



Circuito de Interface para Ligação de um Gerador Eólico à Rede

Carlos Manuel Ferreira Ribeiro

Guimarães, 2008

Agradecimentos

Desejo agradecer ao meu orientador Manuel João Sepúlveda Mesquita de Freitas pela cooperação, incentivo, disponibilidade e sugestões ao longo do trabalho.

Aos meus colegas de laboratório, André Teixeira, Renato Alves, Gabriel Pinto e Raul Almeida pela amizade e ótimo ambiente no laboratório, mas deixo um especial agradecimento ao Domingos Gonçalves, Pedro Neves e Luís Monteiro pelos seus bons conselhos para com a realização da programação do microcontrolador.

A todos os elementos da direcção do Núcleo Estudantil IEEE pela sua amizade e preocupação demonstrada ao longo da resolução deste trabalho e ao Bruno Matos pela ajuda dada em momentos decisivos.

Aos técnicos do Departamento de Electrónica Industrial pela sua disponibilidade.

Ao professor João Luiz Afonso pela possibilidade dada para poder usufruir de um espaço no laboratório de potência e que possibilitou a execução prática deste trabalho.

À Sílvia por esperar pacientemente e pelo apoio e incentivo dado ao longo da realização deste trabalho.

Aos meus pais José e Maria e ao resto da família pelo estímulo e apoio dado ao longo da trajectória académica.

Resumo

Presentemente atravessam-se tempos delicados a nível energético devido à escalada do custo dos combustíveis fósseis, além de que, as necessidades energéticas têm vindo a aumentar.

As fontes de energia renovável, que se anunciam actualmente como a forma mais ecológica e próspera de aproveitamento de energia, assumem-se como uma solução para a resolução do problema energético, merecendo a investigação e o desenvolvimento de formas de ligação entre esses tipos de fonte e a rede eléctrica, pois elas não podem ser ligadas directamente à rede.

O objectivo principal desta dissertação consistiu no estudo, simulação e implementação de um sistema capaz de realizar a interface entre um gerador eólico de pequena potência e a rede eléctrica.

O sistema possui um gerador síncrono de ímanes permanentes que fornece energia a um circuito inversor de tensão controlado por um microcontrolador, de forma a adequar as características da onda de tensão produzidas pelo gerador eólico às características da rede eléctrica.

O software de controlo em tempo real foi implementado em linguagem C e permite o controlo sobre a frequência, fase e amplitude da tensão de saída do circuito conversor.

Um filtro passivo LC e um transformador, são usados de modo a filtrar os harmónicos resultantes das comutações do inversor e adequar os níveis de tensão do sistema, aos níveis da rede eléctrica.

Palavras-Chave: Gerador Eólico, Modulação de Largura de Impulso, Inversor Comutado, Harmónicos, Interface com a Rede Eléctrica.

Abstract

At present we are crossing delicate times at energy point due the scale of fossil fuel costs, moreover, the energetic needs have been rising.

The renewable sources of energy, which auto proclaims at present as the most ecologic way and prosperous energy profits, claims as solution for the resolution of the energetic problem, deserving the investigation and development of connecting forms between renewable energy sources and electrical grid, because they can't be directly connected to the grid.

The main objective of this thesis was to study, simulate and implement a system capable of realize an interface between wind generator and electrical power grid.

The system has a permanent magnet synchronous generator that supplies energy to an inverter circuit, controlled by a microcontroller, in way to adapt waveform voltage characteristics produced by the wind generator to the characteristics of the electrical power grid.

The real time control software was implemented in C language and it allows the control on the frequency, phase and voltage magnitude of the converter output.

A passive LC filter and a transformer are used to filter the harmonics from switching inverter and adjust the system's voltage, to the electrical power grid levels.

Keywords: Wind Generator, Pulse Width Modulation (PWM), Switching Inverter, Harmonics, Electrical Power Grid Interface.

Índice

Agradecimentos	i
Resumo	ii
Abstract.....	iii
Índice	iv
Índice de Figuras	vii
Índice de Tabelas	ix
1. Introdução.....	1
1.1. Motivações do Trabalho	2
1.2. Objectivos do Trabalho.....	4
1.3. Organização da Tese.....	4
2. Geradores Eólicos.....	5
2.1. Tipos de Turbinas	5
2.1.1 Turbina de Eixo Horizontal	6
2.1.1.1 Rotor	7
2.1.1.2 Pás	8
2.1.1.3 Caixa de Velocidades.....	9
2.1.1.4 Cabina	9
2.1.1.5 Torre	9
2.1.1.6 Vantagens da Turbina de Eixo Horizontal.....	11
2.1.1.7 Desvantagens da Turbina de Eixo Horizontal.....	12
2.1.2 Turbina de Eixo Vertical	12
2.1.2.1 Turbina Darrieus	12
2.1.2.2 Turbina Savonius	13
2.1.2.3 Cicloturbina	14
2.1.2.4 Vantagens da Turbina de Eixo Vertical	15
2.1.2.5 Desvantagens da Turbina de Eixo Vertical.....	15
2.2. Geradores Eléctricos	15
2.2.1 Máquina de Corrente Contínua	16
2.2.2 Máquina Síncrona.....	16
2.2.2.1 Princípio de Funcionamento da Máquina Síncrona	18
2.2.2.2 Vantagens da Máquina Síncrona	19

2.2.2.3 Desvantagens da Máquina Síncrona	19
2.2.3 Máquina Assíncrona	20
2.2.3.1 Gerador de Indução de Rotor em Gaiola de Esquilo	20
2.2.3.2 Gerador de Indução de Rotor Bobinado	22
2.2.3.3 Princípio de Funcionamento do Gerador Assíncrono	23
2.2.4 Inversores	23
3. Simulação do Sistema Proposto.....	27
3.1 Diagrama de Blocos.....	28
3.2 Modelo PSCAD.....	29
3.2.1 Sistema de Controlo	32
3.2.2 Simulação em PSCAD	34
3.2.2.1 Carga Puramente Resistiva	35
3.2.2.2 Carga Resistiva e Indutiva	36
3.2.2.3 Carga Resistiva e Capacitiva	38
3.2.2.4 Carga Resistiva e Indutiva com Rectificador de Onda Completa não Controlado	39
3.2.2.5 Carga Resistiva e Capacitiva com Rectificador de Onda Completa não Controlado	41
3.2.2.6 Ligação do Gerador Eólico à Rede Eléctrica.....	43
3.2.2.7 Ligação do Gerador Eólico à Rede Eléctrica para Alimentação de uma Carga Resistiva e Indutiva	44
3.3 Conclusões sobre os Resultados da Simulação.....	44
4 Implementação	46
4.1 Teste do Gerador Eólico	48
4.1.1 Características do equipamento utilizado.....	48
4.1.2 Condições de funcionamento	49
4.1.3 Material utilizado	49
4.1.4 Descrição da Instalação.....	51
4.1.5 Resultados obtidos	52
4.2 Circuito de Potência.....	54
4.2.1 Conversor CC-CA.....	55
4.2.2 Filtro.....	56
4.2.3 Transformador.....	57
4.3 Circuito de Controlo	58
4.3.1 Microcontrolador	59
4.3.2 Acoplador Óptico.....	66
4.3.3 Circuito de <i>Drive</i>	67
5 Resultados Experimentais	70
5.1 Características do Modelo Utilizado.....	70
6 Conclusões.....	73
6.1 Propostas de Trabalho Futuro	74
7 Referências Bibliográficas	75

Anexos	78
Anexo 1	79
Anexo 2	80
Anexo 3	81
Anexo 4	82
Anexo 5	83
Anexo 6	84
Anexo 7	85

Índice de Figuras

Figura 1.1 – Situação em Dezembro de 2004.	3
Figura 1.2 – Capacidade Eólica prevista para 2010.	3
Figura 2.1 – Turbina de Eixo Horizontal.	6
Figura 2.2 – Turbina de Eixo Vertical.	6
Figura 2.3 – Elementos Principais de uma Turbina de Eixo Horizontal.	7
Figura 2.4 – Influência do Tamanho do Rotor na Potência do Gerador.	7
Figura 2.5 – Torre Tubular.	10
Figura 2.6 – Torre em Treliça.	10
Figura 2.7 – Parque Eólico Offshore.	10
Figura 2.8 – Efeito de Esteira.	11
Figura 2.9 – Turbina Darrieus.	13
Figura 2.10 – Turbina Savonius.	14
Figura 2.11 – Cicloturbina.	14
Figura 2.12 – Turbina Giromil.	14
Figura 2.13 – Gerador Síncrono de Rotor Bobinado com Conversor CA/CC/CA.	17
Figura 2.14 – Gerador Síncrono de Ímanes Permanentes com Conversor CA/CC/CA.	18
Figura 2.15 – Gerador Síncrono de Ímanes Permanentes com Conversor CA/CA.	18
Figura 2.16 – Gerador Síncrono de Rotor Bobinado ligado directamente à Rede Eléctrica.	19
Figura 2.17 – Gerador Assíncrono de Rotor em Gaiola de Esquilo.	21
Figura 2.18 – Gerador Assíncrono de Rotor em Gaiola de Esquilo com Conversor CA/CC/CA.	21
Figura 2.19 – Gerador Assíncrono de Rotor em Gaiola de Esquilo com Conversor CA/CA.	21
Figura 2.20 – Gerador Assíncrono de Rotor Bobinado com Controlo de Binário.	22
Figura 2.21 – Gerador Assíncrono de Rotor Bobinado com Circuito de extracção de Potência pelo Rotor.	22
Figura 2.22 – Inversor Monofásico de Dois Níveis em Ponte Completa.	24
Figura 2.23 – Inversor Monofásico de Dois Níveis em Meia Ponte.	24
Figura 2.24 – Inversor Monofásico de Três Níveis em Meia Ponte.	25
Figura 2.25 – Inversor Monofásico de Três Níveis em Ponte Completa.	25
Figura 3.1 – Diagrama de Blocos.	28
Figura 3.2 – Circuito Implementado em PSCAD.	30
Figura 3.3 – Circuito de Snubber.	31

Figura 3.4 – Controlo por Frequência Fixa.	32
Figura 3.5 – Controlo Proporcional Implementado em PSCAD.	33
Figura 3.6 – Controlo PI Implementado em PSCAD.	34
Figura 3.7 – Formas de Onda obtidas com o Controlador Proporcional.	35
Figura 3.8 – Formas de Onda obtidas com o Controlador PI.	35
Figura 3.9 – Carga Resistiva e Indutiva ($\cos \varphi=0,95$ – Controlo Proporcional).	36
Figura 3.10 – Carga Resistiva e Indutiva ($\cos \varphi=0,9$ – Controlo Proporcional).	36
Figura 3.11 – Carga Resistiva e Indutiva ($\cos \varphi=0,95$ – Controlo PI).	37
Figura 3.12 – Carga Resistiva e Indutiva ($\cos \varphi=0,9$ – Controlo PI).	37
Figura 3.13 – Carga Resistiva e Capacitiva ($\cos \varphi=0,95$ – Controlo Proporcional).	38
Figura 3.14 – Carga Resistiva e Capacitiva ($\cos \varphi=0,9$ – Controlo Proporcional).	38
Figura 3.15 – Carga Resistiva e Capacitiva ($\cos \varphi=0,95$ – Controlo PI).	39
Figura 3.16 – Carga Resistiva e Capacitiva ($\cos \varphi=0,9$ – Controlo PI).	39
Figura 3.17 – Rectificador de Onda Completa não Controlado (RL).	40
Figura 3.18 – Rectificador de Onda Completa (Controlo Proporcional).	40
Figura 3.19 – Rectificador de Onda Completa (Controlo PI).	40
Figura 3.20 – Forma de Onda da Tensão que Alimenta a Carga.	41
Figura 3.21 – Rectificador de Onda Completa (RC).	41
Figura 3.22 – Rectificador de Onda Completa (Controlo Proporcional).	42
Figura 3.23 – Rectificador de Onda Completa (Controlo PI).	42
Figura 3.24 – Forma de Onda da Tensão que Alimenta a Carga.	43
Figura 3.25 – Gerador Eólico Injecta Energia na Rede Eléctrica.	43
Figura 3.26 – Gerador Eólico e Rede Eléctrica Alimentam uma Carga (RL).	44
Figura 4.1 – Diagrama de Blocos do Sistema Implementado.	47
Figura 4.2 – Fonte CC Variável.	47
Figura 4.3 – Túnel Aerodinâmico do LAIND.	48
Figura 4.4 – Gerador Eólico AIR X.	48
Figura 4.5 – Multímetros.	49
Figura 4.6 – Baterias de 12V Ligadas em Série.	50
Figura 4.7 – Taquímetro Óptico.	50
Figura 4.8 – Caixa de Comando.	50
Figura 4.9 – Estrutura de Suporte para a Torre.	50
Figura 4.10 – Esquema Eléctrico da Montagem para a Realização de Testes no Túnel Aerodinâmico.	51
Figura 4.11 – Distância entre a Turbina e o Túnel Aerodinâmico.	52
Figura 4.12 – Curva de Potência de uma Turbina de Eixo Horizontal.	52
Figura 4.13 – Testes Efectuados à Turbina AIR X no Túnel Aerodinâmico.	53
Figura 4.14 – IGBT STGB14NC60KD.	55
Figura 4.15 – Circuito Inversor Implementado no Laboratório de Potência.	55
Figura 4.16 – Bateria de Condensadores.	56
Figura 4.17 – Filtro LC.	57

Figura 4.18 – 2 transformadores e 2 resistências.	58
Figura 4.19 – PIC 18F4431.	58
Figura 4.20 – Circuito Programador de PIC's.	60
Figura 4.21 – Função de Configuração do Módulo PWM.	61
Figura 4.22 – Função de Configuração do Módulo ADC.	62
Figura 4.23 – Interrupção do Módulo ADC.	63
Figura 4.24 – Circuito Somador.	63
Figura 4.25 – Transdutor de Efeito de Hall.	64
Figura 4.26 – Figura do Sensor de Hall Implementado.	65
Figura 4.27 – Esquema do Circuito de Controlo.	65
Figura 4.28 – Esquema de Ligação do Acoplador Óptico.	66
Figura 4.29 – Ligação do Microcontrolador aos Acopladores Ópticos.	66
Figura 4.30 – Ligações Típicas do CI IR2130.	67
Figura 4.31 – Esquema do Circuito Inversor Implementado.	68
Figura 4.32 – Esquema de Ligação do Circuito de Drive IR2130.	68
Figura 5.1 – Diagrama de Blocos do Modelo Implementado.	70
Figura 5.2 – Forma de Onda da Tensão à Saída do Sistema (30V).	71
Figura 5.3 – Análise Harmónica (30V).	71
Figura 5.4 – Forma de Onda da Tensão (40V).	71
Figura 5.5 – Análise Harmónica (40V).	72

Índice de Tabelas

Tabela 1 – Resultados Obtidos pelo Gerador AIR X no Túnel Aerodinâmico.....	54
---	----

1. Introdução

Na União Europeia o assunto da Energia assume um papel relevante, existindo acordos que fomentam o desenvolvimento de sistemas de produção/consumo de energia para sistemas mais limpos e eficientes.

A energia pode ser obtida a partir de dois grandes grupos:

- Fontes de energia renovável;
- Fontes de energia não renovável.

As fontes de energia não renovável (combustíveis fósseis e nucleares) apresentam reservas limitadas e a sua renovação contrasta com o seu consumo rápido, pelo que não se prevê a sua renovação à escala humana [1].

Em contraste com as anteriores, as fontes de energia renovável estão em constante renovação na Natureza [2]. São exemplos disso, as águas em movimento ou armazenadas (energia hídrica), o vento (energia eólica), o sol (energia solar térmica e fotovoltaica), os caudais associados às diferentes amplitudes das marés (energia das marés), os géiseres (energia geotérmica), as ondas do mar (energia das ondas), biocombustíveis e as matérias orgânicas (energia da biomassa).

Na produção total de energia no Mundo, cerca de 80% resulta da utilização de fontes de energia não renovável, sendo este um facto preocupante não só devido à limitação das suas reservas mas também os graves problemas ambientais que estas fontes causam tais como a poluição do ar, água e solo.

Para além da devastação do planeta a uma velocidade alarmante, a dependência do petróleo (principal combustível fóssil) fez com que surgissem rupturas energéticas, sendo que a primeira se deu em 1973 e é conhecida como “1º choque petrolífero” (aconteceu devido à tendência de alta dos preços que culminou com o seu embargo) [3].

Se a esta dependência atender-se que dentro da OPEP (Organização dos Países Exportadores de Petróleo) os países do Golfo detêm 65 a 70% das reservas mundiais, que o Médio Oriente está para Petróleo assim como os países da ex-URSS e do leste

européu estão para o gás natural, impõe-se aos países importadores de petróleo um esforço na redução da dependência em relação aos combustíveis fósseis através da aposta nas energias renováveis e no aumento da eficiência energética.

Na União Europeia, com a directiva 2001/77/EC admitiu-se a necessidade de desenvolver as fontes de energia renovável, considerando-as vectores estratégicos na protecção ambiental e no crescimento sustentável [4].

Em Portugal a directiva comunitária resultou na criação de um programa de apoio designado Programa E4 (Eficiência Energética e Energias Endógenas) que anuncia um plano estratégico para a promoção de fontes de energia renovável.

Sendo Portugal um país que importa entre 85 a 90% do total de energia que consome, pode-se afirmar que são tempos de oportunidade para a independência de Portugal a nível energético.

1.1. Motivações do Trabalho

Das alternativas possíveis no grupo das energias renováveis, as mais estudadas são a energia eólica, a solar, a hidroeléctrica, a geotérmica e a das marés.

A energia eólica desde longa data tem sido utilizada, através de moinhos de vento para moer cereais ou para bombear água, bem como na navegação marítima dos veleiros.

Actualmente, com o avanço da tecnologia surgiram os denominados aerogeradores ou turbinas eólicas que transformam a energia eólica em energia eléctrica.

Esta forma de extracção de energia revela-se muito competitiva quando todos os custos das várias formas de energia são incluídos, pelo que o grande investimento que se tem verificado neste tipo de energia é para continuar, como se pode verificar nas seguintes figuras.

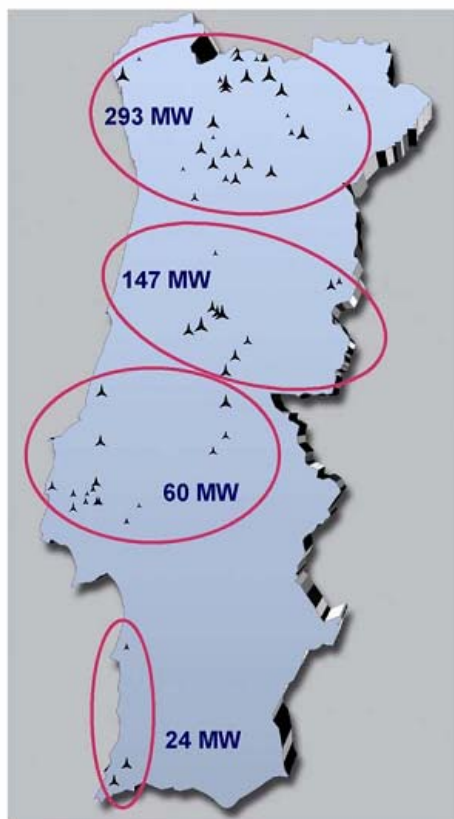


Figura 1.1 – Situação em Dezembro de 2004 – Fonte: INETI.

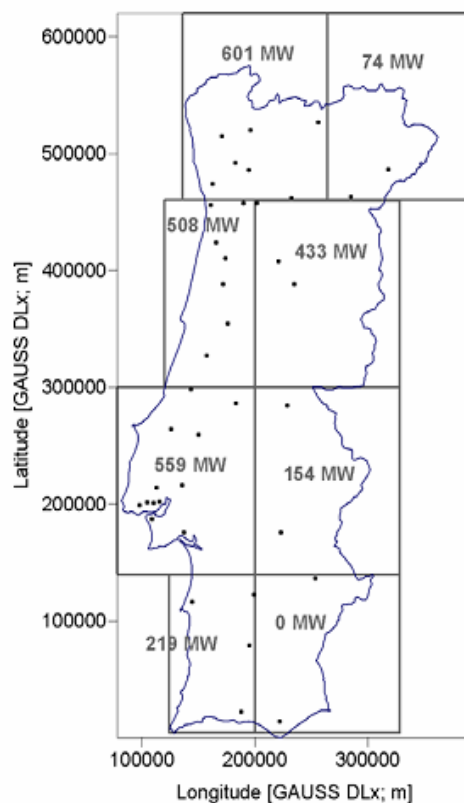


Figura 1.2 – Capacidade Eólica prevista para 2010 – Fonte: INETI.

Contudo a utilização de geradores eólicos não resolve o problema da energia por si só, uma vez que estes não produzem energia eléctrica com as características aceitáveis do ponto de vista da carga, sendo necessária a utilização de sistemas conversores de potência dedicados de modo a que a energia eólica gerada seja uma energia de qualidade, isto é, com 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 eléctrica.

O gerador eólico destina-se a carregar baterias e possui um gerador síncrono de ímanes permanentes, cuja saída é rectificada e introduzida num regulador de tensão. A ligação à rede eléctrica exige a introdução de um inversor comutado que faz a conversão de corrente contínua (CC) em corrente alternada (CA). O circuito conversor CC/CA é controlado por um microcontrolador que permite o controlo da frequência, fase e amplitude de saída do circuito inversor, de forma a adequar as características da onda de tensão produzida pelo gerador eólico.

1.2. Objectivos do Trabalho

Este trabalho apresenta os seguintes objectivos principais:

- Teste de um gerador eólico 48V CC, 400W de potência máxima;
- Desenvolvimento de um inversor electrónico de potência capaz de converter a saída do gerador num sistema alternado monofásico 230V, 50Hz;
- Implementação de um sistema de controlo e respectivas interfaces;
- Teste do sistema completo em diversas condições de operação.

1.3. Organização da Tese

Esta dissertação encontra-se dividida em 6 capítulos:

No Capítulo 1 efectua-se uma introdução ao problema actual da energia eléctrica em Portugal e no Mundo e expõe-se uma solução possível.

No Capítulo 2 apresenta-se um estudo sobre os geradores eólicos e expõem-se os diversos tipos de Turbinas, tipos de Geradores e tipos de Interfaces.

No Capítulo 3 encontra-se a simulação deste trabalho numa ferramenta de simulação computacional chamada PSCAD. Apresenta-se o diagrama de blocos e a sua implementação. Por fim são apresentados os resultados da simulação.

No Capítulo 4 apresenta-se a implementação deste trabalho, realizada no Laboratório de Electrónica de Potência.

No Capítulo 5 são apresentados os resultados experimentais. Pode-se visualizar as principais formas de onda obtidas, medições e os respectivos espectros com a análise harmónica.

Por fim, no Capítulo 6 apresentam-se as conclusões e efectua-se um comentário aos resultados obtidos. São feitas algumas propostas para trabalho futuro.

2. Geradores Eólicos

A energia do vento há muito que têm sido utilizada para benefício próprio do Homem. Começando por ser utilizada para a movimentação de barcos, assim como para a moagem e o bombeamento de água.

Mais tarde utilizou-se o vento para a produção de electricidade, sendo necessário a utilização de um sistema eólico para converter energia cinética do vento em energia mecânica de rotação [5]. Este elemento designa-se por turbina e caracteriza o sistema eólico pois a sua configuração influencia o rendimento global do sistema.

2.1. Tipos de Turbinas

As turbinas podem ser classificadas segundo vários critérios, mas o mais importante é aquele que utiliza a orientação do eixo do seu rotor como factor de classificação [6] [7].

Assim pode-se dividir os tipos de turbinas em dois grupos:

- Eixo Horizontal (*HAWT – Horizontal Axis Wind Turbine*), em que o eixo de rotação é paralelo ao solo e alinhado com o caudal do vento (Fig 2.1).
- Eixo Vertical (*VAWT – Vertical Axis Wind Turbine*), em que o eixo de rotação é vertical em relação ao solo (Fig 2.2).



Figura 2.1 – Turbina de Eixo Horizontal
[Danish Assoc].



Figura 2.2 – Turbina de Eixo Vertical
[Danish Assoc].

2.1.1 Turbina de Eixo Horizontal

As turbinas de Eixo Horizontal têm o rotor e o gerador eléctrico no topo da torre, mas a turbina deve estar alinhada na direcção do vento, servindo-se para isso de mecanismos automáticos [8].

Na Fig 2.3 podem ver-se os principais componentes de uma turbina de eixo horizontal, sendo eles os seguintes [8]:

1. Pá
2. Cubo do rotor
3. Cabina
4. Chumaceira
5. Veio
6. Caixa de velocidades
7. Travão
8. Veio do gerador
9. Gerador
10. Permutador de arrefecimento do óleo da caixa de velocidades e/ou gerador
11. Anemómetro e sensor de direcção
12. Sistema de controlo
13. Sistema hidráulico
14. Mecanismo de orientação (ao vento)

15. Chumaceira

16. Cobertura

17. Torre

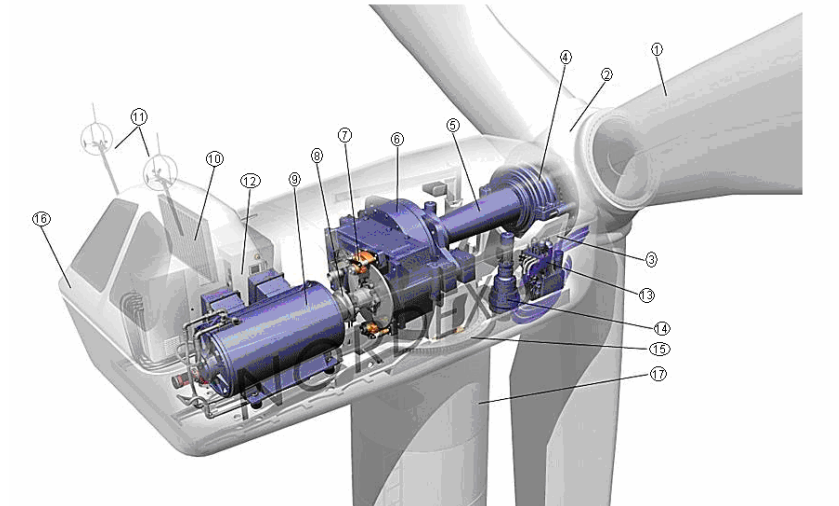


Figura 2.3 – Elementos Principais de uma Turbina de Eixo Horizontal [Rui M. G. Castro].

2.1.1.1 Rotor

O rotor acciona um gerador eléctrico por intermédio de um veio e uma caixa de velocidades (engrenagens) para aumentar a velocidade de rotação do gerador relativamente ao rotor.

A Figura 2.4 mostra que à medida que o tamanho do rotor aumenta, a potência produzida pelo gerador também aumenta uma vez que a área varrida pelo rotor também aumenta.

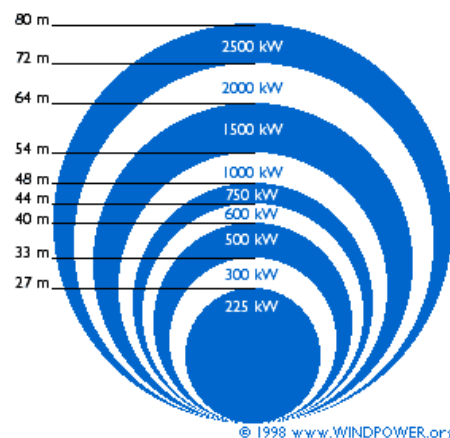


Figura 2.4 – Influência do Tamanho do Rotor na Potência do Gerador [WINDPOWER.org].

O rotor pode ser constituído por uma pá e contrapeso (pouco utilizado), duas pás, três pás ou múltiplas pás, que se encontram acopladas a um eixo central, podendo dividir-se em 3 grupos:

- Rápidos – duas a três pás;
- Velocidade média – três a seis pás;
- Lentas – seis a vinte e quatro pás.

Uma outra característica do rotor é a disposição do rotor em relação à torre, isto é, o rotor pode ser colocado a montante ou a jusante da torre (em relação ao sentido do vento) denominando-se por opção “*upwind*” e “*downwind*” [8].

A primeira opção caracteriza-se pelo facto do vento atacar as pás pelo lado da frente da torre, enquanto a segunda opção distingue-se pelo facto do vento atacar as pás pelo lado de trás, facultando desta forma o auto-alinhamento na direcção do vento.

2.1.1.2 Pás

Em relação aos termos construtivos as pás podem ter as mais variadas formas e empregar os mais variados materiais [8], no entanto devem ser fortes para evitar o contacto entre as pás e a torre. Os materiais mais utilizados são a fibra de vidro, fibra de carbono, alumínio, madeira e PVC.

Se o diâmetro e a solidez das pás forem mantidas constantes, então o rendimento aumenta com o número de pás, mas este melhoramento abranda progressivamente com o aumento do número das pás, além do que, os custos também aumentam.

A solidez define-se como a razão entre a área total das pás e a área varrida pelas mesmas.

Por outro lado, com o aumento do número de pás, a velocidade de rotação diminui sendo necessário uma caixa de velocidades maior. A maioria das turbinas tem 3 pás uma vez que oferece maior estabilidade e menor vibração.

Relativamente às pás da turbina utilizada neste trabalho, estas são constituídas por fibra de carbono, de modo a serem leves. Além disso, foram projectadas para entrarem em perda a partir de uma certa velocidade do vento. Isto designa-se por controlo *stall* e entram em perda aerodinâmica de modo a dissipar o excesso de energia produzida. Este é um tipo de controlo simples devido à ausência de partes em movimento, no entanto a sua implementação exige complicados métodos de cálculo aerodinâmico e oferecem alguma incapacidade nos modos de arranque e paragem.

2.1.1.3 Caixa de Velocidades

A maior parte dos fabricantes de grandes turbinas usam uma caixa de velocidades de modo a reduzir o número de pares de pólos necessários para o gerador eléctrico.

Uma outra opção é o accionamento directo que elimina os custos da caixa de velocidades.

Para além da redução do número de pólos, a caixa de velocidades é utilizada para manter a rotação do gerador numa velocidade óptima [9]. Estas podem assumir duas configurações, a de eixos paralelos ou epicicloidais.

As caixas de velocidade epicicloidais são compactas e os seus eixos de entrada e saída são coaxiais. As de eixos paralelos oferecem um desenho e uma manutenção mais simples.

2.1.1.4 Cabina

Os equipamentos mecânicos e eléctricos tais como o veio principal, caixa de velocidades (quando existe), mecanismo de orientação direcciona entre outros encontram-se encerrados num invólucro, que se designa por cabina.

2.1.1.5 Torre

A torre faculta a colocação do eixo da turbina a uma altura estabelecida, em que a cabina assenta no cimo da torre por intermédio de uma placa rotativa que permite orientar o eixo da turbina segundo a direcção do vento.

O objectivo é poder elevar a turbina até ventos mais regulares, alcançando dessa forma uma maior eficiência uma vez que a velocidade do vento aumenta com a distância ao solo [8].

As torres podem ser tubulares (Figura 2.5) ou em Treliça (Figura 2.6), sendo que as últimas são mais seguras para o pessoal que efectua a manutenção das turbinas, podendo ser fabricadas em aço ou em betão em que os diferentes troços são colocados usando uma grua.

As torres em Treliça são mais baratas, as fundações são mais ligeiras e o efeito de sombra da torre é reduzido, porém têm vindo a ser progressivamente abandonadas.



Figura 2.5 – Torre Tubular [Rui M. G. Castro].

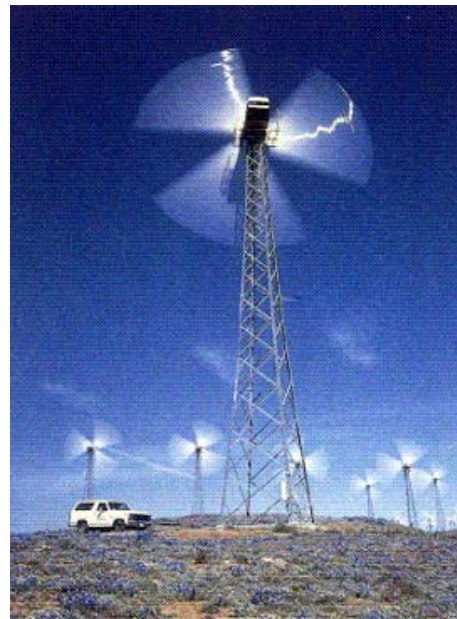


Figura 2.6 – Torre em Treliça [Rui M. G. Castro].

As torres são necessárias para sustentar a turbina a uma altura conveniente no entanto, como seria de esperar, quanto mais alta é a torre, mais material ela utiliza, pelo que o seu preço aumenta. As torres possibilitam também efectuar o aproveitamento eólico tanto em terra como no mar (Figura 2.7).



Figura 2.7 – Parque Eólico *Offshore* [Rui M. G. Castro].

No entanto é necessário construir torres de uma forma optimizada de modo a que o custo final da electricidade seja o mais pequeno possível. Sendo que este objectivo estende-se a todos os componentes do gerador eólico pois só assim é possível produzir energia de uma forma barata.

Devido à orientação horizontal do eixo e à necessidade de orientar a turbina para o vento, as turbinas de eixo horizontal apresentam as seguintes consequências [9] [10]:

- Esforços Cíclicos;

- Precessão Giroscópica;
- Efeito de Esteira.

Os Esforços Cíclicos são a principal causa de falhas neste tipo de turbina, pois a velocidade do vento é superior a maior altitude e dessa forma as pás oferecem maior resistência ao ar quando estão no topo e menor quando estão em baixo, causando esforço de rotação do eixo e respectivos rolamentos ou chumaceiras. Esta situação pode-se agravar em turbinas com um número par de pás.

Um outro efeito causado por este tipo de turbina é o efeito de Precessão giroscópica que resulta do apoio que a turbina faz para se orientar com o vento. Assim o rotor actua como um giroscópio que tende a torcer as pás da turbina para a frente e para trás. Para cada pá, o esforço é mínimo quando está na horizontal e máximo na vertical. Este efeito causa grandes esforços na base das pás, eixo e chumaceiras podendo danificar gravemente as turbinas.

Por fim surge o Efeito de Esteira que se pode observar na Figura 2.8, que se manifesta devido ao facto do vento que sai da turbina apresentar um conteúdo energético inferior ao do vento que “entrou” na turbina.

Este efeito deve ser levado em consideração aquando da utilização de várias turbinas num parque eólico pois o vento ao transpor a turbina cria uma cauda de vento tumultuosa e suavizada em comparação com o vento que chega à turbina.



Figura 2.8 – Efeito de Esteira [Rui M. G. Castro].

2.1.1.6 Vantagens da Turbina de Eixo Horizontal

As turbinas de eixo horizontal destacam-se por apresentarem na sua grande maioria, arranque automático e por se poderem colocar em locais tais como florestas e outros locais remotos assim como no mar (*offshore*). Desta forma é possível elevar a eficiência do sistema eólico pois a turbina está sujeita a ventos mais regulares.

2.1.1.7 Desvantagens da Turbina de Eixo Horizontal

As principais desvantagens da turbina de eixo horizontal prendem-se com o facto do seu funcionamento junto ao solo ser um pouco turbulento, diminuindo assim a sua eficiência. Por outro lado, existe a adversidade de transportar os vários constituintes do gerador, nomeadamente as pás, torre, etc. até ao local de instalação, sendo necessários meios de transporte específicos para o seu transporte.

Outra dificuldade surge com a sua instalação pois são necessárias máquinas de grande porte, para poder manusear os vários constituintes podendo este problema agravar-se aquando da instalação de geradores de grandes dimensões em locais de difíceis acessos.

Por fim, o impacto visual causado pela sua instalação, pois para se extrair grandes quantidades de energia cinética do vento é necessário instalar grandes geradores incluindo pás gigantescas, torres enormes, etc.

2.1.2 Turbina de Eixo Vertical

As turbinas de eixo vertical (*Vertical Axis Wind Turbine*) podem-se subdividir em três tipos [10]:

- Darrieus;
- Savonius;
- Cicloturbina.

2.1.2.1 Turbina Darrieus

A turbina do tipo Darrieus (Figura 2.9) foi patenteada pelo francês *Georges Jean Marie Darrieus* e assemelha-se a uma bateadeira de ovos.

Trata-se de uma turbina que apresenta boa eficiência mas produz grandes oscilações de binário o que diminui a fiabilidade podendo ser reduzidas pelo aumento do número de pás.

Normalmente requer um sistema de arranque pois o seu binário é muito baixo. O veio é mantido na sua posição vertical por cabos ligados à sua chumaceira superior e transmite o binário produzido pelas pás a um gerador eléctrico por intermédio de uma caixa de velocidades situada na parte inferior.

As pás são flexíveis e sujeitas à força centrífuga quando a sua máquina está em movimento e trabalham num estado de tensão quase puro o que permite que sejam mais leves e como tal mais económicas.



Figura 2.9 – Turbina Darrieus [Danish Assoc].

É uma turbina simples de construir e os seus equipamentos mecânicos e eléctricos situam-se no solo, facilitando a sua manutenção e não necessita de um sistema de orientação.

Apresenta uma baixa relação velocidade das pás/velocidade do vento e não se consegue controlar a sua potência.

2.1.2.2 Turbina Savonius

A turbina Savonius (Figura 2.10) utiliza “colheres” que oferecem resistência à passagem do vento idêntico ao sistema utilizado pelos anemómetros.

São muito fiáveis podendo trabalhar com baixas velocidades contudo oferecem um baixo rendimento. É uma turbina que arranca por si própria se tiverem pelo menos três pás pois apresentam um alto binário de arranque.



Figura 2.10 – Turbina Savonius.

2.1.2.3 Cicloturbina

A cicloturbina (Figura 2.11) é uma variante da turbina Giromil que se encontra na Figura 2.12 e é uma versão modificada da turbina Darrieus que inclui uma aleta destinada a controlar o passo da turbina para diminuir as oscilações do binário e aumentar a eficiência.

Apresenta um binário elevado de arranque e um funcionamento eficaz para ventos turbulentos.



Figura 2.11 – Cicloturbina.



Figura 2.12 – Turbina Giromil.

2.1.2.4 Vantagens da Turbina de Eixo Vertical

As turbinas de eixo vertical em comparação com as turbinas de eixo horizontal oferecem uma manutenção mais acessível pois a maioria dos elementos desta turbina encontram-se junto ao solo. É uma turbina que é indiferente à direcção do vento, logo não necessita de mecanismos de orientação direccional.

Podem ser mais fáceis de transportar e instalar além do que, oferecem uma menor probabilidade de ruptura perante ventos fortes.

2.1.2.5 Desvantagens da Turbina de Eixo Vertical

A maioria das turbinas de eixo vertical produz energia apenas com uma eficiência de 50% em comparação com as turbinas de eixo horizontal, devido ao facto dos ventos que circulam próximo do solo serem mais lentos e menos regulares.

Outra restrição deste modelo é a altura máxima até ao qual a turbina pode ser edificada.

2.2. Geradores Eléctricos

Como se pôde verificar no ponto 2.1, existem dois tipos de turbinas (eixo horizontal e eixo vertical) responsáveis por converterem a energia cinética do vento em energia mecânica. Em seguida pode-se usar esta energia mecânica para se efectuar bombagem ou então pode-se converter esta energia para energia eléctrica.

Para converter a energia mecânica disponível no eixo produzida pelo rotor, utiliza-se uma máquina eléctrica que pode ser de dois tipos, de corrente alternada ou de corrente contínua. Dentro destes dois, pode-se citar os seguintes:

- Máquina de Corrente Contínua.
- Máquina de Corrente Alternada:
 - Máquina Síncrona;
 - Máquina Assíncrona.

Estes geradores podem funcionar como sistemas de velocidade variável ou então como sistemas de velocidade fixa.

2.2.1 Máquina de Corrente Contínua

A máquina de corrente contínua, cuja aplicação nestes sistemas é mais antiga que as máquinas de corrente alternada, pode operar como motor ou como gerador.

Quando opera como gerador (*DC Generator*) é usualmente designada por dínamo.

O seu estator é constituído por pares de pólos de ímanes permanentes, que se obtêm através da aplicação de uma corrente contínua nos enrolamentos do estator. Por esses enrolamentos, circularão correntes que produzirão um campo magnético que atravessará o rotor.

O rotor é constituído por um certo número de condutores distribuídos em fatias. Os condutores encontram-se ligados ao comutador, denominado colectador e em série entre eles, resultando no aparecimento de uma corrente contínua nas escovas que fazem o contacto eléctrico com o rotor da máquina, quando este gira.

Para a produção de energia eléctrica, a deslocação das pás da turbina eólica produz um movimento relativo entre os condutores eléctricos e o campo magnético, gerando dessa forma uma tensão aos terminais dos condutores do gerador eléctrico.

Normalmente são geradores que se utilizam em aplicações isoladas com o objectivo de carregar baterias, que acumulam a energia produzida para uso posterior [11]. Sendo que hoje em dia, utiliza-se de preferência um gerador síncrono com rectificador incorporado devido aos progressos da Electrónica de Potência e aos problemas inerentes às máquinas de corrente contínua.

De uma forma geral a máquina de corrente contínua foi trocada pela máquina síncrona na operação como gerador, e pela assíncrona aquando da necessidade da acção de um motor.

2.2.2 Máquina Síncrona

A Máquina síncrona é muito utilizada nas centrais eléctricas (barragens hidroeléctricas, centrais térmicas), pois apresenta um rendimento muito elevado ($\approx 98\%$ nas máquinas de maior potência).

Esta pode operar como motor ou como gerador, sendo que no funcionamento como gerador normalmente se designa por alternador.

Nas barragens hidroeléctricas a velocidade do rotor pode ser facilmente controlada, sendo apenas imperioso o facto de que haja água em abundância. No entanto, nos sistemas eólicos, tal não é possível, pois a velocidade do vento não é controlada pelo Homem. Mesmo assim, este é um gerador bastante utilizado nos sistemas eólicos para a produção de energia eléctrica que se evidencia, por ser de velocidade fixa.

O gerador síncrono é composto por um estator e por um rotor, e pode ser de dois tipos: de rotor bobinado ou de ímanes permanentes.

No estator encontram-se os enrolamentos onde será induzida a tensão pelo movimento do rotor, criando dessa mesma forma uma tensão e corrente alternada.

Quanto ao rotor, este poderá ter um enrolamento (rotor bobinado), que é alimentado por corrente contínua, e que serve para criar um campo magnético no gerador, ou então poderá ser constituído por ímanes permanentes com o mesmo objectivo.

O Gerador Síncrono de rotor bobinado caracteriza-se por ser de velocidade fixa, no entanto com o auxílio da Electrónica de Potência, estes podem transformar em sistemas de velocidade variável. Empregando-se circuitos conversores do tipo CA/CC/CA ou CA/CA pode-se operar com velocidade variável e injectar potência reactiva de uma forma variável e controlada, dispensando a utilização de uma caixa de velocidades [12].

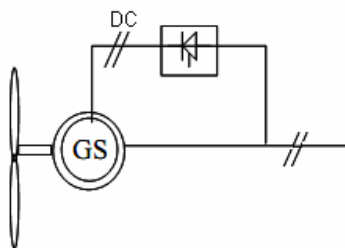


Figura 2.13 – Gerador Síncrono de Rotor Bobinado com Conversor CA/CC/CA [Pedro Rosas e Ana Estanqueiro].

Nos geradores em que o rotor é constituído por ímanes permanentes, não se utiliza caixa de velocidades e estes não carecem de um circuito de excitação ao contrário do gerador síncrono de rotor bobinado, pois a excitação do rotor do gerador eléctrico é feita através de ímanes permanentes. É um gerador que pode operar com velocidade variável e que emprega conversores do tipo CA/CC/CA (Figura 2.14) ou CA/CA (Figura 2.15) para estabelecerem a frequência do sinal eléctrico produzido e

fornecerem energia reactiva. No entanto é um tipo de gerador que ainda não se encontra disponível para potências elevadas devido a problemas característicos do sistema de ímanes permanentes. No entanto, para sistemas de baixa potência revelam-se bastante adequados.

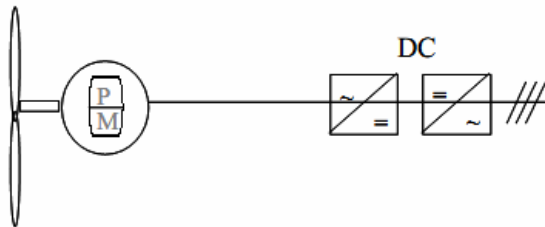


Figura 2.14 – Gerador Síncrono de Ímanes Permanentes com Conversor CA/CC/CA [Pedro Rosas e Ana Estanqueiro].

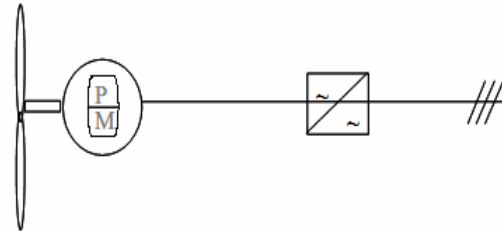


Figura 2.15 – Gerador Síncrono de Ímanes Permanentes com Conversor CA/CA [Pedro Rosas e Ana Estanqueiro].

O Gerador utilizado para a execução deste trabalho é composto por um rotor de ímanes permanentes (*Iron Boron Neodymium magnets*) com rectificador incorporado, caracterizando-se por ser um gerador de velocidade variável uma vez que a tensão aos seus terminais é contínua.

2.2.2.1 Princípio de Funcionamento da Máquina Síncrona

A máquina síncrona pode operar como gerador ou como motor, no entanto irá ser analisada apenas a sua actividade como gerador. O rotor contém um enrolamento de magnetização (ou indutor). Quando a corrente contínua passa pelos enrolamentos criam-se pólos magnéticos. O número de pólos é sempre par (Norte e Sul).

O estator aloja três enrolamentos (um por fase), onde será induzido um sistema de tensões trifásico devido ao movimento do rotor. As tensões induzidas são alternadas uma vez que o rotor contém vários pólos magnéticos (de polaridades alternadas).

A frequência está relacionada com a velocidade a que rodará e com o número de pólos:

$$N = 120 * \frac{f}{p} \quad (1)$$

Quando o gerador eólico estiver ligado à rede eléctrica, este tem de rodar a essa velocidade exacta.

Este processo torna-se ainda mais complicado no arranque pois necessita de estar em fase e na velocidade certa, implicando assim o uso de caixa de velocidades (Figura 2.16).

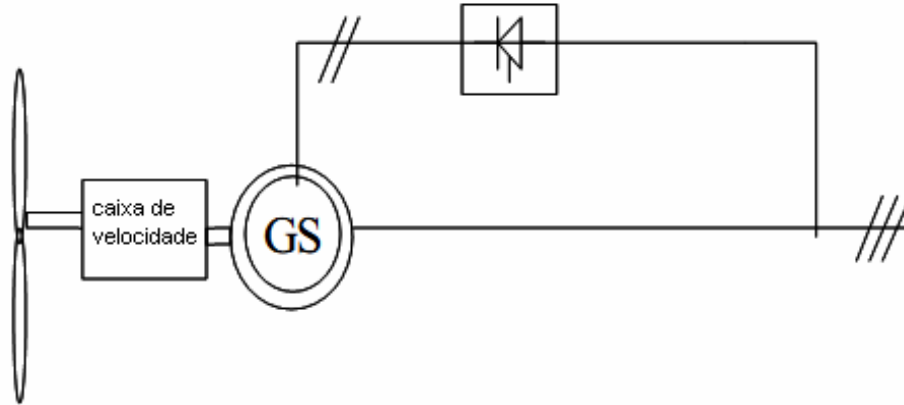


Figura 2.16 – Gerador Síncrono de Rotor Bobinado ligado directamente à Rede Eléctrica [Pedro Rosas e Ana Estanqueiro].

No final da década de 90 instalaram-se os primeiros geradores síncronos em Portugal que operavam em velocidade variável devido à utilização de circuitos conversores CA/CC/CA evitando dessa forma a utilização da caixa de velocidade.

2.2.2.2 Vantagens da Máquina Síncrona

As principais vantagens dos geradores síncronos são o facto de se poderem ligar directamente à rede evitando dessa forma a injeção de harmónicos e o facto de apresentarem um elevado rendimento. É o tipo de gerador que se revela muito robusto para a implementação de turbinas eólicas de elevada potência.

2.2.2.3 Desvantagens da Máquina Síncrona

A máquina síncrona apresenta o inconveniente de necessitar de conversores para poder trabalhar em velocidade variável, aumentando desta forma, o seu custo final e introduzindo harmónicos de tensão devido ao uso de circuitos inversores, reduzindo a qualidade da energia eléctrica.

2.2.3 Máquina Assíncrona

As Máquinas assíncronas em comparação com os Máquinas síncronas caracterizam-se por não possuírem um campo de excitação [12].

O gerador assíncrono, ou gerador de indução como se classifica habitualmente, aquando da produção de energia eléctrica permite variações limitadas de rotação dentro da margem de escorregamento do gerador. Além de ser mais robusto, requer uma manutenção mínima e apresenta uma longa vida de operação. A sua robustez justifica-se por não existirem partes que se desgastam facilmente, tais como o comutador ou anéis e escovas.

Os geradores de indução podem ser de dois tipos:

- Rotor em gaiola de esquilo;
- Rotor bobinado.

Ambos permitem a ligação directa à rede eléctrica, mas também podem ser usados conversores para a injeção na rede de potência reactiva de uma forma variável e controlada.

2.2.3.1 Gerador de Indução de Rotor em Gaiola de Esquilo

O gerador de indução de rotor em gaiola de esquilo (*Squirrel Cage Induction Generator*) é o sistema mais antigo utilizado em unidades eólicas, e consiste num gerador eléctrico ligado directamente à rede eléctrica.

O escorregamento, e consequentemente a velocidade, variam com o valor da potência gerada, contudo a variação de velocidade é pequena. Assim este sistema é classificado como sistema de velocidade fixa [7].

O gerador de indução de rotor em gaiola de esquilo pode girar a duas velocidades diferentes, mas constantes, através da mudança do número de pólos do enrolamento do rotor, dependendo apenas da configuração dos enrolamentos.

Este gerador (Figura 2.17) também se distingue por apresentar um factor de potência indutivo, exigindo assim a introdução de condensadores de compensação.

Um ponto forte deste gerador, ligado directamente à rede eléctrica é a sua robustez, manutenção, menor custo e a não poluição através da injeção de harmónicos na corrente.

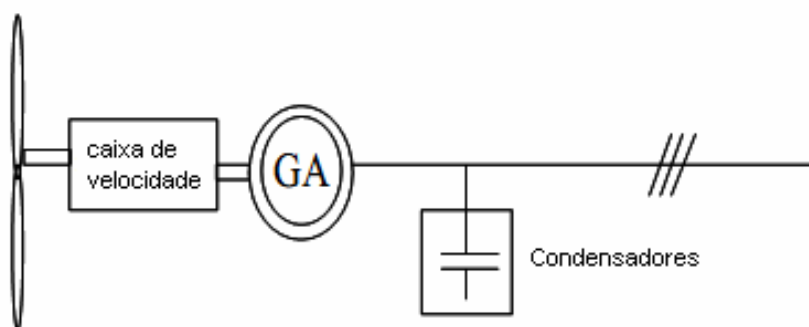


Figura 2.17 – Gerador Assíncrono de Rotor em Gaiola de Esquilo [Pedro Rosas e Ana Estanqueiro].

No entanto, com este gerador também se podem utilizar conversores CA/CC/CA (Figura 2.18) ou CA/CA (Figura 2.19) de modo a injectar energia activa e reactiva de uma forma variável e controlada. Em contrapartida, a utilização de conversores insere componente harmónica na corrente.

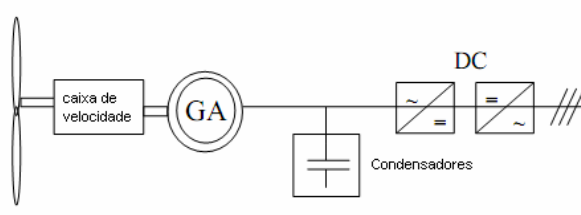


Figura 2.18 – Gerador Assíncrono de Rotor em Gaiola de Esquilo com Conversor CA/CC/CA [Pedro Rosas e Ana Estanqueiro].

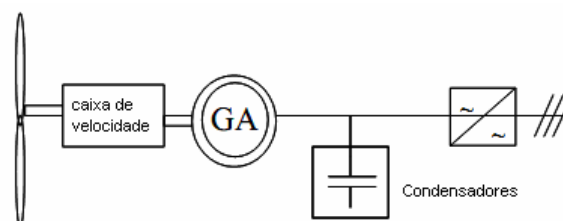


Figura 2.19 – Gerador Assíncrono de Rotor em Gaiola de Esquilo com Conversor CA/CA [Pedro Rosas e Ana Estanqueiro].

No entanto, aquando da utilização de sistemas conversores, a sua característica de funcionamento torna-se complexa, mas em contrapartida adquire as vantagens dos sistemas de velocidade variável, ou seja, desempenho dinâmico superior, possibilidade de controlo de potência reactiva e extracção máxima de potência da turbina eólica.

Nos finais dos anos 80, princípio dos anos 90, foram instalados em Portugal os primeiros geradores eólicos que eram do tipo assíncrono de rotor em gaiola de esquilo.

Para funcionar como gerador é necessário que a velocidade angular do rotor seja superior à velocidade do campo girante para que o escorregamento assuma valores negativos. No entanto, como foi visto, é uma máquina que necessita de compensação do factor de potência pois apresenta sempre um factor de potência indutivo.

2.2.3.2 Gerador de Indução de Rotor Bobinado

Para o gerador de indução de rotor bobinado existem duas configurações: uma em que o escorregamento (ou o binário) é controlado através de Electrónica de Potência no circuito do rotor (Figura 2.20); e outra configuração que é a ligação de um circuito de extracção de potência pelo rotor (conhecido como *double fed generator* – Figura 2.21) [12].

Trata-se de um gerador que se caracteriza por ser de velocidade variável.

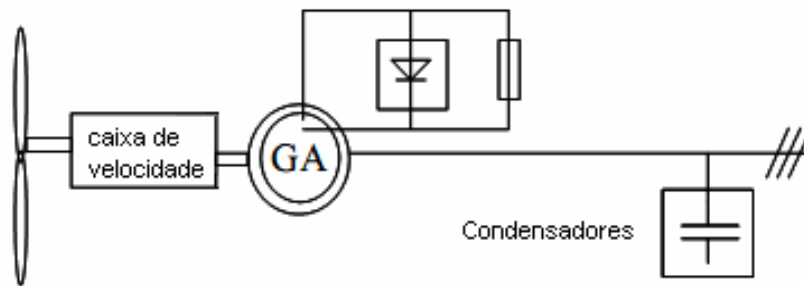


Figura 2.20 – Gerador Assíncrono de Rotor Bobinado com Controlo de Binário [Pedro Rosas e Ana Estanqueiro].

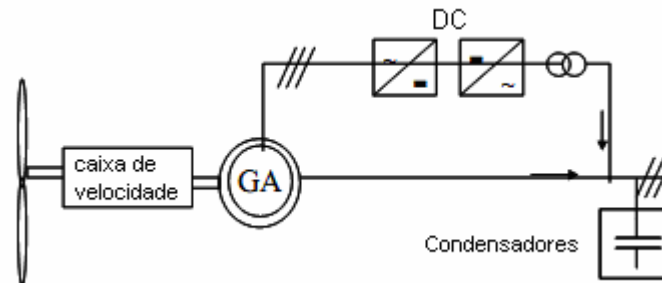


Figura 2.21 – Gerador Assíncrono de Rotor Bobinado com Circuito de Extracção de Potência pelo Rotor [Pedro Rosas e Ana Estanqueiro].

O gerador assíncrono de rotor bobinado com circuito de extracção de potência pelo rotor apresenta um custo mais elevado que o gerador de rotor bobinado com controlo de binário, devido à inserção de circuitos conversores, no entanto caracteriza-se por poder funcionar como gerador mesmo com valores de escorregamento positivos.

Estes equipamentos possuem caixa de velocidade de forma a adaptarem a velocidade da turbina à velocidade de rotação da máquina de indução. No entanto ambos possuem as vantagens dos sistemas de velocidade variável, nomeadamente um maior rendimento, qualidade e segurança devido a um maior desempenho dinâmico e a

uma maior extracção de potência do gerador eólico. Como desvantagem apresenta o facto de consumir energia reactiva, necessitando de compensação por baterias de condensadores.

2.2.3.3 Princípio de Funcionamento do Gerador Assíncrono

O estator do gerador assíncrono é idêntico ao do gerador síncrono, mas os enrolamentos do rotor encontram-se curto-circuitados.

A máquina assíncrona, assim como a máquina síncrona, pode operar como gerador ou motor, sendo que para funcionar como gerador, a velocidade do rotor deverá ser superior à velocidade do campo magnético girante do estator, ou seja, o escorregamento deve ser negativo.

O gerador assíncrono apresenta-se como uma solução robusta, que necessita de manutenção mínima e ostenta uma longa vida de operação.

Em contrapartida, este gerador consome energia reactiva, exigindo a compensação do factor de potência através do uso de condensadores.

2.2.4 Inversores

Os conversores CC/CA são largamente usados em aplicações industriais, tais como sistemas de accionamento estáticos para máquinas eléctricas, fontes de tensão reguladas, filtros activos de potência, etc.

Os conversores CC/CA, denominados inversores, possibilitam a geração de tensões alternadas com amplitude e frequência variável a partir de uma fonte CC.

Podem ser identificadas duas topologias para a implementação de circuitos conversores CC/CA [13]:

- Conversores CC/CA de dois níveis;
- Conversores CC/CA multiníveis.

Na topologia de dois níveis trabalha-se com uma frequência de comutação elevada com o intuito de reduzir o conteúdo harmónico e melhorar as formas de onda de tensão de saída. No entanto, quanto maior for a frequência de comutação maiores serão as perdas de comutação dos semicondutores, sendo essas perdas, tanto mais significativas quanto maior for a tensão e a potência do sistema eléctrico em questão.

O conversor CC/CA monofásico de dois níveis, ilustrado na Figura 2.22, possui quatro semicondutores controlados, dispostos de uma forma que se designa por braço, em que cada braço é constituído por dois interruptores e dois díodos em anti paralelo.

Esta topologia é denominada de inversor monofásico de dois níveis em ponte completa (Figura 2.22).

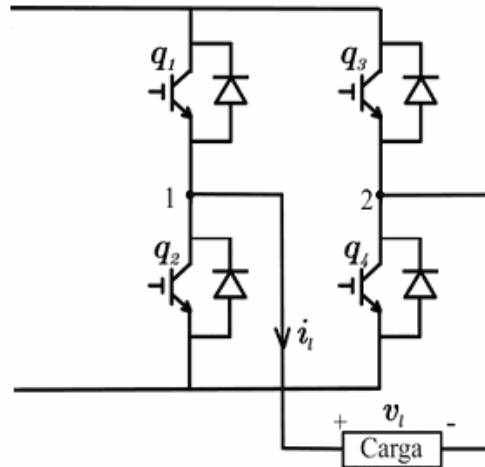


Figura 2.22 – Inversor Monofásico de Dois Níveis em Ponte Completa [Katia, Talvanes, Isaac, Cursino e Edison].

Na Figura 2.23 pode-se visualizar o inversor de dois níveis em meia ponte que é composto por um número reduzido de semicondutores, possuindo apenas um braço. Neste esquema a ligação da carga é efectuada entre o ponto intermédio do braço e o ponto intermédio do barramento CC, podendo provocar um desequilíbrio nas tensões dos condensadores.

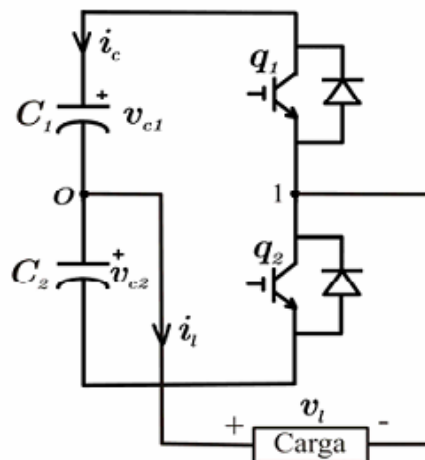


Figura 2.23 – Inversor Monofásico de Dois Níveis em Meia Ponte [Katia, Talvanes, Isaac, Cursino e Edison].

Os conversores multiníveis apresentam vantagens sobre os conversores CC/CA de dois níveis, especialmente para aplicações de média e alta potência. Porém as estratégias de modulação são mais complexas, além do que os microcontroladores e os processadores digitais de sinal (DSP - *Digital Signal Processor*) disponíveis no mercado não possuem *hardware* adequado para a implementação das estratégias de modulação, o que dificulta a sua execução.

Na Figura 2.24 e na Figura 2.25 pode-se visualizar o inversor monofásico de três níveis em meia ponte e em ponte completa.

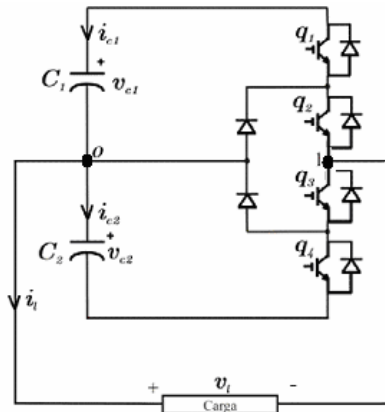


Figura 2.24 – Inversor Monofásico de Três Níveis em Meia Ponte [Katia, Talvanes, Isaac, Cursino e Edison].

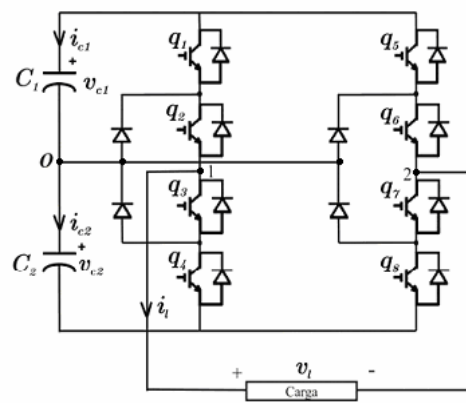


Figura 2.25 – Inversor Monofásico de Três Níveis em Ponte Completa [Katia, Talvanes, Isaac, Cursino e Edison].

O inversor monofásico de três níveis em ponte completa apresenta à sua saída uma tensão com 5 níveis, enquanto o inversor em meia ponte apresenta apenas 3 níveis de tensão.

Relativamente ao esquema de montagem, seleccionou-se o inversor de dois níveis em ponte completa (*Full-Bridge Inverter* – Figura 2.22) em detrimento do inversor de dois níveis em meia ponte, uma vez que se trata de uma montagem que para o mesmo nível de tensão de entrada contínua (V_d), a tensão alternada (V_0) gerada pelo circuito inversor em ponte completa é o dobro da tensão gerada pela montagem em meia ponte [14], como se pode verificar pelas equações (2) e (3).

$$V_0 = m_a * V_d \quad (2)$$

$$V_0 = m_a * \frac{V_d}{2} \quad (3)$$

Além disso, os inversores de dois níveis são mais fáceis de implementar que os inversores multiníveis, e existem microcontroladores que possuem *hardware* adequado para a sua implementação.

3. Simulação do Sistema Proposto

As ferramentas de simulação são presentemente muito atractivas e indispensáveis, pois permitem a realização de testes a um sistema em várias situações de funcionamento. Desta forma evita-se o constrangimento de se executar testes do sistema em “ambientes verdadeiros”, pois não se sabe o tipo de reacção que se irá obter, isto é, protege-se todo o hardware e a própria segurança do investigador, diminuindo os custos e o tempo de investigação e melhorando a segurança do trabalho desenvolvido.

No entanto, é imperioso que as ferramentas de simulação estejam inteiradas com os modelos existentes no mercado para a sua execução no sentido de se aproximarem o suficiente da realidade, proporcionando a observação do comportamento de um sistema, como seria de esperar na implementação prática.

Além disso, servindo-se de ferramentas de simulação torna-se “fácil” o desenvolvimento de um sistema e o encontro de prováveis soluções para o aperfeiçoamento do desempenho do sistema, uma vez que é possível efectuar ajustamentos e comparar alternativas às soluções inicialmente empregues de uma forma simples.

Actualmente existe uma ampla gama de ferramentas de simulação dirigidas à Electrónica de Potência e às Máquinas Eléctricas, tais como *Matlab/Simulink* através da *toolbox SimPower Systems*, *Pspice* e o *PSCAD (Power Systems Computer Assisted Design)*, entre outras.

Entre as ferramentas de simulação existentes, conhecidas e disponíveis decidiu-se utilizar o *PSCAD* para a simulação deste projecto.

A ferramenta *PSCAD* foi desenvolvida pelo centro de pesquisa HVDC Manitoba e funciona como interface gráfico para o utilizador (*GUI – Graphical User Interface*), que utiliza o algoritmo *EMTDC (ElectroMagnetic Transients including DC)* para resolver os modelos de simulação [15].

Esta ferramenta caracteriza-se por incluir modelos complexos com definições que são preenchidas pelo utilizador, que encurtam a distância entre o modelo simulado e a realidade.

3.1 Diagrama de Blocos

Para a implementação deste projecto no PSCAD começou-se por definir o diagrama de blocos que seja teoricamente capaz de efectuar a ligação de um gerador eólico à rede eléctrica ou a uma carga.

Na Figura 3.1 pode-se visualizar o diagrama de blocos com o objectivo de converter a energia produzida pelo gerador eólico em electricidade.

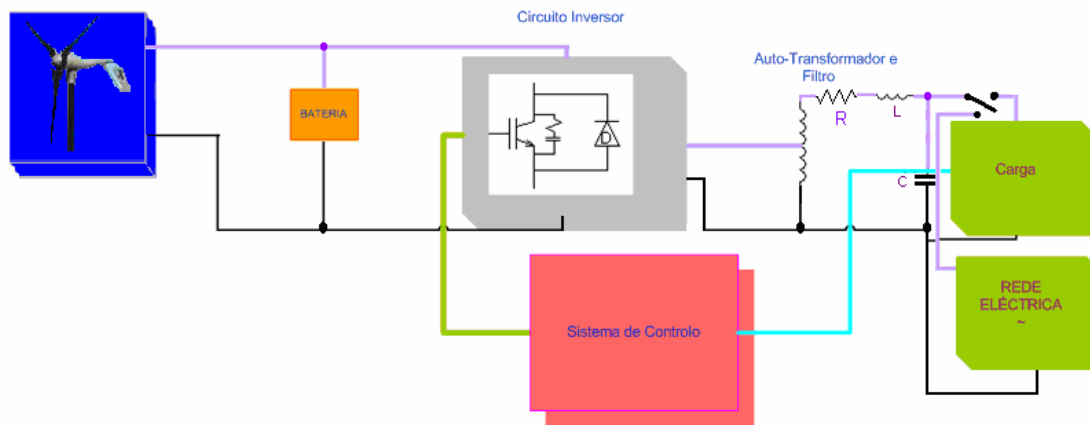


Figura 3.1 – Diagrama de Blocos.

O primeiro bloco contém o gerador eólico de velocidade variável, ou seja, é o local de origem da conversão da energia cinética do vento em energia eléctrica.

O gerador eólico utilizado, é um gerador síncrono trifásico de eixo horizontal, com rotor de ímanes permanentes, rectificador e regulador de tensão internos. Desta forma, converte-se a tensão alternada de amplitude variável da máquina síncrona, numa tensão contínua de amplitude regulável. Este gerador permite obter aos seus terminais, uma tensão de 48V.

No segundo bloco encontram-se as baterias, que de acordo com a regulação efectuada no gerador eólico podem assumir várias configurações. As baterias são responsáveis pela acumulação de energia produzida pelo gerador e a sua utilização deve-se à possibilidade de poder se alimentar cargas eléctricas em sistemas isolados não restringindo a sua aplicação apenas para a geração de energia para a ligação à rede

eléctrica. As baterias são especificadas pela sua capacidade (A.h – Ampere x hora) e pela sua tensão.

O terceiro conjunto é constituído por um circuito conversor CC/CA responsável pela conversão da tensão contínua, gerada pelo gerador eólico e acumulada nas baterias, numa tensão alternada. Este circuito é indispensável pois os aparelhos eléctricos destinam-se a ser alimentados em corrente alternada. O circuito conversor CC/CA designa-se por circuito inversor.

Em seguida surge o autotransformador e o filtro LC que têm por finalidade efectuar o aumento dos níveis de tensão obtidos aos terminais do circuito inversor e a filtragem dos harmónicos de alta frequência produzidos pelo conversor CC/CA.

O filtro LC efectua a filtragem da tensão fundamental eliminando a maioria dos harmónicos resultantes das comutações do circuito inversor e o autotransformador eleva os níveis da tensão obtida, pois os aparelhos eléctricos necessitam de 230V eficazes para operarem correctamente, ou seja, este conjunto (filtro LC e autotransformador) adequa os níveis de tensão do sistema aos níveis da rede eléctrica.

O sistema de controlo efectua a leitura do sinal à saída do sistema e compara com uma referência, gerando em seguida um sinal que se aplica ao circuito conversor CC/CA. Este bloco é responsável pelo controlo da fase, amplitude e frequência do sinal a ser gerado e que vai alimentar uma carga eléctrica, ou então que vai ser injectado na rede eléctrica.

No último bloco encontra-se o receptor de energia eléctrica, isto é, pode-se colocar uma carga normal tal como, um electrodoméstico, circuito de iluminação, pequeno motor, etc., ou então efectuar a entrega de energia eléctrica para a rede eléctrica.

3.2 Modelo PSCAD

Na Figura 3.2 encontra-se o modelo do circuito principal da simulação implementado em PSCAD, responsável pela conversão de corrente contínua produzida pelo gerador eólico, em corrente alternada com 230V de tensão eficaz e uma frequência de 50Hz.

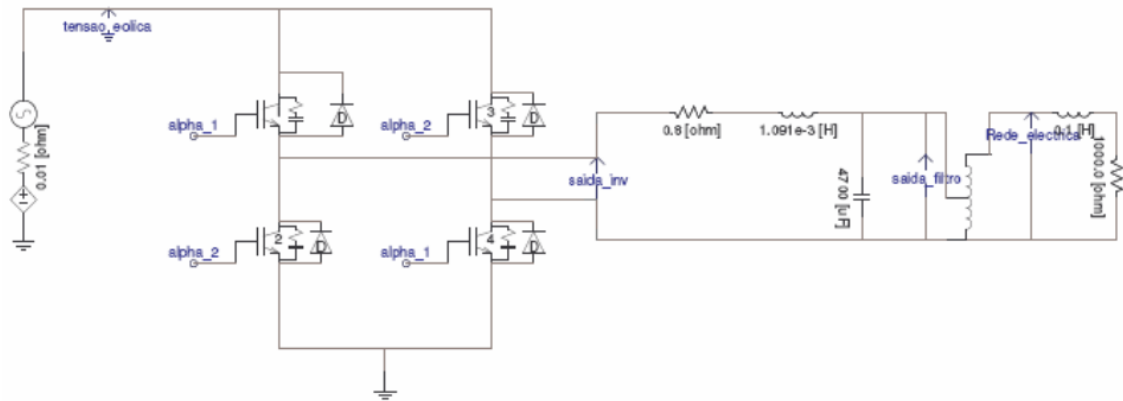


Figura 3.2 – Circuito Implementado em PSCAD.

As fontes de tensão contínua e alternada, que se encontram no início, tem por objectivo simular o gerador eólico de velocidade variável e o conjunto de baterias, uma vez que, o gerador por vezes produz energia (quando existe vento a uma velocidade suficiente para tal) que é armazenada no conjunto de baterias. No entanto não o faz de uma forma constante e ininterrupta pois o vento não é um fenómeno que possa ser controlado pelo Homem, passando por vezes à fase de descarga das baterias.

Em seguida encontram-se os semicondutores que vão comutar a uma frequência elevada e que no seu conjunto se denominam por circuito inversor.

Pode-se utilizar Mosfet's (*Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor*) ou IGBT's (*Insulated Gate Bipolar Transistor*).

Ambos são capazes de comutar a frequências elevadas, no entanto os Mosfet's são mais rápidos na transição *On-Off* e vice-versa, permitindo frequências de comutação ainda mais elevadas que os IGBT's. No entanto os IGBT's são capazes de operar com potências mais elevadas.

Uma vez que a potência do gerador eólico é reduzida (400W), o Mosfet apresenta-se como uma boa solução, sendo que, caso se utilizasse um gerador de potência elevada os IGBT's seriam os semicondutores escolhidos para a implementação do circuito conversor CC/CA.

O inversor utilizado para converter a tensão contínua que provém do conjunto das baterias em tensão alternada, é do tipo VSI (*Voltage Source Inverter*), uma vez que a entrada do conversor é alimentada por uma fonte de tensão contínua.

Os inversores do tipo VSI podem ser divididos nas seguintes categorias:

- Inversores PWM (*Pulse-Width Modulated Inverter*);
- Inversores de Onda Quadrada (*Square Wave Inverter*);

- Inversores Monofásicos Com Cancelamento de Tensão (*Single-Phase Inverter With Voltage Cancellation*).

Para este trabalho utilizou-se a técnica *Sinusoidal Pulse-Width Modulated Inverter*, por ser a mais usual e por conter diversos parâmetros que possibilitam o controlo da amplitude, frequência do sinal gerado e o controlo do conteúdo harmónico.

De referir ainda a inclusão de um circuito de *snubber* com o objectivo de protecção dv/dt e sobretensão durante o *turn-off* do Mosfet [16].

Um circuito de snubber simples encontra-se na Figura 3.3, constituído por uma resistência (R) e um condensador (C) que apresenta perdas reduzidas a frequências elevadas.

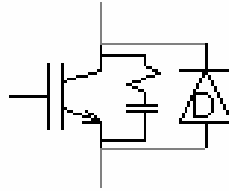


Figura 3.3 – Circuito de Snubber.

A constante $\tau = R \cdot C$ deve ser pequena em comparação com o período de comutação ($\approx 64\mu s$).

Assim assumiu-se para o condensador um valor de $0,1\mu F$ e para a resistência 64Ω ($\tau = 6,4\mu s$).

Assim a potência dissipada no circuito de snubber ($P_{dissipada}$) pode ser calculada pela seguinte expressão:

$$P_{dissipada} = C_{Snubber} * E_a^2 * f_{comutação} \quad (4)$$

Em que $C_{Snubber}$ é o valor do condensador do circuito de snubber, $f_{comutação}$ é a frequência de comutação e por fim, E_a é a tensão que o condensador está sujeito, nas comutações. O valor da potência dissipada é aproximadamente 3,6W.

Por fim o filtro LC e o autotransformador, que efectuem a filtragem da onda fundamental da tensão obtida aos terminais do circuito inversor (filtro LC), e elevam o nível da tensão para valores compatíveis com os receptores e a rede eléctrica (autotransformador – eleva para 230V eficazes).

O filtro é responsável por filtrar toda a componente harmónica a partir de uma década abaixo da frequência de comutação do circuito inversor.

Supondo uma frequência de comutação de 15,55kHz, então $W_0 = 2\pi \cdot (15550/10)$ rad/s. Sendo W_0 dado também por:

$$W_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad (5)$$

Prosseguindo o cálculo com $L = 0,1\text{mH}$ então obtém-se o seguinte valor para o condensador:

$$C = 104,7 \mu\text{F}$$

No entanto, este valor de C pode sofrer alterações devido ao facto de que, variando o tipo de carga que o gerador eólico alimenta, as condições de funcionamento são distintas especificamente em relação ao factor de potência e ao conteúdo harmónico que a própria carga gera.

Em seguida vai ser analisada a execução do controlo deste sistema de forma a obter a melhor performance para vários tipos de carga.

3.2.1 Sistema de Controlo

Implementou-se o controlo por frequência fixa (Figura 3.4), que se caracteriza por ser uma técnica de PWM que gera um sinal de erro, resultante da comparação entre a referência e a variável que se pretende controlar (tensão de saída). Em seguida o erro é processado pelo controlador resultando uma tensão de controlo que é comparada com uma onda triangular de frequência fixa, gerando dessa forma os impulsos que serão aplicados aos semicondutores do circuito inversor, ou seja, este método determina o *duty-cycle* necessário à conversão de CC em CA. Para a ligação à rede eléctrica, o sinal de referência deve estar sincronizado com a rede eléctrica.

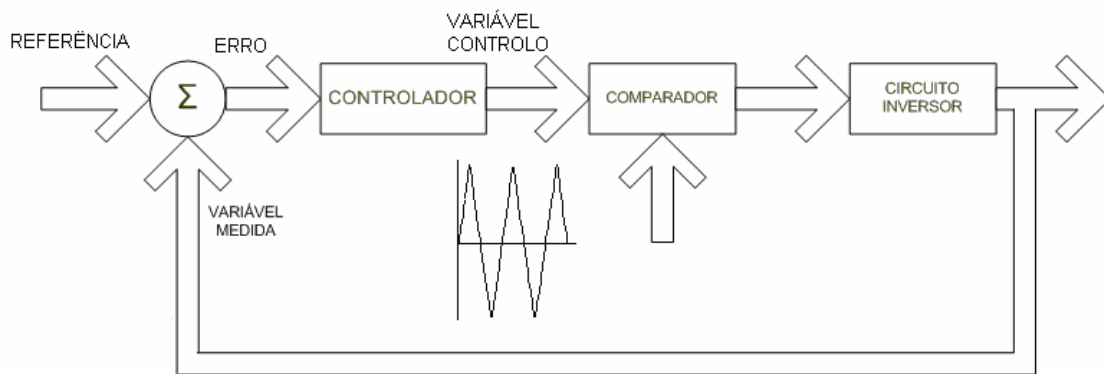


Figura 3.4 – Controlo por Frequência Fixa.

O controlador tem por finalidade gerar um sinal de controlo para reduzir a diferença entre o valor medido à saída de um sistema e uma entrada de referência [14].

De forma a obter um sistema flexível, optimizado e estável dispõem-se dos seguintes tipos de controlo clássico [17]:

- Liga-Desliga (ON-OFF);
- Controlo Proporcional (P);
- Controlo Proporcional Integral (PI);
- Controlo Proporcional Derivativo (PD);
- Controlo Proporcional Integral Derivativo (PID).

A escolha do controlador cinge-se particularmente pelas condições operativas do sistema e das especificações de performance.

O modo proporcional é adicionado para se adquirir um determinado tempo de subida.

Se o erro em regime estacionário não é admissível então o modo integral deve ser incluído no controlador, uma vez que esta é a única acção que possibilita anular ou reduzir esse erro.

Mediante as características do processo e de cada um dos controladores referidos implementou-se em PSCAD o controlador P e o PI. Com a simulação pretende-se determinar se o controlo Proporcional é satisfatório para a implementação prática uma vez que se trata de um algoritmo de controlo simples de implementar.

Na Figura 3.5 pode-se visualizar a implementação do controlador Proporcional em PSCAD.

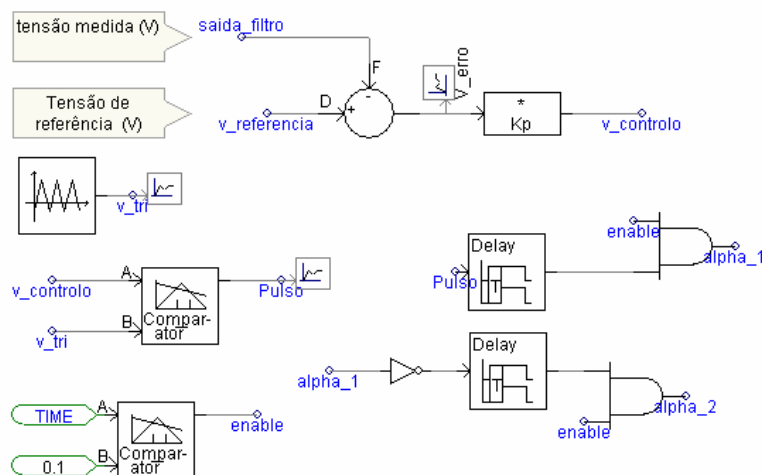


Figura 3.5 – Controlador Proporcional Implementado em PSCAD.

Na Figura 3.6 encontra-se a implementação do controlador Proporcional Integral para o controlo do circuito conversor CC-CA.

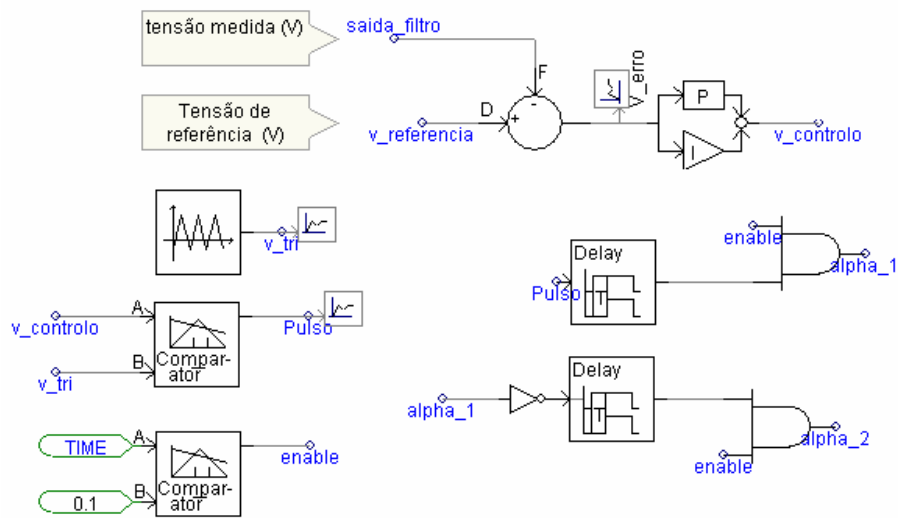


Figura 3.6 – Controlador PI Implementado em PSCAD.

3.2.2 Simulação em PSCAD

Nesta secção pode-se visualizar os resultados da simulação do circuito da Figura 3.2 para várias cargas. Pretende-se verificar como o sistema reage de forma a conhecer os seus limites, características e até melhorar a sua performance caso tal seja possível. Assim decidiu-se testar o sistema para as seguintes cargas:

- Carga puramente resistiva;
- Carga Resistiva e Indutiva com factor de potência 0,9 e 0,95;
- Carga Resistiva e Capacitiva com factor de potência 0,9 e 0,95;
- Rectificador de onda completa com carga resistiva e bobina de filtragem de corrente;
- Rectificador de onda completa com carga resistiva e condensador de filtragem de tensão;
- Ligação à rede eléctrica.

Os testes efectuados a estas cargas foram feitos com os controladores Proporcional e Proporcional Integral.

3.2.2.1 Carga Puramente Resistiva

Na Figura 3.7 pode-se visualizar as principais formas de onda obtidas com o controlador Proporcional.

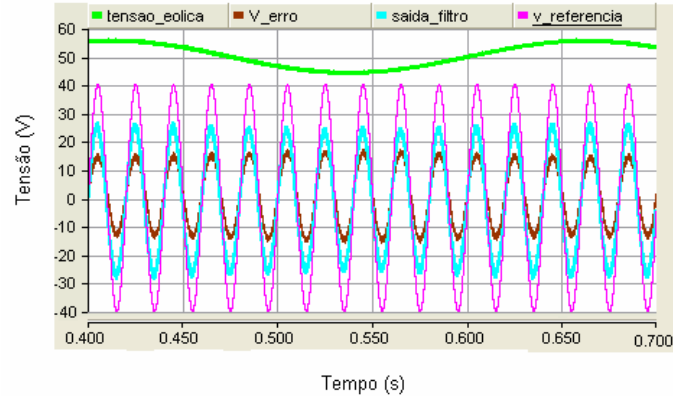


Figura 3.7 – Formas de onda obtidas com o Controlador Proporcional.

A linha de cor castanha revela o erro real entre a tensão de referência e a tensão de saída do filtro LC.

A linha a azul mostra a tensão à saída do filtro LC que em seguida será elevada através do autotransformador para ligação à respectiva carga.

Através da linha verde pode-se observar a variação da tensão aos terminais das baterias.

A linha de cor-de-rosa é a referência ou seja, é o sinal que o sistema deve obter à saída do filtro LC.

Obteve-se um THD (Total Harmonic Distortion – Distorção Harmónica Total) com um valor aproximado a 3%.

Em seguida pode-se visualizar as mesmas formas de onda mas desta vez com controlador Proporcional e Integral.

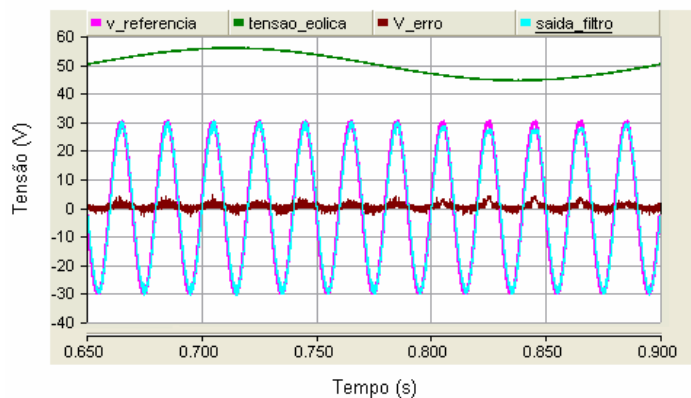


Figura 3.8 – Formas de Onda obtidas com o Controlador PI.

Assim como na situação em que se utilizou o controlador Proporcional, obteve-se um THD que varia entre 1% e 2,5%.

Os resultados obtidos com o controlador PI são melhores, como se pode verificar pela comparação das Figuras 3.7 e 3.8.

No entanto, o sinal de referência utilizado no controlador PI era uma sinusóide de 30V de amplitude, enquanto que na simulação do controlador Proporcional a referência utilizada foi uma sinusóide de 40V de amplitude, uma vez que o erro em regime permanente é menor com o controlador PI.

3.2.2.2 Carga Resistiva e Indutiva

Inicialmente testou-se o sistema com controlador proporcional com um factor de potência ($\cos \phi$) igual a 0,95 e em seguida com um $\cos \phi = 0,9$.

Nas Figuras 3.9 e 3.10 podem-se visualizar as formas de ondas obtidas para uma carga resistiva e indutiva (RL).

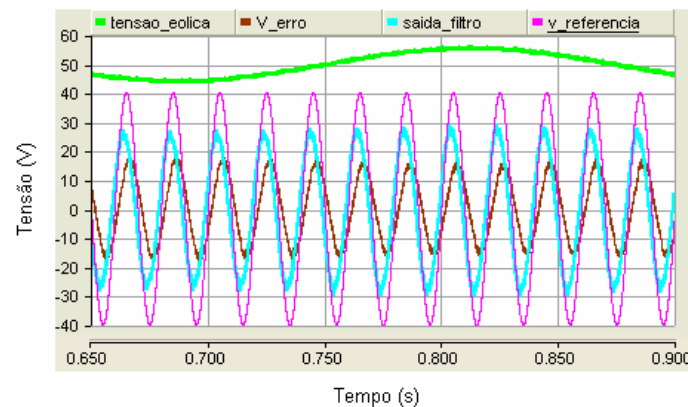


Figura 3.9 – Carga Resistiva e Indutiva ($\cos \phi = 0,95$ – Controlador Proporcional).

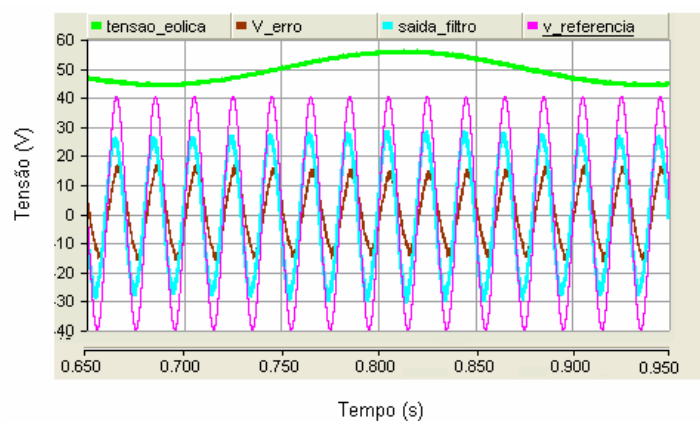


Figura 3.10 – Carga Resistiva e Indutiva ($\cos \phi = 0,9$ – Controlador Proporcional).

Para ambas as cargas com o controlador Proporcional, obteve-se uma $\text{THD} \approx 3\%$, que variava entre 2,5% e 3%.

Para se obter uma carga RL série com um $\cos \varphi = 0,95$, a resistência tomou o valor de 500Ω e a bobina $0,52\text{H}$.

Na situação em que se têm um factor de potência igual a 0,9, a bobina passou a ter $0,77\text{H}$.

Em seguida pode-se visualizar os mesmos sinais para uma carga com $\cos \varphi$ igual a 0,95 e 0,9 mas com o controlador Proporcional Integral implementado.

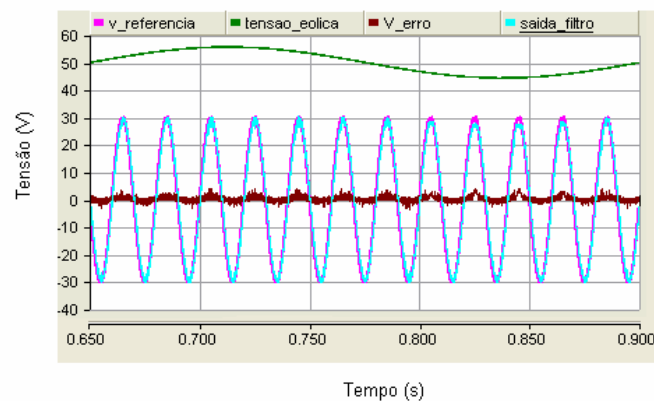


Figura 3.11 – Carga Resistiva e Indutiva ($\cos\varphi=0,95$ – Controlador PI).

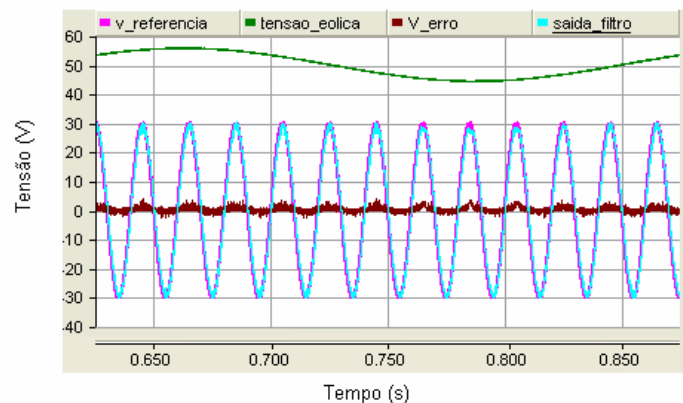


Figura 3.12 – Carga Resistiva e Indutiva ($\cos\varphi=0,9$ – Controlador PI).

A THD obtido com controlo Proporcional e Integral é um pouco menor que a THD obtido com controlo Proporcional, variando entre 1,5% e 2,5%, no entanto o sinal de referência utilizado era diferente da referência que se utilizou na implementação do controlo Proporcional, uma vez que o erro em regime permanente é menor com o controlador PI.

3.2.2.3 Carga Resistiva e Capacitiva

Em seguida encontram-se as formas de onda obtidas com uma carga resistiva e capacitiva (RC paralelo) com um $\cos \phi$ igual a 0,95 e 0,9.

Pode-se visualizar as principais formas de onda obtidas com controlador Proporcional.

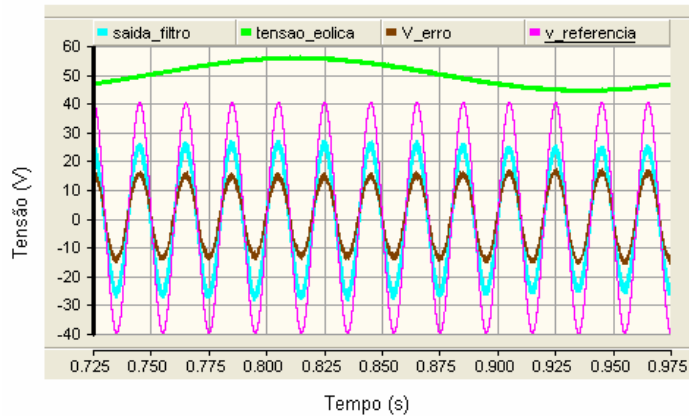


Figura 3.13 – Carga Resistiva e Capacitiva ($\cos \phi = 0,95$ – Controlador Proporcional).

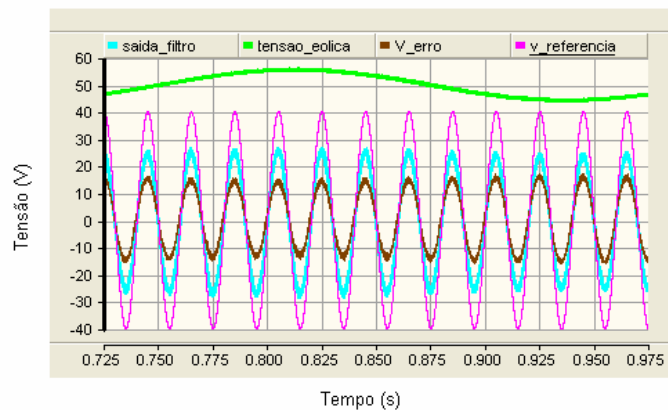


Figura 3.14 – Carga Resistiva e Capacitiva ($\cos \phi = 0,9$ – Controlador Proporcional).

Para este tipo de carga a resistência utilizada era de 500Ω e o condensador $3,08\mu\text{F}$ para se obter um $\cos \phi = 0,9$ e na simulação seguinte (factor de potência = 0,95), o condensador passou a ser $2,09\mu\text{F}$.

Com a utilização do controlador proporcional, obteve-se uma THD que varia de 1% a 2%.

Posteriormente implementou-se o controlador PI para as mesmas cargas (Resistiva e Capacitiva com $\cos \phi$ igual a 0,9 e 0,95).

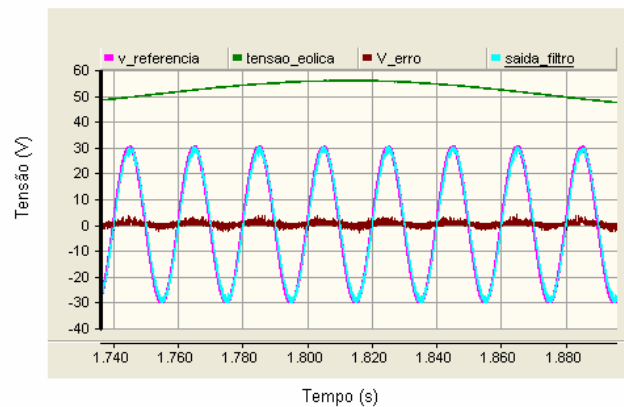


Figura 3.15 – Carga Resistiva e Capacitiva ($\cos\phi=0,95$ – Controlador PI).

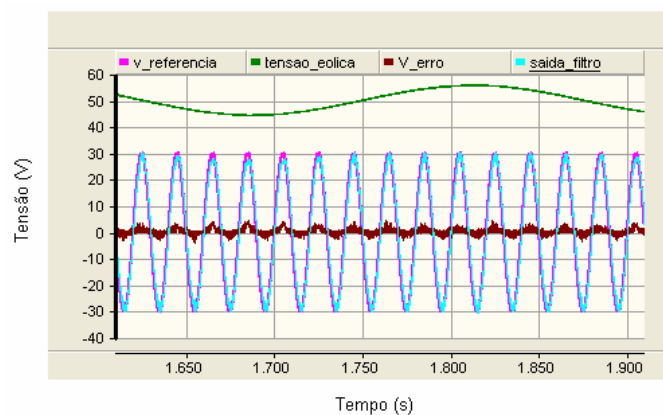


Figura 3.16 – Carga Resistiva e Capacitiva ($\cos\phi=0,9$ – Controlo PI).

Para a carga com $\cos \phi$ igual a 0,95 (Figura 3.15) obteve-se uma THD que varia entre 1% e 2%, sendo que para um $\cos \phi$ igual a 0,9 (Figura 3.16) a THD variou de 1% a 3%.

3.2.2.4 Carga Resistiva e Indutiva com Rectificador de Onda Completa não Controlado

Em seguida pretende-se alimentar uma carga com um rectificador de onda completa não controlado com uma resistência e uma bobina (Figura 3.17).

Relativamente ao sistema de controlo utilizaram-se as mesmas formas de onda de referência (sinusóide de 40V de amplitude).

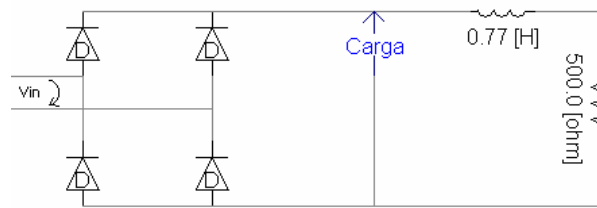


Figura 3.17 – Rectificador de Onda Completa não Controlado com carga RL.

Mais uma vez, utilizou-se o controlador proporcional e o proporcional e integral.

Na figura seguinte pode-se visualizar os principais sinais da simulação efectuada com este tipo de carga utilizando o controlador proporcional.

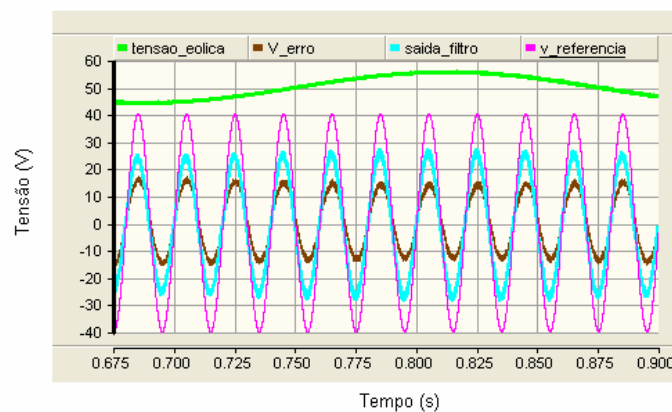


Figura 3.18 – Rectificador de Onda Completa (Controlador Proporcional).

Obeve-se uma $THD \cong 4\%$ para este tipo de carga, com o controlador proporcional.

Na figura seguinte pode-se observar as principais formas de onda, mas com o controlador PI implementado.

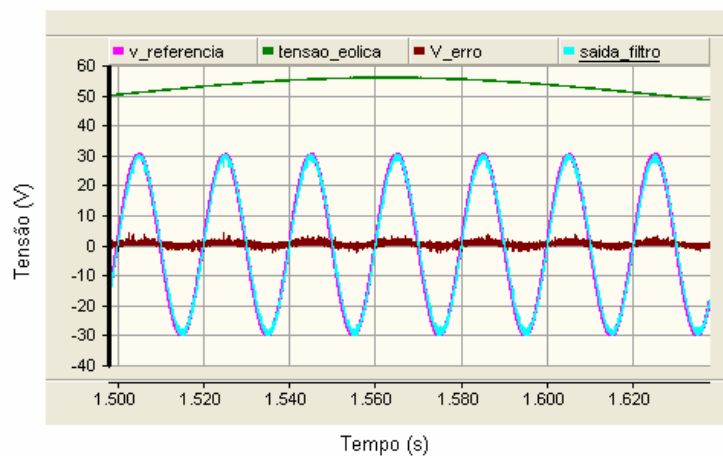


Figura 3.19 – Rectificador de Onda Completa (Controlador PI).

Com o controlador proporcional e integral obteve-se uma THD que varia dos 3% até 10%.

Ou seja, de uma forma geral com o controlador Proporcional alcançaram-se melhores resultados, uma vez que se obteve um menor conteúdo harmónico.

Em seguida pode-se observar a forma de onda da tensão que alimenta o rectificador a diodos com resistência e bobina como carga, com o controlador P e o PI.

Como se pode verificar na Figura 3.20, a distorção causada por este tipo de carga na forma de onda da tensão que alimenta esta carga não é muito elevada se a impedância das linhas for baixa.

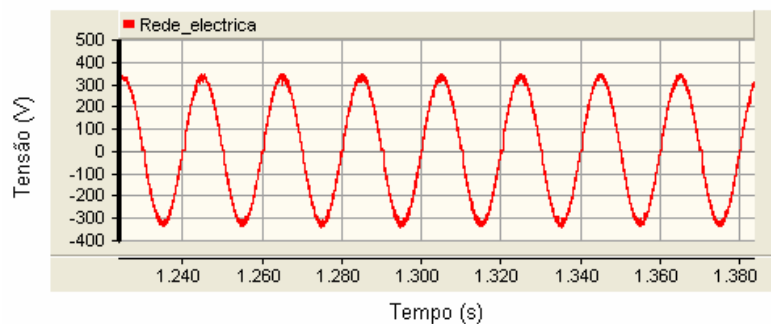


Figura 3.20 – Forma de Onda da Tensão que Alimenta a Carga.

3.2.2.5 Carga Resistiva e Capacitiva com Rectificador de Onda Completa não Controlado

Uma carga muito comum é a carga que se encontra na Figura 3.21, que é composta por um rectificador a diodos com uma resistência e um condensador.

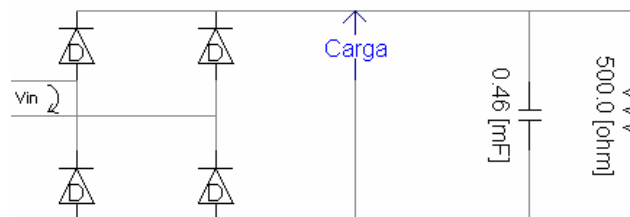


Figura 3.21 – Rectificador de Onda Completa não controlado com carga RC.

Mais uma vez, efectuaram-se testes utilizando os dois tipos de controlador (Proporcional e Proporcional e Integral), e com as mesmas formas de onda de referência (sinusóide de 40V de amplitude).

Na figura seguinte pode-se observar as principais formas de onda utilizando o controlador Proporcional.

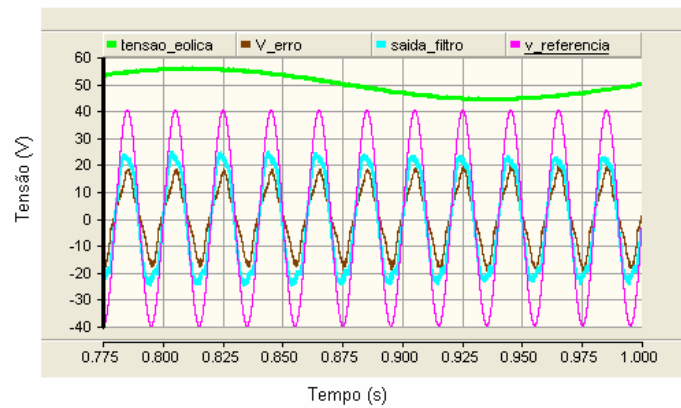


Figura 3.22 – Rectificador de Onda Completa (Controlador Proporcional).

Com o controlador P obteve-se um THD com 13% de conteúdo harmónico.

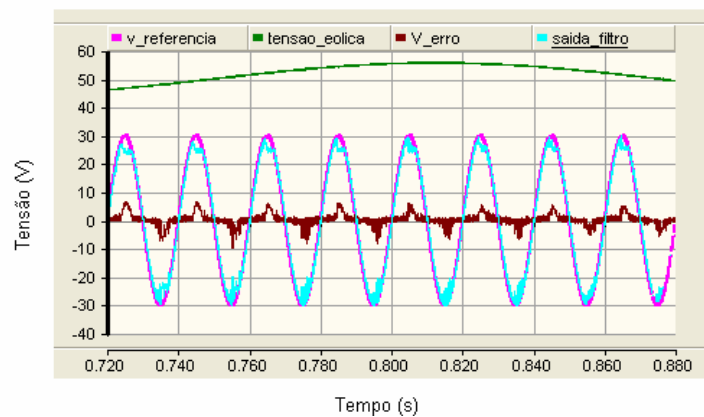


Figura 3.23 – Rectificador de Onda Completa (Controlador PI).

Com o controlador PI obteve-se um THD que varia entre 12% e 16%. Observando as formas de onda obtidas para uma carga com rectificador a díodos com carga RC, pode-se concluir que o controlador proporcional apresentou melhores resultados finais que o controlador proporcional e integral.

Em seguida apresenta-se a forma de onda obtida à entrada do rectificador a díodos para ambos os controladores, ou seja, é a forma de onda resultante da ligação de uma carga com rectificador a díodos com carga RC.

Esta forma de onda, da tensão de alimentação, verifica-se para este tipo de carga, pois o elevado conteúdo harmónico da corrente consumida pela carga (rectificador monofásico com filtro capacitivo) distorce a tensão de alimentação devido à queda de tensão na impedância da linha.

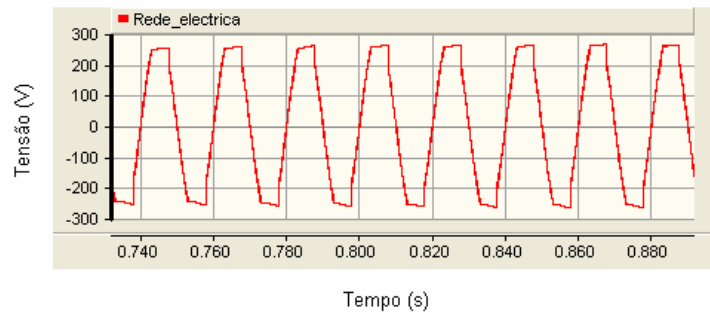


Figura 3.24 – Forma de Onda da Tensão que Alimenta a Carga.

3.2.2.6 Ligação do Gerador Eólico à Rede Eléctrica

Em seguida, simulou-se o sistema responsável pela conversão de uma tensão contínua em tensão alternada em paralelo com a rede eléctrica.

Numa etapa inicial, a rede eléctrica alimenta uma carga RL e em seguida o gerador eólico entra em funcionamento, passando a alimentar a carga e a injectar corrente na rede eléctrica, como se pode observar na Figura 3.25.

A linha de cor roxa ($I_{rede_electrica}$) mostra a corrente da rede eléctrica. A linha de cor vermelha ($I_{gerador}$), mostra a corrente que o gerador eólico injecta no sistema e por fim, a linha de cor verde (I_{carga}), mostra a corrente que a carga consome.

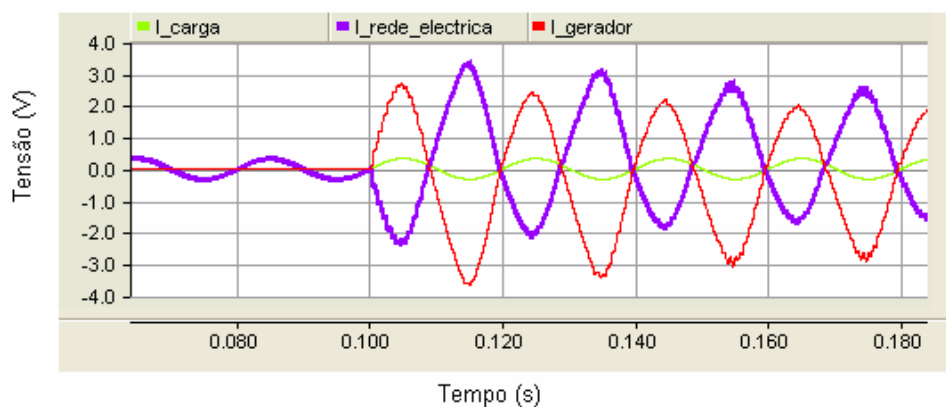


Figura 3.25 – Gerador Eólico Injecta Energia na Rede Eléctrica.

O valor da THD da corrente injectada é aproximadamente de 10%.

3.2.2.7 Ligação do Gerador Eólico à Rede Eléctrica para Alimentação de uma Carga Resistiva e Indutiva

Na figura seguinte (Fig. 3.26) pode-se visualizar as formas de onda da corrente obtidas na ligação do gerador eólico à rede eléctrica com uma carga com $\cos\phi=0,9$.

Num primeiro momento, o gerador encontra-se desligado, ou seja, a carga é alimentada na sua totalidade pela rede eléctrica.

Em seguida, o gerador eólico começa a fornecer energia, mas verifica-se que não consegue fornecer a corrente total necessária que a carga necessita.

Assim o gerador e a rede eléctrica fornecem em conjunto a corrente necessária à carga, verificando-se uma diminuição do valor da corrente fornecida pela rede eléctrica.

O valor da THD da corrente fornecida pelo gerador varia entre 6% e 10% enquanto na rede eléctrica, o valor da THD da corrente varia entre 3% a 6%.

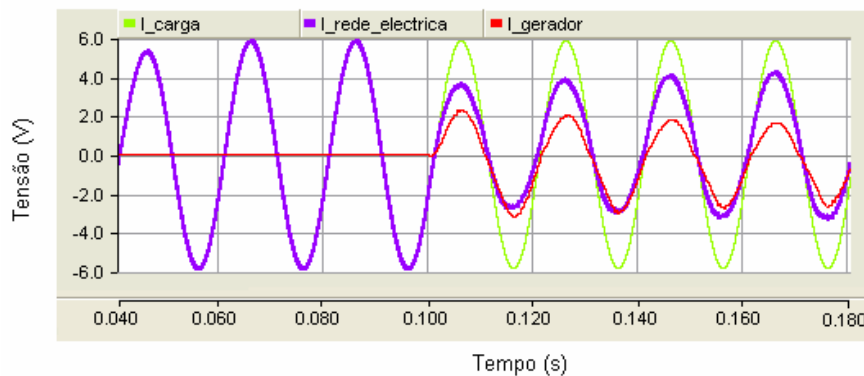


Figura 3.26 – Gerador eólico e rede eléctrica alimentam uma carga (RL).

3.3 Conclusões sobre os Resultados da Simulação

No dimensionamento do filtro LC obteve-se um condensador de $104,7\mu\text{F}$, no entanto, para este valor os resultados da simulação eram insatisfatórios, razão pelo qual se aumentou o valor do condensador para $200\mu\text{F}$ alcançando dessa forma melhores resultados.

Relativamente ao controlador verificou-se que o controlador proporcional e integral, como seria de esperar, reduz o erro em regime permanente.

No entanto, o controlo proporcional apresenta um erro elevado entre a referência e a tensão medida à saída, e isso representa uma perda de eficiência.

Assim e devido à simplicidade de implementação do controlo proporcional em relação ao controlo PI, o controlo P revela-se uma boa opção para a implementação prática.

Na ligação do gerador eólico em paralelo com a rede eléctrica, apenas se conseguiu efectuar essa ligação através da utilização do controlo proporcional, pois o controlo PI apresentava resultados inaceitáveis.

Na ligação do gerador eólico à rede também se verificou que o comportamento do sistema apresenta melhores resultados na ligação a cargas predominantemente indutivas, optando-se por simular a ligação do gerador eólico em paralelo com a rede alimentando cargas RL na sua totalidade e injectando corrente na rede, e ainda simulando a alimentação de uma carga RL por parte do gerador eólico em conjunto com a rede eléctrica. Além disso, as cargas indutivas são mais habituais que as capacitivas.

4 Implementação

Para o desenvolvimento deste trabalho dispunha-se de um gerador eólico AIR 403 (SOUTHWEST WINDPOWER) de 400W de potência máxima. Trata-se de um gerador síncrono trifásico de ímanes permanentes sem escovas, composto por 12 magnetos de Neodímio-Ferro-Boro ($\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$) em arco, que é um íman muito potente tendo em conta a sua massa, no entanto, é um pouco frágil e perde o magnetismo para temperaturas elevadas.

O gerador AIR 403 possui 3 pás, construídas a partir de um termoplástico forte, mas leve, que apresenta elevada performance e mínimas vibrações, sendo que a velocidade das pás é regulada pelas características aerodinâmicas das pás, de forma a limitar a potência do gerador eólico (limitação do tipo *stall* - perda).

O gerador possui um rectificador robusto e fiável e um regulador, ambos incorporados, que permitem obter aos terminais da turbina uma tensão contínua com 48V.

O regulador possui um circuito de controlo por histerese, em que a turbina trava de uma forma lenta e silenciosa assim que as baterias se encontram completamente carregadas, voltando a produzir energia assim que o nível de tensão das baterias diminui. Desta forma converte-se uma tensão alternada de amplitude variável numa tensão contínua de amplitude conhecida, fazendo com que aos terminais do gerador eólico surja uma tensão contínua.

Contudo esta turbina não se encontra nas melhores condições, motivo pelo qual serão apresentados os testes e resultados efectuados com uma turbina semelhante, a AIR X, bem como, todo o material utilizado que pertence ao Departamento de Engenharia Mecânica (DEM) da Universidade do Minho.

Na Figura 4.1 pode-se visualizar o diagrama de blocos do sistema que foi implementado no laboratório de potência.

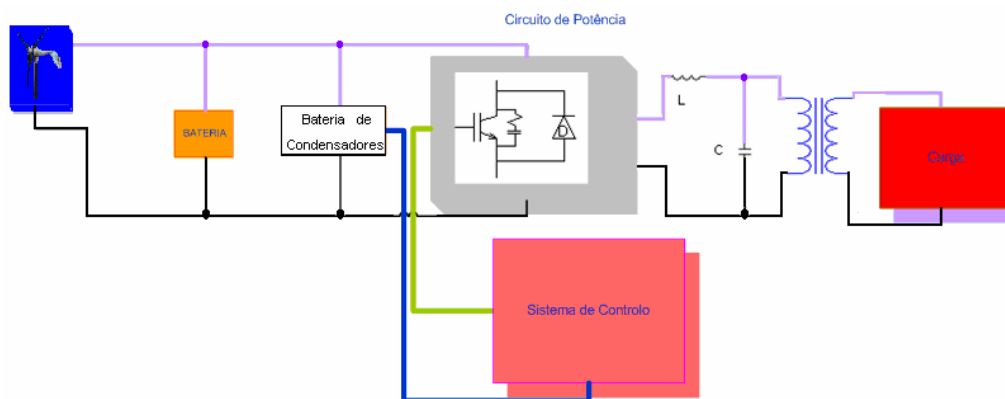


Figura 4.1 – Diagrama de Blocos do Sistema Implementado.

Como o gerador eólico AIR 403 não se encontrava nas melhores condições, decidiu-se substituir o conjunto, gerador eólico e baterias por uma fonte CC variável que se pode visualizar na Figura 4.2.



Figura 4.2 – Fonte CC Variável.

Em seguida, serão analisados os blocos constituintes do esquema que se encontra na Figura 4.1, assim como os testes efectuados ao gerador eólico semelhante ao gerador AIR 403, pois a única diferença significativa entre o gerador AIR 403 e o AIR X encontra-se no regulador da turbina AIR X, uma vez que este apenas permite 24V nos seus terminais.

Inicialmente tentou-se validar o modelo simulado em PSCAD, isto é, através da realimentação do sinal de saída do circuito de potência actuava-se com um controlador de forma a garantir uma tensão de saída com um valor eficaz constante, no entanto, devido às limitações de processamento do microcontrolador alterou-se essa realimentação por uma leitura do nível CC da entrada do circuito inversor. De acordo com o nível da tensão CC o microcontrolador altera o índice de modulação de amplitude

(m_a), mantendo dessa forma, o valor eficaz da tensão de saída constante para uma tensão CC variável.

4.1 Teste do Gerador Eólico

O Laboratório de Aerodinâmica Industrial (LAIND) do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade do Minho, possui um túnel aerodinâmico (Figura 4.3) com uma secção de 1.40m x 0.80m, extensível até 8 metros de comprimento.

É comandado por um motor de corrente contínua de 15kW com um regulador a tiristores, que permite um ajuste da velocidade na secção de ensaios entre 0,5m/s e 7m/s.

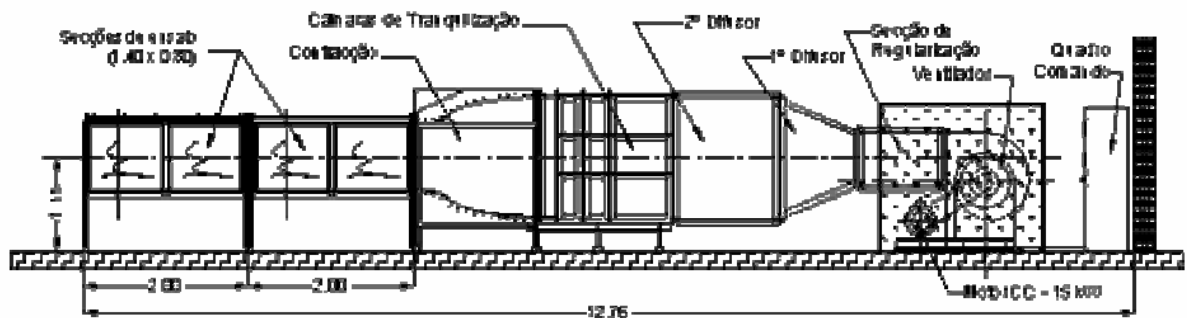


Figura 4.3 – Túnel Aerodinâmico do LAIND [Manuel de Almeida].

4.1.1 Características do equipamento utilizado

Na Figura 4.4, pode-se visualizar o Gerador eólico AIR X utilizado nos testes efectuados no LAIND.



Figura 4.4 – Gerador Eólico AIR X.

Esta turbina possui também um gerador síncrono trifásico sem escovas de ímanes permanentes (12 Magnetos de Neodímio-ferro-boro em arco) e um retificador interno. Possui ainda um regulador de carga, que monitoriza e compara continuamente a tensão das baterias com o ponto de regulação. Assim que atinge o ponto de regulação a turbina desliga-se, voltando a produzir energia assim que o nível de tensão das baterias diminui.

Além disso possui um mecanismo de protecção para velocidades de vento elevadas, isto é, a turbina entra em perda aerodinâmica para velocidades superiores a 15.6 m/s (controlo *stall*).

4.1.2 Condições de funcionamento

Circuito Aberto – Quando o gerador se encontra desligado das baterias.

Em carga – Quando se liga o gerador às baterias, a turbina roda com o vento e inicia a carga das baterias até atingir o ponto de regulação. Assim que inicia o processo de carregamento das baterias, um LED acende-se.

Regulação – Se a tensão das baterias atinge o ponto de regulação, o gerador deixa de produzir energia, retomando ao seu modo normal assim que a tensão nas baterias desça abaixo do nível máximo.

4.1.3 Material utilizado

Utilizaram-se dois multímetros (Figura 4.5). Um multímetro para medir a tensão das baterias e outro para medir a corrente fornecida pelo gerador eólico.



Figura 4.5 – Multímetros.

Utilizaram-se duas baterias de 12V ligadas em série (Figura 4.6).



Figura 4.6 – Baterias de 12V ligadas em série.

Para se poder medir a velocidade de rotação das pás da turbina eólica, utilizou-se um taquímetro (Figura 4.7).



Figura 4.7 – Taquímetro Óptico.

A caixa de comando (pertence ao LAIND) que se encontra na próxima figura possui um fusível de protecção e permite ligar/desligar as baterias do gerador eólico.



Figura 4.8 – Caixa de Comando.

Para além deste material, utilizou-se uma estrutura de suporte (pertence ao LAIND) para a torre do gerador (Figura 4.9), de forma a oferecer uma maior resistência aos esforços a que a torre está sujeita.



Figura 4.9 – Estrutura de Suporte para a Torre.

Em seguida pode-se visualizar o esquema da montagem para se poder efectuar os testes no túnel aerodinâmico (Figura 4.10).

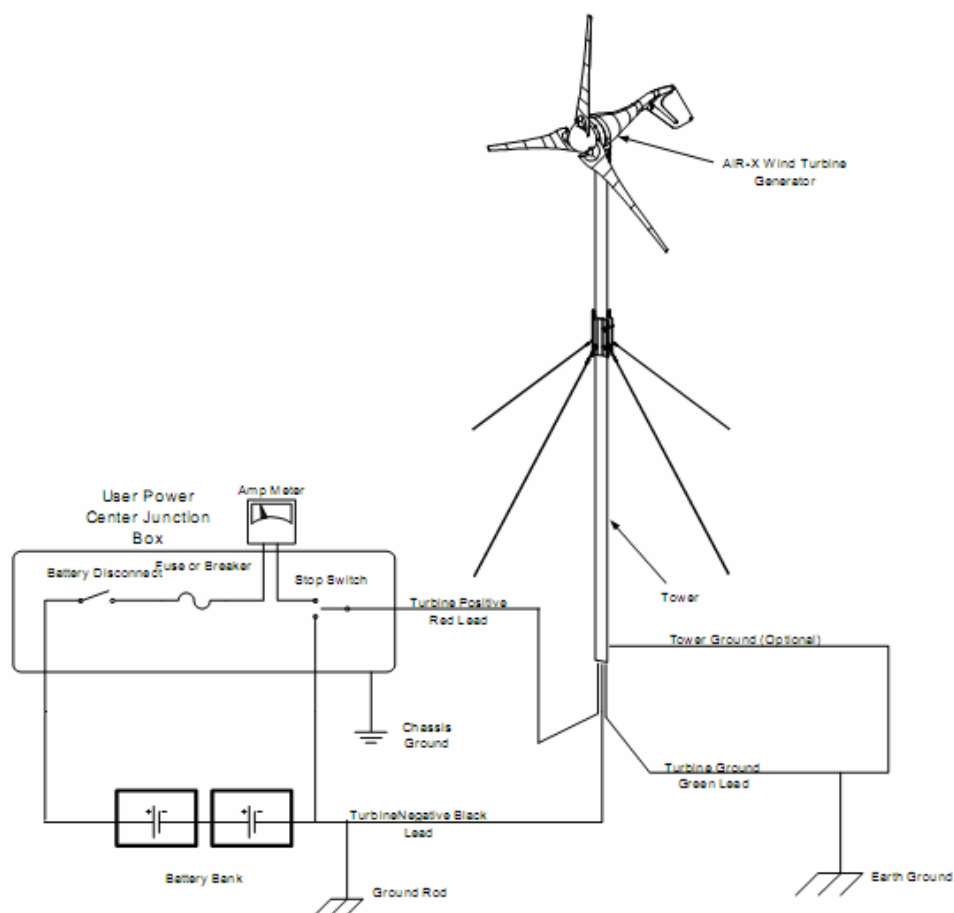


Figura 4.10 – Esquema eléctrico da montagem para a realização de testes no Túnel Aerodinâmico [AIR-X Land Manual].

4.1.4 Descrição da Instalação

Para se efectuar o teste do gerador eólico no túnel aerodinâmico procedeu-se à instalação de todos os componentes, dispendo-os de uma forma que concedesse segurança, fiabilidade e aproximação à realidade dos resultados.

O gerador encontra-se distanciados de 500mm (Figura 4.11) uma vez que esta é a distância que permite obter o melhor aproveitamento da velocidade do túnel (a secção de ensaio do túnel cobre apenas 80% da área varrida pelas pás).

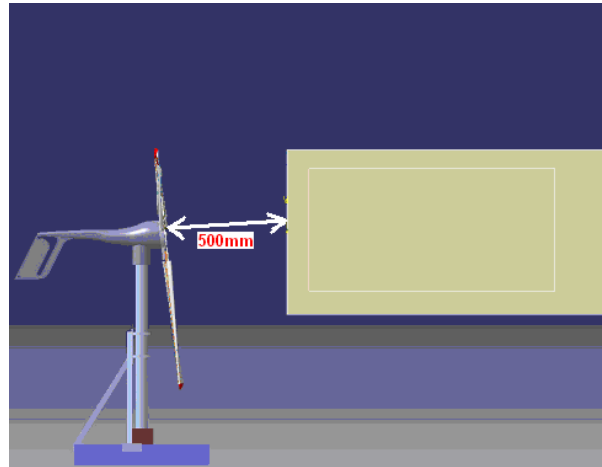


Figura 4.11 – Distância entre a Turbina e o Túnel Aerodinâmico.

4.1.5 Resultados obtidos

Na Figura 4.12 pode-se visualizar a forma de onda da potência em função da velocidade do vento que se espera obter nos testes. A potência varia com o cubo da velocidade do vento (equação 6).

$$P = \frac{1}{2} * U^3 * S * C_p * \rho \quad (6)$$

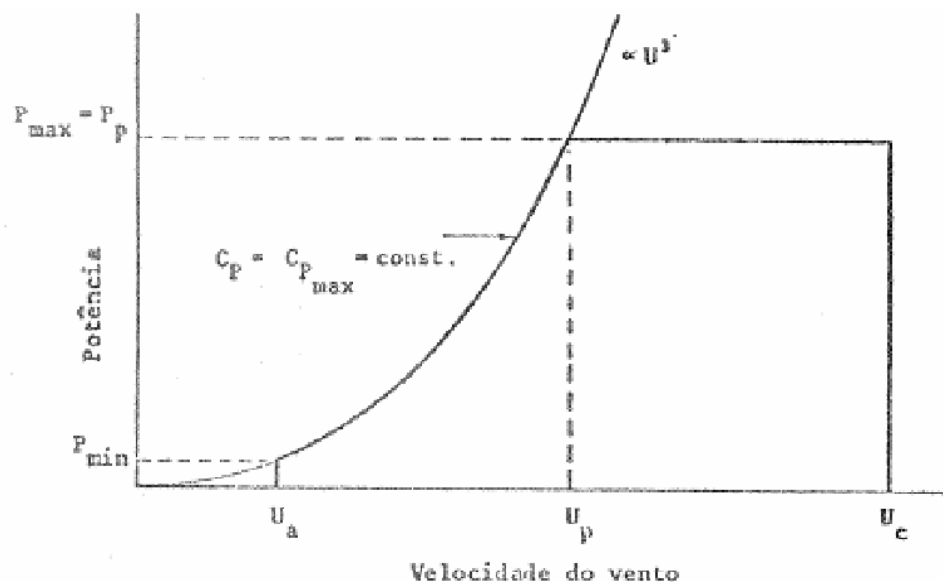


Figura 4.12 – Curva de Potência de uma Turbina de Eixo Horizontal [Manuel de Almeida].

Na próxima figura (Figura 4.13) pode-se observar os valores obtidos da velocidade de rotação, corrente e tensão das baterias, potência e potência corrigida.

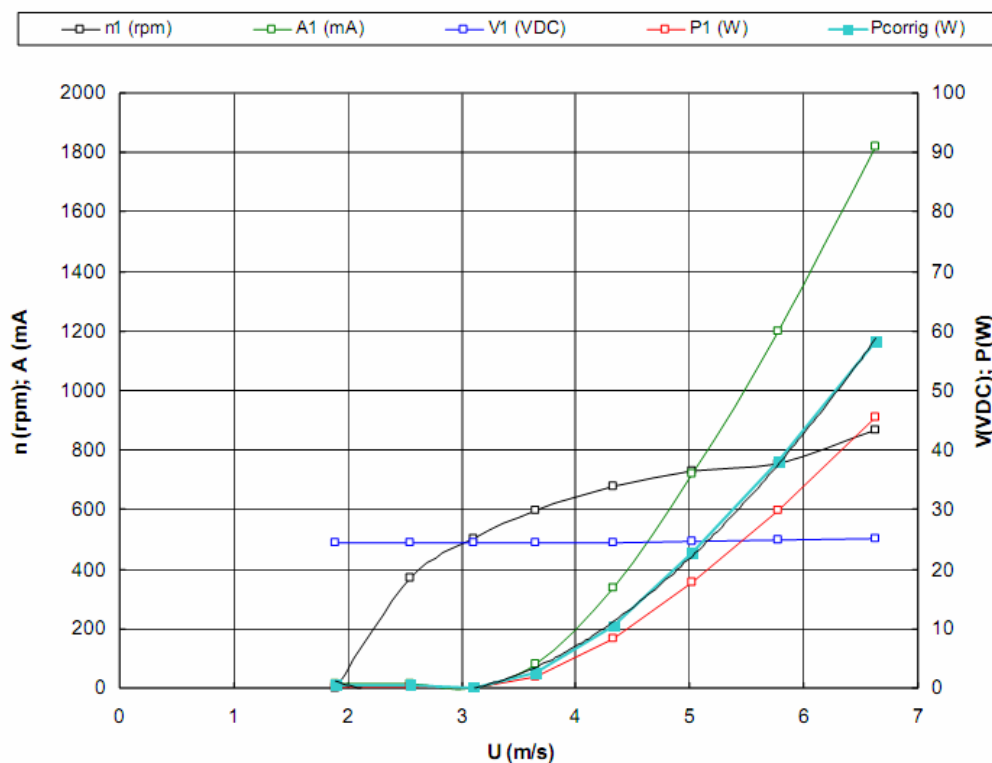


Figura 4.13 – Testes Efectuados à Turbina AIR X no Túnel Aerodinâmico.

A curva de potência é limitada pela velocidade máxima do túnel (7 m/s) sendo esse o limite máximo de velocidade para a máxima produção de energia.

Os valores da corrente (A1), tensão (V1) e velocidade de rotação (n1) resultam da medição directa, executada pelo uso directo dos instrumentos de medição apropriados.

O valor da potência (P1) e potência corrigida (Pcorrig) resulta da multiplicação dos valores obtidos da tensão e corrente das baterias para a primeira situação, e resulta da suposição que a área varrida pelo vento do túnel nas pás do gerador eólico fosse 100% na segunda situação.

Na próxima tabela pode-se visualizar com mais detalhe os valores obtidos pelo gerador AIR X no túnel.

Tabela 1 – Resultados Obtidos pelo Gerador AIR X no Túnel Aerodinâmico.

Ref	POT. %	Δp (mm H ₂ O)	U_{∞} (m*s ⁻¹)	n1 (rpm)	V1 (VDC)	A1 (mA)	P1 (W)	Cp	Pcorrig (W)
1	30	0,22	1,89	0	24,36	13	0	0,09	0
2	40	0,40	2,55	370	24,37	14	0	0,04	0
3	50	0,59	3,10	503	24,37	0	0	0,00	0
4	60	0,82	3,65	598	24,39	82	2	0,08	3
5	70	1,15	4,33	677	24,45	335	8	0,19	10
6	80	1,55	5,02	732	24,64	720	18	0,26	23
7	90	2,05	5,78	755	24,84	1200	30	0,29	38
8	100	2,70	6,63	866	25,04	1820	46	0,29	58

Obteve-se somente 58W de potência máxima para uma velocidade de rotação de 866 rpm, valor que se encontra limitado pela velocidade máxima que o túnel pode conceder (7 m/s). Relativamente ao coeficiente de potência (C_p) obteve-se um valor de 0,29. Este é um valor considerável tendo em conta o tipo de turbina [18], pois o valor máximo teórico (Limite de *Betz*), é 0,59.

4.2 Circuito de Potência

O circuito de potência é composto pelos seguintes elementos:

- Conversor CC-CA;
- Filtro;
- Transformador.

Relativamente ao circuito conversor CC-CA, optou-se pela montagem monofásica em ponte completa (*Full-Bridge Inverter*), pois em comparação com o esquema em meia ponte, apresenta aos seus terminais uma tensão que é o dobro da tensão obtida com o segundo esquema.

Em seguida é analisado o bloco responsável por filtrar os harmónicos resultantes das comutações efectuadas pelo circuito inversor.

Por fim encontra-se o bloco responsável por adequar o nível de potência gerado pelo circuito inversor e alisado pelo filtro, aos níveis da rede eléctrica.

4.2.1 Conversor CC-CA

Existem vários esquemas de circuitos conversores CC-CA, no entanto optou-se pela montagem do circuito inversor em ponte completa (Figura 2.22), além do que existem microcontroladores que possuem hardware adequado para a sua implementação.

Quanto à sua constituição, utilizaram-se 4 IGBT's (*Insulated Gate Bipolar Transistor*) STGB14NC60KD (Figura 4.14) da STMicroelectronics, no entanto, de acordo com a potência do sistema, o indicado seria a utilização de Mosfet's, mas devido à facilidade de aquisição de IGBT's, decidiu-se utilizar este semiconductor. Trata-se de um componente utilizado em circuitos inversores e no accionamento de motores. Estes semicondutores possuem um diodo rápido em antiparalelo.

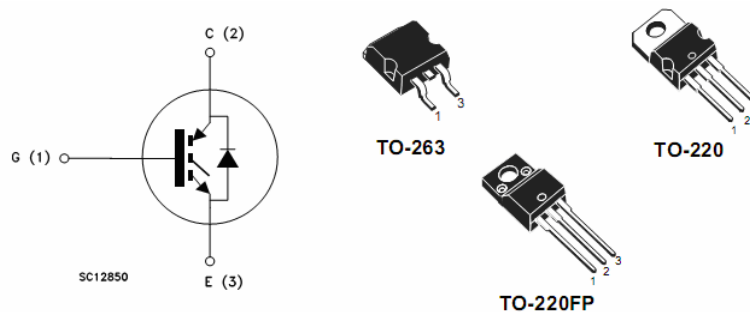


Figura 4.14 – IGBT STGB14NC60KD [STMicroelectronics].

O semiconductor IGBT reúne a facilidade de activação dos Mosfet's e a elevada impedância de entrada com reduzidas perdas em condução dos transístores bipolares de potência [21].

Na Figura 4.15 pode-se visualizar o circuito inversor implementado em placa de circuito impresso (P.C.B. – *Printed Circuit Board*).

O circuito inversor é constituído por 4 IGBT's apertados num dissipador por intermédio de parafusos devidamente isolados.

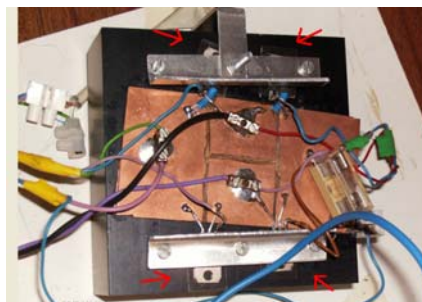


Figura 4.15 – Circuito Inversor Implementado no Laboratório de Potência.

Utilizou-se ainda uma bateria de condensadores com 5,64mF na entrada do circuito inversor, porque para além de ser um armazenador de energia, auxilia como filtro para as baterias e para o gerador eólico.

Isto é necessário devido à comutação dos semicondutores do conversor, pois a corrente solicitada pelo inversor é descontínua, apresentando um ripple cuja frequência é igual à frequência de comutação do circuito inversor.



Figura 4.16 – Bateria de Condensadores.

4.2.2 Filtro

Existem diversas estruturas de filtros, sendo a estrutura LC a mais utilizada para efectuar o alisamento da forma de onda gerada pelo circuito conversor.

O filtro LC caracteriza-se por ser simples e fácil de projectar e tem por finalidade filtrar os harmónicos provenientes das comutações do circuito inversor.

Este bloco é responsável por filtrar toda a componente harmónica a partir de uma década abaixo da frequência de comutação, ou seja,

$$W_0 = 2 * \pi * \frac{f_{comutação}}{10} \quad (\text{rad/s}) \quad (7)$$

Para o dimensionamento da bobina e do condensador, sabe-se que

$$W_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad (\text{rad/s}) \quad (8)$$

Pelos cálculos efectuados no capítulo 3 obtiveram-se os seguintes valores, $L=0,1\text{mH}$ e $C=104,7\mu\text{F}$, no entanto, para a sua implementação, e tendo em conta o material disponível no laboratório implementou-se um filtro LC com um condensador de $30\mu\text{F}$ e uma bobina de $600\mu\text{H}$.

Na Figura 4.17 pode-se observar o filtro LC implementado.

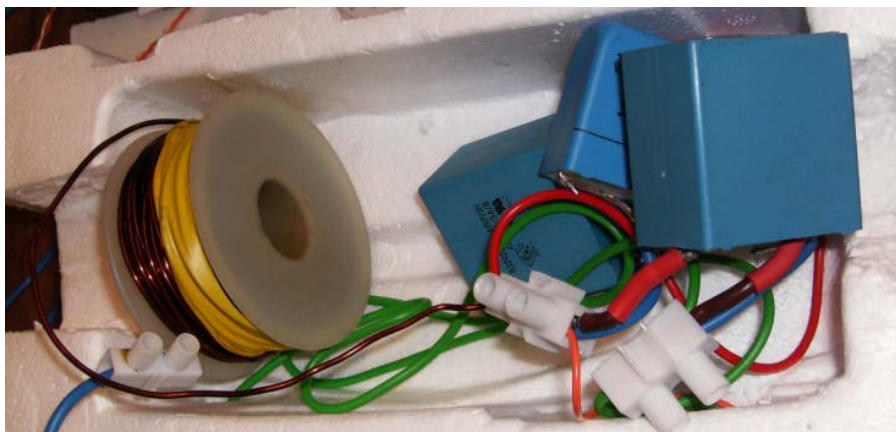


Figura 4.17 – Filtro LC.

4.2.3 Transformador

É o último bloco responsável por elevar a tensão gerado pelo circuito inversor e alisado pelo filtro para os níveis da rede eléctrica.

Poder-se-ia utilizar um auto-transformador variável (Variac) ou um transformador (Figura 4.18). Ambos apresentam inconvenientes na sua ligação aos terminais do filtro LC, devido à corrente de *inrush*, porque quando um equipamento destes, é desligado de um sistema eléctrico, existe um fluxo residual que irá permanecer no núcleo magnético, e no instante em que é novamente activado, juntamente com o fluxo residual surge uma corrente que se chama corrente *inrush*. O instante em que é activado juntamente com o fluxo residual determina a intensidade da corrente de *inrush*.

Uma vez que a potência do auto-transformador disponível no laboratório, é maior que a potência dos transformadores, então o efeito da corrente de *inrush* era maior no auto-transformador. Por esse motivo optou-se pela utilização de um transformador uma vez que facilitava a tarefa da elevação do nível de tensão gerado pelo circuito inversor, pois o efeito da corrente *inrush* é menor.



Figura 4.18 – 2 transformadores e 2 resistências.

4.3 Circuito de Controlo

Com o objectivo de implementar um sistema de controlo capaz de controlar o sistema em causa, escolheu-se o microcontrolador PIC 18F4431 da Microchip Inc. Este microcontrolador possui um módulo de ADC de alta velocidade e um módulo de PWM que facilita a tarefa de gerar os impulsos necessários para o controlo do circuito conversor CC-CA, de modo a obter à saída do circuito de potência uma tensão com um valor eficaz constante.



Figura 4.19 – PIC 18F4431.

No Capítulo 4.3.2 é analisado o circuito que realiza o isolamento entre o circuito de controlo e o circuito de potência. Este é composto por um acoplador óptico e tem por objectivo separar electricamente o circuito de controlo, do circuito de potência.

Por fim examina-se o circuito de *drive* que executa o accionamento dos IGBT's que compõem o circuito inversor.

4.3.1 Microcontrolador

Para efectuar o controlo do sistema de potência é necessário um microcontrolador com características adequadas ao sistema que se pretende desenvolver.

O PIC é um circuito integrado produzido pela Microchip Technology Inc. que pertence à categoria dos microcontroladores e na qual estão disponíveis vários modelos.

Como o objectivo é essencialmente realizar leituras analógicas e gerar *pwm*, escolheu-se o PIC 18f4431. Este microcontrolador caracteriza-se por ser bastante versátil, potente e de baixo custo. Possui 36 pinos de entrada/saída e apresenta as seguintes características:

- 8 Saídas PWM;
- 16384 Bytes de memória de programa;
- 768 Bytes de RAM;
- 256 Bytes de EEPROM;
- 3 Temporizadores de 16 bits;
- 9 Canais ADC;
- Memória flash e possibilidade de programação In-Circuit;
- Disponibilidade de um compilador em C.

Depois de seleccionado o microcontrolador, torna-se obrigatório possuir um circuito que conecte o PC (Computador Pessoal) com o microcontrolador e que possibilite a sua programação.

Existem diversos circuitos programadores à venda, no entanto, implementou-se um circuito que é semelhante ao MPLAB ICD2 (Figura 4.20).

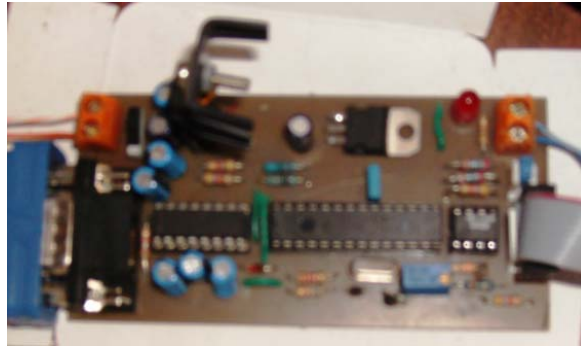


Figura 4.20 – Circuito Programador de PIC's.

Este circuito conecta-se com o PC através da porta série e suporta ICSP (*In Circuit Serial Programmig*). Assim é possível realizar em tempo real a programação, execução e debugging dos programas. Para isso é necessário a utilização de pinos dedicados para a comunicação com o microcontrolador e *firmware* específico *on-chip*.

Relativamente ao *software* a Microchip disponibiliza o MPLAB IDE (*Integrated Development Environment*) V7.42 em conjunto com o compilador C18 Student Edition, específico para a programação de PIC's 18F.

Como já foi referido, o PIC 18F4431 possui um módulo PWM que simplifica a tarefa de gerar múltiplos impulsos sincronizados, que são utilizados para o controlo de motores, conversores etc.

O módulo de PWM possui as seguintes características:

- Até 8 canais para a geração dos impulsos de controlo;
- Até 14 bits de resolução;
- Possibilidade de programação do *dead-time*.

Este módulo é controlado por um total de 22 registos, sendo que 8 deles são usados para a configuração do módulo:

- PWM Timer Control Register 0 (PTCON0);
- PWM Timer Control Register 1 (PTCON1);
- PWM Control Register 0 (PWMCON0);
- PWM Control Register 1 (PWMCON1);
- Dead-Time Control Register (DTCON);
- Output Override Control Register (OVDCOND),
- Output State Register (OVDCONS);
- Fault Configuration Register (FLTCONFIG).

Os restantes registos são usados para a configuração de valores de características específicas:

- PWM Time Base Registers (PTMRH and PTMRL);
- PWM Time Base Period Registers (PTPERH and PTPERL);
- PWM Special Event Trigger Compare Registers (SEVTCMPH and SEVTCMPL);
- PWM Duty Cycle #0 Registers (PDC0H and PDC0L);
- PWM Duty Cycle #1 Registers (PDC1H and PDC1L);
- PWM Duty Cycle #2 Registers (PDC2H and PDC2L);
- PWM Duty Cycle #3 Registers (PDC3H and PDC3L).

O módulo de PWM deste PIC suporta vários modos de operação que de acordo com a aplicação, são seleccionados através da configuração dos registos referentes a este módulo.

Na figura seguinte pode-se visualizar a função implementada no microcontrolador que configura o módulo de PWM.

```
void ini_PWM (void)
{
    PWMCON0=0b00100000;
    PWMCON1=0b00000001;
    PTCO0=0b00000010;
    PTCO1=0b10000000;
    DTCON = 0b00000001;
    OVDCOND = 0b11111111;
    OVDCONS = 0b00000000;
    FLTCONFIG = 0b00000000;
    PTPERL=0b41;
    PTPERH=0b01;
    PWMCON1bits.UDIS=1;
    PDCOL=0b00;
    PDCOH=0b00;
    PWMCON1bits.UDIS=0;
}
```

Figura 4.21 – Função de Configuração do Módulo PWM.

Da função que se encontra na Figura 4.21 pode-se realçar a configuração das saídas PWM0 e PWM1 para o funcionamento em modo complementar. A base de tempo do módulo de PWM funciona em modo “*Continuous UP/DOWN Count*”.

A frequência de comutação é de 15,55KHz, alcançando-se dessa forma uma resolução para o registo de controlo do *duty-cycle* de 10 bits.

O PIC 18F4431 contém ainda um módulo *ADC* de alta velocidade com 10 bits de resolução que possibilita a conversão de uma entrada analógica para o correspondente valor digital de 10 bits.

Este módulo apresenta as seguintes características:

- Até 200k amostras por segundo;
- 2 Sample-and-Hold para a amostragem simultânea;
- Possibilidade de selecção entre amostragem simultânea ou sequencial;
- Selecção do tempo de aquisição.

Este módulo é configurado através dos seguintes registos:

- A/D Result High Register (ADRESH);
- A/D Result Low Register (ADRESL);
- A/D Control Register 0 (ADCON0);
- A/D Control Register 1 (ADCON1);
- A/D Control Register 2 (ADCON2);
- A/D Control Register 3 (ADCON3);
- A/D Channel Select Register (ADCHS);
- Analog I/O Select Register 0 (ANSEL0);
- Analog I/O Select Register 1 (ANSEL1).

Na figura seguinte pode-se visualizar a função implementada no microcontrolador para a configuração deste módulo.

```
void ini_hsadc (void)
{
    ADCON0=0B00111101;
    ADCON1=0B00011000;
    ADCON2=0B11111110;
    ADCON3=0B10000000;
    ADCHS=0B00000000;
    ANSEL0=0B00001111;
}
```

Figura 4.22 – Função de Configuração do Módulo ADC.

O módulo de ADC encontra-se configurado para funcionar em modo contínuo e efectuar amostragens simultâneas. Foram activados os canais AN0, AN1, AN2 e AN3.

É gerada uma interrupção sempre que cada amostra é escrita no buffer.

Para o controlo do sistema de potência configurou-se ainda, uma interrupção do módulo do ADC (Figura 4.23).

Esta interrupção tem por objectivo efectuar o controlo do conversor CC-CA para que este circuito conceba uma sinusóide de frequência 50Hz com o menor conteúdo harmónico possível.

```
void adc_isr (void);

#pragma code low_vector=0x18

void low_interrupt (void)
{ _asm GOTO adc_isr _endasm
}

#pragma code
#pragma interruptlow adc_isr
```

Figura 4.23 – Interrupção do Módulo ADC.

Um dos canais do módulo ADC efectua a leitura de uma sinusóide de referência com valor eficaz constante e frequência 50Hz.

Esta referência poderá ser obtida da própria rede eléctrica, de modo a poder-se gerar um sinal que esteja em fase com o sinal da rede eléctrica, no entanto para a aplicação em causa utilizou-se a sinusóide gerada pelo digital lab.

Em seguida este sinal necessita de ser condicionado através de sensores de efeito *hall* (quando se pretende ler o sinal da rede eléctrica), e um circuito somador (Figura 4.24).

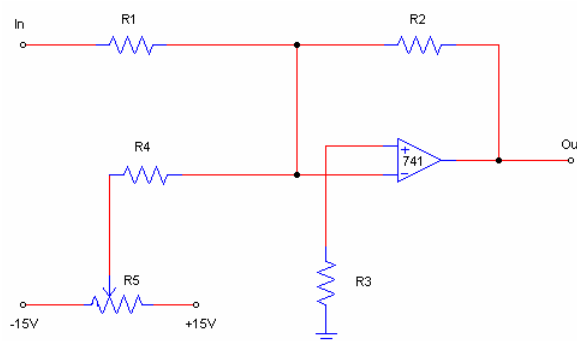


Figura 4.24 – Circuito Somador.

Os valores das resistências que fazem parte do circuito somador são os seguintes:

$$R1 - 1k\Omega$$

$$R2 - 1k\Omega$$

$$R3 - 9,2k\Omega$$

$$R5 - 10k\Omega$$

$$R4 - 3,6k\Omega$$

A saída deste circuito é conectada ao pino do PIC responsável por efectuar a leitura do sinal de referência.

De modo a efectuar a leitura da amplitude do nível CC utilizou-se um transdutor de efeito *hall* (Figura 4.25). Este sensor permite condicionar valores elevados de tensão. No secundário do sensor surge uma tensão com o nível desejado pelo utilizador.

Para a situação em causa, pretende-se que quando surja a tensão máxima na entrada do circuito inversor, esta corresponda a 5V.

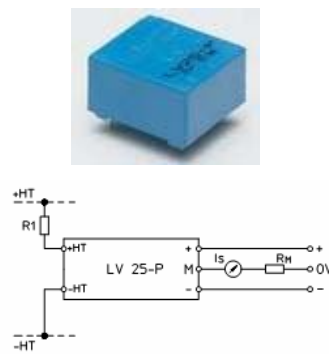


Figura 4.25 – Transdutor de Efeito de *Hall* [LEM].

Uma pequena corrente limitada pela resistência em série ($R1$) é obtida da fonte de tensão a ser medida e é conduzida a circular por um enrolamento primário.

O fluxo magnético criado por esta corrente irá produzir uma corrente no enrolamento secundário que é uma representação fiel da tensão aplicada no lado do primário.

Esta corrente está disponível num pino do transdutor (pino M). Ela é convertida em tensão ao circular pela resistência do lado secundário (R_M).

Assim, quando a tensão de entrada apresenta uma amplitude de pico máxima, obtém-se no secundário do transdutor uma amplitude máxima que é controlada pelo valor da resistência R_M .

Utilizou-se um transdutor LV25-P produzido pela empresa LEM Components com uma resistência de $5k\Omega$ ($R1$) e 200Ω (R_M).

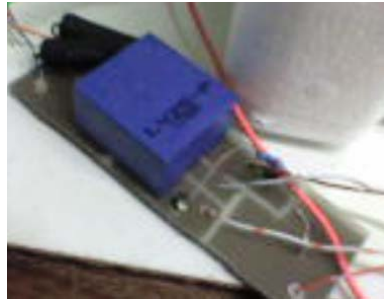


Figura 4.26 – Figura do Sensor de *Hall* Implementado.

Na Figura 4.27 pode-se visualizar o esquema do circuito de controlo que se implementou no laboratório de potência.

A forma de onda, frequência e amplitude do sinal de referência influenciam de uma forma directa o sinal de controlo, ou seja, a forma de onda do sinal de referência será obtida à saída do circuito de potência com a frequência do sinal de referência.

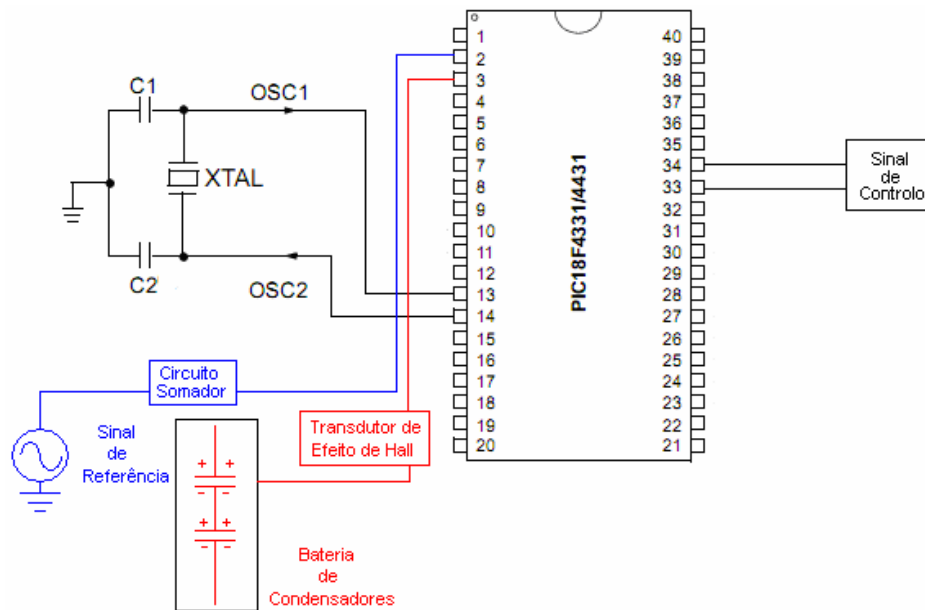


Figura 4.27 – Esquema do Circuito de Controlo.

Relativamente à leitura da tensão à entrada do circuito inversor (V_d), esta será analisada pelo PIC e de acordo com o seu valor, será multiplicado por um valor que se designa por índice de modulação de amplitude m_a .

$$V_0 = m_a * V_d \quad (9)$$

Desta forma consegue-se obter um sinal à saída do circuito de potência (V_0) com um valor eficaz constante.

4.3.2 Acoplador Óptico

O acoplador óptico é um componente bastante utilizado em estruturas onde se deseja um isolamento total do sinal de entrada do sinal de saída. Trata-se de um dispositivo que possui no mesmo encapsulamento, um emissor e um receptor sem ligação eléctrica entre eles. Para a sua implementação utilizou-se o circuito integrado HCPL4503M (Figura 4.28).

Na figura seguinte pode-se visualizar o esquema de ligação do acoplador óptico implementado no laboratório de potência.

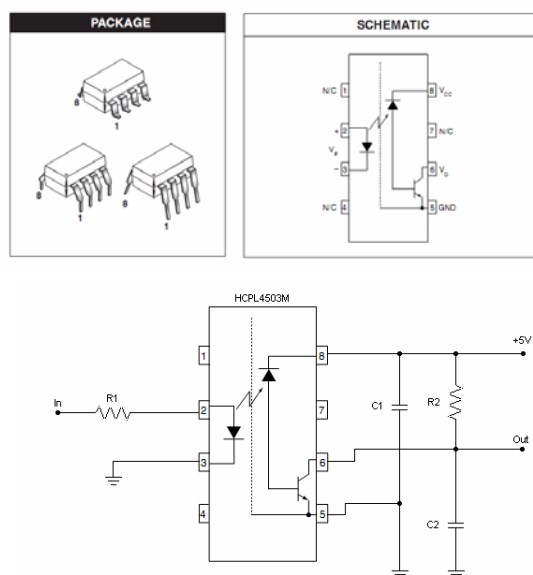


Figura 4.28 – Esquema de Ligação do Acoplador Óptico [Fairchild semiconductor].

Foram implementados 4 esquemas semelhantes ao esquema da figura acima, em que o sinal de entrada vem da saída do PIC como se pode visualizar na próxima figura.

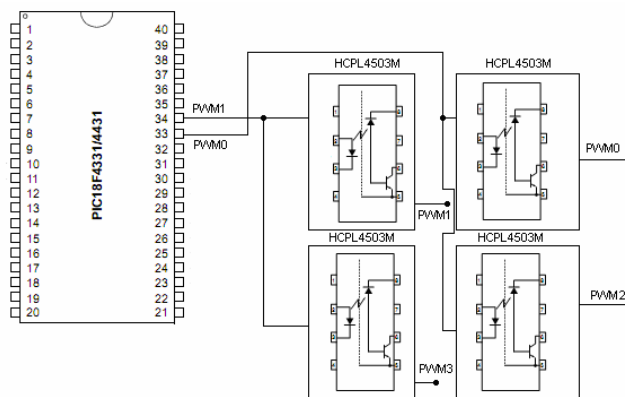


Figura 4.29 – Ligação do Microcontrolador aos Acopladores Ópticos.

O sinal que chega ao acoplador óptico proveniente do microcontrolador, é transmitido por um feixe de luz, mediante um díodo emissor de luz e recebido por um sensor.

Como não existe contacto entre os dois componentes, o isolamento entre os mesmos é teoricamente infinito, no entanto há um limite na tensão máxima que pode haver entre eles. Para o circuito integrado utilizado é de 5kV.

4.3.3 Circuito de *Drive*

O circuito de *drive* realiza a interface entre o circuito de controlo e o circuito de potência.

Este circuito é responsável pela conversão de um nível lógico proveniente do sistema de controlo (0→5V), num sinal analógico capaz de activar o módulo de IGBT's.

O circuito integrado IR2130 efectua o accionamento dos interruptores de potência, podendo ser utilizado até níveis de tensão na ordem dos 600V.

Na próxima figura encontra-se as ligações típicas deste integrado.

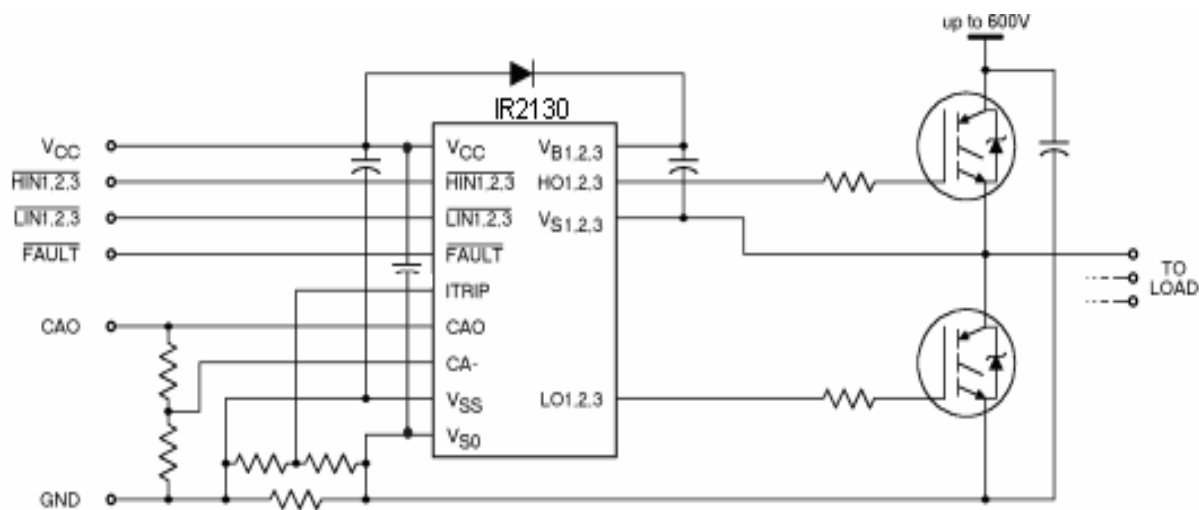


Figura 4.30 – Ligações Típicas do CI IR2130 [International Rectifier].

Este circuito possui entradas separadas onde são ligados os sinais de controle gerados pelo circuito de controle e canais de saída, também eles separados, que são aplicados nos interruptores de potência. Apresenta uma capacidade de corrente de pico em cada saída de 420mA (*negative edge*) e 200mA (*positive edge*). Os tempos de subida e descida dos sinais de controle são de 100nS para o tempo de subida e 50ns para o

tempo de descida. Os tempos de atraso na propagação dos sinais na entrada em condução e no bloqueio encontram-se na ordem dos 675ns e 425ns respectivamente.

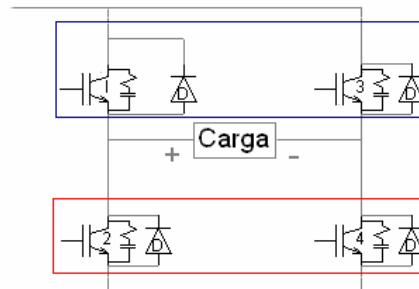


Figura 4.31 – Esquema do Circuito Inversor Implementado.

O circuito conversor CC-CA é constituído por quatro semicondutores. Na Figura 4.31 pode-se visualizar que dois semicondutores (zona a azul) se encontram no nível superior e os restantes semicondutores no nível inferior (zona vermelha).

Assim compreende-se facilmente que a activação do nível superior é diferente da activação do nível inferior uma vez que é necessário gerar uma fonte de alimentação flutuante (princípio de *bootstrap*) com um diódo e um condensador para a activação dos IGBT's do nível superior. Contudo, para a activação dos semicondutores do nível inferior isso não é necessário.

O circuito integrado IR2130 possibilita a activação do andar superior e inferior, sendo apenas necessário, ligar o respectivo diódo e condensador para cada semicondutor do nível superior, como se pode verificar na figura abaixo (no anexo VII pode-se visualizar o esquema das ligações do circuito IR2130 que possibilita a activação dos semicondutores).

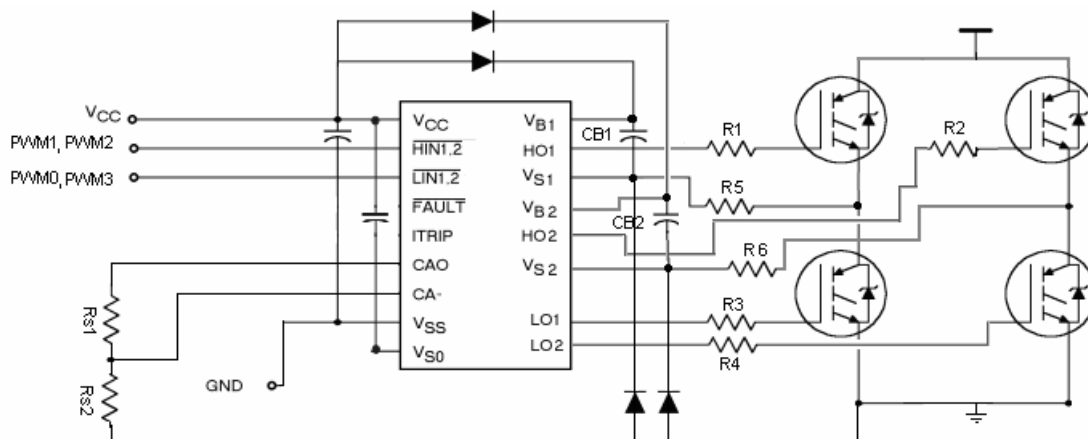


Figura 4.32 – Esquema de Ligação do Circuito de Drive IR2130.

Os sinais que provém do circuito que contém o acoplador óptico, PWM0, PWM1, PWM2 e PWM3 são ligados a L1, H1, H2 e L2 respectivamente.

5 Resultados Experimentais

Neste capítulo serão apresentados resultados experimentais do modelo implementado. Pode-se visualizar as formas de onda, espectros e medições mais importantes.

Reconhece-se que os objectivos não foram totalmente alcançados, no entanto a experiência adquirida foi extraordinariamente compensatória e proveitosa.

5.1 Características do Modelo Utilizado

Na Figura 5.1 pode-se visualizar o diagrama de blocos do modelo implementado no laboratório de potência.

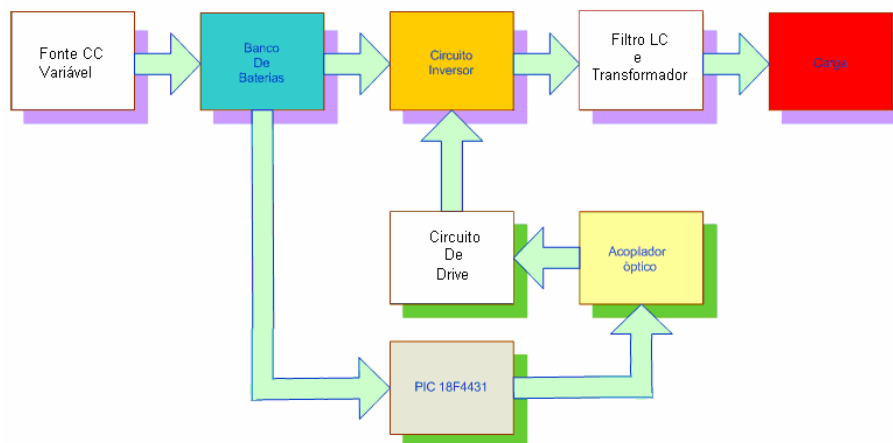


Figura 5.1 – Diagrama de Blocos do Modelo Implementado.

Inicialmente testou-se o sistema, com o regulador do gerador eólico ajustado para 48V. Dessa forma, admitiu-se que a tensão contínua fornecida pela fonte de tensão varia de 40V a 60V. No entanto surgiram interferências causadas pelo circuito inversor, que não permitiam realizar *debug*. Mediante esta dificuldade, alterou-se a regulação do gerador eólico para 36V.

Para esta condição, a fonte CC variável fornece uma tensão contínua que varia entre 30V e 40V.

Na Figura 5.2 pode-se visualizar a forma de onda da tensão nos terminais do transformador com uma carga puramente resistiva (1,02 k Ω).

Para a situação em que a fonte CC apresenta aos seus terminais 30V, obteve-se à saída do sistema aproximadamente 74V (valor eficaz), como de pode constatar na figura.

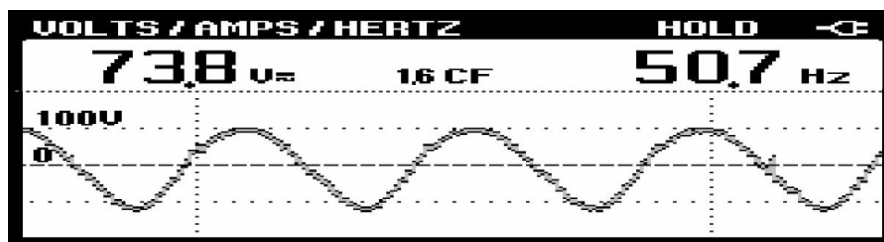


Figura 5.2 – Forma de Onda da Tensão à Saída do Sistema (30V).

Na Figura 5.3 mostra-se o conteúdo harmónico da forma de onda da tensão obtida e apresentada na figura anterior.

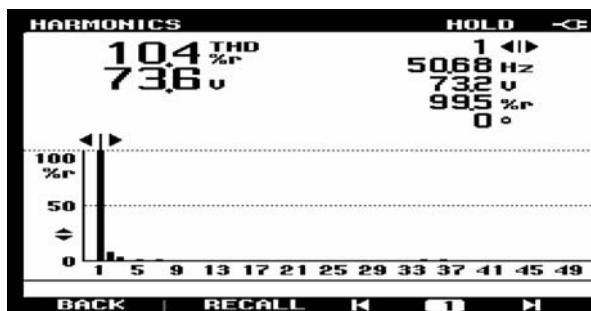


Figura 5.3 – Análise Harmónica (30V).

Na Figura 5.4 encontra-se a forma de onda da tensão obtida à saída do sistema para uma carga puramente resistiva (1,02 k Ω). Para esta situação, a fonte CC fornece 40V e obteve-se à saída do sistema aproximadamente 79V (valor eficaz).

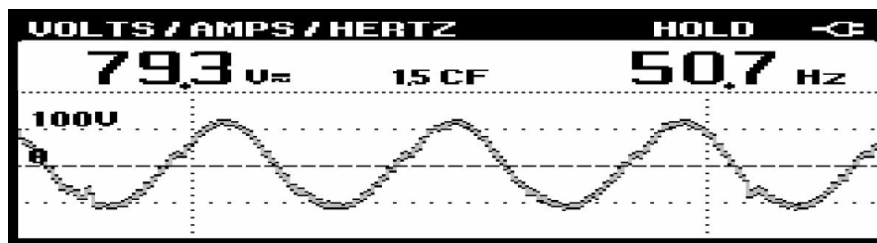


Figura 5.4 – Forma de Onda da Tensão (40V).

Por fim, na Figura 5.5 pode-se visualizar o conteúdo harmónico da forma de onda da Figura 5.4 para uma tensão de entrada de 40V.

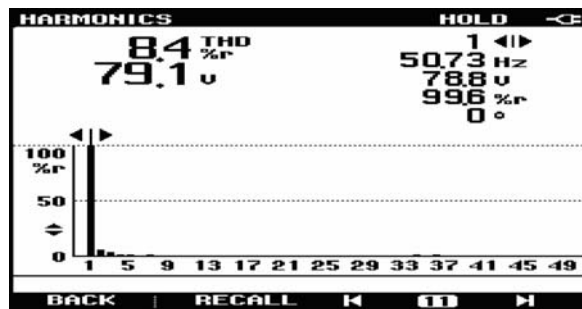


Figura 5.5 – Análise Harmónica (40V).

Relativamente ao sinal de saída, não foi possível estabilizar a tensão de saída, num valor firme. Acabando por ter uma oscilação de 5V (valor eficaz).

Também não se conseguiu obter os 230V eficazes à saída do sistema uma vez que não estava disponível um transformador com a razão de transformação adequada para permitir a elevação de tensão necessária.

6 Conclusões

Este trabalho consistiu no desenvolvimento de um sistema electrónico de potência com o objectivo de ligar um gerador eólico à rede eléctrica. O gerador eólico destina-se a carregar baterias e possui um gerador síncrono de ímanes permanentes, cuja saída é rectificada e introduzida num regulador de tensão. A ligação à rede eléctrica exige a introdução de um inversor comutado que faz a conversão de corrente contínua (CC) em corrente alternada (CA). O circuito conversor CC/CA foi controlado por um microcontrolador que permite o controlo da frequência, fase e amplitude de saída do circuito inversor de forma a adequar as características da onda de tensão produzida pelo gerador eólico.

Relativamente à implementação deste trabalho, registaram-se dificuldades no desenvolvimento do inversor para as circunstâncias iniciais (regulador ajustado para 48V), que levaram à alteração do nível da tensão CC (regulador ajustado para 36V).

Quanto ao circuito programador de PIC's e microcontrolador, surgiram contratempos relacionados com o funcionamento da placa e a programação do microcontrolador, que levaram muito tempo a ser resolvidos.

Por fim surgiram problemas na ligação do transformador que tinha por objectivo elevar o nível de tensão gerada pelo circuito inversor e filtrada pelo filtro LC. Assim foi necessário efectuar vários ajustes na amplitude da referência que o microcontrolador usava para efectuar o controlo do circuito inversor.

Os objectivos destes trabalhos não foram totalmente conseguidos, uma vez que se alterou o ajuste do regulador de 48V para 36V e não foi possível elevar a tensão para 230V, pois não se dispunha de um transformador que permitisse tal elevação.

Porém realizou-se trabalho de simulação do modelo. Implementou-se um circuito inversor electrónico de potência de raiz e uma placa programadora de PIC's de forma a ser possível implementar o sistema de controlo no microcontrolador seleccionado.

Efectuou-se programação em C, estudo de várias técnicas de PWM, e análise e dimensionamento de filtros.

Para todas estas actividades surgiram problemas que levaram tempo a ser resolvidas. Devido a isso não foi possível alcançar os objectivos inicialmente propostos, mas o mais importante é o conhecimento teórico e prático adquiridos com este projecto. Porque os inversores são circuitos muito importantes e utilizados no controlo da velocidade de motores de indução, fontes de alimentação ininterruptíveis, variadores de frequência, fontes de alimentação móveis, aquecimento por indução, etc.

Os microcontroladores são circuitos integrados muito utilizados em circuitos que requerem autonomia e capacidade de decisão mediante factores externos. São utilizados em automóveis, robots, aplicações médicas, etc. Possuem um grande número de periféricos disponíveis num único *chip*, motivo pelo qual, são muito atractivos em projectos electrónicos.

Por fim, a simulação é fundamental, atractiva e indispensável, pois permite a realização de testes a um sistema em várias situações de funcionamento. Desta forma diminui-se os custos e tempo de investigação porque pode evitar possíveis danos na implementação do sistema.

6.1 Propostas de Trabalho Futuro

Como sugestão de trabalho futuro, propõe-se a implementação de um sistema MPPT (*Maximum Power Point Tracker*) para o gerador eólico, de forma a extrair o máximo de energia possível e disponível em cada instante.

Constatou-se que o uso de um transformador pode acarretar dificuldades, logo sugere-se a mudança da interface utilizada. O uso de um circuito conversor *step-up*, pode facilitar a tarefa de manter constante a saída do sistema.

Como foi visto na simulação, aquando da ligação de uma carga não linear (rectificador de onda completa com um filtro capacitivo), verifica-se uma distorção na forma de onda da tensão de alimentação, causada pelo consumo de corrente não sinusoidal da carga. Assim, sugere-se a utilização de um Filtro Activo Paralelo como interface entre o gerador eólico e a rede eléctrica, porque desta forma efectua-se a compensação dinâmica dos harmónicos de corrente mas também a correcção do factor de potência, evitando a degradação da forma de onda da tensão.

7 Referências Bibliográficas

WWW

- [DanishAssoc] Danish Wind Turbine Manufacturers Association, <http://www.windpower.dk/>
[EWEA] EWEA – The European Wind Energy Association, <http://www.ewea.org>
[Nordex] Nordex AG, <http://www.nordex-online.com>
[WindPower] Windpower Monthly News Magazine, <http://www.wpm.co.nz/>

Tradicional

- [1] Recursos não renováveis, In Diciopédia X [DVD-ROM], Porto: Porto Editora, 2006, ISBN: 978-972-0-65262-1
[2] Recursos renováveis, In Diciopédia X [DVD-ROM], Porto: Porto Editora, 2006, ISBN: 978-972-0-65262-1
[3] Crise Mundial dos Anos 70, In Diciopédia X [DVD-ROM], Porto: Porto Editora, 2006, ISBN: 978-972-0-65262-1
[4] Tiago A. Sousa, Ricardo L. Pregitzer, Júlio S. Martins e João L. Afonso, “Estudo do Panorama das Energias Renováveis na União Europeia e Sugestões para Portugal”, ENER’05 – Conferência sobre Energias Renováveis e Ambiente em Portugal, Figueira da Foz, Portugal, 5-7 de Maio de 2005, ISBN: 972-8822-02-02, pp. 1.87-1.92.
[5] Paula Antunes, Ana Salgueiro, Rui Santos, Gonçalo Lobo, João Almeida e Nuno Carvalhais, “Estudo sobre Sector Eléctrico e Ambiente – 1º Relatório”, Entidade Reguladora do Sector Eléctrico, Centro de Economia Ecológica e Gestão do Ambiente, DCEA FCT/UNL, 2000.
[6] Afonso Vianna, Leonardo dos Santos Reis Vieira e Marcos Vinícius G. Nascimento, “Manual de Aplicação de Sistemas Descentralizados de Geração de Energia Elétrica para projetos de Eletrificação Rural – Energia Eólica – versão 1”, Relatório Técnico ADG-A / PER – 785/00, 2000.
[7] José Alberto Cunha Barros, “Cooperação de Fontes de Energia Renovável para Providenciar Serviços de Sistema à Rede Eléctrica de Distribuição”, Projecto,

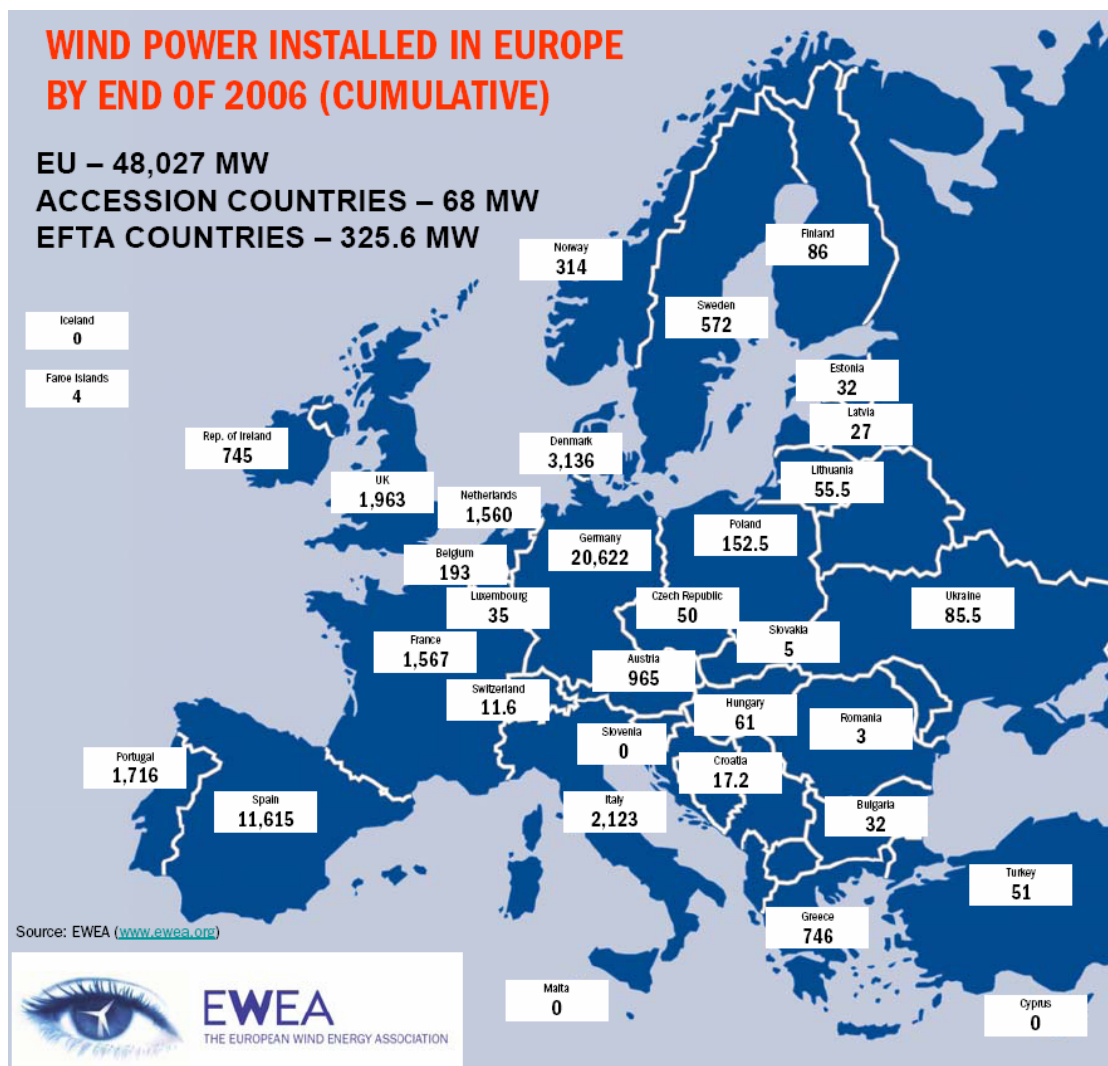
- Seminário ou Trabalho de Fim de Curso, LEEC – 2006/07, DEEC – FEUP, Julho de 2007.
- [8] Rui M.G. Castro, “Energias Renováveis e Produção Descentralizada”, Universidade Técnica de Lisboa, Instituto Superior Técnico, DEEC / Área Científica de Energia, Março de 2007 (edição 3).
- [9] Luís Machado, Telmo Santos, Mário Campos e Luís Pereira, “Energia Eólica”, Complementos de Electrónica de Potência – 2005/2006 – Trabalho 5, Universidade do Minho – Mestrado Integrado Engenharia Electrónica Industrial e Computadores.
- [10] Manuel João Sepúlveda Mesquita de Freitas, Apontamentos de SISTEMAS DE ENERGIA, Mestrado Integrado Engenharia Electrónica Industrial e Computadores, Departamento de Electrónica Industrial, Universidade do Minho, Guimarães, Portugal.
- [11] Vasco de Brederode, Frutuoso Domingues e Penaforte e Costa, “Energia Eólica”, Novas Energias, A Escola e a Comunidade, Universidade do Minho, Braga, Fevereiro 1985.
- [12] Pedro Rosas e Ana Estanqueiro, “Guia de Projecto Eléctrico de Centrais Eólicas, volume 1”, Projecto Eléctrico e Impacto de Centrais Eólicas na Rede Eléctrica, Recife 2003.
- [13] Katia V. D. de Almeida, Talvanes M. Oliveira, Isaac S. de Freitas, Cursino B. Jacobina e Edison R. C. da Silva, “Conversor cc/ca Monofásico Multinível com Controle de Corrente”
- [14] Ned Mohan; Tore M. Undeland; William P. Robbins, “Power Electronics Converters, Applications, and Design”, John Wiley & Sons, Inc., Second Edition 1995, ISBN: 0-471-58408-8
- [15] Ricardo Luís Guerreiro Pregitzer, “Simulações Computacionais de Filtros Activos de Potência em Condições Reais de Operação”, Dissertação de Mestrado submetida ao Conselho Científico da Escola de Engenharia da Universidade do Minho como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre em Electrónica Industrial. Guimarães, Portugal, Setembro de 2006.
- [16] Philip C. Todd, “Snubber Circuits: Theory, Design and Application”, UNITRODE CORPORATION, Maio, 1993.
- [17] Robson Schaeffer, Curso de Técnico de Eletrônica de nível médio, com ênfase em manutenção de Telemática, UNIVATES, Disciplina: Eletrônica Industrial.
- [18] Manuel João Pinto de Almeida, “Caracterização do Desempenho de Pequenos Aerogeradores de Eixo Horizontal ”, Tese de Mestrado em Engenharia Mecânica, Universidade do Minho, Guimarães, Portugal, Novembro de 2007.
- [19] Southwest Windpower; AIR-X Land Manual.
- [20] STMicroelectronics; STGB14NC60KD datasheet.

- [21] Felipe Samuel de Bona, “AS MICROTURBINAS E A GERAÇÃO DISTRIBUÍDA”, Estudante de Mestrado da Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação da Unicamp (FEEC/UNICAMP).
- [22] LEM; Voltage Transducer LV-25P datasheet.
- [23] Fairchild semiconductor; HCPL4503M datasheet.
- [24] International Rectifier, IR2130 3-Phase Bridge Driver datasheet.

Anexos

Anexo 1

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



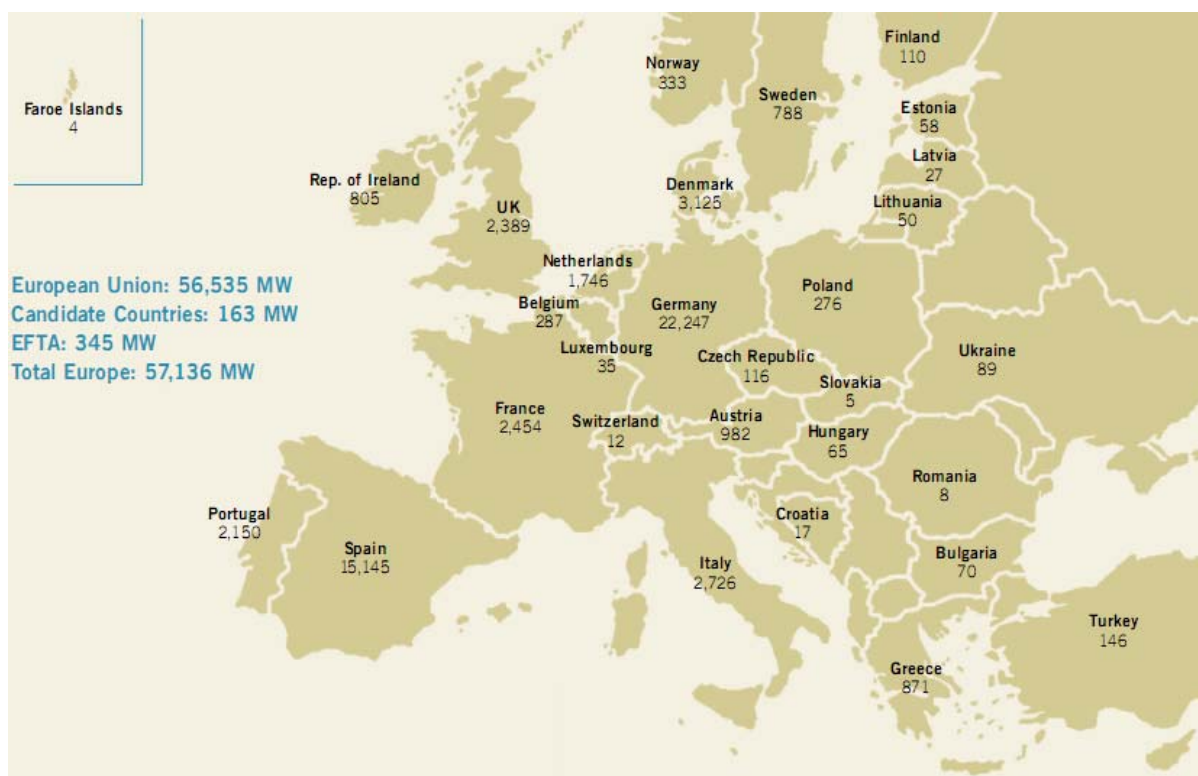
Anexo 2

Potência Eólica instalada na União Europeia no final de 2007 em MW (fonte: Ewea).

	End 2006	Installed 2007	End 2007
EU Capacity (MW)			
Austria	965	20	982
Belgium	194	93	287
Bulgaria	36	34	70
Cyprus	0	0	0
Czech Republic	54	63	116
Denmark	3,136	3	3,125
Estonia	32	26	58
Finland	86	24	110
France	1,567	888	2,454
Germany	20,622	1,667	22,247
Greece	746	125	871
Hungary	61	4	65
Ireland	746	59	805
Italy	2,123	603	2,726
Latvia	27	0	27
Lithuania	48	7	50
Luxembourg	35	0	35
Malta	0	0	0
Netherlands	1,558	210	1,746
Poland	153	123	276
Portugal	1,716	434	2,150
Romania	3	5	8
Slovakia	5	0	5
Slovenia	0	0	0
Spain	11,623	3,522	15,145
Sweden	571	217	788
UK	1,962	427	2,389
Total EU-12	419	263	675
Total EU-15	47,651	8,291	55,860
Total EU-27	48,069	8,554	56,535

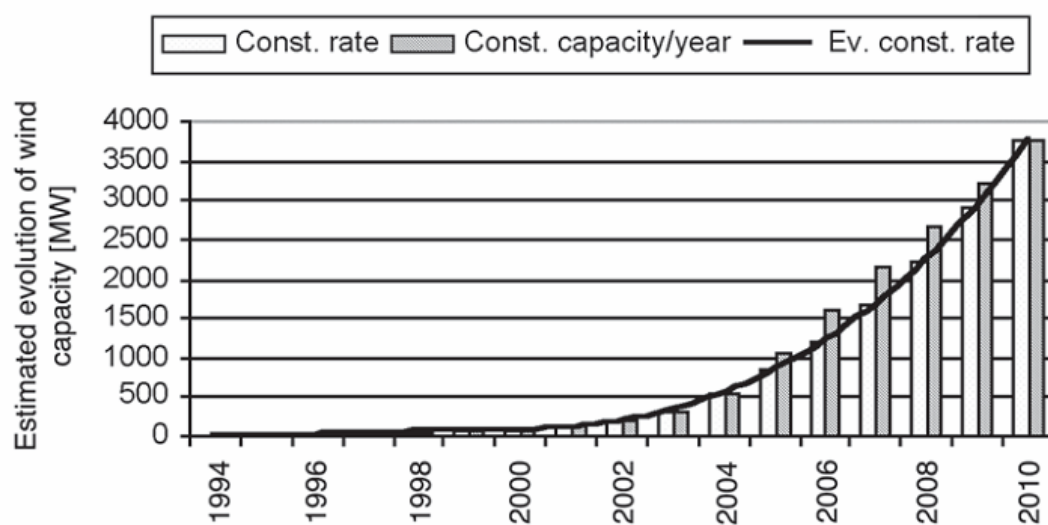
Anexo 3

Potência eólica instalada na União Europeia no final de 2007 (fonte: Ewea).



Anexo 4

Tendência da Potência Eólica Instalada em Portugal.



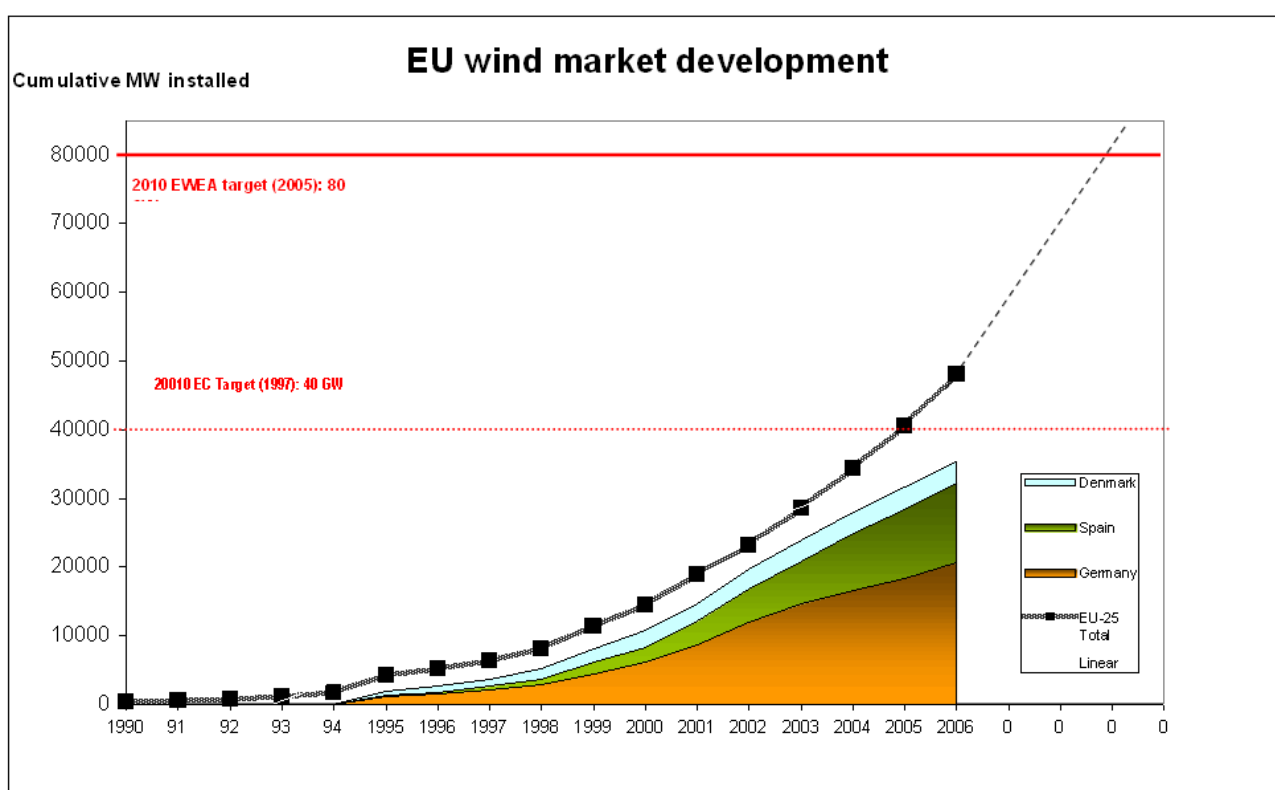
Anexo 5

Objectivos para a capacidade nacional planeada em 2010 e 2013 comparando com o estado da potência eólica instalada em 2005 (fonte: DGGE, INETI).

Table 2 Objectives for national planned capacity in 2010 and 2013 compared to status in 2005			
RES type	Operating in 2005 [MW]	Goal 2010 [MW]	Goal 2013 [MW]
Wind	1,060	3,750	5,100
Small Hydro (<= 10 MW)	272	400	400
Biomass	12	150	150
Biomass (with cogeneration)	345	n.a.	n.a.
Solid waste	88	130	130
Biogas	7.1	50	50
Ocean	0.5	50	50
Photovoltaic	2.3	150	150
Eq. Solar thermo (0.7 kW = 1m ²)	193	700	700
Large Hydro (>10 MW)	4,476	5,000	5,000
Geothermal	18	n.a.	n.a.
Total	6,474	10,380	11,730
Source: DGGE, INETI			

Anexo 6

Desenvolvimento do mercado eólico na União Europeia (fonte: Ewea).



Anexo 7

Esquema de Ligação do Circuito de Drive IR2130.

