

FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO PORTO



Ligação à rede de geradores eólicos

Francisca Maria de Sá Dias Pedro

Mestrado em Engenharia Eletrotécnica e de Computadores

Orientador: Carlos João Rodrigues Costa Ramos

14 de outubro de 2022

Resumo

O presente relatório tem como intuito apresentar o plano teórico para o desenvolvimento de um sistema que realize a interface entre a rede elétrica e um gerador eólico.

O primeiro componente a estudar é o gerador, sendo que se deve comparar dois tipos de geradores: máquinas assíncronas e síncronas, analisando as suas características, vantagens e desvantagens. De facto, aponta-se para que a melhor solução seja um gerador síncrono de ímanes permanentes.

De seguida, será necessário analisar o conversor VSC. Repare-se que este terá dois propósitos, realizando duas funções diferentes. Uma das funções corresponde à ligação do gerador ao barramento DC, ou seja, este irá debitar a energia produzida pelo gerador no barramento DC. Já a segunda será a ligação do barramento DC à rede elétrica, o que significa que este recebe a energia que se encontra no barramento DC, tendo sido retirada do gerador através do primeiro conversor, e modela-a de forma a que seja colocada na rede elétrica.

Abstract

Here goes the abstract written in English.

This report aims to present the theoretical plan for developing a system to interface between the grid and a wind generator.

The first component to be studied is the generator, being that two types of generators should be compared: asynchronous and synchronous machines, analysing their characteristics, advantages and disadvantages. In fact, it is pointed out that the best solution is a permanent magnet synchronous generator.

Next, the VSC converter must be analysed. Note that this will have two purposes, performing two different functions. One of the functions corresponds to the connection of the generator to the DC bus, i.e., it will debit the energy produced by the generator to the DC bus. The second will be the connection of the DC busbar to the grid, which means that it receives the energy that is on the DC bus bar, having been removed from the generator through the first converter, and shapes it so that it can be placed on the grid.

Agradecimentos

Ao longo desta jornada de 5 anos, estive sempre acompanhada por pessoas extremamente importantes que me marcaram e apoiaram sempre, sendo que, sem estas, a realização desta dissertação não teria sido possível. Assim, gostaria de lhes prestar um agradecimento especial.

À minha Mãe por me dar sempre os melhores conselhos e me puxar para cima nos momentos mais difíceis. Ao meu Pai, o Sr. Engenheiro, que tem sido o meu modelo e me tem guiado, ao longo deste meu percurso em Engenharia. Ambos me proporcionaram tudo do bom e do melhor, incluindo uma educação de prestígio.

À minha família por acreditar sempre em mim e por mostrar, constantemente, o seu orgulho.

Às minhas melhores amigas Kika e Inês por me terem acompanhado, desde os três anos, e estarem sempre presentes, apoiando-me incondicionalmente.

A todos os meus amigos da faculdade, que se foram juntando a mim, por tornarem este longo percurso inesquecível e sempre cheio de aventuras. É inexplicável o que vivemos e não podia ter pedido melhores pessoas para o viverem comigo, pelo que espero que a nossa amizade perdure por muitos mais anos.

Ao orientador Carlos João Ramos pela paciência e ajuda prestada, ao longo deste percurso exigente e trabalhoso.

Francisca Pedro

*“You will face many defeats in life,
but never let yourself be defeated.”*

Maya Angelou

Conteúdo

1	Introdução	1
2	Energia Eólica	3
2.1	Introdução	3
2.2	Principais Características do Vento	4
2.3	Turbina Eólica	4
2.4	Curvas de <i>Performance</i>	5
2.4.1	Curva de <i>Performance</i> $C_p(\lambda)$	5
2.5	Turbinas Eólicas de Velocidade Fixa	6
2.6	Turbinas Eólicas de Velocidade Variável	7
2.7	Componentes do Sistema de Conversão de Energia Eólica	7
2.8	Principais Componentes	8
2.8.1	Rotor	9
2.8.2	Número de Pás	9
2.8.3	Gerador	9
2.8.4	Transmissão	10
2.8.5	<i>Design</i> de Arrastamento	10
2.8.6	<i>Design</i> de Elevação	10
2.8.7	Razão da Velocidade de Ponta	11
2.8.8	Torres	11
3	Análise dos Diferentes Tipos de Geradores	13
3.1	Introdução	13
3.2	Princípio Básico de Funcionamento dos Geradores Síncronos e Assíncronos	13
3.3	Geradores Assíncronos	14
3.3.1	Máquina de Indução Duplamente Alimentada	14
3.3.2	Máquina de Indução com Rotor em Gaiola	16
3.4	Gerador Síncrono	17
3.4.1	Gerador Síncrono de Ímanes Permanentes	17
4	Conversor de Ligação à Rede Elétrica	21
4.1	Introdução	21
4.1.1	Conversores <i>Back-to-back</i> PWM	21
4.2	Técnicas de Modulação PWM	22
4.2.1	Modulação PWM Vetorial	23
4.3	Conversor VSC	23
4.3.1	Características do Conversor VSC	23
4.3.2	Princípio de Funcionamento do Conversor VSC	24

4.4	Transformação de Quadros de Referência	26
4.4.1	Generalidades	26
4.4.2	Modelo do Quadro de Referência dq	29
4.4.3	Aplicação do Conversor VSC ao Sistema de Turbina Eólica	32
5	Ligação do Conversor ao Gerador	35
5.1	Modelo Vetorial dos Geradores de Ímanes Permanentes	35
5.1.1	Princípio de Controlo de Corrente com o Eixo d a Zero - ZDC	37
5.1.2	Modelação ao nível do sistema do algoritmo de controlo orientado para o campo	38
6	Conclusão	43
	Referências	45

Lista de Figuras

2.1	Cp: Curva de Performance λ de uma turbina moderna de três lâminas [4].	6
2.2	Cp: Curva de Performance λ de uma turbina moderna de três lâminas, tendo em conta as perdas [4].	6
2.3	Diagrama de blocos representativo de um sistema de produção de energia eólica numa turbina. Baseada em [2].	8
2.4	Esquema dos componentes de um Turbina Eólica [5].	9
2.5	Eixos existentes numa turbina eólica [6].	12
3.1	Curvas características binário - velocidade para diferentes valores de resistência do rotor: $R_{r4} > R_{r3} > R_{r2} > R_{r1}$ [8].	14
3.2	Esquema de ligações da máquina de indução duplamente alimentada [8].	15
3.3	Característica binário-velocidade da máquina de indução de rotor em gaiola [8].	16
3.4	Potência reativa, Q , consumida em função da potência ativa gerada, P [8].	17
4.1	Esquema <i>a</i> de gerador de ímanes permanentes com conversores <i>back-to-back</i> PWM [11].	21
4.2	Esquema <i>b</i> de gerador de ímanes permanentes com conversores <i>back-to-back</i> PWM [11].	22
4.3	Ligação do Conversor VSC à Rede Elétrica. Baseado em [14].	24
4.4	Modelo de ligação do Conversor VSC por fase. Baseado em [14].	25
4.5	Tensão em coordenadas trifásicas [15].	27
4.6	Transformada de <i>Clarke</i> para um sistema a três fios [15].	28
4.7	Transformada de <i>Park</i> para um sistema a três fios [15].	28
4.8	Sistema em estudo.	29
4.9	Sistema em estudo, recorrendo a um filtro LCL.	31
4.10	Diferentes transferências de potência realizadas pelo conversor da rede, tendo em conta as condições diferentes de funcionamento (V_L corresponde à queda de tensão ao longo do filtro da rede [13].	33
5.1	Gerador síncrono de ímanes permanentes de rotor cilíndrico. Baseado em [17].	35
5.2	Controlo vetorial da corrente [18].	36
5.3	Diagrama vetorial espacial de um gerador síncrono com controlo ZDC [19].	38
5.4	Controlador PI em paralelo [20].	39
5.5	Alinhamento do vetor fluxo magnético com o torque a zero [18].	40
5.6	Alinhamento do vetor fluxo magnético com o torque máximo [18].	40

Abreviaturas e Símbolos

f.e.m.	Força Eletromotriz
CC	Curto-Circuito
CA	Circuito Aberto
Cp	Coeficiente de Potência
VSC	<i>Voltage Source Converter</i>
DC	Corrente Contínua
AC	Corrente Alternada
PWM	<i>Pulse Width Modulation</i>
Controlador PI	Controlador Proporcional Integral
MPPT	<i>Maximum Power Point Tracking</i>
PLL	<i>Phase Lock Loop</i>
rpm	Rotações por Minuto
QRR	Quadro de Referência Rotativo
ZDC	<i>Zero d-axis Current Control</i>
s	Escorregamento
STATCOM	<i>Static Synchronous Compensator</i>

Capítulo 1

Introdução

O tema proposto centra-se nas áreas de Energia e Automação. De facto, sabe-se que, de modo a ser possível implementar um gerador eólico é necessário, previamente, ligá-lo à rede elétrica para que a energia produzida possa ser utilizada. Por conseguinte, será necessário escolher e dimensionar os diversos elementos constituintes do circuito em causa.

Numa primeira fase, é necessário realizar uma apresentação geral sobre a energia eólica, de modo a promover uma melhor perceção de certos conceitos básicos essenciais à compreensão da dissertação em causa. Alguns desses conceitos correspondem à turbina eólica, principais componentes da mesma, curvas de *performance*, entre outros.

Seguidamente, será apresentada uma contextualização relativa aos geradores, algo fundamental, na medida em que permitirá conhecer não só os princípios de funcionamento e os principais constituintes, mas também os diversos tipos existentes (máquinas síncronas e assíncronas) e as respetivas características gerais.

Já no Capítulo 4, haverá oportunidade para explorar o conversor de ligação à rede (conversor VSC), onde será explanado o seu princípio funcionamento, as suas características e, ainda, o seu comportamento aquando da sua aplicação num Sistema de Turbina Eólica.

No capítulo seguinte, explorar-se-á novamente a ligação do conversor VSC, mas desta vez ao gerador. Aqui será abordado o modelo vetorial dos geradores de ímanes permanentes.

Por fim, resta apresentar as conclusões retidas após o estudo realizado, justificando quais os melhores componentes a utilizar, de modo a tornar o processo de geração de energia elétrica mais eficiente e inovador.

Capítulo 2

Energia Eólica

2.1 Introdução

O vento é considerado uma fonte de energia limpa e inesgotável, devendo a sua origem a três acontecimentos distintos: o aquecimento desigual atmosférico a partir do sol, a rotação da terra e as irregularidades da superfície terrestre. De facto, deve ter-se em conta alguns fatores capazes de influenciar os padrões de fluxo de vento, sendo esses as condições ambientais, os terrenos e os edifícios. Assim sendo, aquando da recolha do fluxo de vento, por parte das turbinas eólicas, torna-se possível a geração de eletricidade.

O processo de produção de eletricidade pelas turbinas eólicas pode ser descrito através da conversão da energia cinética das pás em energia mecânica dentro das primeiras. Posto isto, a energia mecânica mencionada pode ser utilizada em diversos processos como, por exemplo, o bombeamento de água, porém se se recorrer a um gerador, a energia em causa, pode ser convertida em energia elétrica, como já foi referido. Adicionalmente, sabe-se que tal como nas hélices dos aviões, as turbinas transformam o movimento linear do ar em movimento circular, alimentando o gerador responsável por fornecer corrente.

Quanto à estrutura física da turbina eólica, importa destacar que estas podem ser adquiridas com tamanhos diferentes, o que, consequentemente, leva a classificações distintas de potência. Deste modo, é exequível salientar alguns modelos:

- As turbinas de escala de utilidade¹ com um intervalo de potência entre 50 e 750 kW;
- As turbinas individuais de dimensões reduzidas com potências abaixo dos 50kW, que podem ser utilizadas para aplicações domésticas.

¹Refere-se a instalações ou equipamentos elétricos, cujo funcionamento, enquanto entidade individual, causaria uma alteração notável no funcionamento de uma utilidade pública. Por exemplo, um único painel fotovoltaico doméstico, por si só, não tem qualquer efeito perceptível no funcionamento de uma rede elétrica [1].

2.2 Principais Características do Vento

O ar presente no nosso planeta pode ser modelado como um enorme motor de calor. Com efeito, há zonas na atmosfera em que a pressão do ar, por vezes, é mais elevada ou reduzida do que o esperado. Por conseguinte, são dois os fenómenos que podem ocorrer devido a estas diferenças de pressão do ar: o surgimento de gases e, ainda, a circulação de vento de zonas de maior pressão para zonas de menor pressão. Aquando da relocação do vento, este movimenta-se no sentido contrário aos ponteiros do relógio, estando sujeito a algumas forças, entre as quais uma força de tensão gradiente f_p com direção para o interior, uma força *Coriolis* f_c ² com direção para o exterior e, por último, uma força centrífuga f_g , também com direção para fora [2].

De modo a que o vento seja capaz de continuar a mover-se no sentido oposto aos ponteiros do relógio, é essencial que as forças estejam equilibradas. Deste modo, chega-se à expressão que se segue, onde o vento é designado por fluxo de vento de gradiente :

$$f_p = f_c + f_g \quad (2.1)$$

Assim, há que projetar uma turbina eólica, tendo em conta as características do vento. Logo, repare-se nos parâmetros característicos que uma turbina eólica deve ter:

- Potência nominal da máquina deve ser não só a potência nominal do gerador, mas também a potência máxima desenvolvida pelo rotor.
- Velocidade de corte u_c corresponde à velocidade mínima do vento, na qual a máquina começa o movimento de rotação.
- Velocidade nominal u_R representa a velocidade mínima do vento em que a máquina desenvolve potência nominal.
- Velocidade de enrolamento u_F é a velocidade máxima do vento, na qual a máquina gera potência, sendo que a mesma para quando esta velocidade é ultrapassada.

2.3 Turbina Eólica

Como já foi aludido anteriormente, o princípio de funcionamento das turbinas eólicas consiste na produção de eletricidade através da transformação da energia cinética das pás em energia mecânica rotativa das pás do rotor da turbina. Desta forma, uma das configurações físicas mais usuais das turbinas é a que possui a hélice de eixo horizontal com 2 ou 3 pás montadas no topo de uma torre. No entanto, repare-se que a seleção do número de pás da turbina eólica não se trata de uma escolha de *design* propriamente fácil, visto que os sistemas com três pás são mais

²A força de *Coriolis* é uma força fictícia utilizada, ocasionalmente, com o propósito de simplificar cálculos que envolvam sistemas rotativos, tais como o movimento do ar, da água e de projéteis, acima da superfície da Terra em rotação. Esta força caracteriza-se por ser uma força de inércia que atua juntamente com a força de arrastamento e a força centrífuga, sobre um corpo cujo sistema de referência se encontra em rotação. É perpendicular ao plano definido pelo eixo de rotação e pelo vetor velocidade [3].

dispendiosos do que os de duas pás. Em oposição, os segundos implicam que os geradores tenham de funcionar a velocidades de rotação mais elevadas que as dos primeiros.

Sendo assim, observe-se a expressão que representa a potência do vento num determinado local, perpendicular à direção do fluxo de vento:

$$P_t = \frac{1}{2} \rho A C_p v^3 \quad (2.2)$$

em que P representa a potência da turbina, ρ corresponde à densidade do ar, A é a área varrida pela turbina, v corresponde à velocidade do vento e C_p representa o coeficiente de potência que descreve a fração de vento capturada pela turbina eólica.

2.4 Curvas de Performance

Binário, potência e impulso são os três indicadores que possibilitam uma avaliação do desempenho de uma turbina eólica, aquando da variação da velocidade do vento. Naturalmente, é a potência que deduz a quantidade de energia retida pelo rotor, enquanto o binário é responsável por delimitar o tamanho da caixa de velocidades. Relativamente ao impulso do rotor, importa salientar que este é de extrema importância, uma vez que irá influenciar o desenho estrutural da torre da turbina eólica.

Efetivamente, é fundamental e bastante vantajoso representar o desempenho de uma turbina, recorrendo a curvas de *performance* não dimensionais e características, a partir das quais o desempenho real pode ser determinado independentemente de como a turbina é operada. Isto é, em casos em que a velocidade de rotação é constante ou em algum regime em que o rotor possui velocidade variável.

Admitindo que o comportamento aerodinâmico das pás do rotor não está propício a danos, o desempenho aerodinâmico não dimensional do rotor depende da relação de velocidade da ponta e, se for caso disso, da definição da inclinação das lâminas. Com efeito, é habitual, exibir os coeficientes de potência, binário e impulso como função da relação de velocidade da ponta.

2.4.1 Curva de Performance $C_p(\lambda)$

É primordial que um projetista, aquando da delineação do projeto de uma turbina eólica, tenha acesso a parâmetros de conceção que orientem a potência desenvolvida pela mesma. Deste modo, o método, ao qual se recorre habitualmente, para a apresentação do desempenho energético corresponde ao C_p não dimensional, pelo que se pode observar, na figura que se segue, a curva λ e a curva para uma turbina típica, isto é, moderna e de três lâminas:

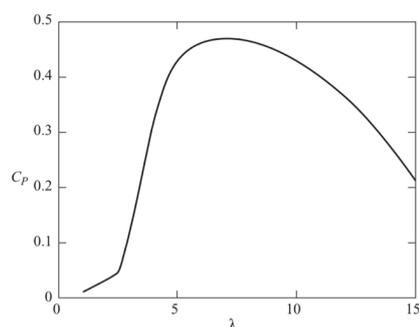


Figura 2.1: C_p : Curva de Performance λ de uma turbina moderna de três lâminas [4].

Através da análise da figura, é verificável que o valor máximo de C_p corresponde a aproximadamente a 0,47, sendo que este valor apenas poderá ser alcançado, se a taxa de velocidade de ponta à volta dos 7. No entanto, o valor referido é bastante inferior ao limite de *Betz*.¹ Por conseguinte, a disparidade em causa pode ser explanada, tendo em consideração dois motivos distintos: perdas por arrastamento e ponta ou perda de velocidade, como é possível verificar na Figura 2.2. Note-se que, ambas as razões são capazes de reduzir o C_p a valores menores que relação da velocidade da ponta.

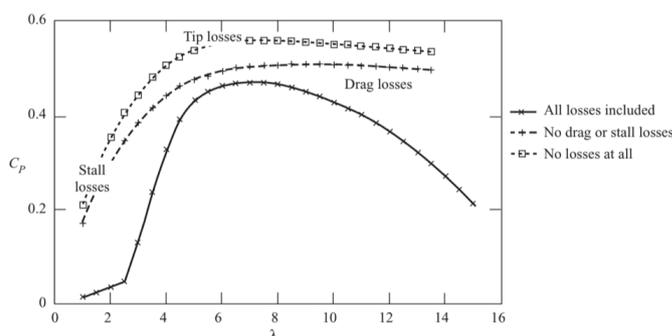


Figura 2.2: C_p : Curva de Performance λ de uma turbina moderna de três lâminas, tendo em conta as perdas [4].

2.5 Turbinas Eólicas de Velocidade Fixa

Quando se criaram os primeiros protótipos de turbinas eólicas de velocidade fixa, estes já eram dotados de uma máquina síncrona, representando um dos seus principais componentes. Contudo, acabou por se optar por recorrer a uma máquina com características mais abrangentes, isto é, uma máquina que contivesse menor carga, maior durabilidade ambiental e, por último, maior

¹O limite de *Betz* indica a potência máxima que pode ser extraída do vento, independentemente do *design* de uma turbina eólica. Este sugere ainda que, mesmo para os melhores aproveitamentos da energia do vento, isto é, turbinas de 2 ou 3 pás de eixo horizontal, apenas se recupera um máximo de 59% da energia eólica, o que significa que o C_p máximo (teórico) é, aproximadamente, 0,59. Contudo, para uma aplicação real, este coeficiente é da ordem de 0,3 a 0,4 no máximo.

compatibilidade com *hardware*, isto é, capaz de suportar as rápidas mudanças de velocidade vento. É por esta razão que, geralmente, as turbinas eólicas que já possuem o valor de velocidade pré-definido utilizando, como geradores, máquinas de indução ligadas à rede.

Outro aspeto a ter em conta, é a presença de uma caixa de velocidades, utilizada pelas pás, através do gerador. A primeira é essencial para os momentos em que a velocidade de rotação da turbina é mais reduzida, aumentando, portanto, a velocidade desta para o valor de velocidade estipulado. Além disso, sabe-se que a velocidade de rotação típica das máquinas de indução se encontra entre as 1000 e as 1500 rpm, sendo esta taxa de rotação, como seria de esperar, dependente do tamanho do rotor.

Veja-se, ainda, que algumas turbinas eólicas de velocidade pré-definida são compostas por um conjunto de velocidades de rotação dissemelhantes, com o objetivo de obter uma maior eficiência e captar uma maior quantidade de energia do vento.

2.6 Turbinas Eólicas de Velocidade Variável

Em termos estruturais, é de destacar que as turbinas em análise possuem diversos componentes semelhantes ou, até mesmo, em comum com as turbinas eólicas de velocidade fixa. É de constatar que, apesar destas turbinas possuírem uma velocidade variável, esta liberdade é encurtada por um leque estreito de possibilidades. Realmente, estas últimas geralmente usam máquinas de indução duplamente alimentadas e, ainda, um conversor acoplado à configuração do rotor.

De modo a que as dimensões da nacelle³ sejam proporcionais, é frequente recorrer-se a um gerador não mediado. Porém, quando se tem uma transmissão não mediada ligada a uma turbina, com um rotor acoplado a pás de grande diâmetro, é normal que esta funcione a velocidades mais reduzidas. Com efeito, é necessário instalar-se uma caixa de velocidades apta a elevar a velocidade.

Importa ainda destacar que, no gerador de energia principal deste tipo de turbinas, é frequente utilizar-se um conversor de frequência, na medida em que estas possuem uma vasta variedade de velocidades ajustáveis.

Em suma, é de salientar que, as turbinas eólicas de velocidade variável acabam por ser capazes de poupar uma quantidade de energia considerável, quando comparadas com as turbinas de velocidade fixa.

2.7 Componentes do Sistema de Conversão de Energia Eólica

A conversão de energia eólica pode adotar a seguinte organização estrutural: pás geradoras de energia, gerador, conversores eletrónicos de potência e os respetivos sistemas de controlo. Apesar de existirem diversas opções diferentes para a escolha de geradores e de métodos de controlo, todos os sistemas têm a mesma função: converter a energia cinética do vento em eletricidade e

³Uma nacelle de uma turbina eólica corresponde a uma caixa fechada que alimenta as partes responsáveis pela geração na turbina, correspondendo essas ao gerador, à caixa de velocidades, à transmissão e ao conjunto de travões.

inseri-la na rede. Desta forma, atente-se na figura a seguir, onde está descrita a estrutura básica de uma turbina eólica:

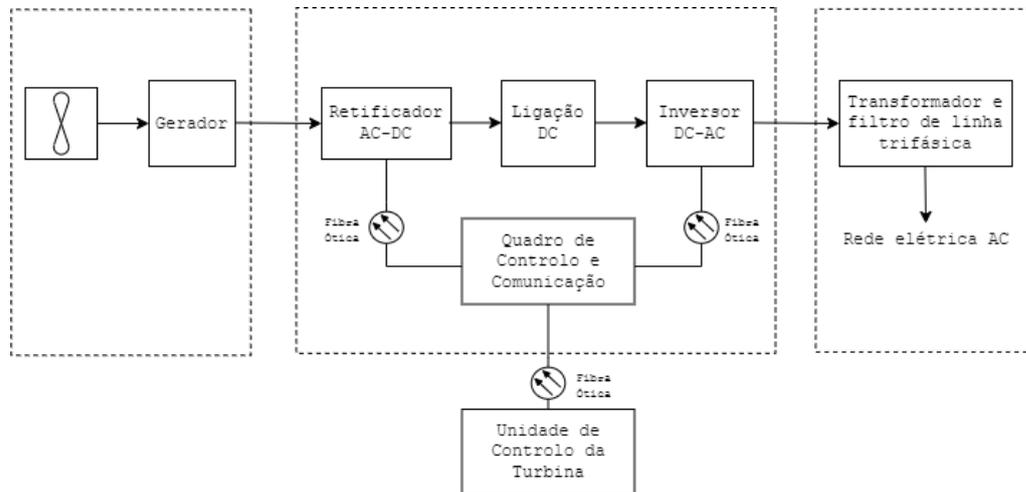


Figura 2.3: Diagrama de blocos representativo de um sistema de produção de energia eólica numa turbina. Baseada em [2].

Note-se que, hoje em dia, os geradores eólicos podem ser encaixados em dois grupos fundamentais: turbina de eixo horizontal, semelhante à turbina original de bombeamento de água, e a turbina eólica de eixo vertical. No entanto, o tipo mais utilizado é o das turbinas eólicas que possuem o eixo horizontal, sendo estas caracterizadas por captar a energia eólica na direção contrária à direção real do vento.

De forma suplementar, é de salientar que a velocidade do vento é bastante maior em altitude do que junto ao solo, pelo que a localização ideal para a instalação das turbinas deve ser um local elevado, de modo a evitar possíveis turbulências. Estas turbulências podem ser traduzidas pela velocidade variável do vento, aquando do contacto com obstáculos.

2.8 Principais Componentes

De modo a que as turbinas eólicas de eixo horizontal funcionem corretamente, é de extrema importância que estas sejam equipadas com os seguintes constituintes:

- Pá e rotor, capazes de converter a energia do vento em energia com movimento de rotação;
- Uma unidade de tração (nacele) que, usualmente, possui um gerador e uma caixa de velocidades;
- Uma torre capaz de suportar o rotor e a unidade de tração;
- Outros componentes entre os quais cabos elétricos, controladores, equipamento de apoio à terra e de interligação.

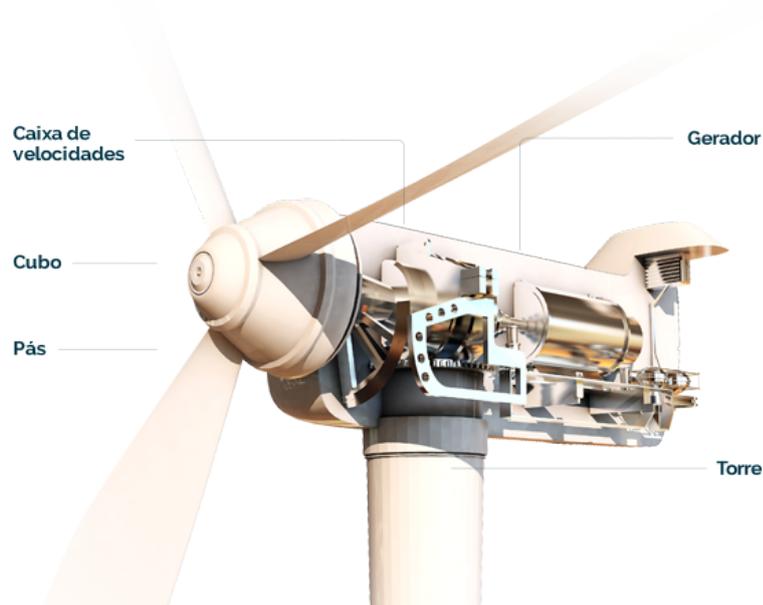


Figura 2.4: Esquema dos componentes de um Turbina Eólica [5].

2.8.1 Rotor

As pás correspondem à área do gerador eólico capaz de acumular energia do vento, sendo estas fixadas ao centro e, conseqüentemente, conectadas à base principal. Relativamente à bobina do rotor, esta é geralmente constituída por duas ou mais lâminas de madeira, aço ou de fibra de vidro. Naturalmente, estas lâminas giram, de acordo com um eixo horizontal ou vertical, à velocidade determinada pelo vento e tendo em conta o *design* das lâminas.

2.8.2 Número de Pás

De modo a verificar o volume das pás da turbina, é essencial compreender que este pode ser medido, tendo em vista o número total de pás e a área total que estas cobrirão, possibilitando, desta forma, uma melhoria no desempenho dos geradores. Com efeito, é primordial que o vento flua facilmente pelas pás, a fim de o rotor funcionar eficientemente. Além disso, deve evitar-se a turbulência, sendo que para tal deve ter-se em atenção o espaçamento entre pás. Por conseguinte, este deve ser maior para evitar que uma pá não esteja em contacto com a pá que está a ser realmente perturbada. É por este motivo que as turbinas eólicas apenas possuem duas ou três pás no seu rotor.

2.8.3 Gerador

Como seria de esperar, o gerador é o componente responsável por converter o movimento de rotação das pás da turbina diretamente em eletricidade. Sabe-se ainda que o comprimento das pás influencia não só a posição, mas também o tamanho do gerador eólico. No que diz respeito aos modelos de geradores, podem existir dois tipos de modelos: os que produzem corrente alternada

e os que geram corrente contínua, sendo que ambos os modelos se encontram disponíveis para os vários valores de potência elétrica de saída existentes. Quanto aos geradores AC, estes estão munidos com características aptas a gerar uma tensão precisa (100V e 20V ou 240V) e também uma potência constante, independentemente da variação da velocidade do vento. Já os geradores de potência DC são geralmente utilizados em aplicações de carregamento de baterias, para produção de ar condicionado através de eletricidade, entre outros.

2.8.4 Transmissão

O intervalo de [45,400]rpm corresponde à quantidade de rotações por minuto que uma turbina eólica pode realizar, tendo em conta o modelo do mesmo e a velocidade do vento. No entanto, é comum os geradores necessitem um mínimo de 200 rpm e um máximo de 800 rpm, o que leva a que a generalidade das turbinas necessite de uma transmissão por engrenagem, a fim de possibilitar o aumento do número de rotações do gerador e, conseqüentemente, elevar à velocidade necessária para se realizar uma produção eficiente de eletricidade. Repare-se que, algumas das turbinas que possuem um gerador DC, não requerem transmissões, pelo que, em substituição, possuem uma ligação direta entre o rotor e o gerador, sendo conhecidos como sistemas de impulso direto. Por conseguinte, não havendo transmissão, a complexidade das turbinas eólicas e as respetivas especificações para manutenção passam a ser menores. Porém, será necessária uma turbina de maiores dimensões, de modo a ser exequível o fornecimento de uma quantidade de potência similar às das turbinas AC.

2.8.5 Design de Arrastamento

O *design* de arrastamento permite que, aquando da passagem do vento, as pás não sejam um obstáculo. Na verdade, os geradores que baseiam o seu movimento na energia eólica por arrastamento, possuem velocidades de rotação bastante mais reduzidas, em contraste com elevadas capacidades de binário.

2.8.6 Design de Elevação

Este tipo de *design* é o mesmo que possibilita que os aviões e os pássaros voem. De facto, as pás funcionam como uma espécie de superfície de controlo, isto é, quando o fluxo de vento circula por estas, é gerada não só alguma velocidade do vento, mas também uma força diferencial entre as secções superior e inferior da pá. Naturalmente, é na zona inferior da pá que é exigida uma maior força, de modo a ser possível levá-la. Apesar de as pás estarem conectadas ao eixo principal, o movimento de elevação das mesmas é demonstrado através de movimentos de rotação. Assim sendo, é possível afirmar que os geradores de elevação possuem velocidades de transferência de dados de rotação bastante mais elevadas do que qualquer outro tipo de movimento, pelo que se pode deduzir que se trata de um excelente *design* para produção de energia.

2.8.7 Razão da Velocidade de Ponta

Em primeiro lugar, é fundamental esclarecer que a razão da velocidade de ponta corresponde à razão entre velocidade de rotação da pá e a velocidade do vento. Consequentemente, quanto maior for este rácio, maior será a velocidade de rotação do rotor da turbina à velocidade do vento estabelecida. Logo, conclui-se que são necessárias velocidades de rotação bastante elevadas para se poder produzir energia. Deste modo, tendo em conta a sua aplicação prática, as turbinas eólicas do tipo elevador são as mais indicadas para a produção de eletricidade.

2.8.8 Torres

Os geradores eólicos, aquando da sua instalação, são fixados a uma torre dotada de mais funções, para além da de estrutura de suporte. Com efeito, esta também tem como propósito a elevação da turbina em altitude, de modo a proporcionar uma maior segurança e, adicionalmente, a captação de ventos mais fortes. Repare-se que, na maioria dos casos, a altura máxima da torre, é uma escolha opcional, havendo sempre exceções, tal como a existência de restrições de zoneamento.

No que diz respeito à escolha da altura da torre, sabe-se que esta representa uma decisão na qual se deve ter em conta algumas condições como, por exemplo, o custo das torres mais altas e o aumento da produção de energia causada pelo seu funcionamento das mesmas. De facto, alguns estudos comprovam que o custo adicional associado ao acréscimo da altura do pódio é, na maioria das vezes, bastante vantajoso e justificado, na medida em que permite que a turbina capte rajadas de vento mais fortes, promovendo um aumento da geração de energia.

Geradores eólicos de maiores dimensões são montados, por vezes, em torres com alturas entre os 40 e os 70 metros, já os geradores mais pequenos exigem a existência de cabos ancorados ao chão, geralmente em 3 ou 4 lados da torre, de modo a ser possível transportá-la na vertical. Estes últimos são menos dispendiosos, porém necessitam de uma maior área para enterrar os fios, logo algumas das torres sustentadas por cabos de suspensão são construídas inclinando-as para cima [2]. Efetivamente, se se recorrer a um guincho é exequível encurtar o tempo de instalação e, consequentemente, diminuir o tempo de manutenção.

Quanto à parte construtiva, a constituição básica de uma torre deve incluir: um tubo simples, um poste de madeira ou uma treliça conectada com tubos, suportes e, por fim, os suportes angulares. Deste modo, os geradores eólicos de maiores dimensões podem ser instalados de três formas distintas: em torres de treliça, torres de tubos ou sistemas de pontaria estaiados.

Naturalmente, os responsáveis pela instalação podem sugerir qual o melhor tipo de torre para afixar o gerador escolhido, contudo é essencial que se tenha em atenção que a torre deve ser forte e ampla, de modo a que a turbina consiga resistir a qualquer outro elemento meteorológico, como a agitação do vento, durante todo o período de vida útil do gerador.

É de notar que os custos associados à torre podem oscilar devido aos possíveis *designs* e alturas existentes e, também, pelo facto de as turbinas eólicas serem comercializadas completas ou com os pódios em separados.

Importa ainda destacar os benefícios associados à utilização de um eixo horizontal nas turbinas eólicas:

- Maior eficiência;
- A relação custo/potência é menor;
- Capacidade de movimentação das pás.

Não obstante, deverá ter-se em consideração as principais desvantagens do uso de um eixo horizontal:

- A manutenção é limitada, pelo facto de o gerador e a caixa de velocidades terem de ser instalados na torre;
- O *design* torna-se mais complexo, devido à necessidade de existência de componentes responsáveis pela orientação, direção ao vento, do rotor da turbina eólica.

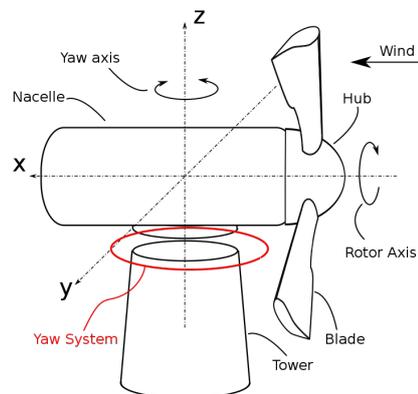


Figura 2.5: Eixos existentes numa turbina eólica [6].

Capítulo 3

Análise dos Diferentes Tipos de Geradores

3.1 Introdução

Os sistemas de conversão de energia eólica tornaram-se um ponto fulcral na investigação de fontes de energia renováveis. Isto deve-se, em grande parte, não só aos rápidos avanços nas dimensões dos geradores eólicos, mas também ao desenvolvimento da eletrónica de potência e à sua aplicabilidade na extração da energia eólica. Assim sendo, importa destacar não só as diversas vantagens dos geradores assíncronos, mas também realizar uma revisão abrangente das topologias de conversão mais vantajosas e aplicáveis ao gerador síncrono de ímanes permanentes.

3.2 Princípio Básico de Funcionamento dos Geradores Síncronos e Assíncronos

De facto, sabe-se que todos os geradores, que recorrem a corrente alternada, têm como princípio básico de funcionamento os campos magnéticos girantes. Deste modo, surge um conceito essencial designado por velocidade de sincronismo, que corresponde à velocidade de rotação do campo magnético girante do estator [7].

Tendo em conta o conceito referido, é possível distinguir as máquinas síncronas das assíncronas. Efetivamente, nas primeiras a velocidade de rotação é igual à velocidade de sincronismo, enquanto nas segundas a velocidade de rotação já é diferente da velocidade de sincronismo.

No que diz respeito às máquinas síncronas, estas possuem diversas vantagens entre as quais a proporcionalidade existente entre a velocidade de rotação e a frequência. Seguem-se algumas das suas principais características:

- Possuem um campo magnético no entreferro girante, com variação sinusoidal no tempo e no espaço;
- O circuito do induzido, bobinado encontra-se no estator;

- O circuito indutor localiza-se no rotor;
- No estator, o circuito magnético é laminado e no rotor é maciço ou laminado.

Quanto às máquinas assíncronas, têm como vantagens a sua robustez, o preço reduzido e a facilidade de manutenção. Estas têm como características gerais:

- Um campo magnético no entreferro girante, com variação sinusoidal no tempo e no espaço;
- O circuito induzido encontra-se no rotor;
- O circuito indutor bobinado localiza-se no estator;
- O circuito magnético é totalmente laminado.

3.3 Geradores Assíncronos

3.3.1 Máquina de Indução Duplamente Alimentada

Esta máquina assenta o seu funcionamento na oportunidade de controlar a sua velocidade através da variação da resistência do rotor. Deste modo, observe-se a figura que se segue, onde está representada a transformação das curvas de binário em função do escorregamento da máquina de indução, devido à variação de uma resistência ligada em série com a do enrolamento do rotor.

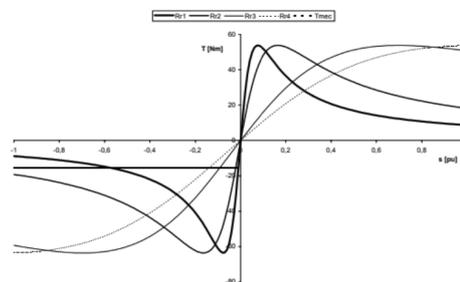


Figura 3.1: Curvas características binário - velocidade para diferentes valores de resistência do rotor: $R_{r4} > R_{r3} > R_{r2} > R_{r1}$ [8].

Naturalmente, é possível observar que, para um dado valor de binário mecânico, T , a velocidade da máquina de indução é variável, através da variação da resistência rotórica. Sendo assim, se se substituir a resistência variável por um sistema de conversão CA/CC/CA ligado ao rotor, é exequível a extração de potência ativa pelo rotor da máquina, pelo que é praticável o controlo da velocidade. Desta forma, o processo descrito corresponde ao princípio do aproveitamento da energia de escorregamento nos motores de indução de rotor bobinado. Com efeito, é neste princípio que se baseia o funcionamento das máquinas em análise, aquando da sua utilização nas turbinas eólicas. Por conseguinte, para escorregamentos negativos, até ser atingida a intensidade de corrente nominal do estator, é fundamental controlar a potência retirada pelo rotor, com o objetivo de otimizar a velocidade específica da ponta da pá do rotor e, consequentemente, maximizar o

valor do coeficiente de potência, C_p , da turbina. De facto, para escorregamentos negativos com valores mais elevados, em módulo, para os quais a intensidade da corrente no estator atinge o valor nominal, a potência ativa no estator e rotor permanecem constantes. Importa destacar que o princípio em questão, controla a velocidade por aproveitamento da energia de escorregamento, promovendo o funcionamento da máquina como gerador para escorregamentos positivos. Logo, para tal operação é essencial que se forneça ao rotor potência ativa.

Atente-se, agora, na figura representativa do esquema de ligações da máquina de indução duplamente alimentada:

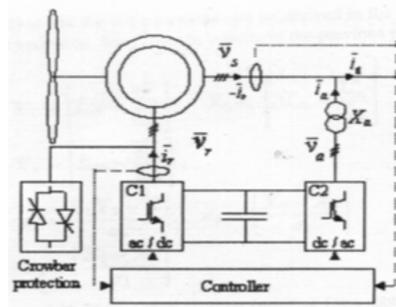


Figura 3.2: Esquema de ligações da máquina de indução duplamente alimentada [8].

Na verdade, o estator da máquina é diretamente ligado à rede de energia elétrica, já o rotor necessita de recorrer a um sistema de conversão CA/CC/CA e a um transformador elevador, para se conectar à rede. Com efeito, os conversores CA/CC/CA que fazem a interligação do rotor da máquina com rede, recorrendo a um transformador elevador, correspondem a pontes conversoras a seis pulsos compostas por transístores bipolares de porta isolada (IGBT's), que possuem um sistema de comando por modulação da largura do impulso. Habitualmente, aquando do uso de máquinas de indução duplamente alimentadas nos geradores eólicos, o conversor que está conectado ao transformador elevador é responsável por gerir o controlo da tensão contínua aos terminais do condensador do subsistema de corrente contínua, pelo que também controla o fator de potência no ponto comum aos circuitos do rotor e estator. Já o conversor que se encontra diretamente ligado ao rotor tem como função controlar o módulo e argumento da intensidade de corrente injetada ou extraída pelo circuito rotórico. O princípio de funcionamento do sistema de controlo por modulação da largura de impulso dos conversores permite impor uma forma de onda alternada sinusoidal com frequência, amplitude e fase ajustáveis aos terminais de corrente alternada dos conversores [9]. Analise-se, agora, o caso onde o conversor CA/CC ligado ao rotor da máquina de indução, possibilita o controlo da frequência da forma de onda aplicada a este elemento, sendo essa igual à frequência de escorregamento da máquina num dado ponto de operação. Além disso, também ocorre em simultâneo, o controlo do módulo e argumento da intensidade de corrente no rotor. Relativamente ao conversor CA/CC que se encontra ligado ao transformador elevador, este não só irá gerir a amplitude da tensão contínua aos terminais do condensador, mas também a frequência da onda de corrente alternada, que é igual à frequência da rede onde o conversor está conectado. Por fim, é ainda controlada a fase, o que permite a imposição do fator de potência. Veja-se que,

geralmente, é exequível excluir a necessidade de utilização de baterias de condensadores, devido à propriedade do sistema de comando por modulação da largura do impulso que ajusta a fase da onda de tensão/intensidade de corrente. Deste modo, é comum os fabricantes garantirem um controlo do fator de potência no intervalo entre cerca de 0,9 indutivo e 0,9 capacitivo aos terminais da máquina. Assim, o sistema de controlo dos conversores CA/CC/CA tem como propósito garantir que o valor do C_p da turbina é maximizado na região da característica $P(v)$, onde a potência não é controlada. Para além disso, este sistema de controlo é capaz de manter um certo valor do fator de potência no ponto de interligação da máquina com a rede de energia elétrica. Na região de potência controlada da característica $P(v)$ da turbina, é possível verificar que o controlador do sistema de conversão CA/CC/CA consegue manter constante a potência total, P_t , extraída pelo estator e pelo rotor da máquina, o qual pode ser complementado com o sistema de controlo do ângulo de passo das pás do rotor. Em suma, é possível deduzir que os geradores eólicos que recorrem às máquinas de indução duplamente alimentadas para funcionarem como sistema de controlo dos primeiros, têm em vista a maximização da potência elétrica fornecida à rede na gama de variação da velocidade do vento [8].

3.3.2 Máquina de Indução com Rotor em Gaiola

Quando a velocidade angular do rotor é superior à velocidade angular do campo girante, isto é, para escorregamentos negativos, este tipo de máquina é capaz de funcionar como um gerador.

Deste modo, aquando do funcionamento como gerador, este irá trabalhar no intervalo entre os pontos correspondentes ao escorregamento aproximadamente nulo e os que representam o valor máximo da intensidade de corrente admissível no estator. De facto, esse valor máximo para a característica da máquina representada graficamente na Figura 3.3, corresponde a um valor de s igual a -0.8% , sendo bastante menor que o valor para o qual ocorre o binário máximo, ou seja, cerca de -8% para a característica apresentada.

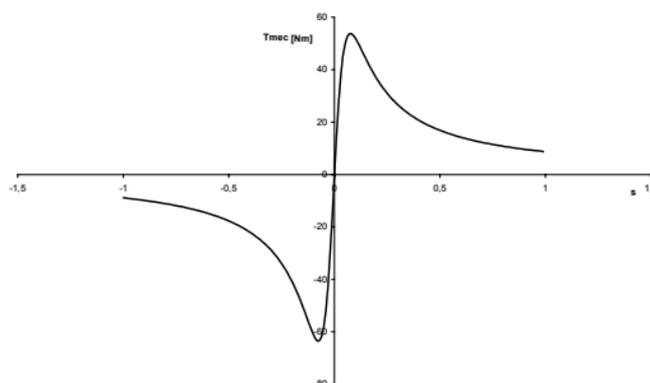


Figura 3.3: Característica binário-velocidade da máquina de indução de rotor em gaiola [8].

Na prática, a máquina em análise comporta-se como se possuísse velocidade constante, na

medida em que a variação da velocidade admissível da máquina em relação à velocidade de sincronismo é muito reduzida.

Observe-se o gráfico que se segue representativo da potência reativa consumida pela máquina em questão, em função da potência ativa gerada:

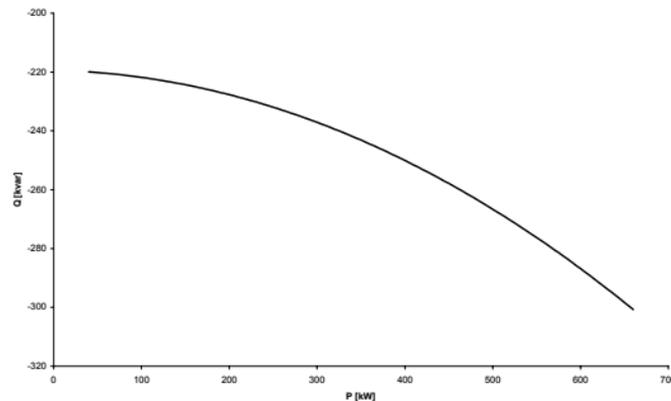


Figura 3.4: Potência reativa, Q , consumida em função da potência ativa gerada, P [8].

Naturalmente, é no estator da máquina que é criado o campo magnético fundamental para a conversão de energia mecânica em energia elétrica. Consequentemente, como é possível observar na figura acima, enquanto gerador, a máquina irá sempre reter a potência reativa da rede, daí a escala utilizada para o eixo dos y ser negativa. Adicionalmente, com o aumento da produção de ativa produzida, haverá também um aumento do fator de potência, logo a variação em causa não será linear. Assim, para o exemplo descrito na Figura 3.4, o fator de potência varia num intervalo de 0,18 a 0,91 (capacitivo), para valores da potência ativa entre 40 kW e 660 kW, respetivamente [8].

Importa ainda destacar que os geradores eólicos que possuem este tipo de máquina estão sempre equipados com baterias de condensadores, de forma a ser exequível compensar o fator de potência das máquinas. Em geral, os fabricantes ajustam o fator de potência para o valor unitário, recorrendo a bancos de condensadores, tipicamente com dois escalões. Existem ainda alguns fabricantes que oferecem as máquinas de indução com um rotor em gaiola que na sua constituição possui um número variável de pares de polos, geralmente 2 a 3, sendo que esse número está dependente da velocidade da turbina. Com efeito, a solução apresentada possibilita a adaptação da velocidade específica da ponta da pá, a um valor que seja capaz de maximizar o coeficiente de potência, C_p .

3.4 Gerador Síncrono

3.4.1 Gerador Síncrono de Ímanes Permanentes

Este tipo de geradores é bastante similar ao dos geradores convencionais, contudo possui uma ligeira diferença. Efetivamente, essa distinção corresponde ao facto de os enrolamentos do rotor

serem substituídos por ímanes permanentes com alta eficiência energética. Adicionalmente, sabe-se que num gerador síncrono convencional, os enrolamentos do rotor são alimentados por corrente contínua, de modo a produzir um campo magnético contínuo. Já no gerador de ímanes permanentes é possível obter o mesmo efeito através da utilização dos ímanes. Sabe-se ainda que, estes geradores não necessitam de excitação externa, já que geram fluxo de forma espontânea, contudo este último não pode ser controlado.

De facto, este tipo de gerador não está equipado com escovas, nem possui uma fonte de tensão contínua, pelo que, como já foi referido, possui um rendimento mais elevado e necessita de um reduzido número de manutenções. Quanto ao posicionamento dos ímanes, é comum estes serem posicionados tangencialmente à superfície dos polos do rotor ou embutidos neste. Atente-se ainda nas vantagens desta máquina relativamente aos geradores síncronos convencionais:

- Inexistência de sistema de excitação;
- Não existindo densidade de corrente nem condutores no rotor, há menos perdas Joule;
- Devido à ausência de contactos deslizantes, a necessidade de manutenção é bastante reduzida;
- A relação potência/volume é bastante melhor, já que é mais robusta e compacta.

Analisando agora os custos associados ao gerador em causa, é de notar que estes estão dependentes do tipo de aplicação, da sua faixa de potência, dos materiais e da sua importação, pelo que a sua análise se torna mais complicada. Os geradores de ímanes permanentes possuem ainda diversos aspetos particulares que os valorizam, na medida em que estes foram alvo de constante estudo e desenvolvimento, promovendo assim o domínio de novos materiais magnéticos, como o neodímio-ferro-boro. Efetivamente, através da utilização deste material foi possível dar origem a fluxos de excitação com grande coercividade, através de ímanes de pequena espessura e de alta densidade. Desta forma, analisem-se os seguintes aspetos:

- Maior fiabilidade, maior rendimento e menores custos de manutenção, devido à eliminação de anéis e escovas de contacto;
- Sendo o gerador de ímanes permanentes, não existem enrolamentos condutores, pelo que as perdas no enrolamento de excitação do rotor são excluídas, passando a haver apenas perdas no enrolamento estatórico;
- O rendimento da máquina é mais elevado, devido a uma menor quantidade de perdas, logo é possível reduzir o tamanho da máquina, promovendo uma solução com um peso e volume menores que a máquina síncrona convencional;
- A criação de um arranjo de disposição dos ímanes é possível, pelo que se pode modificar a característica de funcionamento;

- Os limites associados às potências disponíveis não estão relacionados com os limites dos ímanes, uma vez que esses resultam de considerações económicas.

No que diz respeito às aplicações deste tipo de gerador, é de notar que este possui um leque bastante alargado, no entanto é necessário ter em conta o cumprimento de regras e das condições necessárias, de modo a que a sua instalação seja adequada e legal. Deste modo, aquando da instalação é necessário ter em vista as seguintes características:

- Elevada eficiência;
- Projeto compacto;
- Elevada densidade de fluxo no entreferro;
- Elevado binário / inércia;
- Elevada razão potência / peso;
- Reduzida oscilação do binário.

Voltando às aplicações desta máquina, importa destacar a mais relevante para o tema em causa: a conversão de energias renováveis em energia elétrica, uma vez que é possível esta operar como gerador isolado, estando ligado à rede. De facto, a máquina de ímanes permanentes é mais utilizada aquando da produção de energia eólica, na medida em que possibilita a exclusão da caixa de velocidades. Por conseguinte, não só diminui o peso e o ruído, mas também aumenta o rendimento e a fiabilidade do sistema. Em síntese, contrariamente às máquinas assíncronas, as máquinas em análise permitem a exploração de recursos renováveis com fatores de potência mais elevados. Relativamente aos geradores síncronos convencionais, os geradores de ímanes permanentes correspondem a uma solução mais eficiente, visto que melhoram a robustez e a fiabilidade, obtendo rendimentos mais elevados, devido à eliminação das perdas Joule no rotor [10].

A utilização deste tipo de gerador acarreta não só diversos benefícios, mas também algumas desvantagens, sendo que ambos podem ser analisados a seguir:

- Vantagens:
 - A flexibilidade no *design* permite o projeto de modelos mais pequenos e mais leves;
 - Um nível de produção mais elevado pode ser alcançado sem necessidade de aumentar o tamanho do gerador;
 - Os custos de manutenção e de funcionamento são mais baixos, pelo que os rolamentos duram mais;
 - Não há perdas significativas geradas no rotor;
 - A velocidade do gerador pode ser regulada sem a necessidade de se recorrer a engrenagens ou a caixa de velocidades;

- Através das velocidades mais reduzidas é possível atingir um torque muito elevado;
 - Exclui a necessidade de sistemas separados de excitação ou arrefecimento.
- Desvantagens:
 - Custo inicial mais elevado, devido ao preço elevado dos ímanes a utilizar;
 - O custo dos ímanes permanentes restringe a produção de tais geradores para projetos de turbinas de grande escala ligadas à rede;
 - Por vezes, as temperaturas elevadas e as condições de sobrecarga e de curto-circuito severas podem desmagnetizar os ímanes permanentes;
 - A utilização de retificador de díodos na fase inicial de conversão de energia reduz a controlabilidade de todo o sistema.

De facto, a excitação de ímanes permanentes é, geralmente, favorecida em projetos mais recentes de turbinas mais pequenas, na medida em que permite uma maior eficiência e menor diâmetro das pás das turbinas eólicas. Embora, alguns estudos recentes tenham privilegiado *designs* em maior escala, a economia de grandes volumes de material magnético permanente limitou a sua aplicação prática. Assim, a principal vantagem dos geradores síncronos de ímanes permanentes corresponde ao facto de estes não requererem qualquer corrente de excitação externa. Adicionalmente, o facto de um retificador de ponte de díodos poder ser utilizado nos terminais do gerador, já que não é necessária corrente de excitação externa, pode ser visto como um grande benefício de custo da sua utilização.

Capítulo 4

Conversor de Ligação à Rede Elétrica

4.1 Introdução

No que diz respeito à escolha dos conversores a utilizar, existem muitas combinações diferentes de conversores-geradores, contudo para o estudo em causa apenas importa estudar o conversor *back-to-back PWM*, tendo em conta a topologia, custo, eficiência, consumo de energia e complexidade de controlo.

Nos últimos anos, muitas técnicas de conversão de energia foram desenvolvidas, de modo a serem integradas na rede elétrica. Por exemplo, a utilização de conversores eletrónicos de energia permite que a turbina eólica possua um funcionamento de velocidade variável, levando a uma maior extração de energia. Neste tipo de funcionamento, é necessária a existência de um método de controlo concebido para extrair a potência máxima da turbina, fornecendo tensão e frequência constantes da rede. Deste modo, todos os esquemas de controlo integrados com o conversor eletrónico de potência são concebidos para maximizar a potência de saída a todas as velocidades de vento possíveis.

4.1.1 Conversores *Back-to-back* PWM

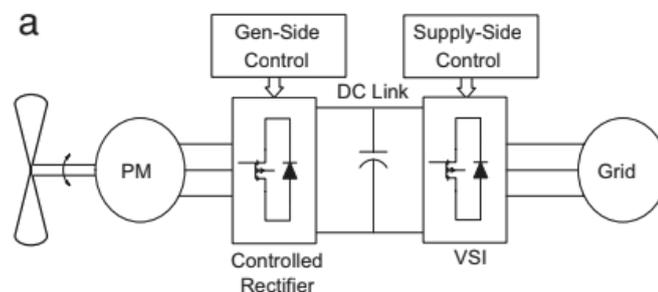


Figura 4.1: Esquema *a* de gerador de ímãs permanentes com conversores *back-to-back* PWM [11].

Na figura 4.1 é possível observar a utilização de dois conversores, de 6 interruptores, com um condensador *DC-link*. De facto, o retificador lateral do gerador é controlado através de um

controlador PID, de modo a que a corrente do eixo d seja mantida a zero, a fim de se obter o máximo de torque elétrico com um valor mínimo de corrente. Assim, recorre-se ao MPPT para se determinar a velocidade ótima do rotor para as diferentes velocidades do vento, obtendo-se assim a potência máxima do rotor.

Relativamente ao inversor do lado da rede, este é responsável por garantir que a corrente de linha é sinusoidal, recorrendo a um controlador de histerese. A tensão $DC-link$ também é controlada por um controlador PID, através do inversor do lado da rede.

Mais recentemente, desenvolveu-se um conversor que utiliza dois conversores B-4 e dois condensadores $DC-link$, como é exequível verificar na Figura 4.2. Mais uma vez, o MPPT calcula a potência de saída do gerador, medindo a corrente e tensão $DC-link$, sendo que, posteriormente, altera o funcionamento do gerador aumentando ou diminuindo a magnitude da corrente de referência. O controlo MPPT é realizado no retificador do lado do gerador. Efetivamente, o controlo do lado da rede define a corrente do inversor através de um controlador PID e do erro de voltagem DC. O erro de corrente é utilizado para conduzir os sinais de comutação do inversor. É de notar que um PLL é utilizado de cada lado para assegurar que o fator de potência unitário é mantido em todo o sistema.

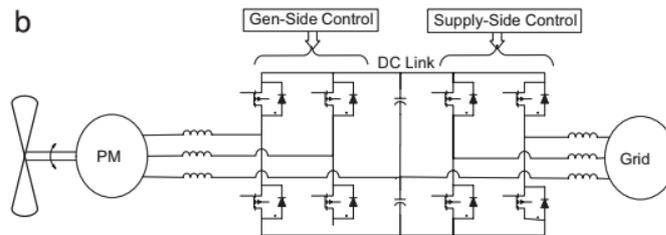


Figura 4.2: Esquema *b* de gerador de ímãs permanentes com conversores *back-to-back* PWM [11].

4.2 Técnicas de Modulação PWM

De modo a controlar a amplitude da tensão eficaz da onda de saída e a frequência, surge a técnica de modulação de largura de impulsos PWM, que tem como princípio de funcionamento, a comparação de um sinal triangular portador com alta frequência f_s com um sinal de baixa frequência f_m . É de referir que f_s representa a frequência de comutação, enquanto f_m é conhecido como o sinal de referência modelador.

Adicionalmente, sabe-se que a frequência do sinal modulador é responsável por definir a frequência fundamental da tensão de saída do conversor. Sendo assim, é possível deslocar o conteúdo harmónico da corrente produzida para frequências mais elevadas, aquando do uso de frequências de comutação maiores que a frequência fundamental, facilitando a sua filtragem [12].

No entanto, o uso de frequências de comutação mais elevadas acarreta como inconveniente o facto de haver uma maior produção de perdas nos semicondutores. Consequentemente, também o rendimento do conversor será prejudicado.

4.2.1 Modulação PWM Vetorial

A estratégia de modulação PWM vetorial corresponde a uma técnica de modulação que agrupa, num diagrama vetorial, os valores de tensão praticáveis para o conversor, de modo a que cada um dos valores em causa tenha a ele associado um vetor. Assim sendo, dispõe-se o espaço vetorial de forma a possibilitar que, as três variáveis de tensão do inversor, sejam apenas representadas por duas: v_d e v_q , sendo que a primeira corresponde ao eixo real d e a segunda ao eixo imaginário q .

Com o intuito de pôr em prática esta técnica, é necessário recorrer ao algoritmo *Nearest Three Vectors*, capaz de identificar a amplitude e a posição do vetor de saída e comparando-o com os três vetores mais próximos. Posto isto, obtêm-se informações relativas à frequência, amplitude e conteúdo harmónico da saída.

4.3 Conversor VSC

4.3.1 Características do Conversor VSC

O conversor VSC, *Voltage Source Converter*, tem como principal função a conversão de uma tensão DC fixa numa tensão de três fases AC, com frequência e magnitude variáveis. É de notar que, tendo em conta a direção do fluxo de energia, este pode funcionar como retificador, isto é, a energia circula do lado AC para o DC, ou como inversor, se a energia flui do lado DC para o AC. Adicionalmente, também pode operar bidirecionalmente, o que significa que funciona com as duas direções de fluxo de energia.

Este tipo de conversor, é um condensador de relativamente grandes dimensões que irá alimentar o circuito principal do conversor. Assim, o circuito principal é constituído por 6 interruptores, pelo que cada um é, usualmente, composto por um transístor de potência e um diodo de rodagem livre, de modo a possibilitar um fluxo de corrente bidirecional e uma capacidade de bloqueio de tensão unidirecional.

Para o conversor em estudo, é essencial a existência elementos passivos DC e AC, como, por exemplo, indutâncias e condensadores, já que ambos possuem funções de filtragem e armazenamento.

De facto, o funcionamento do conversor VSC está relacionado com a utilização de um armazenamento capacitivo DC, em vez de um armazenamento indutivo DC. Assim, esse condensador DC é carregado com uma certa quantidade de tensão, sendo esta tensão a responsável por assegurar o funcionamento básico do VSC. Com efeito, é através da comutação que o conversor em questão consegue controlar a corrente AC. Deste modo, recorrendo ao controlo da corrente AC, o conversor consegue modificar o valor DC, como nas aplicações ativas de retificadores e filtros.

Naturalmente, este fenómeno pode ser compreendido através do equilíbrio de potência, ou seja, se se assumir que não há perdas, o conversor é capaz de transformar a potência ativa AC em potência DC. Relativamente, ao controlo da potência ativa AC pode ser feito realizando o controlo da corrente AC. Veja-se ainda que, uma alteração da potência ativa AC, também modifica a potência DC, pelo que leva à carga e descarga do condensador DC [13].

Sabe-se que este condensador é o mais usado para a ligação à rede de geradores eólicos, sendo dotado de diversas características, entre as quais:

- A tensão de saída AC não pode ultrapassar a tensão DC, logo o VSC, para a conversão DC/AC, é um inversor passa-baixo e, para AC/DC, é um retificador passa-alto. Se a tensão DC, por algum motivo, estiver limitada é necessário um conversor passa-alto DC/DC adicional, de modo a obter uma tensão DC capaz de colocar em funcionamento o conversor em estudo com a rede. Consequentemente, haverá uma menor eficiência do sistema e o seu custo será mais elevado.
- Estes conversores necessitam de um *dead-time* que bloqueie os dispositivos superiores e inferiores, o que irá causar uma distorção da forma de onda. Isto deve-se ao facto de os dispositivos superiores e inferiores não poderem ser ligados simultaneamente, seja qual for o motivo, uma vez que pode provocar o disparo e conseqüente destruição dos dispositivos.
- Os conversores VSC precisam de um filtro passa-alto de saída, de modo a diminuir a ondulação da corrente, permitindo o cumprimento dos requisitos harmónicos. Por conseguinte, haverá uma perda adicional de potencial e de complexidade do controlo

4.3.2 Princípio de Funcionamento do Conversor VSC

Como já foi referido anteriormente, num conversor VSC a energia tem a possibilidade de ser transferida em dois sentidos, o que leva a dois tipos de funcionamento distintos:

- Retificador, se a energia flui do lado AC para o lado DC;
- Inversor, se a energia circular do lado DC para o lado AC;

Consequentemente, sabendo que a transferência de energia será realizada do conversor para a rede, o VSC funcionará como um inversor.

Deste modo, analise-se o esquema de ligação do conversor em questão com a rede:

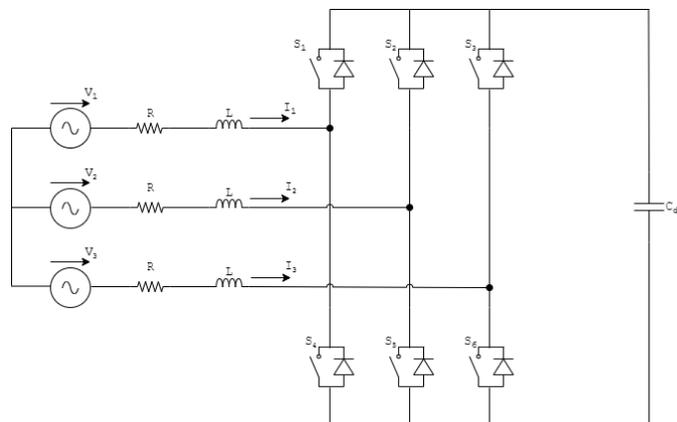


Figura 4.3: Ligação do Conversor VSC à Rede Elétrica. Baseado em [14].

De modo a ser possível estudar o funcionamento do conversor, deve admitir-se que a rede se trata de um sistema ideal, isto é, um sistema trifásico de tensões equilibrado e sem harmónicos. Portanto, a única componente a ter em conta para a transferência de energia entre o conversor e a rede é a componente fundamental da tensão produzida pelo conversor, na medida em que a componente harmónica apenas influenciará as perdas alcançadas nos dispositivos de comutação e na qualidade da tensão produzida [12].

Atente-se na figura que se segue, onde está representado o modelo de ligação do conversor por fase:

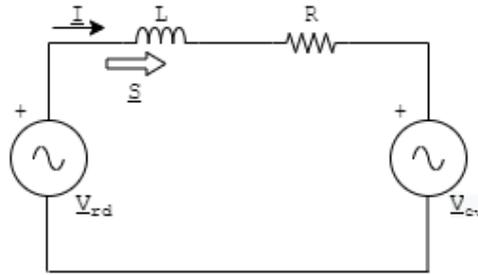


Figura 4.4: Modelo de ligação do Conversor VSC por fase. Baseado em [14].

Após a análise da figura, é possível compreender que o modelo em causa mostra a componente sinusoidal, no domínio fasorial, que é dada pelas expressões seguintes:

$$\overline{V}_{rd} = V_{rd} \quad (4.1)$$

$$\overline{V}_{cv} = \text{Re}(\overline{V}_{cv}) + j\text{Im}(\overline{V}_{cv}) = V_{cv}e^{j\phi} \quad (4.2)$$

$$\overline{I} = \text{Re}(\overline{I}) + j\text{Im}(\overline{I}) = Ie^{j\phi} \quad (4.3)$$

$$\overline{S} = P + jQ = Se^{-j\phi} \quad (4.4)$$

$$\overline{Z} = R + j\omega L = Ze^{-j\phi} \quad (4.5)$$

$$\phi = \arctan \frac{\omega L}{R} \quad (4.6)$$

Veja-se ainda que, o conversor em análise produz uma tensão controlada por PWM, sendo essa dividida em duas variáveis particulares: ângulo de defasamento α e o índice de modulação m_a .

$$\overline{V}_{cv} = kV_{dc}m_a e^{j\alpha} \Leftrightarrow \overline{V}_{cv} = kV_{dc}m_a \cos(\alpha) + jkV_{dc}m_a \sin(\alpha) \quad (4.7)$$

Onde $m_a = [0, m_{a_{max}}]$ e $\alpha = [-\pi, \pi]$

Adicionalmente, sabe-se que os valores de $m_{a_{max}}$ e k estão sujeitos ao tipo de modulação PWM recorrida. Assim, se se considerar uma modulação PWM sinusoidal, obtém-se um $m_{a_{max}}$ e um k do tipo:

$$m_{a_{max}} = 1 \quad (4.8)$$

$$k = \frac{1}{2\sqrt{2}} \quad (4.9)$$

Posto isto, é admissível obter as equações da corrente que flui da rede para o conversor:

$$\bar{I} = \frac{\overline{V_{rd}} - \overline{V_{cv}}}{\bar{Z}} \quad (4.10)$$

$$\begin{cases} Re(\bar{I}) = \frac{R}{Z^2} V_{rd} - \frac{R}{Z} k V_{dc} m_a \cos(\alpha - \phi) \\ Im(\bar{I}) = -\frac{\omega L}{Z^2} V_{rd} - \frac{\omega L}{Z} k V_{dc} m_a \sin(\alpha - \phi) \end{cases} \quad (4.11)$$

$$\begin{cases} Re(\bar{I}) = \frac{R}{Z^2} V_{rd} - \frac{R}{Z^2} Re(V_{cv}) - \frac{\omega L}{Z^2} Im(V_{cv}) \\ Im(\bar{I}) = -\frac{R}{Z^2} V_{rd} - \frac{R}{Z^2} Re(V_{cv}) - \frac{\omega L}{Z^2} Im(V_{cv}) \end{cases} \quad (4.12)$$

Relativamente, às potências ativas e reativas fornecidas pela rede, as expressões que se seguem permitem certificar que o controlo da potência ativa e reativa pode ser realizado recorrendo às duas variáveis de comando do conversor: o índice de modulação m_a e pelo ângulo de desfasamento α .

$$V_{rd} \bar{I} = P_{rd} + jQ_{rd} \quad (4.13)$$

$$P_{rd} = \frac{R}{Z^2} V_{rd}^2 - \frac{k}{Z} V_{rd} V_{dc} m_a \cos(\alpha - \phi) \quad (4.14)$$

$$Q_{rd} = \frac{\omega L}{Z^2} V_{rd}^2 - \frac{k}{Z} V_{rd} V_{dc} m_a \sin(\alpha - \phi) \quad (4.15)$$

4.4 Transformação de Quadros de Referência

4.4.1 Generalidades

Existem três quadros de referência, sendo esses $a b c \rightarrow \alpha \beta 0 \rightarrow d q 0$. O primeiro quadro corresponde a um sistema trifásico composto pela junção de três circuitos energizados por forças eletromotrizes alternadas e desfasadas 120° entre si [15]. Sendo assim, é possível adotar as equações seguintes para as tensões:

$$v_{ar}(t) = \sqrt{2} V_{rms} \cos(\omega_r t) \quad (4.16)$$

$$v_{br}(t) = \sqrt{2}V_{rms} \cos(\omega_r t - 120^\circ) \quad (4.17)$$

$$v_{cr}(t) = \sqrt{2}V_{rms} \cos(\omega_r t + 120^\circ) \quad (4.18)$$

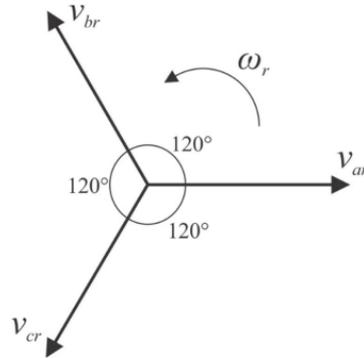


Figura 4.5: Tensão em coordenadas trifásicas [15].

No que diz respeito ao segundo quadro, este é composto por coordenadas também sinusoidais desfasadas em 90° . Por fim, chega-se ao terceiro e último quadro que representa grandezas constantes. Constate-se que, para passar de um quadro para quadro, é necessário recorrer-se a certas transformadas, que serão analisadas a seguir.

4.4.1.1 Transformada de Clarke

A transformada de *Clarke*, também conhecida por transformada $\alpha \beta 0$, corresponde à transformação algébrica de um sistema trifásico noutro sistema com apenas duas coordenadas, sendo estas perpendiculares entre si. Isto significa que, através de cálculos trigonométricos, é possível obter o valor instantâneo espelhado das grandezas $a b c$ para as grandezas nos eixos $\alpha \beta 0$.

Efetivamente, o campo girante é gerado a partir de três correntes sinusoidais desfasadas em 120° (i_a, i_b, i_c), contudo um vetor apenas precisa de duas coordenadas para ser descrito (i_α, i_β), daí recorrer-se à simplificação que se segue:

$$\begin{bmatrix} u_\alpha \\ u_\beta \\ u_0 \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_a \\ u_b \\ u_c \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} u_a \\ u_b \\ u_c \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & 0 & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_\alpha \\ u_\beta \\ u_0 \end{bmatrix}$$

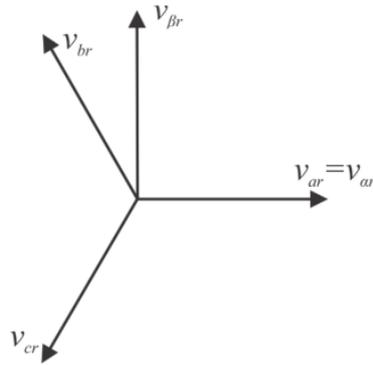


Figura 4.6: Transformada de *Clarke* para um sistema a três fios [15].

4.4.1.2 Transformada de *Park*

A transformada de *Park* pode, também, ser designada por transformada $dq0$, sendo que esta consiste na transformação de um sistema trifásico com grandezas sinusoidais em três sistemas sinusoidais conectados com grandezas contínuas e em regime permanente. Com efeito, esta é capaz de realizar uma reflexão do sistema trifásico, num referencial, para o eixo $dq0$, mantendo a velocidade angular.

No sistema a três fios obtido pela Transformada de *Clarke*, é possível proceder-se ao estudo dos valores de α β em relação às coordenadas dq , pelo que se obtém a simplificação a seguir representada:

$$\begin{bmatrix} u_d \\ u_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta \\ -\sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_\alpha \\ u_\beta \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} u_\alpha \\ u_\beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta \\ \sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_d \\ u_q \end{bmatrix}$$

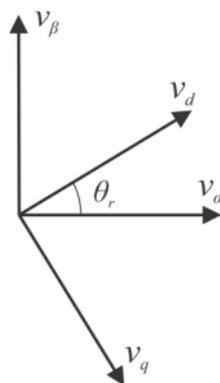


Figura 4.7: Transformada de *Park* para um sistema a três fios [15].

Logo, é possível deduzir que esta transformada, em vez de variar as tensões ou as correntes, de modo a que o vetor do campo gire, opta-se por rodar o referencial dq , obtendo-se tensões e correntes constantes.

Repare-se ainda que o objetivo é maximizar d ($u_d = \sqrt{3}$) e minimizar o q ($u_q = 0$).

4.4.2 Modelo do Quadro de Referência dq

A transformação de quadros de referência é um processo bastante vantajoso, na medida em que permite a passagem de sinais sinusoidais para sinais contínuos, simplificando assim a sua análise e respetiva escolha dos controladores.

Assim sendo, atente-se no sistema que está a ser utilizado como alvo de estudo. Sabe-se que este opera a 50 Hz, sendo que as suas resistências têm um valor de 1Ω e as indutâncias possuem o valor de 1mH:

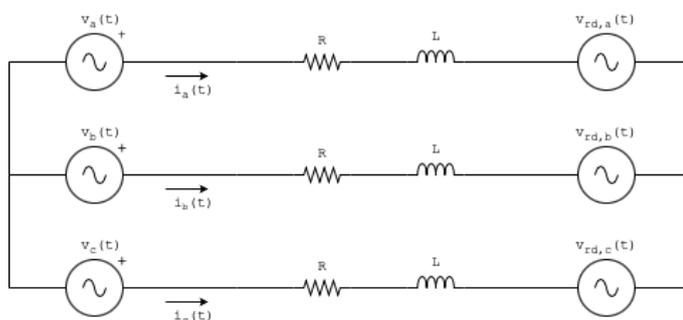


Figura 4.8: Sistema em estudo.

De facto, de modo a ser possível controlar as potências ativas e reativas do circuito, atuando sobre as fontes de tensão, é essencial ter certos aspetos em conta: as equações de tempo do sistema, as transformadas DQ, os controladores PI, o facto de a transformada inversa de DQ definir as tensões e, por fim, testar o sistema no simulador PSIM.

Deste modo, para o sistema em causa tem-se em consideração as equações de tempo do sistema que se seguem:

$$\begin{cases} -v_a(t) + R i_a(t) + L \frac{d}{dt} i_a(t) + v_{rd,a}(t) - v_{rd,b}(t) - L \frac{d}{dt} i_b(t) - R i_b(t) + v_b(t) = 0 \\ -v_a(t) + R i_a(t) + L \frac{d}{dt} i_a(t) + v_{rd,a}(t) - v_{rd,c}(t) - L \frac{d}{dt} i_c(t) - R i_c(t) + v_c(t) = 0 \\ i_a(t) + i_b(t) + i_c(t) = 0 \end{cases} \quad (4.19)$$

Se $v'(t) = v(t) - v_{rd}(t)$:

$$\begin{cases} -v'_a(t) + R i_a(t) + L \frac{d}{dt} i_a(t) - L \frac{d}{dt} i_b(t) - R i_b(t) + v'_b(t) = 0 \\ -v'_a(t) + R i_a(t) + L \frac{d}{dt} i_a(t) - L \frac{d}{dt} i_c(t) - R i_c(t) + v'_c(t) = 0 \\ i_a(t) + i_b(t) + i_c(t) = 0 \end{cases} \quad (4.20)$$

Resolvendo em ordem à derivada da corrente de cada nó:

$$\begin{cases} \frac{d}{dt}i_a(t) = \frac{1}{3L}[R(-2i_a(t) + i_b(t) + i_c(t)) + 2v'_a(t) - v'_b(t) - v'_c(t)] \\ \frac{d}{dt}i_b(t) = \frac{1}{3L}[R(i_a(t) - 2i_b(t) + i_c(t)) - v'_a(t) + 2v'_b(t) - v'_c(t)] \\ \frac{d}{dt}i_c(t) = \frac{1}{3L}[R(i_a(t) + i_b(t) - 2i_c(t)) - v'_a(t) - 2v'_b(t) + 2v'_c(t)] \end{cases} \quad (4.21)$$

De seguida, recorrendo aos quadrados de referência de transformação de abc para dqo , é possível obter o sistema que se segue:

$$\begin{cases} x_d = \sqrt{\frac{3}{2}}(\cos(\theta)x_a + \cos(\theta - \frac{2\pi}{3})x_b + \cos(\theta - \frac{2\pi}{3})x_c) \\ x_q = \sqrt{\frac{3}{2}}(-\sin(\theta)x_a - \sin(\theta - \frac{2\pi}{3})x_b - \sin(\theta - \frac{2\pi}{3})x_c) \\ x_o = \sqrt{\frac{3}{2}}(\frac{\sqrt{2}}{2}x_a + \frac{\sqrt{2}}{2}x_b + \frac{\sqrt{2}}{2}x_c) \end{cases} \quad (4.22)$$

De notar que, nesta etapa, a potência é invariável, sendo que o eixo d apenas alinha com o eixo a , se $\theta(t) = 0$ e o eixo q conduz o eixo d .

Transformando, novamente, de dqo para abc chega-se ao sistema que se segue:

$$\begin{cases} x_a = \sqrt{\frac{3}{2}}(\cos(\theta)x_d - \sin(\theta)x_q + \frac{\sqrt{2}}{2}x_o) \\ x_b = \sqrt{\frac{3}{2}}(\cos(\theta - \frac{2\pi}{3})x_d - \sin(\theta - \frac{2\pi}{3})x_q + \frac{\sqrt{2}}{2}x_o) \\ x_c = \sqrt{\frac{3}{2}}(\cos(\theta + \frac{2\pi}{3})x_d - \sin(\theta + \frac{2\pi}{3})x_q + \frac{\sqrt{2}}{2}x_o) \end{cases} \quad (4.23)$$

Repare-se que:

- $p = v'_a i_a + v'_b i_b + v'_c i_c$
- $p = v_d i_d + v_q i_q + v_o i_o$
- $\theta = \omega t$

Retomando o sistema inicial de equações dos nós da Figura 4.8 e usando as equações temporais do sistema (4.19), obtêm-se as equações seguintes:

$$\begin{cases} L \frac{d}{dt}i_d = v_d - Ri_d + \omega Li_q \\ L \frac{d}{dt}i_q = v_q - Ri_q + \omega Li_d \\ i_o = 0 \end{cases} \quad (4.24)$$

Onde $i_o = 0$ demonstra a existência do neutro. Sabe-se ainda que o modelo em causa no enquadramento dq recorre a sinais do tipo DC, em vez de utilizar sinais sinusoidais, o que promove a facilidade de controlo deste modelo.

De seguida, é essencial realizar a transformação de um sistema de duas entradas e duas saídas acopladas para dois sistemas de uma só entrada e uma só saída:

$$\begin{cases} L \frac{d}{dt} i_d = v_d - Ri_d + \omega Li_q \\ L \frac{d}{dt} i_q = v_q - Ri_q - \omega Li_d \\ i_o = 0 \end{cases} \quad (4.25)$$

Em que i_d é controlado por v_{xd} e i_q é controlado por v_{xq} .

$$\begin{cases} L \frac{d}{dt} i_d = v_d - Ri_d + \omega Li_q \\ L \frac{d}{dt} i_q = v_q - Ri_q - \omega Li_d \end{cases} \quad (4.26)$$

Seguidamente, recorrem-se aos sistemas que se seguem, de modo a simplificar as expressões de v_{xd} e v_{xq} :

$$\begin{cases} v_{xd} = v_d + \omega Li_q \\ v_{xq} = v_q - \omega Li_d \end{cases} \quad (4.27)$$

$$\begin{cases} v_d = v_{xd} - \omega Li_q \\ v_q = v_{xq} + \omega Li_d \end{cases} \quad (4.28)$$

Por fim, obtém-se o sistema simplificado:

$$\begin{cases} v_{xd} = Ri_d + L \frac{d}{dt} i_d \\ v_{xq} = Ri_q + L \frac{d}{dt} i_q \end{cases} \quad (4.29)$$

No entanto, devido a técnicas emergentes, foi introduzido, no sistema em causa, um filtro de ligação LCL de terceira ordem, que permite melhorar o conteúdo harmónico entregue à rede. Adicionalmente, é de notar que a resistência é algo inerente aos cabos, pelo que a sua representação não é necessária. Por conseguinte, atente-se na Figura 4.9:

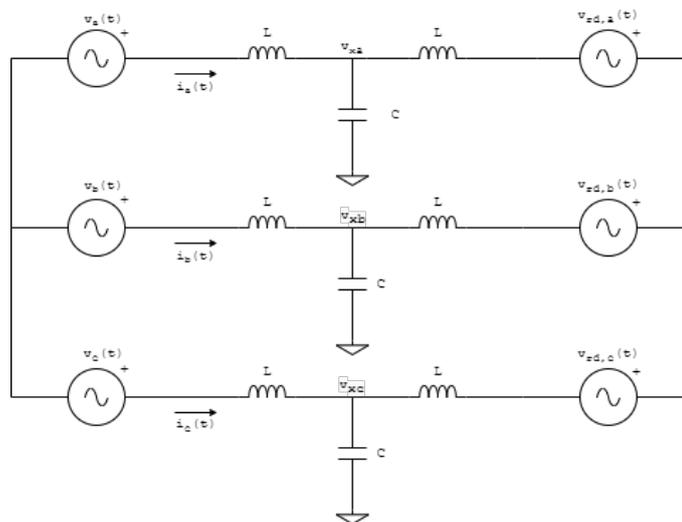


Figura 4.9: Sistema em estudo, recorrendo a um filtro LCL.

Apesar de ser raro, assumiu-se que as indutâncias possuem o mesmo valor. Com efeito, surgem novas equações de tensão para o sistema, que podem ser determinadas da seguinte forma:

$$\frac{V_a - V_{xa}}{j\omega L} + \frac{V_{rd,a} - V_x}{j\omega L} - j\omega V_x C = 0 \Leftrightarrow \frac{V_a + V_{rd,a} - 2V_{xa}}{j\omega L} - j\omega V_{xa} C = 0 \quad (4.30)$$

$$\Leftrightarrow V_a + V_{rd,a} - 2V_{xa} + \omega^2 L V_{xa} C = 0 \quad (4.31)$$

$$\Leftrightarrow V_{xa}(-2 + \omega^2 LC) = -V_a - V_{rd,a} \quad (4.32)$$

$$\Leftrightarrow V_{xa} = \frac{-V_a - V_{rd,a}}{-2 + \omega LC} \quad (4.33)$$

Note-se que, apesar de se ter determinado apenas para o nó a , para os nós b e c , segue-se exatamente o mesmo processo, obtendo-se as equações, que se seguem, para os nós b e c , respetivamente:

$$\Leftrightarrow V_{xb} = \frac{-V_b - V_{rd,b}}{-2 + \omega LC} \quad (4.34)$$

$$\Leftrightarrow V_{xc} = \frac{-V_c - V_{rd,c}}{-2 + \omega LC} \quad (4.35)$$

Relativamente à corrente, é exequível achar-se a equações representadas a seguir:

$$i_a = \frac{V_a - V_{xa}}{j\omega L} = \frac{V_a + \frac{V_a + V_{rd,a}}{2 - \omega^2 LC}}{j\omega L} \quad (4.36)$$

$$= \frac{V_a}{j\omega L} + \frac{V_a + V_{rd,a}}{(2 - \omega^2 LC)j\omega L} = \frac{V_{rd,a} + V_a(3 - \omega^2 LC)}{(2 - \omega^2 LC)j\omega L} \quad (4.37)$$

$$= \frac{1}{j\omega} \frac{V_{rd,a} + V_a(3 - \omega^2 LC)}{2L - \omega^2 L^2 C} = \frac{1}{s} \frac{V_{rd,a} + V_a(3 - \omega^2 LC)}{2j\omega L - j\omega^3 L^2 C} \quad (4.38)$$

Como é possível verificar, o filtro LCL encontra-se no domínio das frequências, sendo que, pelo facto de ser um filtro de terceira ordem, realiza uma maior atenuação dos harmónicos. No entanto, devido à frequência de ressonância, que tende a desestabilizar o controlo de corrente do conversor conectado à rede [16], torna-se ligeiramente mais difícil de o controlar. Por conseguinte, não foi realizada uma análise mais profunda do filtro em causa.

4.4.3 Aplicação do Conversor VSC ao Sistema de Turbina Eólica

O princípio de funcionamento do conversor VSC na rede será semelhante ao comportamento de um gerador síncrono. Efetivamente, este irá controlar as transferências de potência ativa e reativa, através da sua atuação na amplitude e fase da tensão produzida.

Observe-se a imagem apresentada a seguir, onde é possível verificar as diferentes transferências de potência realizadas pelo conversor da rede, tendo em conta as distintas condições de funcionamento:

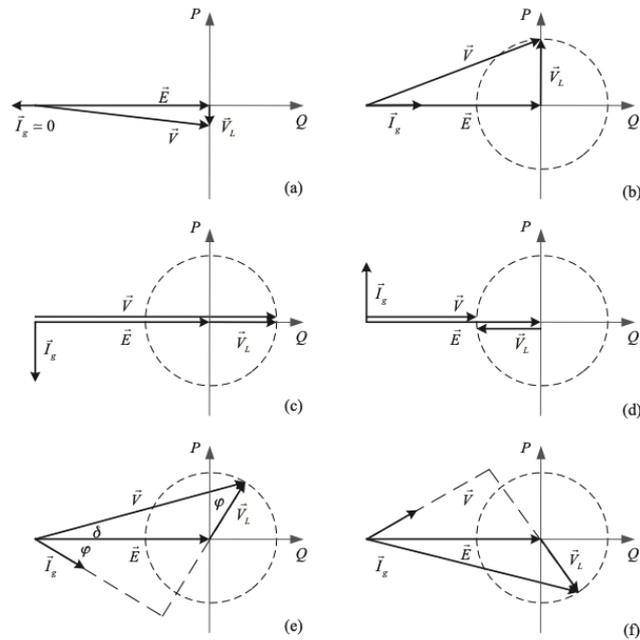


Figura 4.10: Diferentes transferências de potência realizadas pelo conversor da rede, tendo em conta as condições diferentes de funcionamento (V_L corresponde à queda de tensão ao longo do filtro da rede [13]).

A Figura 4.10(a) representa a situação na qual o sistema da turbina eólica não produz energia, pelo que uma pequena potência é absorvida para manter a tensão da ligação DC no seu valor nominal. De facto, o VSC funciona como um retificador e a potência ativa absorvida compensa as perdas no conversor global.

Na Figura 4.10(b) é demonstrado o caso em que o sistema turbina eólica apenas injeta potência ativa, enquanto na Figura 4.10(c) são mostrados os casos em que o conversor da rede funciona como um STATCOM, não havendo injeção de potência ativa, pelo que é esperado que uma pequena quantidade de energia seja drenada da rede, de modo a compensar as perdas.

Por último, as Figuras 4.10(d) e (e) demonstram as situações em que o sistema da turbina eólica injeta tanto potência ativa como reativa [13].

Capítulo 5

Ligação do Conversor ao Gerador

5.1 Modelo Vetorial dos Geradores de Ímanes Permanentemente

O controlo do modelo vetorial, em geral, pode ser definido como uma estratégia de controlo do gerador, que consiste na orientação do vetor de corrente do estator num quadro de referência rotativo (QRR) da máquina. Logo, trata-se de uma forma de controlo de vetores.

De facto, as tensões, correntes e fluxos magnéticos, do gerador em análise, são representados sob a forma de vetor espacial, estando estes inseridos num QRR. Sabendo que a máquina se trata de um gerador síncrono, é natural que o rotor e o estator possuam fluxos síncronos, pelo que é evidente que se deve orientar o QRR, da mesma forma que o eixo d está orientado pelo fluxo do rotor, sendo que, para tal, é essencial ter conhecimento da posição do rotor.

Deste modo, é necessário realizar a medição da posição física angular do rotor, permitindo assim o conhecimento automático de qual a posição do campo magnético produzido pelo rotor. Desta forma, é necessário recorrer a um sensor de velocidade que, a partir desta, irá obter a posição mecânica do rotor. Por conseguinte, tenha-se em consideração o esquema que se segue:

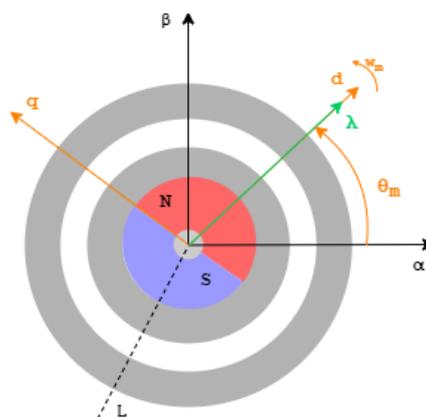


Figura 5.1: Gerador síncrono de ímanes permanentes de rotor cilíndrico. Baseado em [17].

$$i_{sq}^* = \frac{1}{p} \frac{1}{\psi f} T_e^* \quad (5.9)$$

Logo:

$$i_s = \sqrt{i_{sd}^2 + i_{sq}^2} = i_{sq} \quad (5.10)$$

A expressão (5.8) mostra que a corrente referente ao eixo d do estator é igual a zero, pelo que se obtém a seguinte expressão para o torque:

$$T_e = \frac{3}{2} p \phi i_{sq} \quad (5.11)$$

Sabendo que ϕ é uma constante, é possível afirmar que existe proporcionalidade direta entre T_e e i_{sq} , o que significa que o torque será diretamente controlado pelo eixo q .

5.1.1 Princípio de Controlo de Corrente com o Eixo d a Zero - ZDC

Retomando as expressões (5.8), (5.9) e (5.10), é possível verificar que o controlo ao qual se recorreu é o de corrente com o eixo d a zero. Este tipo de controlo consiste na transformação da corrente trifásica do estator no quadro de referência estacionário em componentes do eixo dq no quadro de referência síncrono.

De facto, tal como é observável na expressão (5.8), a corrente i_{ds} é mantida a zero pelo controlador, logo a corrente do estator i_s será igual à componente da corrente do eixo q , i_{sq} , ou seja:

$$\begin{cases} \vec{i}_s = i_{sd} + j i_{sq} = j i_{sq} \\ i_s = \sqrt{i_{sd}^2 + i_{sq}^2} \end{cases} \quad (5.12)$$

em que \vec{i}_s corresponde a vetor espacial da corrente do estator e i_s não só representa a magnitude do vetor referido, como também o valor de pico da corrente trifásica do estator no quadro de referência estacionário.

Observe-se a expressão para o torque eletromagnético do rotor:

$$T_e = \frac{3}{2} P (\phi i_{sq} + (L_d - L_q) i_{sd} i_{sq}) \quad (5.13)$$

Que simplificando, se obtém a equação (5.11). De facto, esta equação mostra que, quando $i_{sd} = 0$, o torque do motor é proporcional à corrente do estator i_s e, adicionalmente, se existir uma ligação constante do fluxo do rotor, o binário também apresentará uma relação linear do estator.

Atente-se agora na figura que se segue, onde está explanado um diagrama vetorial espacial para um motor síncrono que esteja a ser controlado via ZDC.

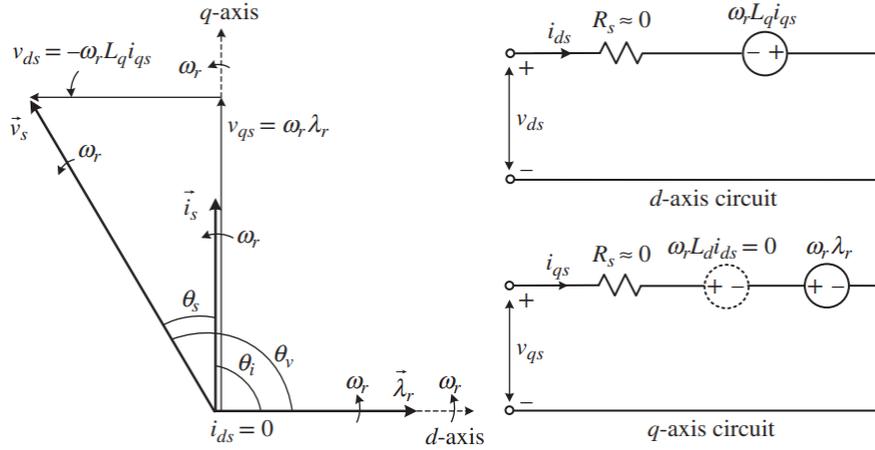


Figura 5.3: Diagrama vetorial espacial de um gerador síncrono com controle ZDC [19].

Efetivamente, o vetor da corrente do estator é perpendicular ao vetor do fluxo do rotor. Deduzindo a expressão da magnitude da tensão do estator, chega-se a:

$$v_s = \sqrt{v_{sd}^2 + v_{sq}^2} = \sqrt{(-\omega_r L_q i_{sq})^2 + (\omega_r \lambda_r)^2} \quad (5.14)$$

Já o ângulo do fator de potência do estator é dado por:

$$\theta_s = \theta_v - \theta_i \quad (5.15)$$

Onde θ_v e θ_i correspondem aos ângulos de tensão no estator e aos vetores de corrente, respectivamente. Cada um deles possui uma expressão associada que é apresentada a seguir:

$$\begin{cases} \theta_v = \tan(-1) \frac{v_{sq}}{v_{sd}} \\ \theta_i = \tan(-1) \frac{i_{sq}}{i_{sd}} = \frac{\pi}{2} \end{cases} \quad (5.16)$$

Por último, para $i_{sd} = 0$ o ângulo do fator de potência do estator, pode traduzir-se na seguinte expressão:

$$\theta_s = \theta_v - \theta_i = \tan(-1) \frac{v_{sq}}{v_{sd}} - \frac{\pi}{2} \quad (5.17)$$

5.1.2 Modelação ao nível do sistema do algoritmo de controlo orientado para o campo

Em primeiro lugar, é importante perceber o que é um controlador PI. Realmente, este tipo de controladores é largamente utilizado em eletrónica de potência, visto possuir não só uma estrutura, mas também uma implementação bastante simples. Geralmente, recorre-se a estes com o intuito de controlar quantidades constantes ou paulatinamente variáveis como, por exemplo, em situações em que a corrente é contínua, alternada ou até mesmo, em transformações de coordenadas. Assim,

observe-se a figura que se segue, onde é possível visualizar o controlador PI, quando implementado de forma paralela:

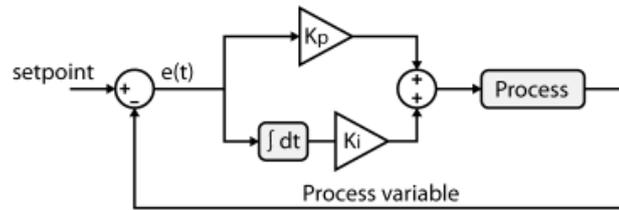


Figura 5.4: Controlador PI em paralelo [20].

Retomando a Figura 5.2, é possível perceber que o controlo das correntes I_{ds} e i_{qs} é independente, pelo que para tal, como em qualquer estratégia de controlo vetorial, pode recorrer-se a dois controladores PI associados a uma rede de desacoplamento. Usualmente, o algoritmo do controlo orientado para o campo gera referências de tensão, que são transformadas por um modulador PWM em sinais de alimentação usados por um inversor de fonte de tensão.

A figura referida anteriormente mostra o diagrama de blocos completo da implementação, com um modulador PWM baseado numa portadora e num módulo codificador/descodificador. Note-se que a modulação vetorial espacial poderia ser utilizada em alternativa, a fim de melhorar a utilização do bus DC.¹

No entanto, pode utilizar-se uma abordagem ligeiramente mais intuitiva. Constate-se que os eixos d e q , integrados num quadro de referência rotativo, são dotados de um significado físico:

- Eixo d : encontra-se diretamente alinhado com um polo magnético do rotor.
- Eixo q : está deslocado 90° elétricos, daí a designação eixo de quadratura.

De facto, dois polos magnéticos de polaridades opostas são sempre desfasados em 180° . Assim, diz-se que o sistema está em equilíbrio e que o vetor de fluxo do estator está alinhado com o eixo d , se os polos do estator estiverem alinhados com os seus polos contrários do rotor. Contrariamente, se os polos magnéticos do estator não estiverem alinhados com os seus polos opostos, as forças atrativas e repulsivas vão gerar um torque no rotor. Assim, se o fluxo do estator não estiver alinhado com o eixo d e a diferença entre os ângulos dos dois, usualmente, designado por ângulo de carga, é diferente de zero. Logo, é possível deduzir que o eixo d é apenas responsável por magnetizar a máquina, enquanto a componente do eixo q do fluxo do estator, contribui para a geração do torque.

¹O *bus DC* é um tipo de circuito ou protocolo que serve como via de comunicação comum partilhada por vários componentes e que utiliza um nível de tensão de corrente contínua como referência. Também pode ser utilizado para descrever um sistema de distribuição de energia partilhada por múltiplos componentes dentro de uma máquina ou sistema de distribuição de energia [21].

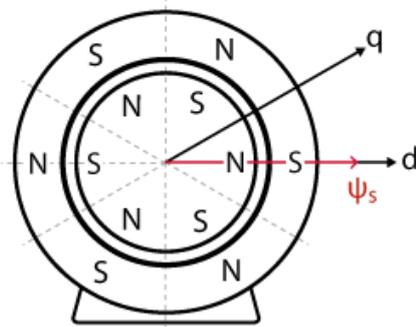


Figura 5.5: Alinhamento do vetor fluxo magnético com o torque a zero [18].

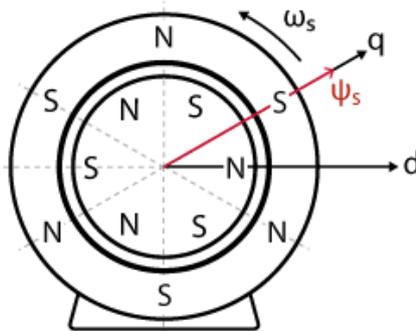


Figura 5.6: Alinhamento do vetor fluxo magnético com o torque máximo [18].

No que diz respeito ao controlo das correntes do estator geradas pela fonte de tensão inversora, é necessário determinar a relação entre as tensões e correntes do estator. Deste modo, tendo em conta que, na versão simplificada (4.8), as fases no estator de um gerador síncrono de ímãs permanentes correspondem essencialmente a circuitos RL, as funções de transferência que ligam a tensão à corrente são dadas por:

$$H_d(s) = \frac{I_{ds}(s)}{U_{ds}(s)} = \frac{\frac{1}{R_s}}{1 + s\frac{L_d}{R_s}} = \frac{K_1}{1 + sT_1} \quad (5.18)$$

$$H_q(s) = \frac{I_{qs}(s)}{U_{qs}(s)} = \frac{\frac{1}{R_s}}{1 + s\frac{L_q}{R_s}} = \frac{K_2}{1 + sT_2} \quad (5.19)$$

Veja-se ainda que, para realizar o controlo das correntes do estator, basta recorrer dois controladores PI e conjugá-los com algumas operações matemáticas, de modo a ser exequível calcular os ciclos de funcionamento PWM. Sabendo que os eixos d e q se encontram acoplados, é essencial que exista uma rede de desacoplamento com o propósito de permitir o controlo independente de cada componente. Deste modo, os reguladores PI podem ser sintonizados através do critério de

magnitude ótima:²

$$\begin{cases} T_n = T_1 \\ T_i = 2K_1 T_{tot} \\ K_p = T_n/T_i \\ K_i = 1/T_i \end{cases} \quad (5.20)$$

Onde T_{tot} corresponde à soma de todos os pequenos atrasos do sistema.

Relativamente ao fluxo de referência, sabe-se que o controlo orientado para o campo é utilizado principalmente como controlador de torque. Por conseguinte, a referência de corrente do eixo d é normalmente fixada em zero, a fim de maximizar a produção de binário. A corrente do eixo d pode ser definida para uma referência não zero quando se utiliza uma técnica de otimização de fluxo. Por exemplo, as técnicas de enfraquecimento de campo reduzem o fluxo do estator no eixo d , a fim de operar acima da velocidade nominal.

²Um possível objetivo do *design* do sistema é manter a curva de resposta de magnitude tão plana e próxima da unidade, para uma largura de banda tão grande quanto possível, para uma dada combinação de planta e controlador. Esta técnica designa-se por magnitude ótima. A magnitude ótima é uma técnica de otimização, uma vez que ajuda a determinar os "melhores" coeficientes de controlador para uma dada configuração de controlador que, anteriormente, tinham sido determinados como sendo os mais capazes de controlar um plano fixo [22].

Capítulo 6

Conclusão

A realização da dissertação intitulada de "Ligação à Rede de Geradores Eólicos" possibilitou, primeiramente, a oportunidade de estudar o estado de arte com os conceitos gerais associados ao tema. Ou seja, permitiu analisar não só desde a formação até às características do vento, mas também a estrutura e os principais componentes de uma turbina eólica. De seguida, um dos pontos fulcrais desta dissertação centrar-se na investigação e escolha de um dos componentes fundamentais de uma turbina eólica: o gerador a utilizar. Com efeito, foi possível compreender que a escolha ideal são os geradores síncronos de ímanes permanentes, na medida em que, este tipo de geradores, devido à sua composição pode possuir dimensões e peso mais reduzidos, algo favorável para a estrutura da turbina. Isto apenas é possível, devido ao facto de estes geradores não serem dotados de escovas, o que leva a que o fluxo magnético do rotor seja gerado pelos ímanes permanentes. Outro fator que influencia o tamanho do gerador, é o facto da densidade da potência do gerador poder ser aumentada, devido à inexistência de enrolamentos no rotor. Resta ainda salientar um outro benefício associado a este tipo de geradores, que é a ausência de perdas do enrolamento do rotor, o que permite um aumento da eficiência do gerador. Quanto às principais desvantagens é de destacar a sua tendência para a desmagnetização e o facto de serem mais dispendiosos.

Numa fase seguinte, é essencial analisar o conversor de ligação à rede elétrica, que se denomina de conversor VSC. Efetivamente, apesar de existirem outros conversores alternativos, o elemento referido é o mais utilizado atualmente e que prova ter melhores resultados, visto que, até à data, não foi projetado ou encontrado outro que possuísse características mais favoráveis. Note-se que a maioria dos elementos integrantes de uma turbina eólica já estão selecionados, uma vez que o tema em causa, já é conhecido e solucionado. Nesta etapa foi ainda necessário, referir a transformação de quadros de referência, de modo a simplificar a compreensão da ligação do conversor à rede e passagem de corrente DC para AC.

Por fim, foi fundamental estudar a ligação do conversor ao gerador, pelo que, para tal, analisou-se o modelo vetorial dos geradores síncronos de ímanes permanentes e o princípio de controlo de corrente aplicável ao tema em causa.

Naturalmente, o grande desafio seria trazer alguma inovação a este projeto, de modo a conseguir tornar o processo de geração de energia ainda mais eficiente. No entanto, foram consideráveis as dificuldades enfrentadas, ao longo do decurso da dissertação, uma vez que o tema em causa era completamente díspar da minha área de formação, dado que envolvia assuntos nunca antes aprofundados. Deste modo, foi inevitável mudar um pouco o rumo da dissertação, focando o estado de arte principalmente na vertente da energia eólica em si e descartando possíveis simulações de controladores, que estavam previstas.

Referências

- [1] "Utility-scale solar"Wikipédia. https://en.wikipedia.org/wiki/Utility-scale_solar
- [2] S. Sumathi, L. Ashok Kumar, P. Surekha, *Solar PV and Wind Energy Conversion Systems: An Introduction to Theory, Modeling with MATLAB/SIMULINK, and the Role of Soft Computing Techniques*, 1st ed. Switzerland: Springer Charm, 2015
- [3] "Força de Coriolis"<https://www.infopedia.pt/apoio/artigos/\protect\T1\textdollarforca-de-coriolis>
- [4] Tony Burton, David Sharpe, Nick Jenkins, Ervin Bossanyi, *Wind Energy Handbook*, 1st ed. West Sussex: John Wiley & Sons, 2001
- [5] "Como funciona um aerogerador?"<https://www.generg.pt/pt/area-educativa/area-educativa-eolica/>
- [6] "Yaw System"https://en.wikipedia.org/wiki/Yaw_system
- [7] Artur Fernandes Costa. (2020). Introdução às Máquinas Elétricas Rotativas [PowerPoint: Slides]. Available: https://sigarra.up.pt/feup/pt/conteudos_service.conteudos_cont?pct_id=734075&pv_cod=21as7QbtaUma
- [8] J.M. Ferreira de Jesus, Rui M.G. Castro, "Equipamento Elétrico dos Geradores Eólicos", Instituto Superior Técnico, Lisboa, 2004
- [9] Ned Mohan, Tore M. Undeland, William P. Robbins, *Power Electronics: Converters, Applications and Design*, 2nd ed. Estados Unidos da América: John Wiley & Sons, Inc, 1995
- [10] Mario Tomé Correia Chaves, "Utilização de Geradores de Ímanes Permanentes em Aproveitamentos de Energia Renovável", FEUP, UP, Porto, Portugal, 2013. [Online]. Available: https://sigarra.up.pt/fpceup/en/pub_geral.pub_view?pi_pub_base_id=26912
- [11] Jamal A. Baroudi, Venkata Dinavahi, Andrew M. Knight, "A review of power converter topologies for wind generators", *Renew Energy*, vol. 32, no. 14, pp. 2369-2385, 2007, doi:10.1016/j.renene.2006.12.002
- [12] Afonso Gil Portugal de Sena Lopes, "Controlo Avançado de Conversores para Sistemas Fotovoltaicos", FEUP, UP, Porto, Portugal, 2013. [Online]. Available: https://webcache.googleusercontent.com/search?q=cache:Nzxulhu8P9QJ:https://sigarra.up.pt/fep/en/pub_geral.show_file%3Fpi_doc_id%3D11584+&cd=3&hl=pt-PT&ct=clnk&gl=pt&client=safari

- [13] Remus Teodorescu, Marco Liserre and Pedro Rodríguez, *Grid Converters for Photovoltaic and Wind Power Systems*, 1st ed. United Kingdom: John Wiley & Sons, Ltd, 2011.
- [14] Carlos João Rodrigues Costa, "Modelização e Controlo de Conversores de Tensão Aplicados à Máquina Assíncrona Duplamente Alimentada", FEUP, UP, Porto, Portugal, 2010. [Online]. Available: https://web.fe.up.pt/~cjr/dissertacoes/LigacaoRedeGeradoresEolicos/a40%20-%202010_09_13__cjr_Tese.pdf
- [15] André Miguel Nicolini, "Desenvolvimento de um Sistema de Controle e Supervisão de Inversor para Turbinas Eólicas", Universidade Federal de Santa Maria, Centro de Tecnologia, Santa Maria, RS, Brasil, 2017. [Online]. Available: https://repositorio.ufsm.br/bitstream/handle/1/21419/DIS_PPGEE_2017_NICOLINI_ANDRE.pdf.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- [16] "Conversores CC/CA – Filtro LCL"https://www.gesep.ufv.br/wp-content/uploads/Aula_06-Conversores-cc_ca-Filtro-LCL.pdf
- [17] Carlos João Rodrigues Costa. (2021). *Permanent Magnet Synchronous Machines; FOC: Field-Oriented Control* [Powerpoint slides].
- [18] Simon Strobl. "Field oriented control (FOC) of permanent magnet synchronous machine (PMSM)". imperix. <https://imperix.com/doc/implementation/field-oriented-control-of-pmsm>
- [19] Bin Wu, Mehdi Narimani, *High-Power Converters and AC Drives*, 2nd ed. New Jersey: John Wiley & Sons, Inc, 2017
- [20] Gabriel Fernandez. "PI controller implementation for current control". imperix. <https://imperix.com/doc/implementation/pi-controller>
- [21] "What is DC bus?". Elmo Motion control. <https://www.elmomc.com/glossary-item/dc-bus/>
- [22] Jeffrey W. Umland, Mohammed Safiuddin, "Magnitude and Symmetric Optimum Criterion for the Design of Linear Control Systems: What Is It and How Does It Compare with the Others?", IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRY APPLICATIONS, vol. 26, no. 3, Maio/Junho 1990, doi: 10.1109/28.55967
- [23] "Características e Especificações de Geradores", WEG Equipamentos Elétricos S.A., Jaraguá do Sul - SC, 2020. [Online]. Available: <https://www.weg.net/institucional/PT/pt/>
- [24] "Enrolamento de campo." Wikipédia. https://pt.wikipedia.org/wiki/Enrolamento_de_campo
- [25] "Betz's law." Wikipédia. https://en.wikipedia.org/wiki/Betz%27s_law
- [26] "Limite de Betz"E-LEE. <http://e-lee.ist.utl.pt/realisations/EnergiesRenouvelables/FiliereEolienne/Generalites/Etudeappliquee/EtudeappliqueeEolien3.htm>
- [27] Wafa Torki, Faten Grouz, Lassaad Sbita, "Vector control of a PMSG direct-drive wind turbine", 2017 International Conference on GECS, 2017, doi: 10.1109/GECS.2017.8066247
- [28] Carlos João Rodrigues Costa. (2021). *Reference frame Transformations* [Powerpoint slides].

- [29] Carlos João Rodrigues Costa. (2021). *Reference frame Transformations - example* [Powerpoint slides].
- [30] Bogdan M. Wilamowski, J. David Irwin, *The Industrial Electronics Handbook: Power Eletronics and Motor Drives*, 2nd ed. Estados Unidos da América: Taylor & Francis Group, .
- [31] Dieter Gerling, *Electrical Machines: Mathematical Fundamentals of Machine Topologies*, 1st ed. Berlin: Springer, 2015.
- [32] ifm. "Transição energética bem sucedida com energia eólica."ifm.com. <https://www.ifm.com/pt/pt/applications/060/transicao-energetica-bem-sucedida-com-energia-eolica.html#!/content/documents/pt/shared/applications/060/1020/turbina-eolica-com-engrenagem/turbina-eolica-com-engrenagem>
- [33] O. Apata, D.T.O Oyedokun, "An overview of control techniques for wind turbine systems", Sept 2020, doi:10.1016/j.sciaf.2020.e00566
- [34] Dan Zhao, Nuomin Han, Ernest Goh, John Cater, Arne Reinecke, *Wind Turbines and Aerodynamics Energy Harvesters*, 1st ed., Academic Press, 2019.
- [35] Povl Brondsted, Rogier Nijssen, Stergios Goutianos, *Advances in Wind Turbine Blade Design and Materials*, 2nd ed., Woodhead Publishing, 2022.
- [36] Paul Breeze, *Wind Power Generation*, 1st ed., Academic Press 2015.