste num cilindro de laminação de aço, com condutores de alumínio ou cobre embutidos na sua superfície [17][18].

2.5.3.2 Gerador Assíncrono com Rotor Bobinado

O gerador assíncrono com rotor bobinado apresenta vantagens na facilidade de funcionamento em relação ao rotor em gaiola de esquilo, uma vez que possui circuito elétrico do rotor acessível através de três anéis e escovas, proporcionando mais um grau de liberdade no controlo da máquina que não é possível numa máquina em gaiola de esquilo. Apesar destas vantagens o rotor bobinado é mais caro e menos eficiente que o rotor em gaiola de esquilo, para as mesmas especificações [19][20].

2.6 Topologias de Sistemas Eólicos

A ligação de sistemas eólicos à rede elétrica pode ser realizada através de diversas topologias, sendo a principal diferença o tipo de gerador utilizado [16]:

- Tipo A: velocidade fixa;
- Tipo B: velocidade variável limitada;
- Tipo C: velocidade variável com conversor parcial de frequência;
- Tipo D: velocidade variável com conversor completo de frequência.

2.6.1 Tipo A: Velocidade Fixa

Esta configuração usa o Gerador de Indução com Rotor em Gaiola de Esquilo (SCIG) diretamente ligado à rede através de um transformador, como se pode ver na Figura 2.4. Após da turbina eólica encontram-se ligadas ao gerador através de uma caixa de engrenagens. Contudo, como a variação de velocidade no rotor é pequena, este sistema classifica-se como um sistema de velocidade fixa.

Este gerador apresenta um fator de potência indutivo, necessitando de um banco de condensadores para compensação de potência reativa.

Para suavizar a entrada/saída da conexão da eólica à rede elétrica utiliza-se um mecanismo de arranque, *Soft-Starter* [21].

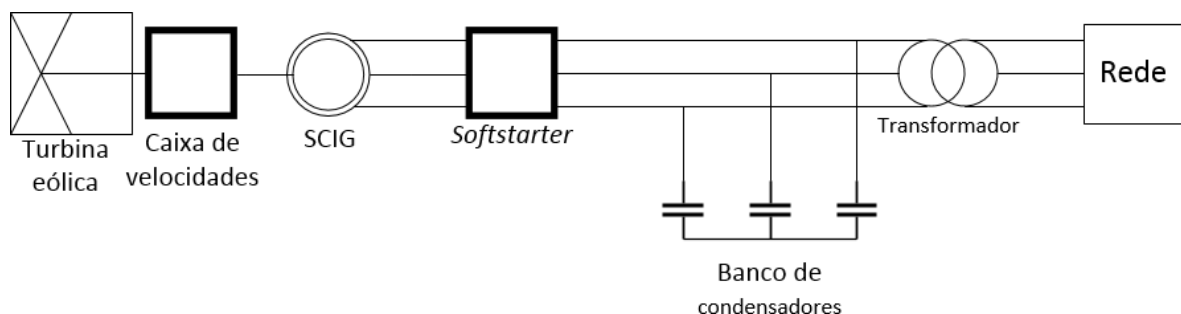


Figura 2.4 - Topologia de Velocidade Fixa

2.6.2 Tipo B: Velocidade Variável Limitada

Esta configuração usa um Gerador de Indução com Rotor Bobinado (WRIG) diretamente ligado à rede, representada na

Figura 2.5.

Aos enrolamentos do rotor do gerador encontram-se ligadas resistências variáveis controladas, permitindo assim, ter uma ligeira variação na velocidade de rotação, conhecida como *OptiSlip*. Tal como na configuração anterior é usado um banco de condensadores para fazer a compensação de potência reativa e utilizado um dispositivo de partida suave para suavizar a entrada/saída da conexão da eólica à rede elétrica [21].

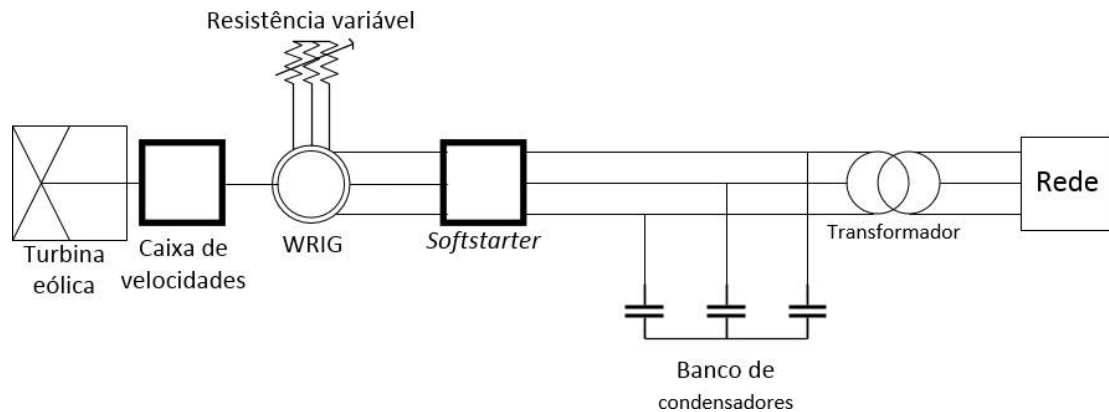
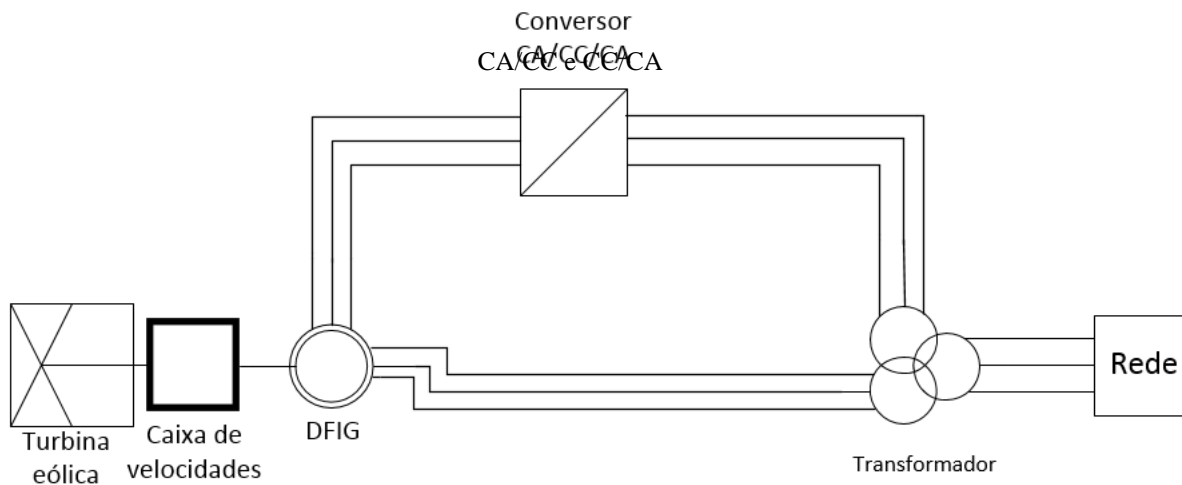


Figura 2.5 - Topologia de Velocidade Variável Limitada

2.6.3 Tipo C: Velocidade Variável com Conversor parcial de frequência

Esta configuração utiliza um Gerador de Indução duplamente alimentado (DFIG). As pás da turbina eólica encontram-se ligadas ao gerador através de uma caixa de velocidades, Figura 2.6. O estator está diretamente ligado à rede elétrica enquanto que o rotor está ligado à rede através de um conversor CA/CC e CC/CA, que assegura a compensação de potência reativa assim

como o arranque suave do gerador. O sistema permite uma operação em velocidade variável, com uma grande gama de velocidade comparativamente à topologia equipada com o sistema *OptiSlip* [21].



CA/CC e CC/CA, Figura 2.7. Este assegura a compensação de potência reativa assim como o arranque suave do gerador. Alguns sistemas de turbinas não possuem caixa de velocidades estando, nestes casos, as pás diretamente ligadas ao gerador.

Nesta situação podem ser utilizados vários tipos de geradores: síncrono de ímanes permanentes (PMSG), síncrono de rotor bobinado (WRSG) ou de indução de rotor bobinado (WRIG).

No caso da utilização do gerador de indução com rotor bobinado, as suas características elétricas podem ser controladas externamente, permitindo variar a velocidade de rotação.

Atualmente, o gerador síncrono tem-se destacado nos sistemas de energia eólica devido à possibilidade de abdicar da caixa de velocidades e da sua característica de excitação. O gerador síncrono de rotor bobinado necessita de um conversor auxiliar para o circuito de excitação do rotor, o que encarece esta solução. A utilização do gerador síncrono de ímanes permanentes, que possui autoexcitação, possibilita o funcionamento com elevado fator de potência. Não necessita de

circuito de excitação externo e apresenta um rendimento elevado, por isso, e apesar do seu custo elevado, tem sido o tipo de gerador mais utilizado na exploração de energia eólica [21].

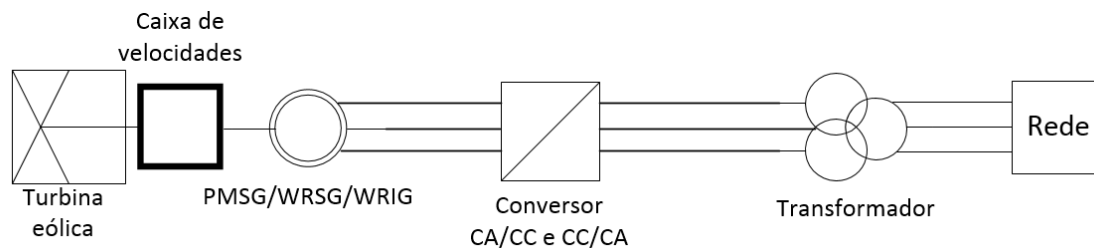


Figura 2.7 - Topologia de velocidade variável com conversor completo

2.7 Conversor CC/CA (Inversor)

Os conversores CC/CA, ou inversores, têm como objetivo converter grandezas elétricas contínuas em alternadas, com amplitudes e frequências determinadas.

Estes são utilizados em sistemas de geração de energia quando esta, à saída da fonte, se apresenta em corrente contínua, sendo necessário fazer a sua conversão para corrente alternada para que, posteriormente, se possa injetar essa energia na rede elétrica. Estes são também utilizados em sistemas de geração que necessitem de sincronizar a frequência e a amplitude da tensão gerada com a tensão da rede.

Os inversores são constituídos por semicondutores de potência que comutam a uma frequência determinada pelo sistema de controlo, sendo mais usuais neste contexto MOSFET (*Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor*) ou IGBT (*Insulated Gate Bipolar Transistor*) [22].

2.7.1 Inversor com Controlo PWM

A técnica de modulação de largura de pulso (PWM) baseia-se na variação da largura dos pulsos que são gerados através da comparação entre dois sinais e tem a finalidade de gerar uma onda à *gate* dos semicondutores de potência [23].

A relação entre o tempo que o pulso permanece em nível alto e o período total do pulso é denominada de razão clínica (D) e está definida na seguinte equação:

$$D = \frac{t(on)}{T}$$

Sendo que T = período total do pulso e $t(on)$ o tempo em que o pulso apresenta valor positivo [24].

2.7.1.1 Controlo com PWM Bipolar

A técnica de modulação PWM bipolar é a técnica de controlo normalmente utilizada, onde existe uma onda de referência e uma onda triangular, pelo que o resultado da comparação apenas tem dois valores possíveis, ou seja, dois níveis de tensão. Estes resultados correspondem aos sinais de comando a aplicar aos semicondutores de potência[24]. Na Figura 2.8 encontra-se ilustrada a onda de referência ($v_{control}$), a triangular (v_{tri}) e o respetivo sinal de saída (v_o).

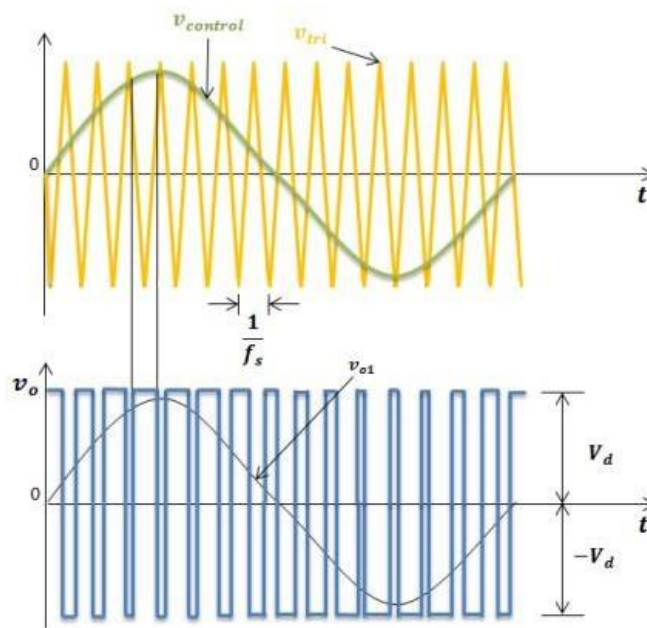


Figura 2.8 - Modulação PWM bipolar [7]

2.7.1.2 Controlo com PWM Unipolar

Nesta técnica existem dois sinais de referência e uma onda triangular. Assim, são efetuadas duas comparações pelo que resultam quatro sinais de comando. Através desta técnica é possível obter três níveis de tensão V_d , $-V_d$, e 0. A Figura 2.9 ilustra as ondas de referência ($v_{control}$ e $-v_{control}$): a triangular (v_{tri}) e o respetivo sinal de saída (v_o) [24].

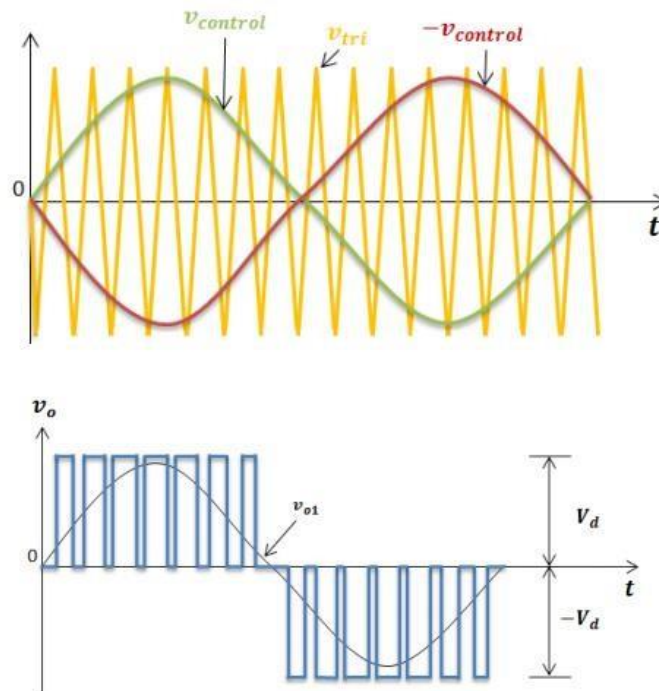


Figura 2.9 - Modulação PWM unipolar [25]

2.7.2 Inversor Monofásico Em Meia-Ponte

O conversor CC/CA em meia-ponte corresponde à topologia mais simples de inversores, sendo constituído por apenas um braço com dois semicondutores de potência e um barramento CC com duas fontes de tensão ou dois elementos armazenadores de energia do tipo capacitivo, conforme representado na Figura 2.10. A funcionalidade do conversor é a criação de tensões CA, através de uma fonte de alimentação CC, controlando a amplitude e frequência da mesma [25].

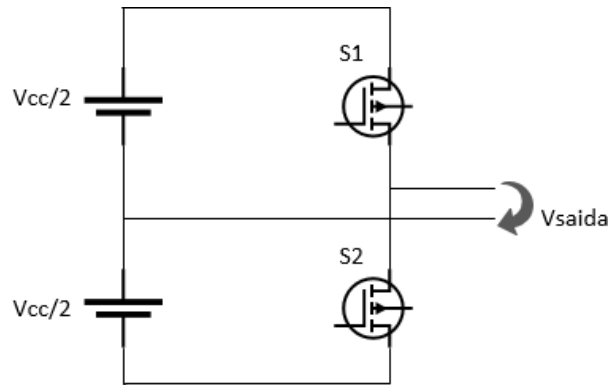


Figura 2.10 - Conversor CC/CA em meia-ponte

Esta topologia permite dois níveis de tensão à sua saída, correspondendo, respetivamente, a um interruptor ligado e outro desligado, conforme ilustrado na Tabela 1. De facto, os dois interruptores ligados simultaneamente provocariam um curto-circuito no barramento CC.

Tabela 1 - Estados de operação do conversor CC/CA em meia-ponte

Estado	S ₁	S ₂	V _{Saída}
1	ON	OFF	+ V _{cc} /2
2	OFF	ON	- V _{cc} /2

2.7.3 Inversor Monofásico em Ponte completa

O conversor CC/CA em ponte completa é constituído por dois braços, cada um com dois semicondutores de potência e um barramento CC com apenas uma fonte de tensão ou um elemento armazenador de energia do tipo capacitivo, conforme representado na Figura 2.11. Em aplicações de elevada potência é preferível utilizar conversores de ponte completa, pois permite obter tensões mais elevadas em comparação com o conversor em meia ponte, para a mesma tensão de barramento CC [26].

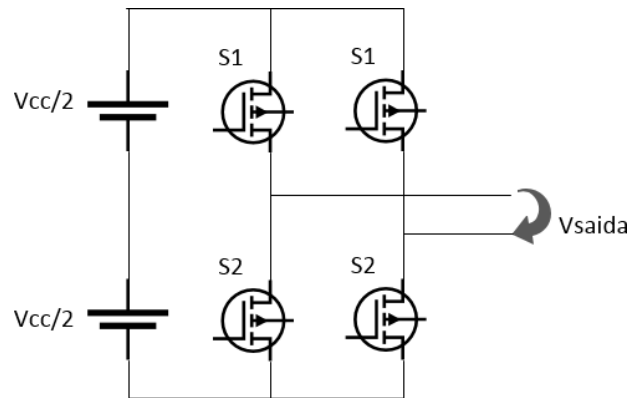


Figura 2.11 - Conversor CC/CA em ponte completa

Esta topologia apresenta a vantagem de permitir três níveis de tensão à sua saída, contrariamente à topologia anterior, que apenas permite dois níveis de tensão. Os dois interruptores do mesmo braço não podem estar ligados simultaneamente, pois provocaria um curto-circuito no barramento CC. Conforme ilustra a Tabela 2, o conversor CC/CA em ponte completa apresenta quatro estados de operação[26].

Tabela 2 - Estados de operação do conversor CC/CA em ponte completa

Estado	S₁	S₂	S₃	S₄	V_{Saída}
1	ON	OFF	OFF	ON	+ V _{CC}
2	OFF	ON	ON	OFF	- V _{CC}
3	ON	ON	OFF	OFF	0
4	OFF	OFF	ON	ON	0

2.7.4 Inversor com Controlo de Corrente por *Periodic Sampling*

A técnica de controlo de corrente tem a função de manter a corrente de saída do conversor o mais próximo possível da corrente de referência. Na técnica de controlo de corrente por *periodic sampling* é feita uma comparação entre a corrente de referência e a corrente de saída do conversor. Para além disso, é definido um limite máximo de frequência de comutação a ser aplicado aos semicondutores. A Figura 2.12 ilustra o controlador de corrente por *Periodic Sampling* recorrendo a um comparador seguido de um *Flip-Flop D* e uma onda quadrada no *clock* que define a frequência de amostragem [27].

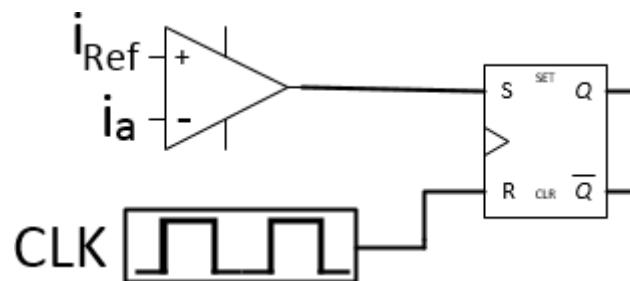


Figura 2.12 - Controlador de Corrente por *periodic sampling*

Uma vantagem desta técnica é a sua simplicidade de implementação com um controlador digital.

2.7.5 Controlo com PWM com Eliminação Programada de Harmónicos.

A técnica HEPWM (*Harmonic Elimination Pulse Width Modulation*), conhecida em português por técnica de modulação com eliminação programada de harmónicos, visa a eliminação de harmónicos utilizando coeficientes da série de Fourier. É uma técnica de controlo que consiste em eliminar harmónicos particulares da tensão através de um PWM específico, previamente calculado. Esta técnica de modulação consiste em gerar um sinal PWM dependente da quantidade de harmónicos que se pretende anular[28][29]. A Figura 2.13 ilustra um exemplo de eliminação do 3º, 5º e 7º harmónico. A sinusoide representa a referência que origina o PWM representado,

esta referência é utilizada no cálculo do erro, pelo sistema de sincronização com a rede elétrica. O PWM representado posteriormente será ajustado à gate do semiconductor.

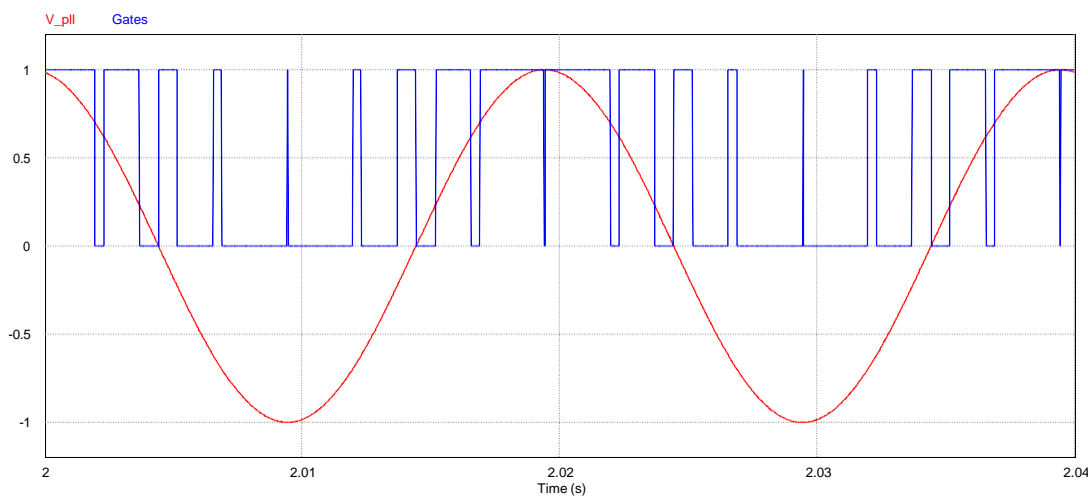


Figura 2.13 - Exemplo de eliminação programada de harmônicos. A vermelho está representada a senoide gerada como referência e a azul o PWM criado.

2.8 Controlo de um Sistema de Geração Eólica Baseado na Máquina Síncrona de Velocidade Variável

A configuração típica de um sistema de energia eólica consiste numa turbina eólica, um gerador (neste caso, optou-se por um gerador síncrono de ímanes permanentes), um conversor CA/CC, um barramento CC, um conversor CC/CA e um transformador, conforme ilustrado na Figura 2.14. A velocidade variável implica que a saída do gerador seja variável em frequência sendo necessário fazer a sua retificação para, posteriormente, ser convertida para a frequência da rede.

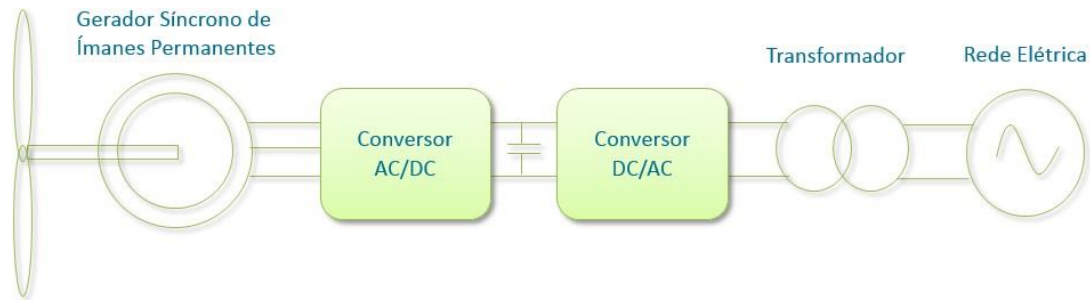


Figura 2.14 - Topologia a implementar

2.8.1 Conversor CA/CC (Retificador)

O conversor CA/CC (retificador) é responsável pela conversão de corrente alternada proveniente do gerador elétrico em corrente contínua. Dependendo da sua aplicação, os conversores CA/CC podem ser de meia-ponte ou ponte completa, não controlados, semicontrolados ou totalmente controlados. O *ripple* da tensão de saída CC dos retificadores é atenuado por um filtro capacitivo na saída [27].

O retificador utilizado é trifásico de ponte completa não controlado, devido à sua simplicidade de utilização e à saída do gerador elétrico ser trifásica. O retificador a usar é constituído por seis díodos, conforme ilustrado na Figura 2.15, o que não permite o controlo da tensão de saída do circuito.

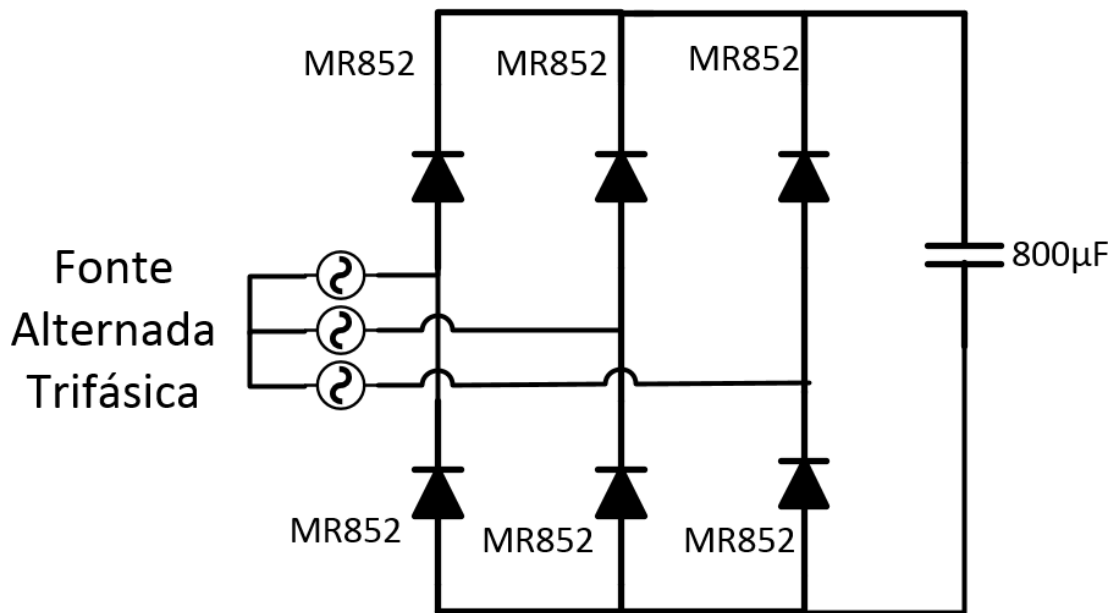


Figura 2.15 - Retificador trifásico não controlado em ponte completa

2.8.2 Condensador

A inclusão de um condensador na saída da ponte retificadora diminui o *ripple* da tensão de saída, aproximando-se de um valor constante ao longo do tempo. Este condensador funciona como o elemento armazenador de energia no barramento CC.

2.8.3 Conversor CC/CA (inversor)

Para a realização deste projeto optou-se por usar um conversor CC/CA em ponte completa, devido não só à sua simplicidade, mas também por permitir ter três níveis de tensão à sua saída. Optou-se por utilizar uma técnica de controlo de tensão que funciona através de repetidos pequenos ajustes na saída, no controlo da PLL. A PLL é a técnica responsável pelo sincronismo com a rede elétrica, cuja implementação através de um controlador digital é simples, bastando fazer a aquisição da tensão de saída do inversor em intervalos de tempo regulares, ou

seja, com uma frequência constante, comparar o valor adquirido com o valor da tensão de referência e fornecer uma saída digital consoante o resultado da comparação.

2.8.4 Transformador

O transformador é responsável por elevar os níveis de tensão gerados pelo sistema inversor para os níveis da rede elétrica, o transformador utilizado foi 24V/230V.

2.8.5 Sincronismo com a Rede

O sincronismo com a rede é realizado através de um sistema *phase-locked-loop*. Este sistema de controlo gera a partir de um sinal de entrada, um sinal de saída, com frequência e fase em sincronismo com o sinal amostrado. A não aplicação de um sistema de sincronismo poderia diminuir a qualidade de energia da rede, ou até, a danificação da interface [30].

A Figura 2.16 ilustra o diagrama da PLL aplicado, a variável de entrada é a rede elétrica.

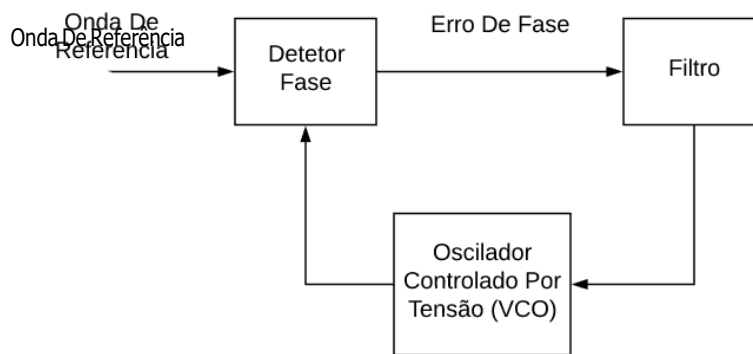


Figura 2.16 - Diagrama simplificado do funcionamento de uma PLL.

2.9 Conclusão

Ao longo deste capítulo foram apresentadas as principais características diferenciadoras das unidades eólicas, do ponto de vista eletrónico e mecânico, relevantes para a dissertação. Salientaram-se as caracterizações relativas à estrutura, gerador utilizado e sistema de controlo.

Evidenciou-se também uma abordagem à topologia da montagem realizada e ao sistema de controlo.

Capítulo 3 Dimensionamento e Simulações do Protótipo Laboratorial

3.1 Introdução

Com o objetivo de validar o hardware de potência, assim como as teorias e técnicas descritas anteriormente, foram efetuadas simulações da interface de ligação de uma fonte de energia eólica com a rede elétrica, utilizando um conversor comutado.

O software utilizado para realizar as simulações foi o PSIM, que é uma ferramenta de simulação orientada para sistemas de eletrónica de potência e para o controlo dos mesmos, caracterizada pela sua simplicidade e flexibilidade. Adicionalmente, o PSIM oferece várias ferramentas para análise dos resultados de simulação, operações matemáticas entre variáveis da simulação, permitindo igualmente a análise de sinais recorrendo à transformada de Fourier (*Fast Fourier Transform* - FFT).

Como já foi referido anteriormente, o objetivo deste trabalho consiste em desenvolver uma interface de conexão entre uma unidade de microgeração de energia eólica e a rede elétrica. Na Figura 3.1, encontra-se representado o esquema estudado.

Inicialmente, simula-se o efeito do retificador com carga resistiva e condensador de filtragem. Em seguida, apresenta-se o modelo que simula os cálculos da PLL, onde foram realizados testes a sinais com harmónicos de apenas primeira ordem, e sinais com harmónicos de múltiplas ordens. O sistema da PLL está interligado ao sistema de eliminação programada de harmónicos, uma vez que a PLL realiza um constante ajuste do valor do período da onda injetada, e o reencaminha para o sistema de eliminação programada. Neste caso foram demonstrados testes utilizando uma carga resistiva, numa primeira fase e, posteriormente, com conexão à rede elétrica.

Foi constituído um modelo de filtro em série monofásico para analisar o seu funcionamento.

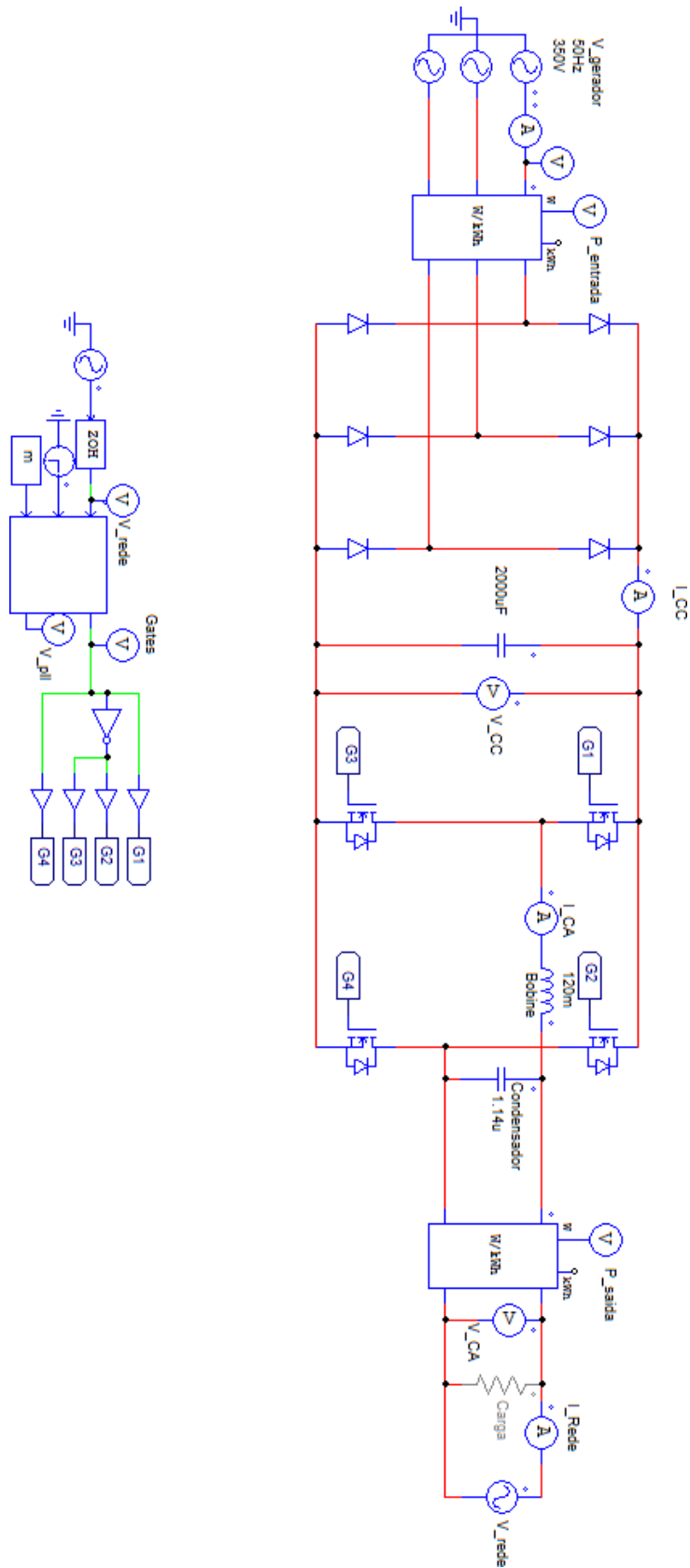


Figura 3.1 - Modelo de simulação

3.2 Ponte Retificadora

A quantidade de energia que o sistema consegue injetar na rede elétrica depende da quantidade recebida que, por sua vez, depende do comportamento do vento. Na implementação laboratorial deste projeto, foi utilizado um gerador elétrico para simular as variações do vento e fornecer diferentes fluxos de energia. Na simulação é utilizada uma fonte trifásica com variação da tensão dentro do intervalo de potência de funcionamento do circuito.

O condensador do barramento CC é necessário para atenuar o *ripple* de tensão gerada pela ponte retificadora e para proteger o sistema de possíveis picos transitórios de tensão, de forma a garantir a estabilidade do sistema e o seu bom funcionamento.

Na Figura 3.2, podem-se observar os gráficos, em regime permanente, da corrente e da tensão no barramento CC, respetivamente, num intervalo de 0,5 segundos. Os valores de corrente e tensão foram dimensionados através das limitações impostas pelos componentes disponíveis.

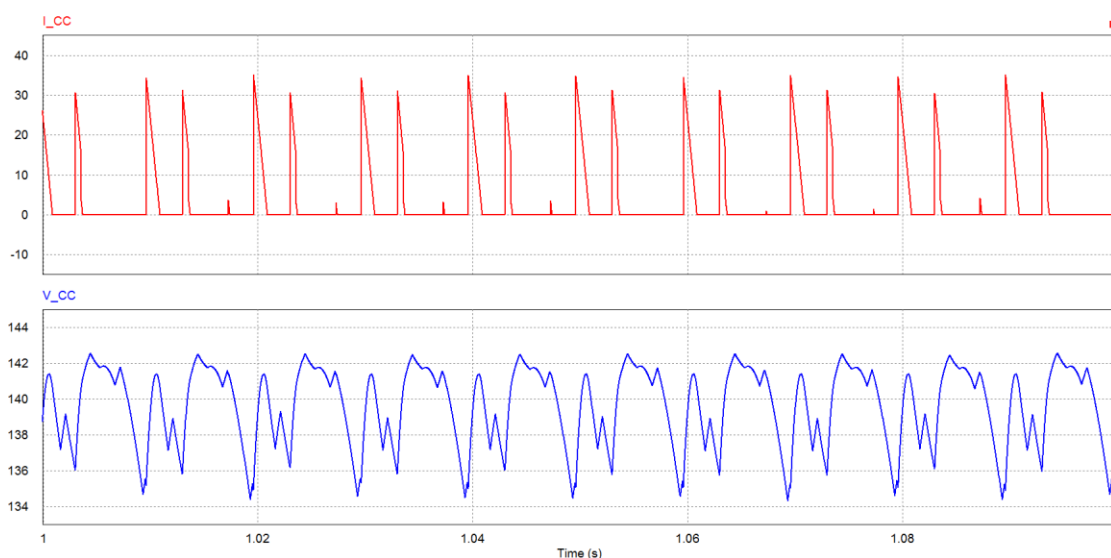


Figura 3.2 - (a) Gráfico da corrente no barramento CC; (b) Gráfico da tensão no barramento CC

3.3 Simulação da PLL (*Phase-Locked Loop*)

A PLL (*Phase-Locked Loop*) tem como objetivo criar uma onda sinusoidal sincronizada com a da rede. Para esta aplicação, a PLL criada realiza a sua função através de pequenas variações do período da onda sinusoidal. Na saída do sistema é encontrada uma senoide que é calculada progressivamente através do valor do período e do tempo decorrido. O princípio de funcionamento implementado é semelhante à técnica *Periodic Sampling*. Como vantagens destacam-se: a simples implementação, a rápida resposta a variações bruscas do sinal de referência e a sua robustez. Existe, contudo, a desvantagem de iniciar a PLL exatamente a 180 graus desfasados relativamente à onda que se deseja sincronizar, que estará sempre em oposição de fase. Na Figura 3.2, pode-se visualizar o algoritmo utilizado. O algoritmo utilizado começa por calcular se o erro (diferença entre o V_{pll} e o V_{rede}) é positivo ou negativo. Em seguida compara se o valor atual da rede, é superior ou inferior ao valor da rede anterior. Através da análise destes dados é possível saber se é necessário aumentar ou diminuir o período, conforme a Tabela 3. Com o novo valor do período, é calculado através da função seno, o novo V_{pll} e repetido o ciclo [28].

Tabela 3 - Alterações do período da onda V_{pll} devido ao desfasamento entre o mesmo e a senoide da rede elétrica

Condição	Consequência
$Erro \geq 0$ & $V_{rede} (atual) \geq V_{rede} (anterior)$	Diminuir o período
$Erro \leq 0$ & $V_{rede} (atual) \geq V_{rede} (anterior)$	Aumentar o período
$Erro \geq 0$ & $V_{rede} (atual) \leq V_{rede} (anterior)$	Aumentar o período
$Erro \leq 0$ & $V_{rede} (atual) \leq V_{rede} (anterior)$	Diminuir o período

De seguida, são apresentados os resultados obtidos nas simulações da PLL efetuadas no software PSIM.

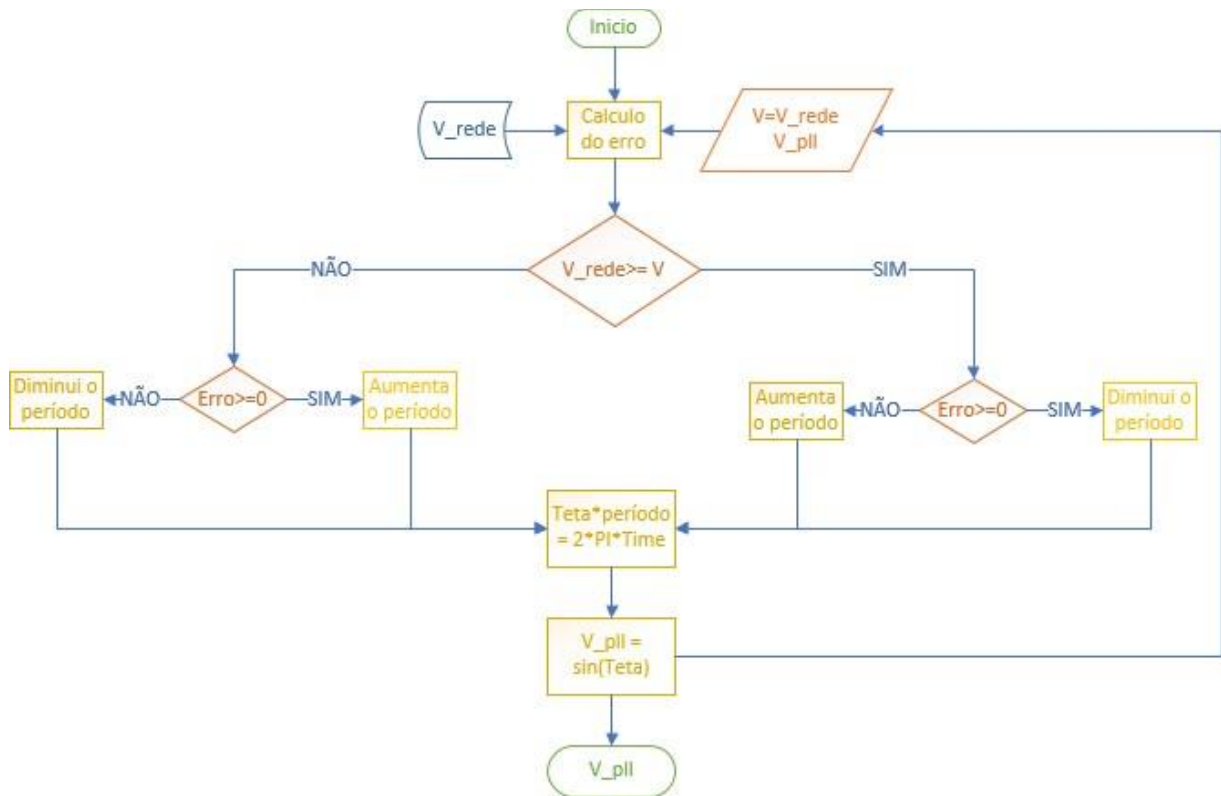


Figura 3.3 - Diagrama de funcionamento da PLL

3.3.1 Phase-Locked Loop com Tensões da Rede Elétrica Ideais

O circuito, utilizado para simular a PLL no software PSIM para o caso onde as tensões da rede elétrica são ideais, encontra-se exemplificado na Figura 3.4.

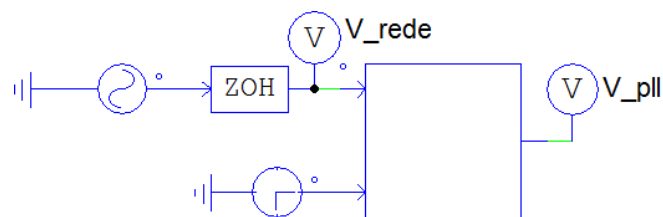


Figura 3.4 - Circuito utilizado nas simulações da PLL com tensão da rede elétrica ideal.

Nesta simulação são utilizadas duas variáveis de entrada, uma fonte de tensão que representa a tensão da rede elétrica e um bloco de "time" que permite saber o tempo da simulação. A variável de saída corresponde à senoide criada. O bloco "ZOH" é um *Zero-Order Hold* que determina a frequência a que o código contido no bloco "PLL" é executado, ou seja, a 60 kHz neste caso.

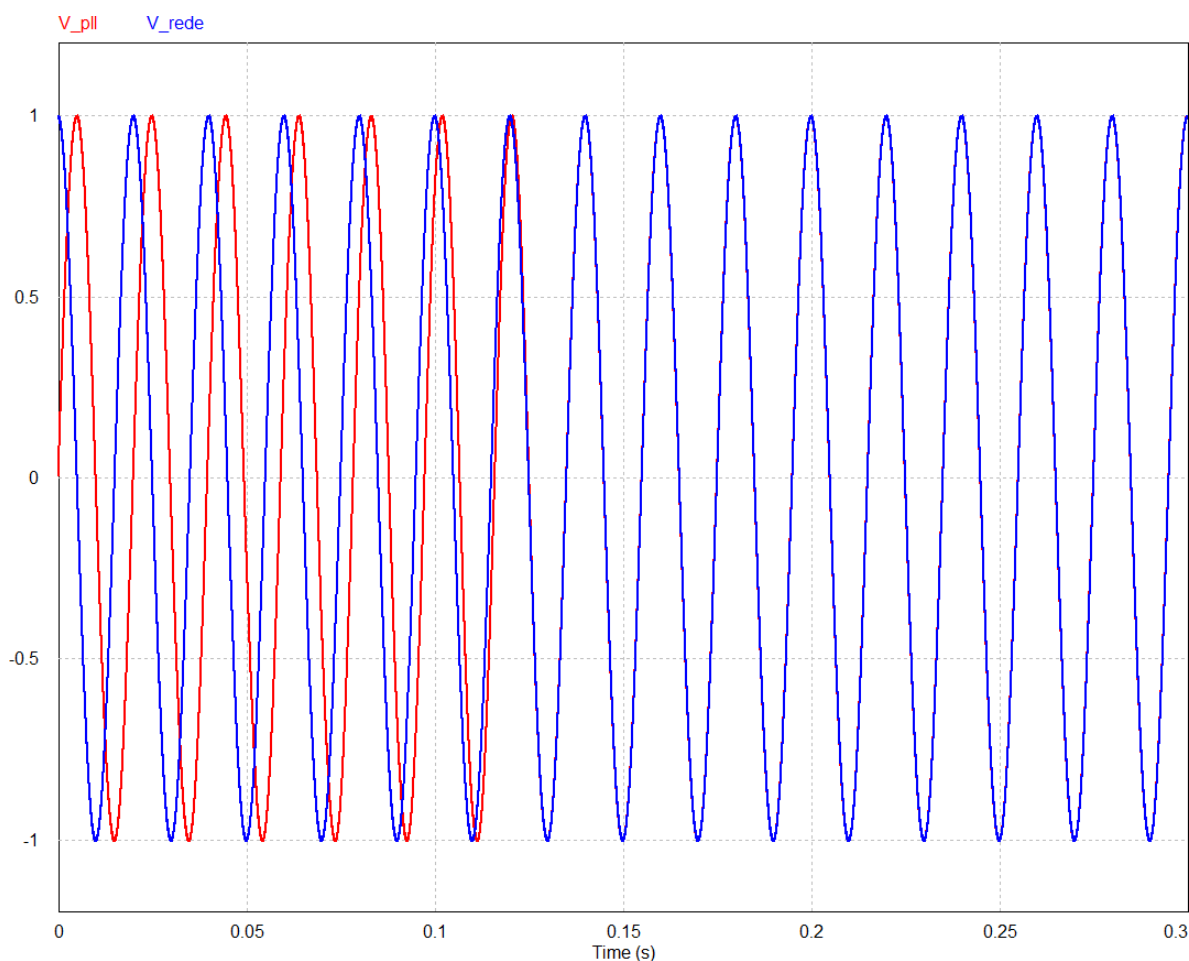


Figura 3.5 - Resultados de simulação da PLL. V_pll a vermelho e V_rede a azul, representam a senoide gerada pela PLL e a tensão da rede elétrica com condições ideais da rede elétrica.

Como se pode verificar na Figura 3.5, o gráfico apresenta os primeiros 0,3 segundos da simulação, que correspondem aos 15 primeiros ciclos da rede elétrica. Pode-se constatar que, a partir do instante 0,12 segundos, a PLL já se fixou com sucesso na frequência e na fase da rede elétrica e o sistema entra em regime permanente.

3.3.2 Simulação da PLL com Tensões da Rede Elétrica Não-Ideais

Nesta simulação foram utilizadas fontes de tensão em série, introduzindo harmónicos de quinta (250 Hz) e décima primeira (550 Hz) ordem. O circuito utilizado nesta simulação está apresentado na Figura 3.6.

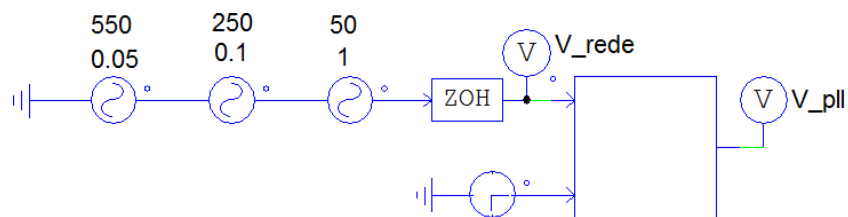


Figura 3.6 - Circuito utilizado nas simulações da PLL com tensão da rede elétrica não-ideais

Na Figura 3.7, encontram-se os 0,3 segundos iniciais da simulação. É possível visualizar o comportamento do controlador, alterando ligeiramente o período da senoide V_{pll} que representa a saída da PLL. Quanto às tensões da rede elétrica, é notável a presença das harmónicas que foram introduzidas, que resultam numa THD (*Total Harmonic Distortion* – taxa de distorção harmónica total) de aproximadamente 11%. Ainda assim, a partir do instante 0,12 segundos, a resposta do sistema entra em regime permanente, e as tensões geradas pela PLL continuam sinusoidais, com a frequência pretendida, e em fase com as respetivas tensões simples da rede elétrica. Deste modo, comprova-se que a PLL simulada tem resultados satisfatórios, tanto para tensões da rede elétrica ideais, como distorcidas.

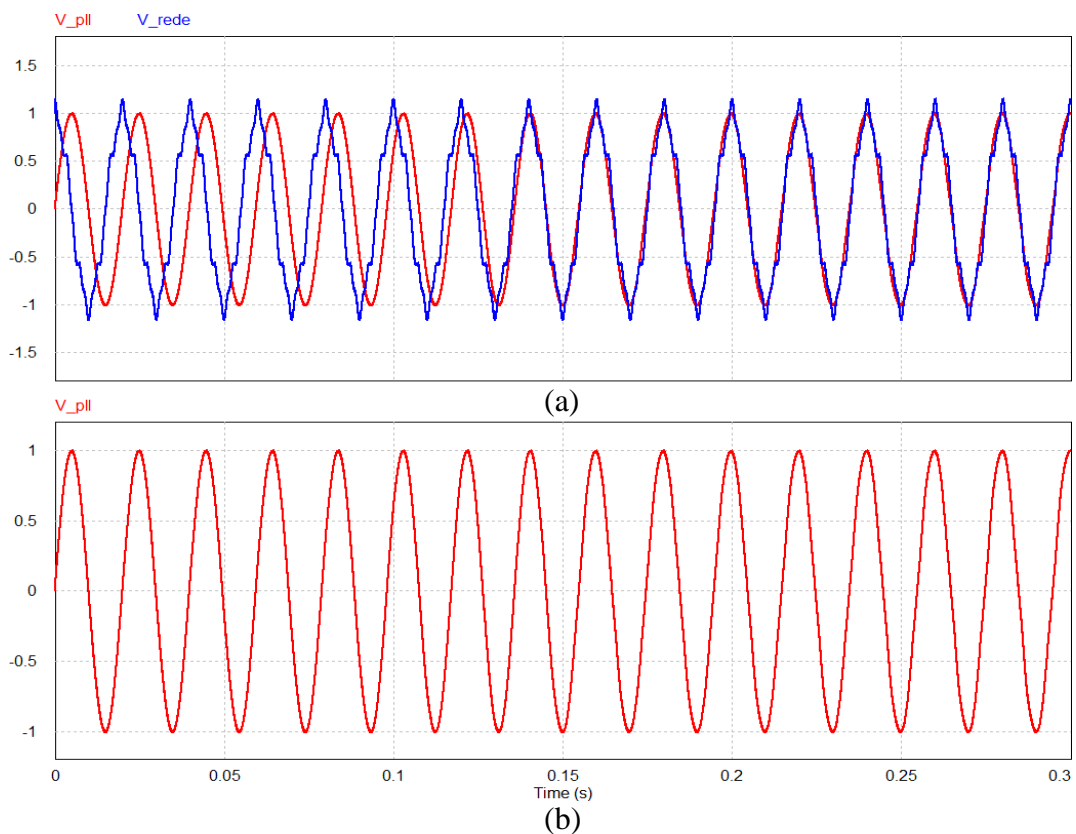


Figura 3.7 - Resultados de simulação da PLL com condições não-ideais da rede elétrica: (a) Tensão da rede elétrica e tensão geradas pela PLL; (b) Tensão geradas pela PLL.

3.4 Inversor Com Eliminação Programada de Harmônicos

Foi utilizado um inversor *full-bridge* controlado através do método de eliminação programada de harmônicos, para a transição da componente contínua para alternada. Este método é baseado na utilização de coeficientes matemáticos, $(\alpha_1, \alpha_2 \dots)$ calculados consoante o número e o grau dos harmônicos que se pretendem eliminar. A solução exemplificada na Figura 3.8 apresenta a eliminação do 3º, 5º e 7º harmónico. Uma particularidade deste método é a simetria em relação ao objeto de abcissa π . Foi testado o ajuste da componente fundamental para os índices de modulação $m = 0,8$ até $m = 1$. Para cada valor de índice de modelação existe um valor de $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$ e α_4 associado, como mostra Tabela 4, não são usados valores de m inferiores a 0,8 uma vez que estes apresentam uma variação entre si pouco significativa.

Tabela 4 - Variação dos valores de α em função de m

Valor de m	α_1	α_2	α_3	α_4
0,8	0,2833	0,72495	0,8696	1,5391
8,5	0,2708	0,71	0,8522	1,545625
0,9	0,2583	0,7	0,8348	1,55215
9,5	0,2583	0,7	0,8348	1,55867
1	0,2333	0,6666	0,7739	1,5652

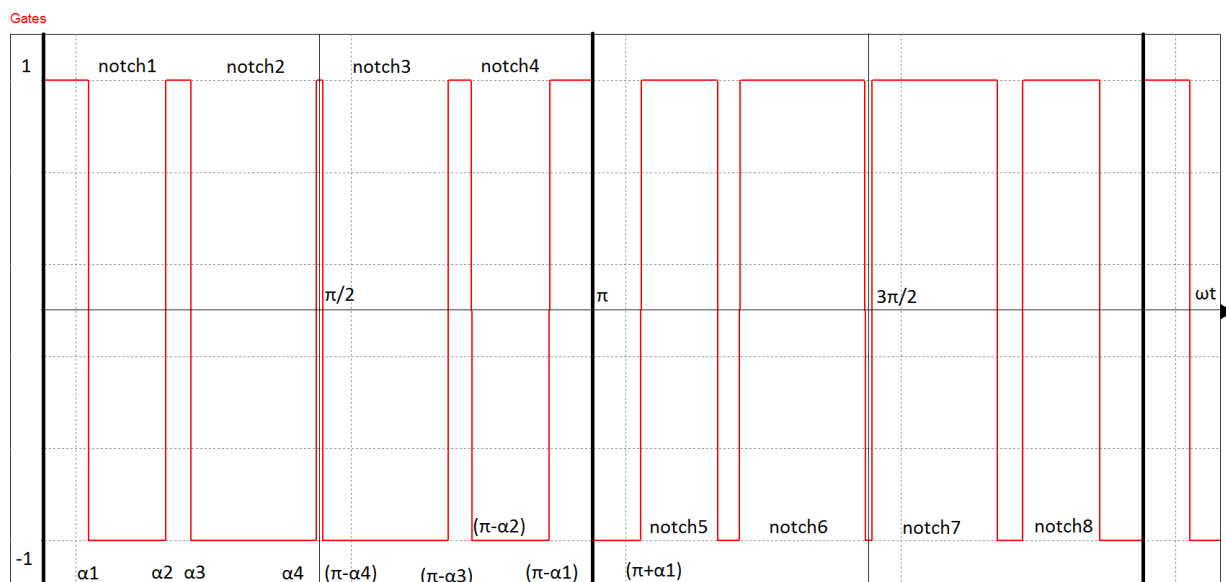


Figura 3.8 - Forma de onda do sinal de controlo, no inversor full-bridge para eliminar o 3°, 5° e 7°, com $m = 0,85$.

3.4.1 Teste do Inversor Com Eliminação Programada de Harmônicos Quando Aplicado a Uma Carga Resistiva

Com esta simulação testou-se se o sistema de controlo estava a eliminar corretamente os harmónicos pretendidos, com uma carga resistiva de 120Ω . Na Figura 3.9, é possível comprovar que, como o sistema é puramente resistivo, o sinal que existe na carga resistiva é proporcional ao sinal do sistema de controlo. Na Figura 3.10, são apresentados os respetivos espectros da tensão e da corrente de saída. Verifica-se que o 3º, 5º e 7º harmónico são praticamente eliminados, tanto na tensão, como na corrente.

A componente fundamental da tensão à saída do conversor apresenta um valor eficaz de 412V, por sua vez a corrente apresenta um valor de 3,43A. Na Tabela 5, estão representados os valores das restantes componentes constituintes dos sinais (tensão e corrente). É possível observar-se que as componentes harmónicas de ordem 3º, 5º e 7º ordem foram efetivamente atenuadas tanto da tensão como da corrente de saída do inversor.

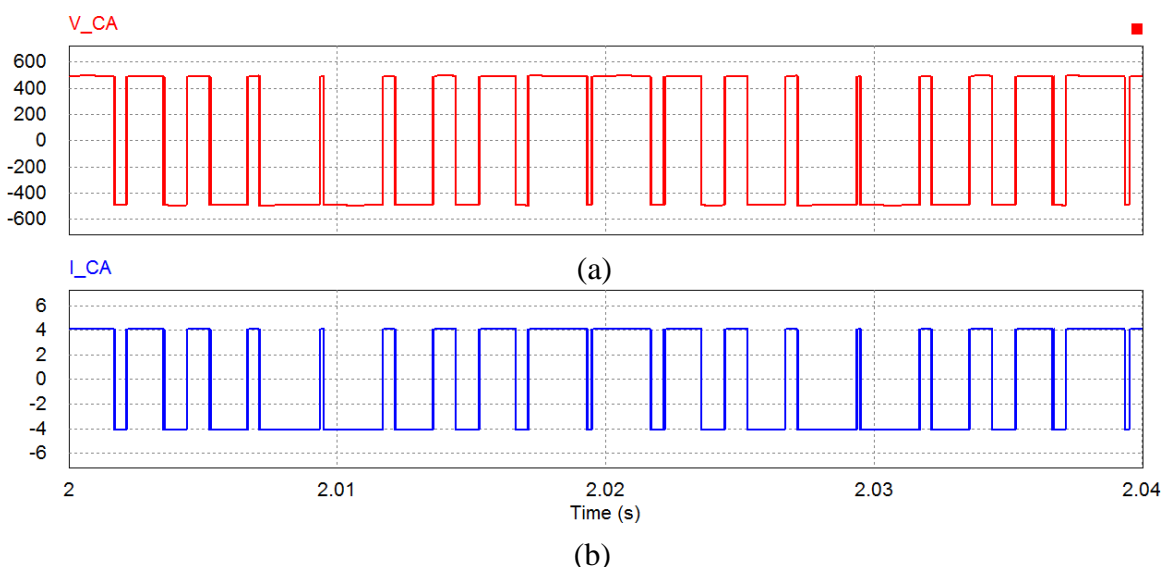


Figura 3.9 - Forma de onda na resistência da saída HEPWM, com inversor full-bridge, para eliminar o 3º, 5º e 7º harmónico, com $m = 0,85$: (a) forma de onda da tensão: (b) forma de onda de corrente

Tabela 5 - Percentagem de componentes harmónicos relativamente á sua componente fundamental e a sua magnitude na eliminação do 3º, 5º e 7º harmónico com carga resistiva

Harmónico	% Em relação à fundamental (corrente)	Magnitude (A)	% Em relação á fundamental (tensão)	Magnitude (V)
3º	3,33	0,15	3,24	17,41
5º	2,40	0,13	2,44	15,59
7º	0,90	0,07	0,91	8,65
9º	2,59	0,99	27,60	310,96
11º	19,82	2,08	17,78	249,11
13º	4,20	0,53	3,71	63,38

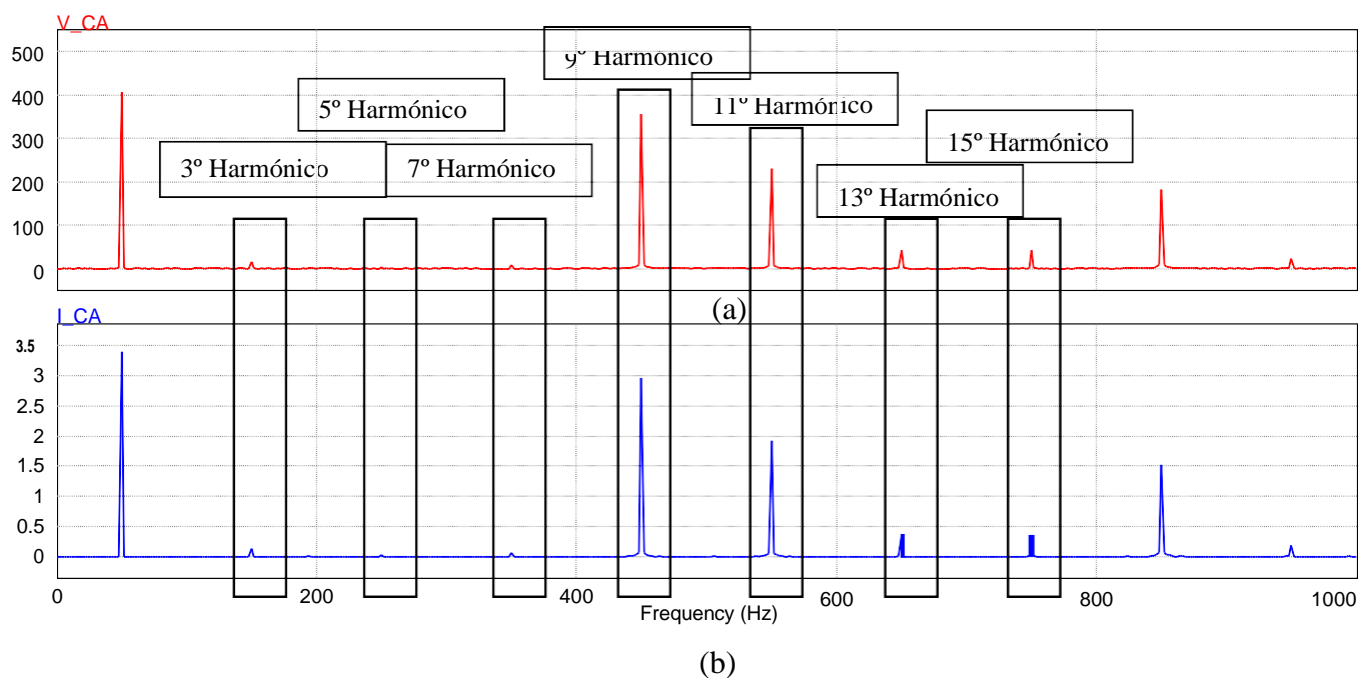


Figura 3.10 - Inversor full-bridge com eliminação do 3º, 5º e 7º harmónico. (a) – Espectro da tensão e (b) – Espectro da corrente.

3.5 Utilização do Filtro LC no Acoplamento a Rede Elétrica.

O filtro LC, também denominado por filtro de acoplamento à rede elétrica, é constituído por uma bobina e um condensador. O inversor funciona com comutações de alta frequência, mesmo que este esteja desenvolvido para sintetizar uma onda sinusoidal, o sinal de saída irá ser um conjunto de pulsos de alta frequência. Como o objetivo da interface é sintetizar e injetar na rede elétrica a potência recebida, é necessário ter em conta que a forma de onda da corrente deve cumprir certos requisitos no que se refere à qualidade da energia elétrica, ou seja, a corrente produzida que será injetada na rede elétrica deve ser aproximadamente sinusoidal, de forma a ter o menor THD% possível para não provocar qualquer tipo de distúrbio na rede elétrica, devido a harmónicos (que podem causar mau funcionamento de equipamentos, aumento das perdas nos condutores, etc.).

O facto do sistema de controlo eliminar o terceiro (150 Hz), quinto (250 Hz) e sétimo (350 Hz) harmónicos acaba por aumentar os harmónicos a frequências mais elevadas, especialmente o nono (450 Hz) harmónico. É necessário ter em conta que, de acordo com a equação (1), quanto menor for a frequência de corte, maior será o valor dos componentes passivos L e C , o que implica um custo maior. Ajustaram-se as características do filtro, ou seja, ajustaram-se os valores da capacidade e da indutância para obter o melhor resultado possível, isto é, uma boa filtragem. Definiu-se um condensador de $1,14 \mu\text{F}$ e uma frequência de corte de 430 Hz, obtendo-se uma indutância total do filtro de 120 mH, calculada usando a equação seguinte, onde (f) representa a frequência de corte, (L) o valor da indutância e (C) do condensador.

$$f = \frac{1}{2 * \pi * \sqrt{L * C}}$$

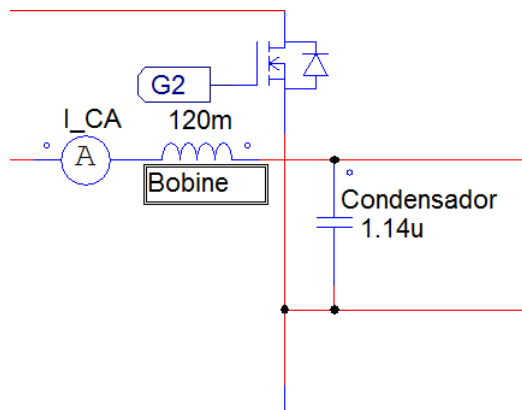


Figura 3.11 - Utilização do filtro LC

Na Figura 3.11 consegue-se ver a utilização do filtro LC na saída da ponte conversora. O sistema dimensionado de eliminação programada de harmónicos, agrava os harmónicos de nona ordem (450 Hz). Com a utilização do filtro é possível melhorar as formas de onda da tensão e corrente, injetadas na rede.

Na Figura 3.12 é possível visualizar a tensão e a corrente no barramento CA, com utilização do filtro e na Figura 3.13 a THD de 0,8% na tensão e 11,6% na corrente. Uma vez que o objetivo do projeto é a injeção de potência na rede elétrica, a THD da tensão é a mais significativa, já que a corrente injetada é significativamente inferior à corrente da rede.

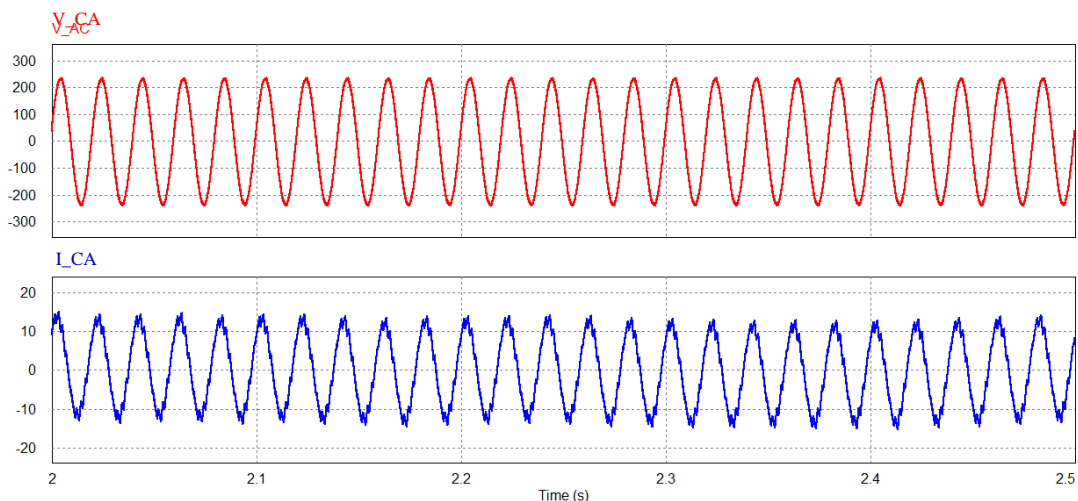


Figura 3.12 - Resultado do barramento CA com utilização do filtro: (a) gráfico da tensão, (b) gráfico da corrente

Capítulo 3 – Dimensionamento e Simulações do Protótipo Laboratorial

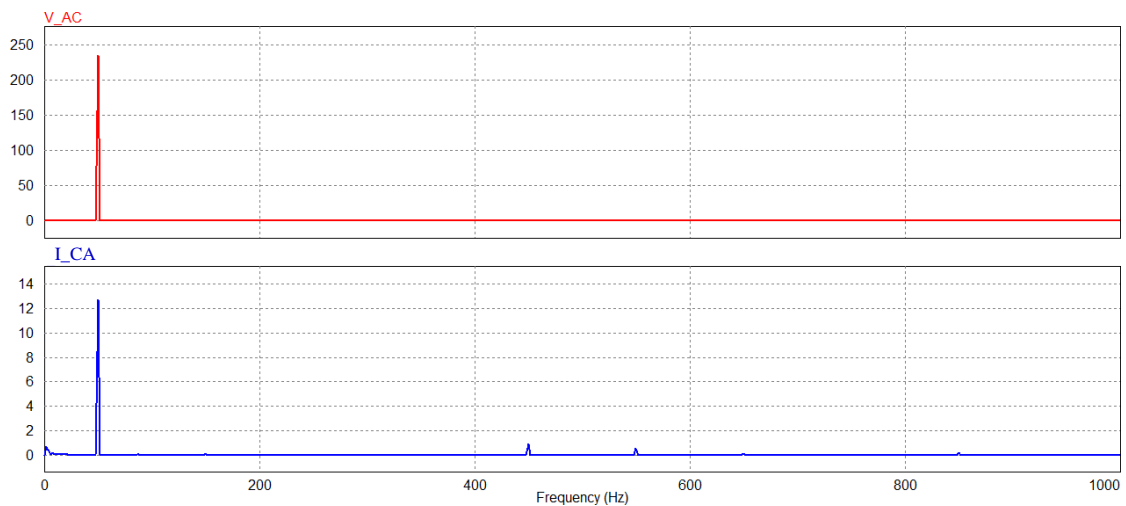


Figura 3.13 - Inversor full-bridge com eliminação do 3º, 5º e 7º harmônico, com utilização do filtro LC: (a) – Espectro da tensão e (b) – Espectro da corrente

Os valores nominais da tensão e da corrente são 235,0 V e 12,7 A. Através da Tabela 6 é possível comparar os dois casos, com e sem filtro.

Tabela 6 - Percentagem de componentes harmônicos relativamente à sua componente fundamental e à sua magnitude na eliminação do 3º, 5º e 7º harmônico quando ligando o sistema à rede elétrica com utilização do filtro LC

Harmónico	% Em relação à fundamental (corrente)	Magnitude (A)	% Em relação à fundamental (tensão)	Magnitude (V)
3º	1,34	0,17	0,02	0,05
5º	0,73	0,09	0,02	0,04
7º	0,24	0,03	0,01	0,03
9º	7,24	0,92	0,36	0,84
11º	4,72	0,60	0,28	0,66
13º	1,02	0,13	0,07	0,17

3.6 Potência Fornecida pelo Sistema

A potência injetada na rede é limitada pela potência fornecida e pelas características dos componentes utilizados. Com a criação de um intervalo de funcionamento, torna-se possível aplicar a interface a um cenário de alimentação de uma carga ou um conjunto de cargas, na existência de um fornecimento de potência correspondente a esse intervalo. O sistema foi dimensionado para fornecer entre 1600 W até 1755 W, controlados através do índice de modelação (m) e da tensão no barramento CC. Na Tabela 7 e na Figura 3.14, é possível analisar a variação da potência de saída em consonância com a variação do índice de modelação e potência recebida.

Tabela 7 - Variação do índice de modelação em relação a tensão do barramento CC

Tensão no barramento CC	Potência desaiída	Índice de modelação (M)
368	1600	1
403	1755	1
403	1600	0.95
412	1637	0.95
412	1600	0.90
430	1680	0.90
430	1600	0.85
451	1680	0.85
450	1610	0.80
494	1755	0.80

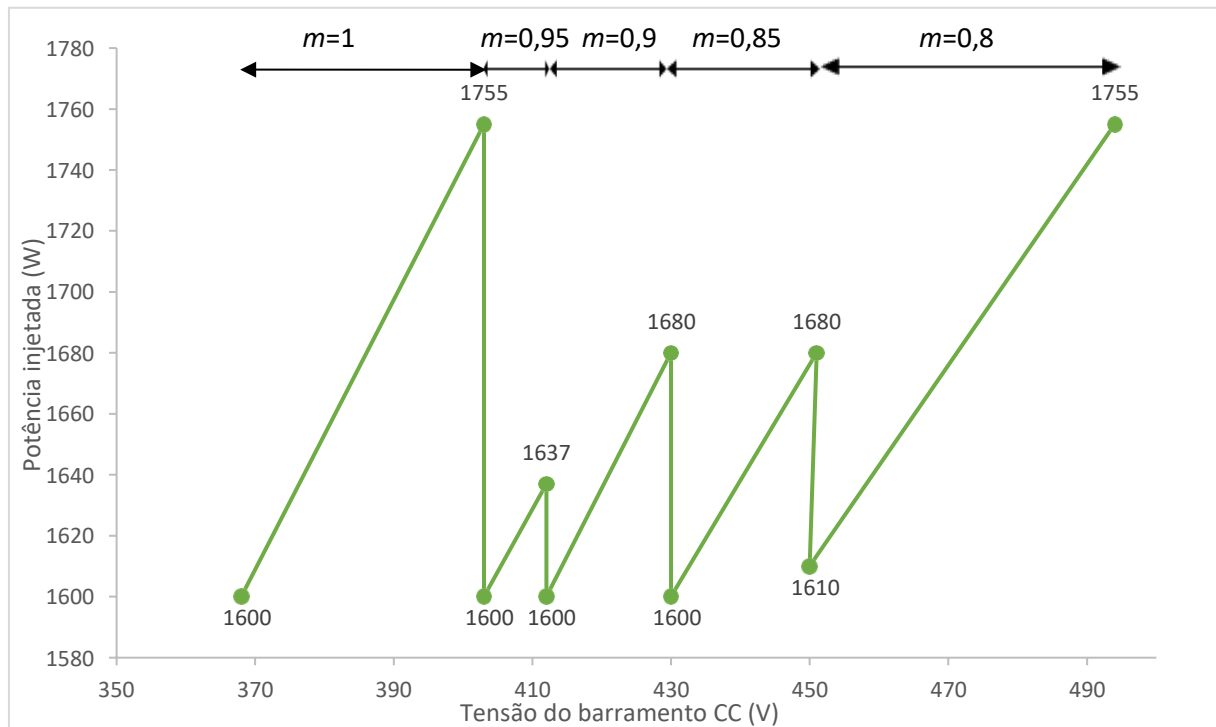


Figura 3.14 - Variação da potência em relação a tensão do barramento CC

A variação do índice de modelação (m), existente no sistema de controlo, origina uma alteração no valor da corrente injetada na rede, o que consequentemente varia a potência injetada na rede.

$$P = I \cdot U \cdot fp$$

Na Figura 3.15, é possível observar a diferença entre a potência injetada na rede e a recebida. Para obtenção destes resultados foram utilizados 490 V no barramento CC e índice de modelação de 0,8. É de salientar o intervalo de sincronismo de 0,19 segundos.

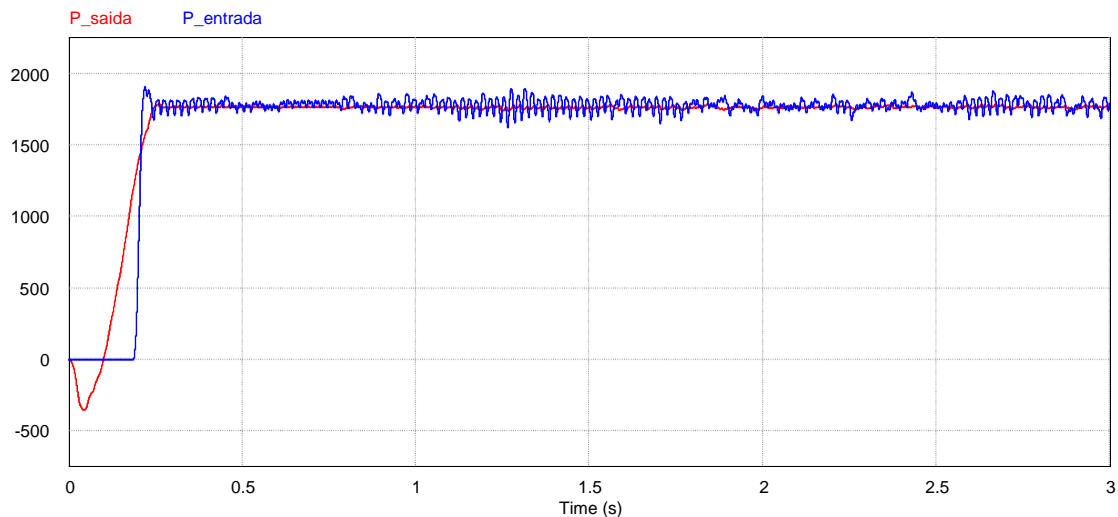


Figura 3.15 - Gráfico da comparação entre a potência recebida e a fornecida.

3.7 Conclusão

Neste capítulo foram efetuados todos os cálculos e simulações computacionais necessárias para projetar, testar e validar o funcionamento da topologia desenvolvida e do respetivo sistema de controlo.

Relativamente às simulações computacionais, há a realçar o facto do bom desempenho do software selecionado, bem como as várias opções de medida disponibilizadas por este, permitindo desta forma inferir sobre todos os resultados obtidos.

Em primeiro lugar, foi dimensionado o barramento CC. A tensão neste barramento depende do valor fornecido pela fonte e é retificada por um conjunto de 6 díodos auxiliados por um condensador. O bom dimensionamento dos elementos do barramento CC é importante para o controlo do índice de modelação aplicado no sistema de eliminação programada de harmónicos.

De seguida procedeu-se às simulações computacionais dos 2 blocos principais do sistema de controlo. O primeiro bloco simulado foi a malha de captura de fase (PLL) e foi comprovado o seu correto funcionamento, isto é, foram comprovados o sincronismo entre os sinais gerados e as respetivas tensões da rede elétrica, ideais e distorcidas.

O segundo bloco consiste na demonstração do sistema de eliminação programada de harmônicos. Foi possível concluir que os resultados foram os esperados, pois os harmônicos das formas de onda sintetizadas pela fonte inversora de tensão, que se pretendiam eliminar foram atenuados com êxito.

Por fim, foi abordada a utilização de um filtro LC. Com a utilização de um filtro que atua a montante da sua frequência de corte, foi possível reduzir o THD das ondas da corrente e da tensão. Uma vez que a eliminação do 3º, 5º e 7º harmônicos origina um agravamento dos harmônicos posteriores, especialmente o 9º, foi definida uma frequência de corte de modo a atenuar os harmônicos posteriores ao 7º.

Capítulo 4 Desenvolvimento do Sistema de Controlo e do Hardware de Potência

4.1 Introdução

Após simular o circuito de potência e o respetivo sistema de controlo a desenvolver, e depois de validar o correto funcionamento de todas as partes constituintes, procedeu-se à implementação do protótipo laboratorial. Acerca do circuito de controlo são descritos os diferentes sinais adquiridos pelos sensores e o processo que é realizado de maneira a gerar os sinais de controlo dos IGBT. É também apresentado, no sistema de controlo o microcontrolador DSP (*Digital Signal Processor*) utilizado. Sobre o sistema de potência são abordados os componentes utilizados, com todas as suas características.

Neste capítulo serão apresentadas as diferentes etapas da implementação do hardware e software utilizados no circuito de potência e no respetivo sistema de controlo. No diagrama da Figura 4.1, está sintetizado o sistema de funcionamento de toda a interface, dividindo o andar de potência e o de controlo.

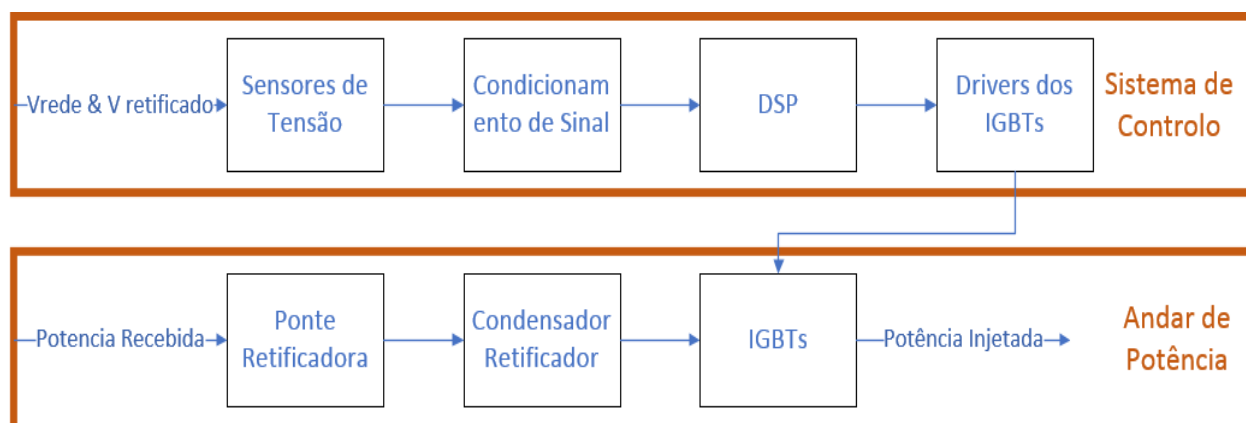


Figura 4.1 - Diagrama de blocos dos elementos constituintes da interface

4.2 Circuito de controlo

Nesta secção são abordados o funcionamento e os elementos constituintes do circuito de controlo da interface. O circuito de controlo é constituído por quatro circuitos de *drive*, dois de aquisição de dados e o DSP. Na Figura 4.2, está representado um dos quatro circuitos de *drive*, e dos sensores, e a forma como estão interligados ao DSP.

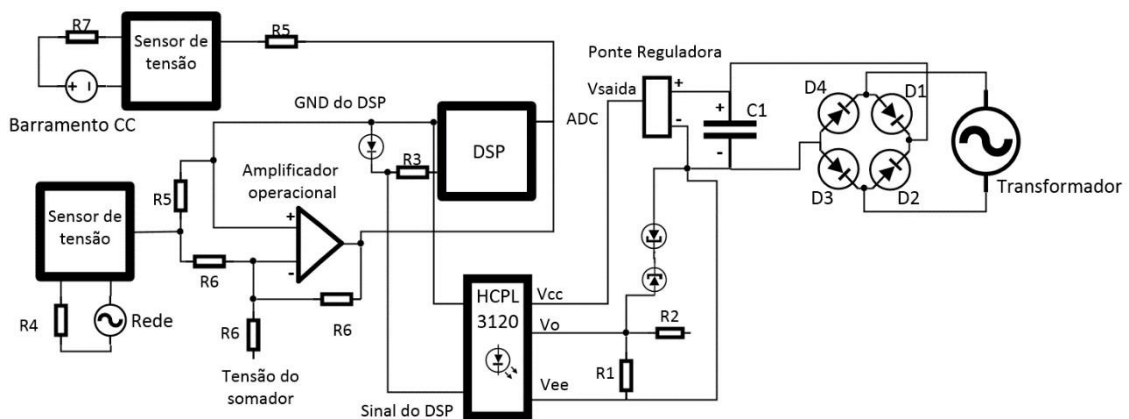


Figura 4.2 - Circuito de controlo (parcial)

4.2.1 Sensor de Tensão

Para medir as tensões do sistema foram utilizados sensores efeito de *HALL*, do fabricante LEM, com referência LV25-P[31]. Este sensor permite a medição em tensões contínua e alternadas e é utilizado na medição do barramento CC e da tensão da rede.

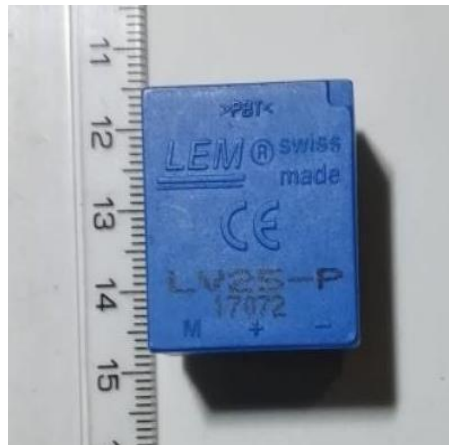


Figura 4.3 - Sensor utilizado para medições das tensões do sistema

No desenvolvimento deste projeto são utilizados dois sensores de tensão, representados pela Figura 4.3. O esquema de montagem do sensor de tensão é o apresentado na Figura 4.2. Destaca-se a utilização da resistência R1, uma resistência de potência, já que a queda de tensão é elevada, o que provoca uma grande potência que tem de ser dissipada. Na saída obtém-se uma razão de transformação de 0,2 relativamente ao lado primário, logo podem-se deduzir os valores de R1 e RM para a saída desejada, abaixo explicitado.

$$I_p = \frac{V_{in}}{R_1}$$

$$I_s = 0,2 * I_p$$

$$I_s = \frac{V_{out}}{R_M}$$

$$I_p = \frac{V_{in}}{R_1}$$



Figura 4.4 - Esquema elétrico do componente LV 25-P

Com o objetivo de limitar a corrente de entrada a 5 mA, relativamente à Figura 4.2, foram utilizadas uma resistência em R4 com 70 k Ω e 2 W, em R7 com 150 k Ω e 4 W, e R5 com 350 Ω e 0,25 W.

4.2.2 Circuito de Condicionamento de Sinal

O DSP utilizado somente suporta sinais entre 0 V e 3 V. É utilizado um amplificador operacional LM741 numa topologia onde o objetivo consiste em aumentar o valor médio da senoide gerada pelo sensor de tensão. Na topologia somadora, foram utilizadas três resistências de 10 k Ω e um divisor de tensão de modo a obter -1,5 V. Na saída deste circuito encontra-se uma senoide de valor médio 1,5 V e 0,7 V, pico a pico.

4.2.3 Placa de Drive

Para desenvolver o circuito de *drive* foi utilizado o dispositivo HCPL3120[32] fabricado pela AGELENT. Cada optoacoplador contém um fototransistor de modo a criar isolamento galvânico e, assim, ser possível atuar os IGBT da parte superior do inversor, bem como criar isolamento entre a parte de controlo e a parte de potência. Foi também tida em conta a necessidade de uma elevada frequência de atuação, para possibilitar a comutação dos IGBT.

A alimentação dos optoacopladores está representada na Figura 4.2. Foi utilizada uma ponte retificadora, RBI57 do fabricante MIC, um condensador e uma ponte reguladora para 15 V

(L7815), este circuito é repetido por 4 vezes, uma para cada IGBT. Os zeners em antiparalelo, em conjunto com a resistência R1 (10 k Ω), atuam na existência de um pico de corrente e também garantem a variação entre 0V e 15V na saída do HCPL. Na Figura 4.5 está representada a placa com os *drives* e ainda os sensores de tensão utilizados, referidos na secção 4.2.1.

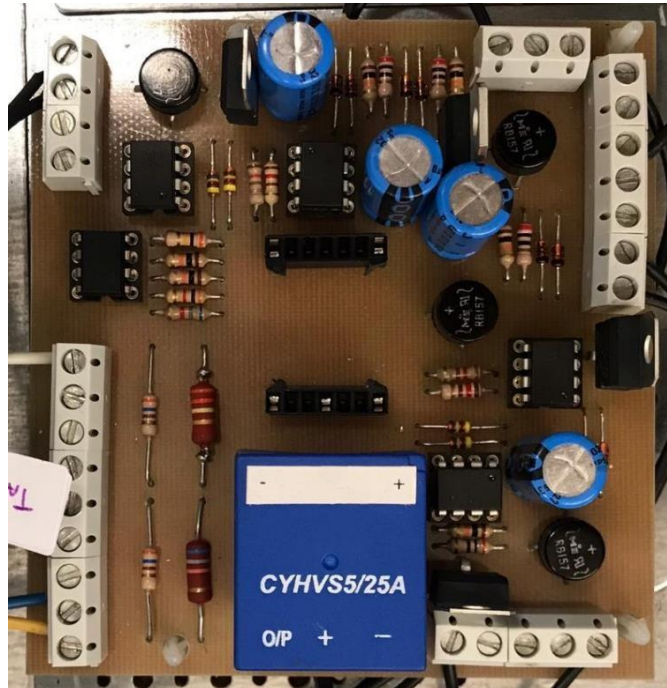


Figura 4.5 - Placa de drive

4.2.4 Microcontrolador Utilizado

A placa de desenvolvimento utilizada foi C2000 PICCOLO LAUNCHPAD LAUNCHXL-F28027F do fabricante Texas Instruments, que se mostra na Figura 4.6. O microcontrolador referido utiliza como recursos: ADC de 12 bit, 8 canais PWM, I2C, SPI, UART e 64 KB de memória flash integrada, etc. Disponibiliza um IDE (*Integrated Development Environment*) da Texas Instruments, Code Composer Studio software para fácil programação, e a possibilidade de representar graficamente as variáveis ao longo do tempo. Realiza operações matemáticas com vírgula flutuante, o que resulta na diminuição do tempo de execução de operações com números decimais e aumenta a resolução do resultado obtido.

Para além da rápida execução e grande resolução de operações matemáticas com números decimais, este DSP possui características que o tornam muito interessante para a utilização em sistemas de eletrónica de potência. Além disso, também contém 40 pinos que permitem a interação com outros dispositivos.

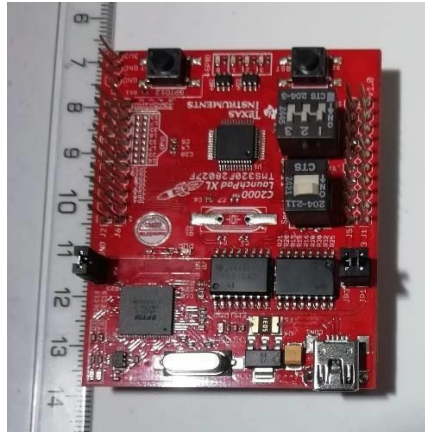


Figura 4.6 - C2000 PICCOLO LAUNCHPAD
LAUNCHXL-F28027F

4.2.5 Algoritmo de Controlo

O algoritmo de controlo é centrado em 2 partes: a PLL referida nas secções 2.8.5 e 3.3 e a eliminação programada de harmónicos referida nas secções 2.7.5 e 3.4. Como é possível visualizar na Figura 3.8, uma vez que se pretende eliminar o 3^o, 5^o e 7^o harmónico, existem para este cenário 8 *notches*, o que origina 18 oscilações por cada período de onda. O intervalo de tempo dessas oscilações é influenciado pelo período de onda (T) calculado pela PLL, e através do valor de m (índice de modulação) sendo que o valor de m varia entre 0.8 até 1, de modo a manter a potência fornecida constante.

Após determinar matematicamente o intervalo de tempo de cada uma das 18 oscilações por ciclo de onda, esses valores são guardados num vetor, denominado de "Tempo", como mostra a Figura 4.7.

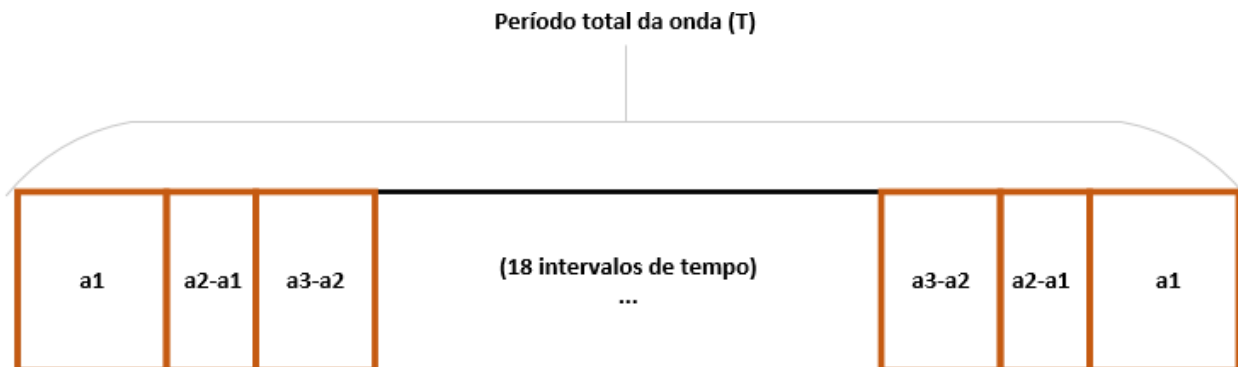


Figura 4.7 - Vetor “Tempo” com 18 posições onde cada uma representa um intervalo de tempo

Na Figura 4.8, é possível ver o funcionamento do algoritmo de controlo. Após a leitura dos valores dos ADC, estabeleceu-se uma comparação entre o valor de tensão da rede e o valor de tensão da onda criada pela PLL, de modo a calcular o erro entre os dois. Através do valor do erro é gerado um novo valor de frequência para a senoide criada, que será utilizado após a próxima leitura do ADC da rede elétrica e assim calculado o novo erro. Com o valor da frequência é calculado o período e depois determinados os valores de a_1 , a_2 , a_3 e a_4 . Estes 4 valores são os responsáveis por determinar os intervalos de oscilação, ou seja, definem o PWM resultante. O PWM resultante é criado com a utilização de um *Timer* que funciona paralelamente durante o decorrer de todo o processo descrito anteriormente. O valor de recarga do *Timer* varia a cada ciclo de onda e a cada intervalo de oscilação.

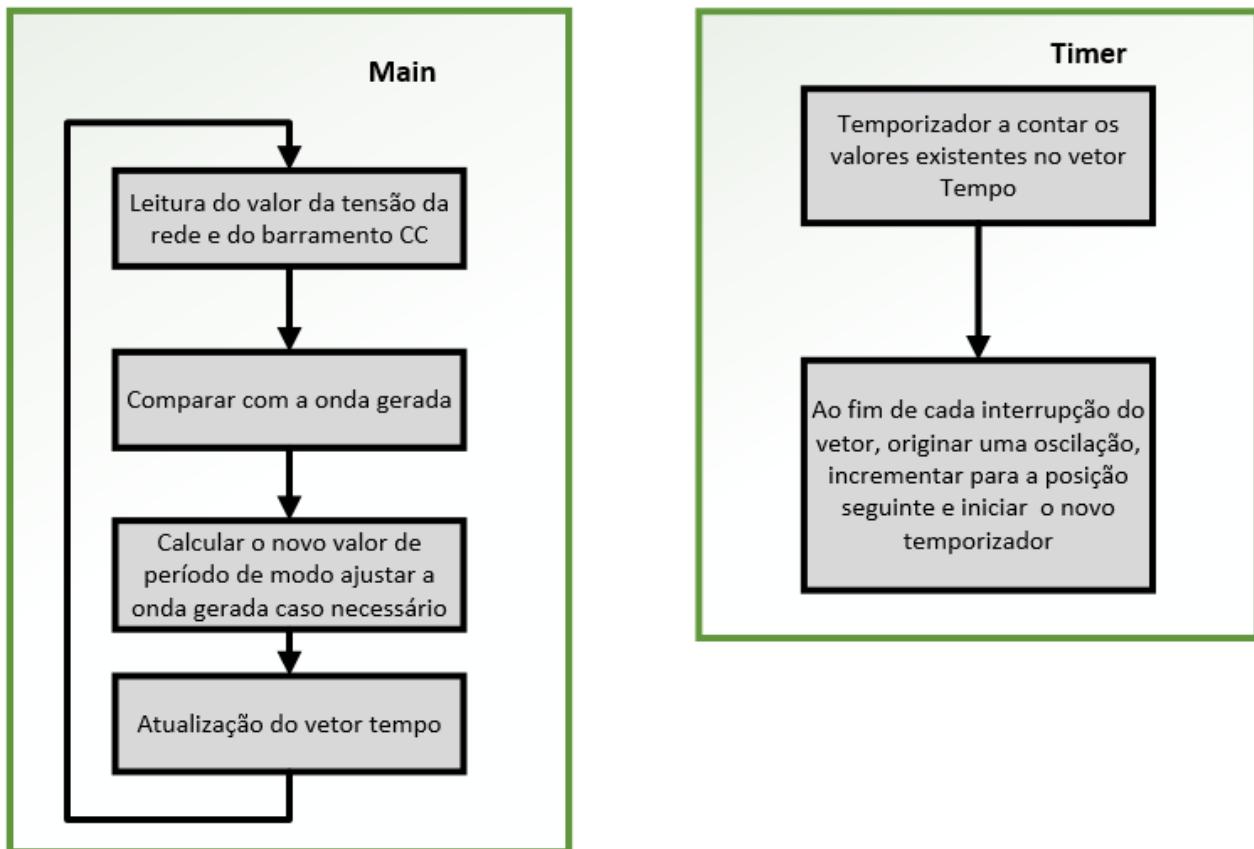


Figura 4.8 - Funcionamento do algoritmo de controlo

4.3 Circuito de Potência

Neste capítulo serão descritos os elementos constituintes do andar de potência da interface, abordando a ponte retificadora, o inversor em ponte completa, o respetivo circuito *snubber* e, por fim, a filtro LC de acoplamento à rede elétrica.

Na Figura 4.9 é apresentado o circuito responsável pelo andar de potência.

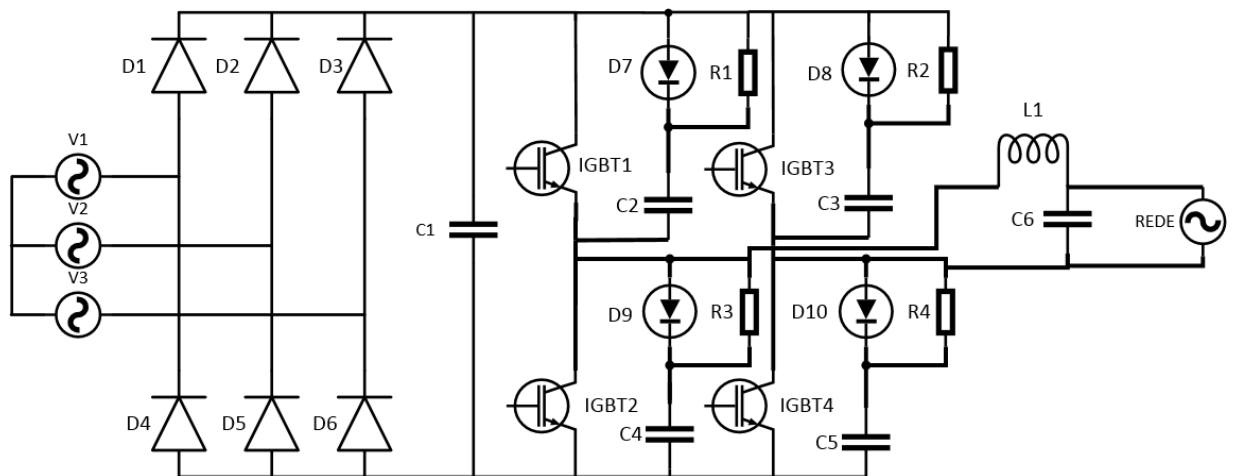


Figura 4.9 - Esquema do circuito de potência

4.3.1 Ponte Retificadora

O retificador utilizado é trifásico e não controlado e está representado na Figura 4.10. São utilizados 6 *Ultrafast Diode* FFPF30UA60S do fabricante FAIRCHILD [33]. Estes díodos apresentam tempo rápido de recuperação e capacidade de suportar 600 V, 30 A. Este díodo foi escolhido devido à sua capacidade de suportar picos de corrente repetidamente, necessários para este efeito. O díodo FFPF30UA60S está representado na Figura 4.10 - Díodo FFPF30UA60S Poderiam

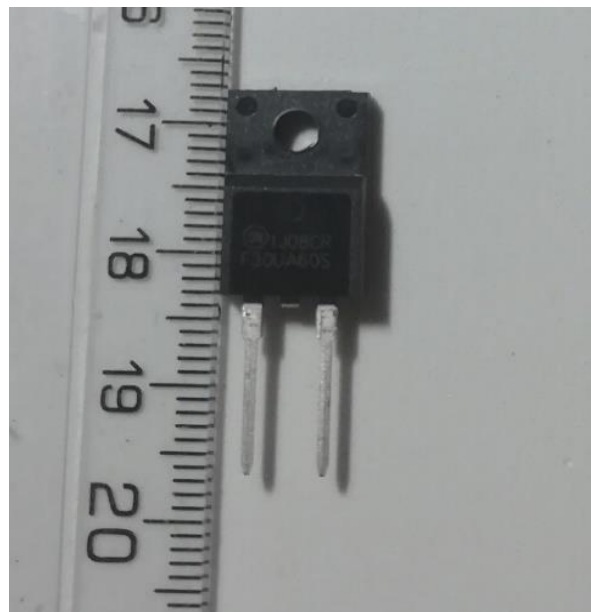


Figura 4.10 - Díodo FFPF30UA60S

também ter sido utilizados díodos de retificação, contudo foram reaproveitados estes de um projeto antigo.

Com o objetivo de aperfeiçoar o retificador é também utilizado um condensador 75J808 do fabricante NIPPON CHEMI-COM [33]. O condensador está preparado para funcionar até 650V e está representado na Figura 4.12 - Condensador 75J808

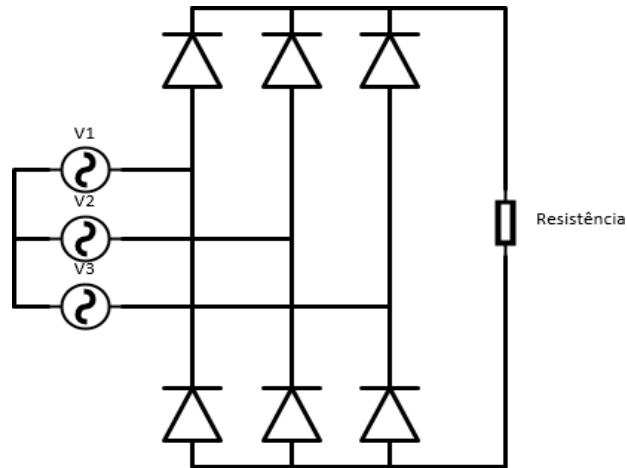


Figura 4.11 - Esquema do retificador trifásico não controlado



Figura 4.12 - Condensador 75J808

4.3.2 Inversor em Ponte Completa

O inversor utilizado na realização da interface é monofásico em ponte completa, como se mostra na Figura 2.11, através 4 IGBT IXGA12N120A3 do fornecedor IXYS, representado na Figura 4.13.

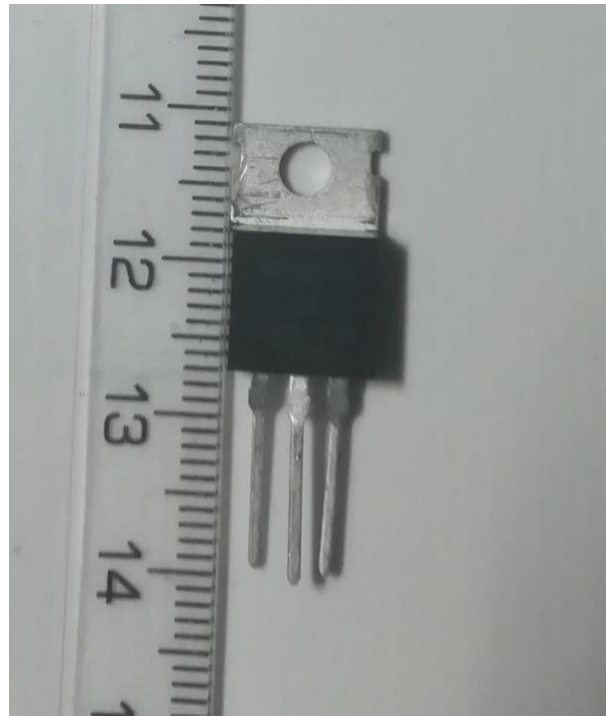


Figura 4.13 - IGBT IXGA12N120A3

No barramento CC encontra-se até 500 V, segundo a topologia de ligação em ponte completa, essa tensão será dividida por 2 IGBT. O componente está preparado para operar até 1200 V e 12A.

A limitação nesta montagem encontra-se nos picos repetitivos de corrente encontrados no barramento CC. Os díodos referidos na secção 4.3.1 foram seleccionados de forma a permitirem a operação dos mesmos com correntes de 80 A de picos repetitivos.

Com a finalidade de proteger o circuito contra picos de alta tensão, foi desenvolvido um circuito *snubber*, que devidamente calculado, previne a deterioração dos IGBT e a criação de interferências eletromagnéticas. Deste modo é possível limitar a tensão no IGBT assim que ele transita do estado em condução para não condução, num intervalo de tempo reduzido.

Foi utilizado um *snubber* RCD acoplado a cada um dos IGBT, configuração demonstrada na Figura 4.14 - Esquemático do *snubber* RCD . O *snubber* RCD é constituído por uma resistência de 470 Ω e 15 W, um diódo MU8100E e um condensador 0,47 mF e 1500V.

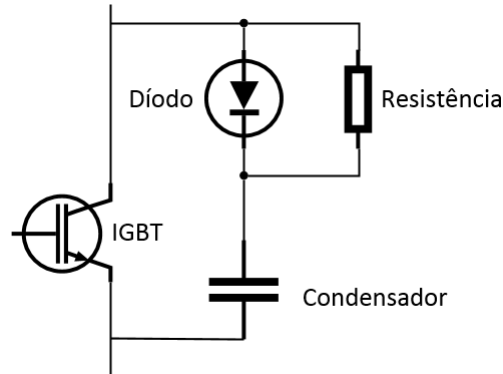


Figura 4.14 - Esquemático do *snubber* RCD

Sabendo que, quando o IGBT transita do estado em condução para não condução corrente, atinge o seu valor máximo, pode-se utilizar a seguinte expressão [34]:

$$i_{\text{pico}} = C * \frac{dV}{dt}$$

$$C = \frac{i_{\text{pico}} * dt}{V_{\text{IGBT}}}$$

Sendo que a variável C representa a capacidade do condensador, o valor da resistência é calculado atribuindo como valor de tempo de reação do *snubber* um décimo da frequência utilizada, resultando:

$$\frac{f}{10} = R * C$$

A energia armazenada no condensador é totalmente dissipada pela resistência, podendo assim ser assumido:

$$P = E_c * f = \frac{1}{2} * C * V^2 * f$$

4.3.3 Filtro LC

O filtro LC assume um papel de acoplamento da plataforma à rede elétrica, atenuando os harmónicos que não são atenuados pelo sistema de controlo.

O filtro utiliza um condensador de 1,15 μF e uma bobine de 120 mH, representados na Figura 4.15. A bobine utilizada apresenta um núcleo variável de modo a ser possível ajustar a indutância. São utilizadas duas em paralelo para dividir a corrente pelas duas. O condensador utilizado é do fabricante VISHAY com a referência MKT1882 [35].

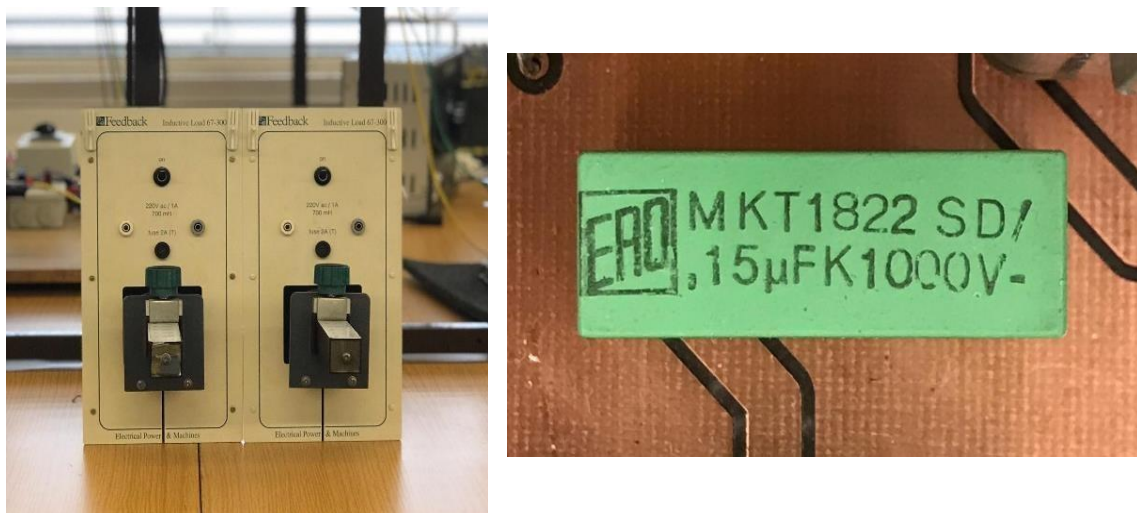


Figura 4.15 - Condensador e bobines utilizados

4.3.4 Disjuntor

Uma das medidas de segurança utilizadas foi a instalação de dois disjuntores na ligação entre a interface e a rede elétrica. O disjuntor é um dispositivo eletromecânico utilizado com o objetivo de garantir o corte automático da corrente, na existência de um pico de corrente que ultrapasse o valor para o qual ele foi dimensionado. Normalmente entra em ação na existência de um curto-circuito ou uma sobrecarga. O disjuntor utilizado é de 230 V e 10 A.

4.4 Conclusão

Neste capítulo foram apresentadas as etapas de implementação e dimensionamento de todo o hardware e software necessários para o projeto.

Todo o hardware utilizado foi adquirido, dimensionado e produzido especificamente para o projeto, à exceção dos sensores de tensão e da bobina de acoplamento à rede, que foram facultados pelo GEPE.

O hardware utilizado foi dividido por três placas; uma placa onde é feita a aquisição de dados, por meio dos sensores de tensão, o isolamento elétrico entre a placa de potência e a DSP; uma placa de potência, dividida numa primeira parte de transformação de corrente alternada para contínua, e, numa segunda parte, de contínua em alternada; uma terceira placa de processamento de software, C2000 PICCOLO LAUNCHPAD LAUNCHXL-F28027F.

O software foi desenvolvido em linguagem C, e baseado no algoritmo de controlo desenvolvido no sistema de simulação.

Capítulo 5 Resultados Experimentais

5.1 Introdução

Após a implementação do protótipo laboratorial, e consequente teste, procedeu-se ao registo e análise dos resultados experimentais obtidos, apresentados ao longo deste capítulo.

Uma parte dos resultados foi obtida com um osciloscópio digital, DS1102E uma vez que este dispositivo possibilita o armazenamento das imagens visualizadas no ecrã, através da transferência das mesmas para um computador. Para além disso, também possibilita a transferência das coordenadas de um determinado sinal, permitindo utilizar estes dados para a reprodução do mesmo, utilizando outra ferramenta como o Microsoft Excel. Deste modo possibilita calcular outras características que o osciloscópio não calcula como, por exemplo, a THD (*Total Harmonic Distortion*).

O desenvolvimento dos resultados experimentais só foi possível devido à disponibilização do laboratório de máquinas elétricas, cuja bancada de trabalho está representada na Figura 5.1.



Figura 5.1 - Bancada de trabalho

5.2 Fonte de Emulação da Unidade Eólica

A interface desenvolvida deve ser capaz de proceder à transformação da potência elétrica, proveniente de uma fonte de energia eólica e de a transferir para a rede elétrica. No entanto, a energia eólica pode ser inconstante, dependendo do vento existente. Devido a esta variável fornecimento de energia foram criados dois métodos de funcionamento. Quando é possível utilizar um fornecimento livre de energia a interface fornece o máximo de energia possível, ideal para injeção de energia em redes, paralelamente também foi criado um método de controlo para cargas elétricas, criando um intervalo de funcionamento, Figura 3.14, que restringe o funcionamento da interface a trabalhar entre 1600 W e 1755 W.

Tendo em conta o material, o espaço disponível e todos os custos associados, não foi possível testar o sistema proposto ligado diretamente a uma unidade eólica. A fonte de energia eólica foi emulada com auxílio de um sistema existente no laboratório de máquinas elétricas,

Figura 5.2, constituído por um variac, motor série universal, fonte CC e uma máquina síncrona trifásica de rotor bobinado, permitindo assim realizar variações na potência fornecida e velocidade, e estudar o comportamento da interface.

O motor série universal é eletricamente excitado pelo variac. A máquina síncrona que irá funcionar como gerador, contém um acoplamento mecânico com o motor série. A fonte CC tem como função alimentar o enrolamento de excitação do gerador.

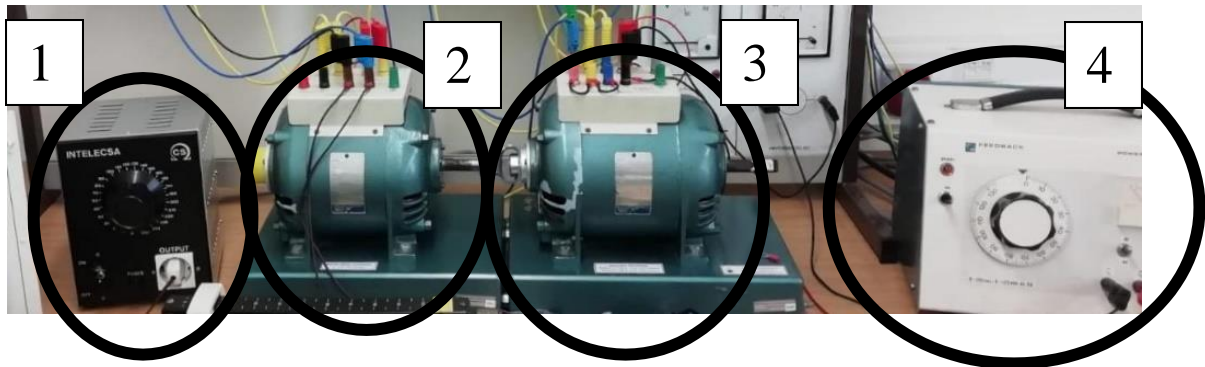


Figura 5.2 - Emulador do gerador microeólico. 1- Variac; 2- Motor série universal; 3 Máquina síncrona trifásica; 4- Fonte CC.

O motor série universal (Feedback ETL174A) apresenta a possibilidade de uma alimentação em corrente contínua ou alternada, utilizando até 186,5 W / 120 V em corrente alternada e 248,7 W / 120 V em corrente contínua, uma velocidade 2000 rpm e 4 A.

A máquina síncrona (Feedback ETL174G) trabalha até 248,7 W, com uma tensão simples de fase de 120 V (CA), uma corrente de fase de 1,2 A (CA), atingindo até 3000 rpm, com uma corrente de excitação de 5 A.

Na Figura 5.3 - Tensão simples numa das fases do gerador é possível ver a forma de onda da tensão simples na fase "a" da máquina síncrona. Foi utilizada uma corrente de 3,8 A no motor série e uma corrente de excitação de 2,1 A na máquina síncrona.

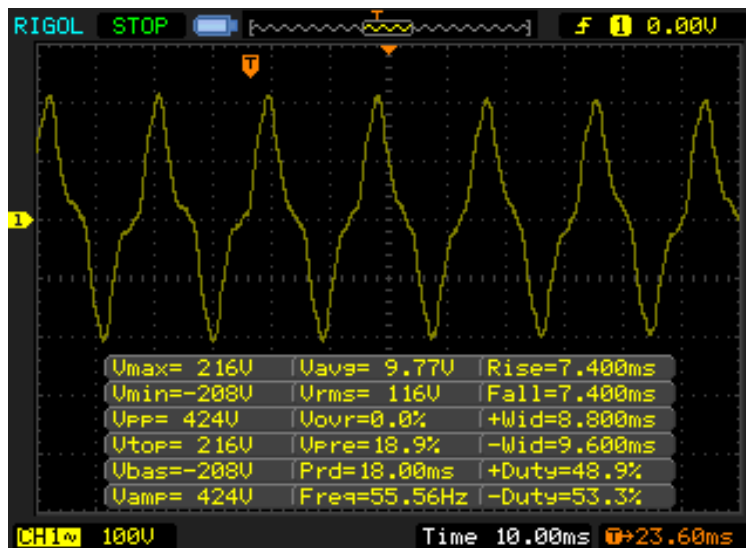


Figura 5.3 - Tensão simples numa das fases do gerador

5.3 Resultados Experimentais do DSP

A componente de software é controlada pelo DSP, que recebe como entrada a tensão da rede elétrica e do barramento CC, provenientes dos sensores de tensão, e apresenta como saídas os sinais de PWM que controlam os IGBT.

O DSP utiliza, simultaneamente, o sistema de sincronização com a rede elétrica e a eliminação programada de harmónicos, gerando as ondas de PWM.

As saídas do DSP estão representadas na Figura 5.4- Resultados experimentais da saída do DSP

, assim como os dois PWM utilizados, com uma tensão de 3,3 V pico a pico.

A ponte inversora utilizada é constituída por um conjunto de 2 pares de IGBT. Utilizando, como exemplo, a Figura 4.9, o IGBT 1 e 4 representariam um dos pares e o IGBT 2 e 3 representariam o segundo par. Assim sendo, cada par de IGBT recebe um dos sinais da Figura 5.4. Os sinais são opostos um ao outro, garantindo que dois IGBT do mesmo braço nunca estejam em condução simultaneamente.

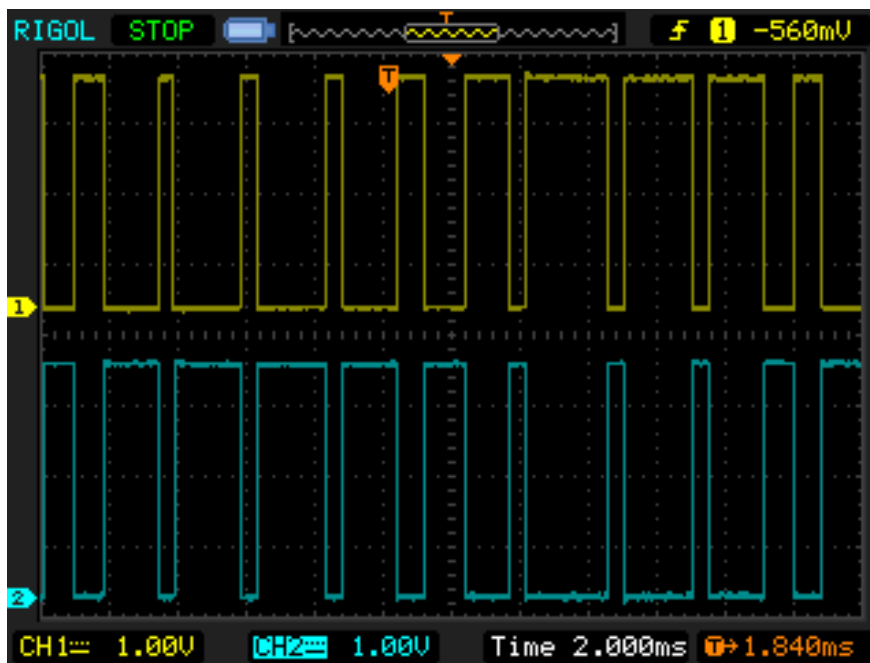


Figura 5.4- Resultados experimentais da saída do DSP

Na prática, os IGBT não ligam nem desligam instantaneamente, assim como o optoacoplador não é instantâneo, pelo que é necessário utilizar um tempo morto (*dead time*). Este tempo não foi implementado nas simulações devido à complexidade do mesmo, porém na prática torna-se indispensável.

O intervalo de tempo morto necessário é de $1,5 \mu\text{s}$ sendo utilizado um intervalo de tempo de $2 \mu\text{s}$, de modo a garantir que os sinais de controlo dos dois IGBT no mesmo braço nunca estejam ativados, simultaneamente, como pode ser representado na Figura 5.5 - Representação dos $2 \mu\text{s}$ utilizados para o intervalo de transição dos IGBTs.

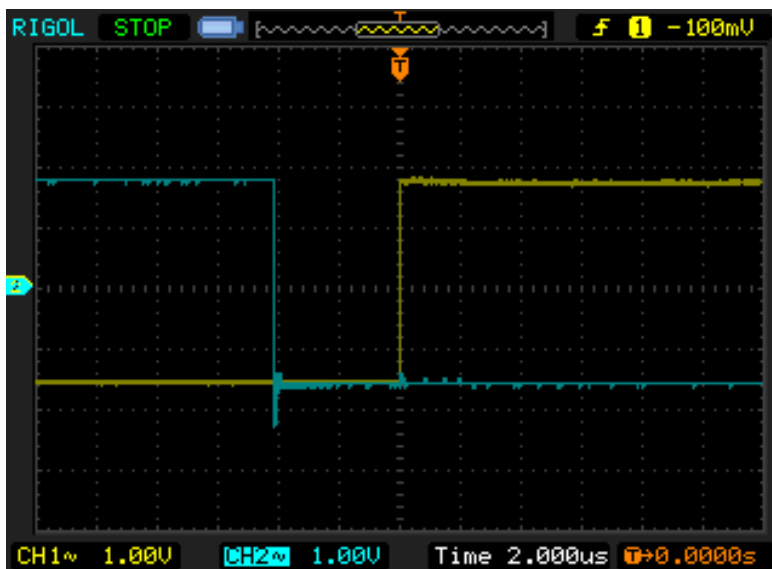


Figura 5.5 - Representação dos 2 μ s utilizados para o intervalo de transição dos IGBTs

5.4 Resultados Experimentais da Placa de Drive

A placa de *drive* é constituída pelo circuito dos sensores e dos optoacopladores que é responsável pelo isolamento elétrico entre o circuito de potência e o DSP, como por elevar o valor da tensão do sinal, pico a pico.

Analisando a Figura 5.6 - Sinal de saída dos optoacopladores. é possível observar que o sinal se encontra com um valor de 15 V pico a pico. É de salientar o ponto de simetria inversa, assinalado pela seta, e delimitado pelas barras se encontra um ciclo de onda, o período da onda neste momento estava ligeiramente acima de 20 ms, o que é perfeitamente normal, pois o controlo de sincronismo implementado recorre à variação da frequência.

Nos circuitos dos sensores é tomada em consideração a utilização de um circuito de tratamento de sinal, com o intuito de alterar o valor médio do sinal de saída do sensor, responsável pela leitura da tensão na rede, assim eliminando a existência de componente negativa no sinal, que é prejudicial ao DSP.

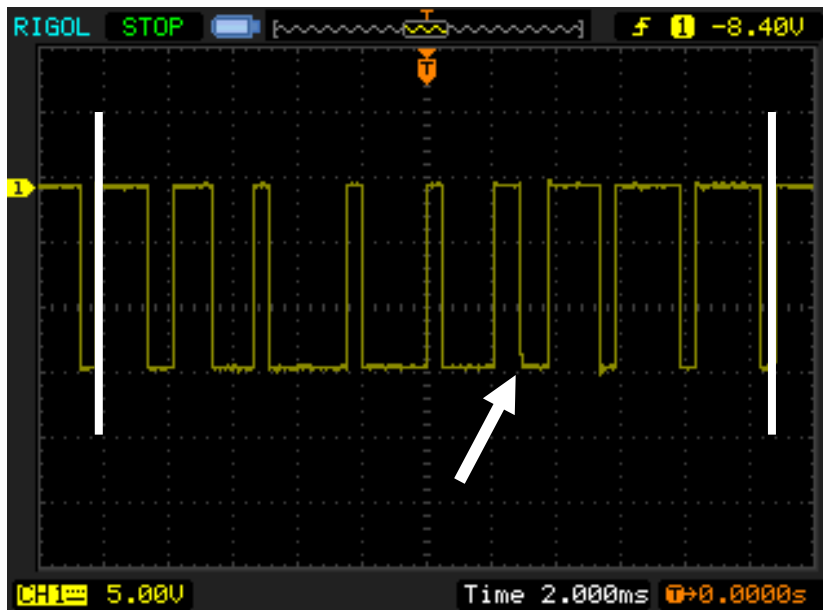


Figura 5.6 - Sinal de saída dos optoacopladores.

Na Figura 5.7 - Sinal de saída do sensor de tensão responsável pela leitura da tensão da rede, após o circuito de acondicionamento de sinal., evidencia-se o sinal de saída do circuito de acondicionamento de sinal que, posteriormente, será recebido pelo DSP. É de sublinhar que o DSP apenas efetua leitura entre 0V e 3V e este sinal encontra-se entre 0,9V a 1,52V.

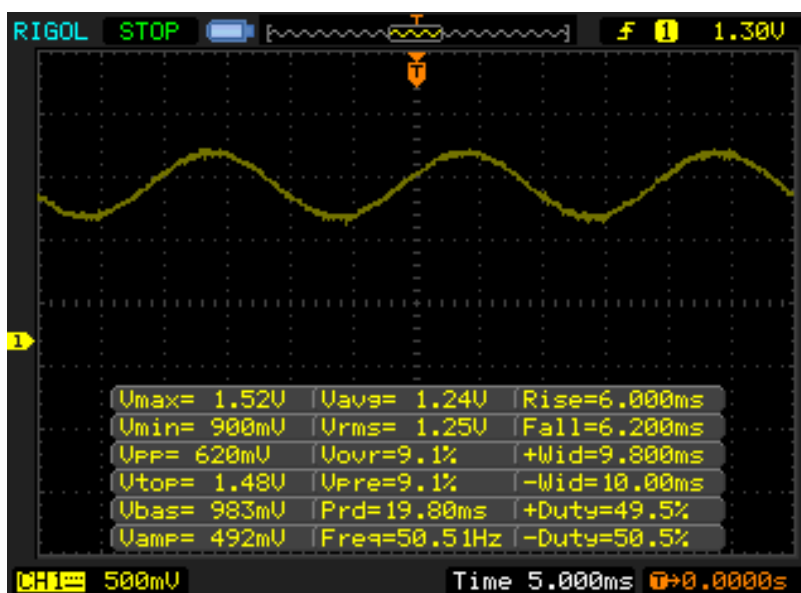


Figura 5.7 - Sinal de saída do sensor de tensão responsável pela leitura da tensão da rede, após o circuito de acondicionamento de sinal.

5.5 Resultados Experimentais da Placa de Potência

Neste capítulo, serão apresentados os resultados obtidos após o compilar de todo o projeto demonstrado até agora, nas suas diferentes etapas. Assim será possível comprovar o funcionamento da placa de potência.

Nesse sentido, realizar-se-á um teste onde a interface alimenta uma carga resistiva e posteriormente, uma análise da qualidade de energia injetada na mesma. Desenrolar-se-á, numa segunda parte, o mesmo teste, com injeção de energia na rede elétrica.

Na Figura 5.8 - Apresentação final do circuito., surgem as 2 placas desenvolvidas, com as respectivas ligações entre si e o DSP. Também estão representados os circuitos de alimentação e sistema de refrigeração. A caixa metálica onde está inserido o circuito não só recebe a alimentação para os circuitos de controlo (rede elétrica) e do circuito de potência (fornecido pelo emulador da unidade eólica) como fornece a energia injetada. Na caixa metálica também existe a ligação com as bobinas de acoplamento (

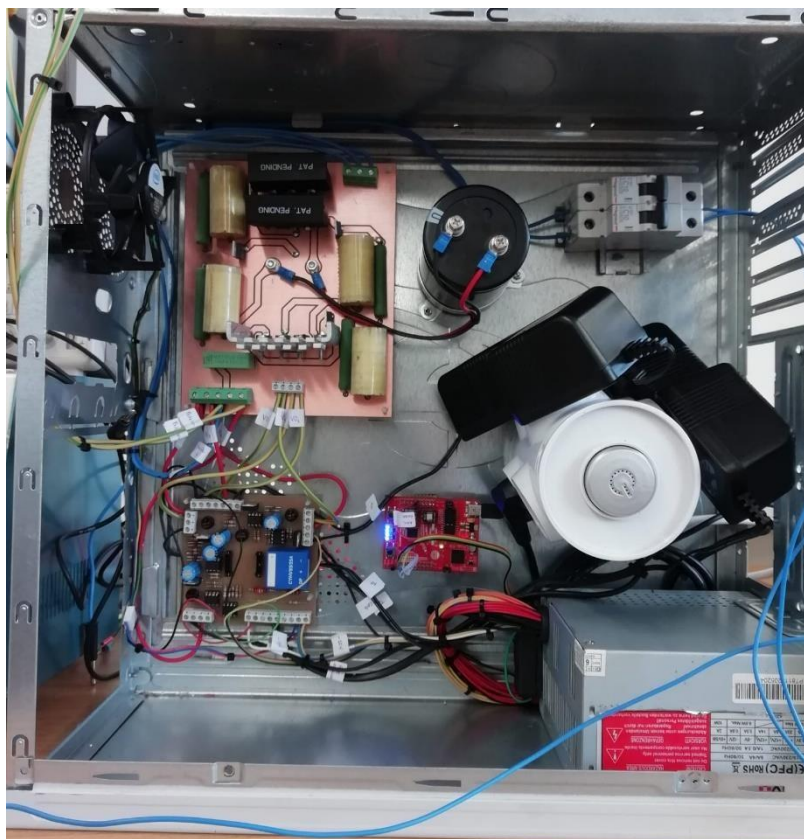


Figura 5.8 - Apresentação final do circuito.

5.5.1 Teste com uma carga resistiva

O primeiro teste ao sistema foi realizado com uma carga resistiva de 100W, com valor de resistência ajustável.

Na Figura 5.9 - Gráfico da tensão na carga e a tensão na rede elétrica, está representada a tensão na carga resistiva, com 60 V pico a pico em conjunto com a representação da tensão na rede elétrica. O valor da potência fornecida pode variar mediante o valor de "m", da potência recebida e do valor da resistência.

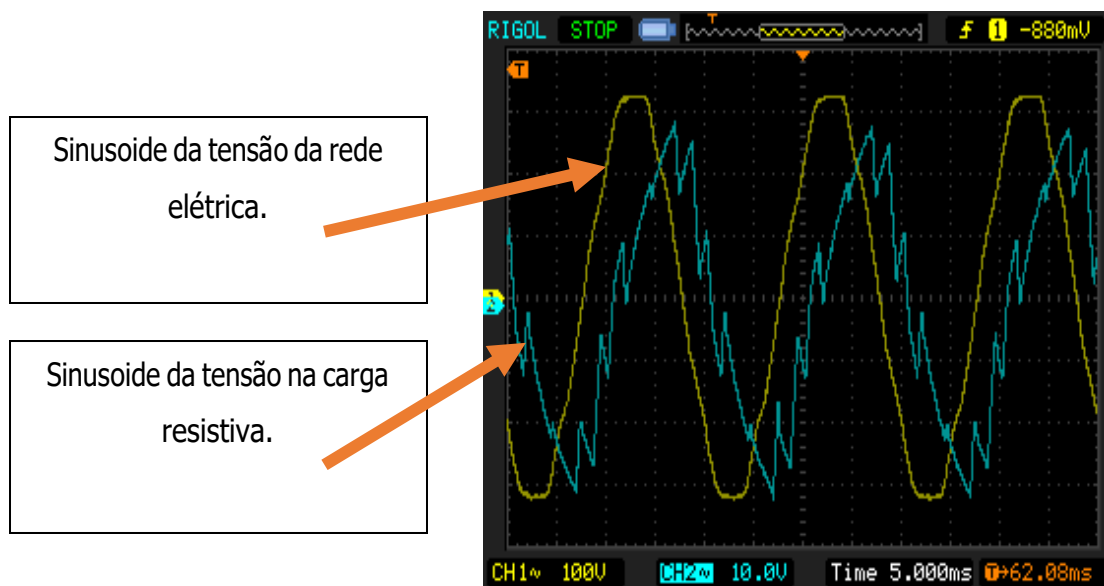


Figura 5.9 - Gráfico da tensão na carga e a tensão na rede elétrica

5.5.1.1 Estudo da qualidade de energia

No estudo da qualidade de energia foi utilizada e estudada a Figura 5.9 - Gráfico da tensão na carga e a tensão na rede elétrica, apesar desta imagem apresentar pouca qualidade, dificultando a leitura de dados.

Com a utilização do software Autocad, foi possível redesenhar uma onda aproximada, no formato vectorial. Também utilizando este software desenhou-se uma grelha que, ao interceptar a

nova onda, permitiu retirar vários pontos e posteriormente, retomar esses pontos para um ficheiro Excel.

Os pontos retirados anteriormente para o ficheiro Excel foram direcionados para um ficheiro PSIM, onde foi possível analisar os harmónicos existentes na onda. A Figura 5.10 - Exemplos das diferentes etapas realizadas na análise da qualidade da energia injetada demonstra as diferentes etapas, descritas anteriormente, realizadas para a análise da qualidade de energia elétrica. A primeira imagem representa a imagem original, a segunda e a terceira são os resultados obtidos no software Autocad e Excel, respetivamente. Após desenhar o gráfico no ambiente PSIM, com a utilização dos pontos calculados anteriormente, foi possível realizar a FFT apresentada na imagem 4.

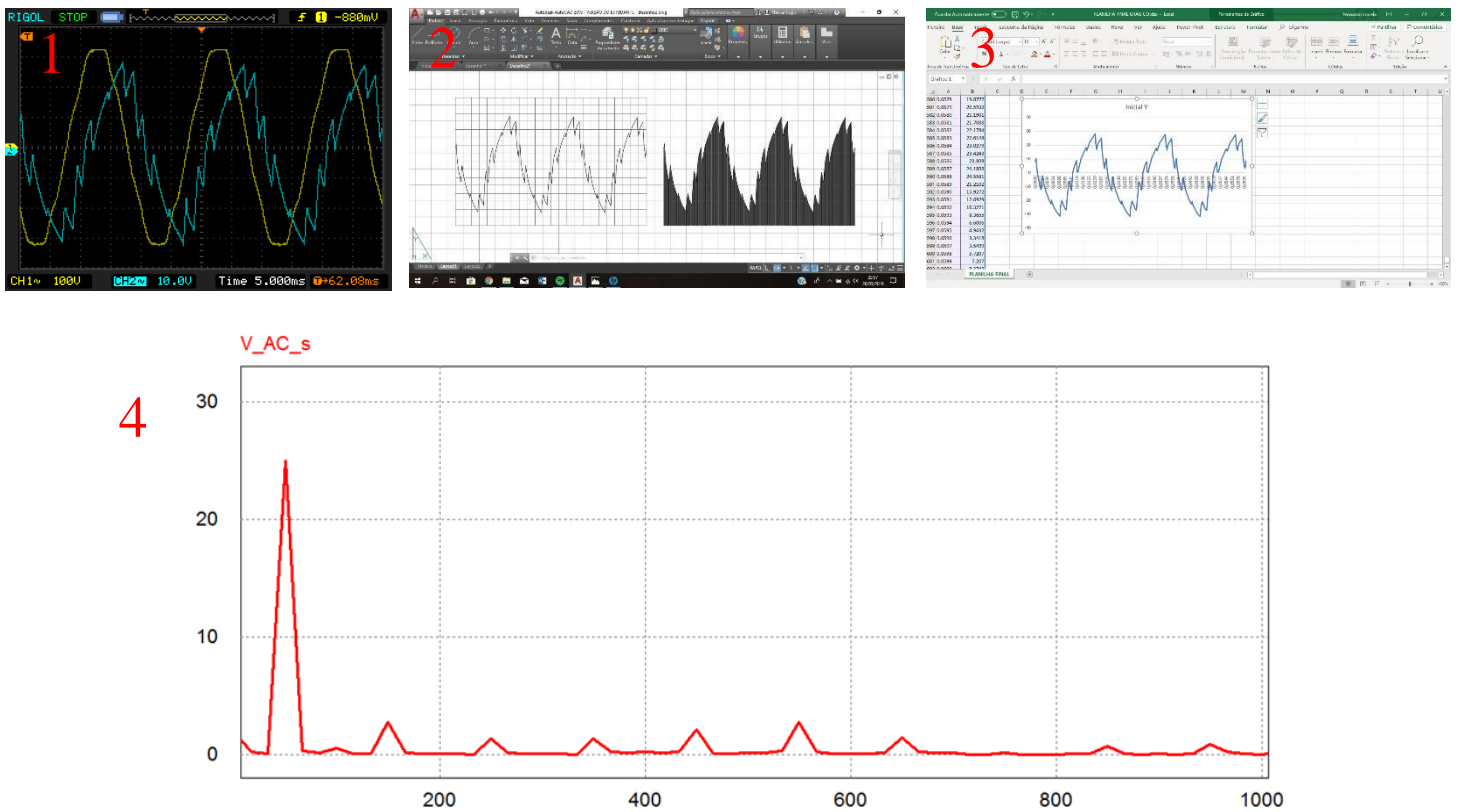


Figura 5.10 - Exemplos das diferentes etapas realizadas na análise da qualidade da energia injetada

5.5.2 Teste com injeção de energia da rede elétrica

Quando a forma de onda da tensão injetada se encontra sincronizada com a forma de onda da rede elétrica e é superior à mesma, é possível injetar potência na rede elétrica. Para tal, foi utilizado um transformador de 230 V / 20 V de modo a baixar a tensão da rede elétrica.

Na Figura 5.11 - Potência injetada na rede elétrica e gráfico da tensão é possível visualizar o gráfico da tensão quando injetada na rede elétrica com uma potência de 50 W.

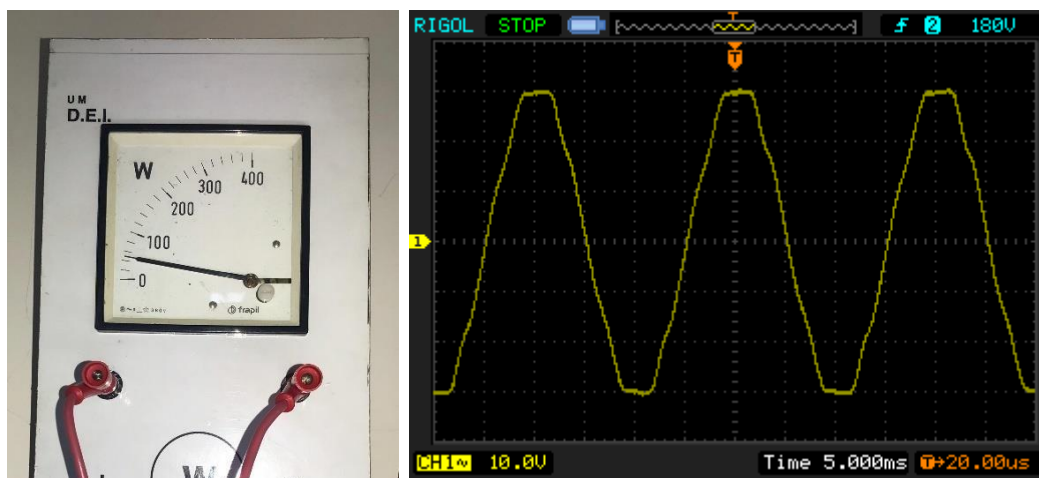


Figura 5.11 - Potência injetada na rede elétrica e gráfico da tensão

5.6 Conclusão

Este capítulo apresenta todos os resultados experimentais relevantes para comprovar o correto funcionamento da interface.

Os resultados foram obtidos por etapas, sendo que, primeiro, foi analisada a saída do DSP e do emulador da unidade eólica. De seguida, anexa-se o DSP com a placa de *drive*, testando todos os pontos e, somente depois, é que todo o circuito foi testado. Em primeiro lugar, o teste foi realizado com uma carga resistiva e, em segundo, com a rede elétrica.

Relativamente ao teste com a carga resistiva, os resultados foram ao encontro do pretendido. Apesar da análise da qualidade de energia elétrica não ser totalmente satisfatória, uma

vez que se trata de uma análise de um curto período de tempo de onda aproximada da onda real, e este resultado apresentar pouca precisão, mesmo assim, foi possível visualizar alguma atenuação no 3º e, especialmente, no 5º e 7º harmônicos. Conclui-se, assim positivamente, que é possível aplicar diferentes valores de potência na carga resistiva e quais os fatores controladores dessa potência. É importante frisar a semelhança entre o resultado esperado por meio de simulação e o resultado obtido, como mostra a Figura 5.12 - Comparação entre o resultado obtido na simulação Psim, com o resultado obtido na implementação..

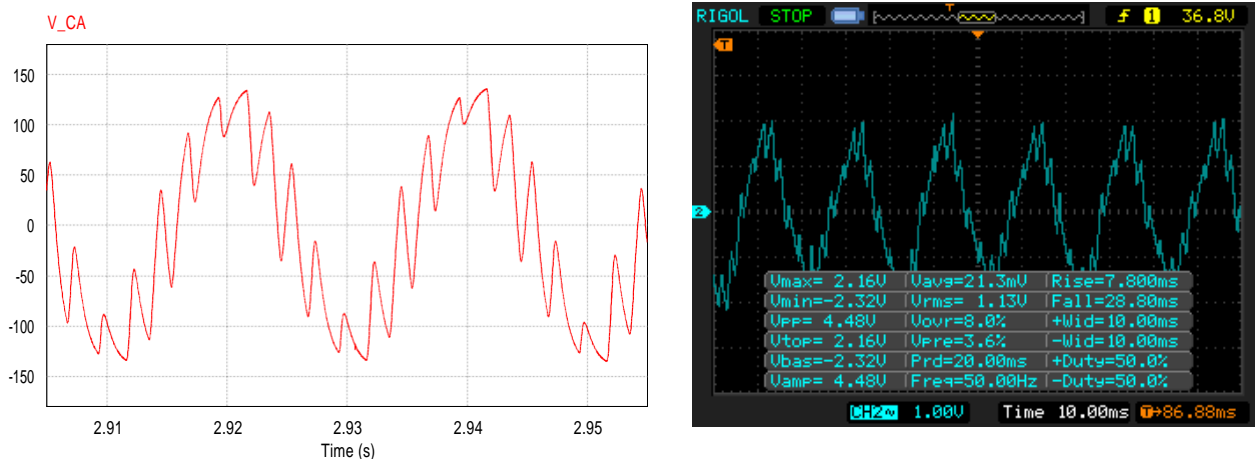


Figura 5.12 - Comparação entre o resultado obtido na simulação Psim, com o resultado obtido na implementação.

Na experiência onde a interface foi conectada à rede elétrica, só foi possível retirar resultados com sucesso, quando foi injetada uma potência elétrica baixa relativamente à rede. Durante o decorrer destes testes, houve um momento em que não foi respeitada a ordem correcta da sequência de desligar os equipamentos, o que provocou o colapso da interface.

Capítulo 6

Conclusões e Trabalho Futuro

6.1 Conclusões

Este trabalho permitiu aprofundar os conhecimentos no contexto da energia renovável, em especial da energia eólica. Para cumprir os objetivos propostos, este trabalho envolveu uma pesquisa e estudo dos conceitos, assim como um planeamento e divisão das tarefas em diferentes fases.

Numa primeira fase são identificados os diferentes tipos de turbinas eólicas e os respetivos tipos de componentes que as constituem, seguindo-se de um estudo sobre alguns geradores utilizados em turbinas eólicas e as diferentes topologias da sua montagem.

Após uma abordagem teórica sobre os conversores CC/CA, destacou-se o sistema de geração eólico baseado na máquina síncrona de velocidade variável, uma vez que a interface foi dimensionada para trabalhar com este gerador.

O objetivo deste projeto consiste no desenvolvimento de uma interface de aproveitamento de energia eólica com eliminação programada de harmónicos. Para tal, foi utilizado um sistema PLL, que permite o sincronismo com a rede onde a energia será injetada.

O DSP começou por apresentar problemas em armazenar e processar a quantidade de informação necessária. Outro problema do DSP é que, ao utilizar a eliminação programada de harmónicos, não foi possível usufruir do comando "PWM", sendo a comutação dos pinos de saída feita por meio de ciclos, o que aumentava o tempo de execução. Ainda assim, a maior dificuldade do projeto surgiu na área de controlo, especialmente no desenvolvimento de um sistema de PLL e eliminação programada de harmónicos que consigam trabalhar com os recursos disponíveis neste DSP.

Em um modo geral concluiu-se que os sistemas de hardware e software necessários para o projeto foram desenvolvidos e devidamente validados, também se conclui que o método de eliminação programada de harmônicos permite reduzir o custo das interfaces, uma vez que através dele é possível reduzir a frequência de comutação dos semicondutores. Para concluir, todos os objetivos propostos para esta dissertação de mestrado foram alcançados, embora com potência limitada.

6.2 Propostas de Trabalho Futuro

Este projeto poderá ser enriquecido utilizando um gerador microeólico ou um microgerador hídrico, em substituição do modelo utilizado para emular o gerador.

Neste momento, o circuito está limitado a 1750 W, valor que poderia ser facilmente aumentado substituindo os díodos da ponte retificadora por díodos que suportem um maior valor de corrente ou incluído um sistema MPPT. Depois disso, poderão ser feitas algumas alterações ao código de modo a ser possível, pelo utilizador da interface, variar o intervalo de potência na saída, dependendo da carga que pretenda alimentar, alterando a componente do índice de modelação no sistema de eliminação programada de harmônicos.

Também a qualidade da energia elétrica fornecida, poderá melhorar, aumentando o número de harmônicos eliminados. Neste momento apenas são eliminados o 3^o, 5^o e 7^o harmônicos.

Também é possível desenvolver um controlador dedicado para esta interface, de modo a, posteriormente, comparar com as interfaces existentes no mercado, fazendo um levantamento a nível financeiro e de performance.

Referências Bibliográficas

- [1] R. Castro, "Energias Renováveis e Produção Descentralizada," *Instituto Superior Técnico-Lisboa*, vol. 2009, no. edição 4. p. 94, 2009.
- [2] B. K. Bose, *Modern Power Electronic and AC Drivers*. 2002.
- [3] J. Marques, "Dissertação de Mestrado TURBINAS EÓLICAS : MODELO , ANÁLISE E CONTROLE DO GERADOR DE INDUÇÃO COM," Santa Maria, RS, BRASIL, 2004.
- [4] G. Botelho, "Desenvolvimento de uma Turbina Eólica de Eixo Vertical," *Diss. Mestrado. Inst. Super. Técnico. Univ. Técnica Lisboa.*, 2011.
- [5] J. A. P. P. Brás, "Interface de um Gerador Eólico para Microgeração de Energia com Cargas Eléctricas," Universidade do Minho, 2011.
- [6] B. C. Carvalho, "Desenvolvimento de modelo computacional de sistemas eólicos utilizando geradores síncronos para estudos de desempenho no contexto da qualidade da energia elétrica," Universidade Federal de Uberlândia, 2006.
- [7] P. Rosas, "Dynamic Influences of Wind Power on The Power System," Orsted Institute, Denmark, 2004.
- [8] ENERGY.GOV, "The inside of a wind turbine," 2014. [Online]. Available: <https://energy.gov/eere/wind/inside-wind-turbine-0>. [Accessed: 11-Jan-2018].
- [9] E. Hau, *Wind Turbines: Fundamentals, Technologies, Application, Economics*. Springer, 2000.
- [10] R. M. G. Castro, "Energias Renováveis e Produção Descentralizada INTRODUÇÃO À ENERGIA EÓLICA," Universidade tecnica de Lisboa, 2005.

Referências Bibliográficas

- [11] Filipe Teixeira Neto, "Geração de perfis de cargas industriais mediante o controle PWM da tensão de campo do gerador de corrente contínua," Universidade de São Paulo, 2010.
- [12] S. A. Nasar, *Schaum's Outline of Theory and Problems of Electric Machines and Electromechanics*. 1984.
- [13] H. Voltolini, "Modelagem e controle de geradores de indução duplamente alimentados com aplicação em sistemas eólicos," Universidade Federal de Santa Catarina, 2007.
- [14] J. M. F. De Jesus and R. M. G. Castro, "Energias Renováveis e Produção Descentralizada EQUIPAMENTO ELÉCTRICO DOS GERADORES 1ª Parte – Princípio de funcionamento," UNIVERSIDADE TÉCNICA DE LISBOA, 2004.
- [15] J. F. P. Gaspar and Dissertação, "Gerador Síncrono de Imanes Permanentes para Microgeração Eólica," Universidade da Beira Interior, 2013.
- [16] F. L. Borin, "Técnicas de Geração de Energia Elétrica com Sistemas de Rotação Ajustável," UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS FACULDADE, 2007.
- [17] A. S. S. Junior, "Estudo de um Gerador de Indução Assíncrono autoexcitado por capacitores," UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO, 2015.
- [18] DeMotor, "Rotor gaiola de esquilo." [Online]. Available: <https://pt.demotor.net/motores-eletricos/motores-de-corrente-alternada/motor-assincrono/rotor-de-gaiola-de-esquilo>. [Accessed: 25-Apr-2019].
- [19] A. M. S. Francisco, "Motores de indução trifasicos," 2006.
- [20] R. Reginatto, "Modelagem do Motor de Indução MODELAGEM DO MOTOR DE INDUÇÃO," Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2006.
- [21] A. D. Hansen, F. Iov, F. Blaabjerg, and L. H. Hansen, "Review of Contemporary Wind Turbine Concepts and their Market Penetration," vol. 28, no. 3. p. 247, 2009.
- [22] C. M. F. RIBEIRO, "Circuito de Interface para Ligação de um Gerador Eólico à Rede," *Esc. Eng.*, p. 85, 2008.

Referências Bibliográficas

- [23] V. M. Pereira, "ESTUDO E MODELAGEM DINÂMICA DE GERADOR DE INDUÇÃO ACIONADO POR MÁQUINA DE COMBUSTÃO INTERNA COM CONTROLE DE TENSÃO E DE FREQUÊNCIA POR MEIO DE INVERSOR PWM," UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS, 2003.
- [24] R. T. FEROLDI, "Modulação senoidal bipolar PWM aplicada em inversores de frequência," UNIVERSIDADE ESTADUAL DE LONDRINA, 2011.
- [25] L. J. O. da Cruz, "Inversor de Tensão Monofásico em Ponte Completa a 50 Hz e 50 VA," Universidade do minho, 2011.
- [26] W. P. R. Ned Mohan, Tore M. Undeland, *Power Electronics Converters, Applications, and Desing*. John Wiley & Sons, INC, 1995.
- [27] J. A. Pomilio, "CONVERSORES CA-CC - RETIFICADORES," in *Eletrônica de potência*, 2013.
- [28] L. Miguel and M. Pacheco, "Inversor de Tensão com Eliminação Programada de Harmônicos," Universidade Do Minho, 2011.
- [29] M. Isa, "Application of PSO to Determine the HEPWM Switching Angles of a Three Phase Cascaded Multilevel Inverter," vol. 2, no. 1, pp. 234–238, 2015.
- [30] L. G. B. Rolim, D. R. Da Costa, and M. Aredes, "Analysis and software implementation of a robust synchronizing PLL circuit based on the pq theory," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 53, no. 6, pp. 1919–1926, 2006.
- [31] L. Components, "Voltage Transducer LV 25-P I PN = 10 mA V PN = 10 .. 500 V Electrical data."
- [32] A. TECHNOLOGIES, "HCPL-3120/J312, HCNW3120."
- [33] FAIRCHILD, "FFPF30UA60S 30 A, 600 V, UItrafast II Diode," 2014.
- [34] T. M. Abraham I Pressman, Keith Billings, "Switching Power Supply Design, Third Edition." Mc Graw Hill, 2009.

Referências Bibliográficas

- [35] V. Roederstein, "Metallized Polyester Film Capacitors MKT Radial Type MKT1822 MKT 1822."

- [36] Aarchiba, "Darrieus-windmill," *Wikimedia*. [Online]. Available: <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Darrieus-windmill.jpg>. [Accessed: 24-Apr-2019].

