



Fábio Carlos da Costa Pereira

COLOCAÇÃO EM SERVIÇO
DE UM GERADOR EÓLICO DUPLAMENTE ALIMENTADO

Dissertação de Mestrado

Janeiro de 2016



UNIVERSIDADE DE COIMBRA



Universidade de Coimbra
Faculdade de Ciências e Tecnologias
Departamento de Engenharia Eletrotécnica e de Computadores

Dissertação de Mestrado Integrado em Engenharia Eletrotécnica e de Computadores
Especialização no Ramo de Energia

Tema:

Colocação em serviço de um Gerador Eólico de Indução Duplamente Alimentado

Autor:

Fábio Carlos da Costa Pereira

Orientador:

Professor Doutor André Manuel dos Santos Mendes

Presidente do Júri:

Professor Doutor Rui Pedro Duarte Cortesão

Vogal:

Professor Doutor Mário João Simões Ferreira dos Santos

Coimbra - Portugal

Janeiro 2016

“Deixe o futuro dizer a verdade, e avaliar cada um de acordo com os seus trabalhos e as suas conquistas”

Nikola Tesla

Agradecimentos

Antes de mais, queria deixar um agradecimento justo aos meus pais que colocaram todo o seu empenho com objetivo de eu conseguir alcançar esta meta final. Ao longo destes anos, proporcionaram-me sempre as melhores condições possíveis de maneira a facilitar o meu percurso académico. Por eles e para eles fiz todos os possíveis para tentar corresponder às expectativas que tinham em mim, e aqui estou na reta final cheio de orgulho dos grandes pais que tenho.

Ao longo desta etapa que se pode dividir em duas, a estudantil e uma posterior já profissional, fiz imensos amigos que tornaram sempre a minha vida mais fácil permitindo que fosse passo a passo atingindo todos os meus objetivos, todos eles que sabem quem são. Um muito obrigado.

Sr. Professor André Mendes durante o período em que tive que elaborar a tese, devido à falta de disponibilidade que me fez estar imenso tempo ausente senti sempre um apoio incondicional que me permitiu focar na minha carreira profissional, sem o professor não seria possível estar no patamar onde estou neste momento.

Ao caro amigo e companheiro de trabalho que me proporcionou a oportunidade, acolheu e me ensinou tudo na minha primeira aventura profissional que serviu como base desta tese, devo mais que um agradecimento. Poucas são as pessoas que têm esta grande oportunidade que tive e sem a sua ajuda não era possível, Sr. Engenheiro Fernando Silva.

Devo ainda agradecer aos responsáveis da empresa *Endiprev* para a qual trabalho e que me permitiu desenvolver a tese a nível industrial. Um agradecimento especial ao Sr. Rúben Ramirez responsável de comissionamento da *AlstomWind*, empresa para a qual prestei serviços como empresa subcontratada.

Para todos os que me acompanharam e me ajudaram neste grande percurso académico, correndo o risco de me esquecer de alguém em específico.

E finalmente para a pessoa mais especial que durante todo o meu percurso académico serviu como guia para que nunca caísse no desalento. Se alcancei o que alcancei devo-lhe a ela, em todos os momentos mais difíceis que permitiam a vontade de desistir ela esteve ao meu lado incentivando-me a tentar e a lutar e nunca me deixou voltar atrás. Mais do que tudo levou-me ao

autocontrolo e à capacidade de encarar sempre todos os desafios de maneira positiva. Não é fácil descrever em palavras o quanto estou grato pela pessoa que foste.

É um enorme orgulho viver rodeado de pessoas assim.

A todos:

Fábio Pereira

Resumo

A energia Eólica tem vindo a ganhar uma enorme importância por todo o Mundo. A evolução das tecnologias aplicáveis leva à aceitação do mercado que se molda cada vez mais a este tipo de produção.

A utilização da energia proveniente do vento remonta à antiguidade, mas só agora com os conceitos tecnológicos emergentes é possível a proliferação de aerogeradores à escala global.

Com o aumento da aposta neste tipo de energia, surge assim uma possibilidade de negócio para grandes empresas do ramo, e conseqüentemente, uma rivalidade saudável proporcionando o acréscimo de investimento no estudo e desenvolvimento de todo o conteúdo eletrónico utilizado desde os geradores aos conversores de potência.

Hoje em dia, os variados fabricantes disponibilizam várias soluções para o controlo dos aerogeradores. Os modelos focam-se principalmente no *design* da turbina eólica, no tipo de gerador e no tipo de eletrónica de potência para ligação à rede elétrica. Estudos de diversos conceitos de produção e estratégias de controlo tornam-se emergentes para dotar os sistemas de maior eficiência, qualidade de serviço e disponibilidade dos equipamentos. O rendimento do sistema é condicionado pelo ponto de funcionamento da máquina, tornando-se necessário incluí-lo no controlo da mesma, através de algoritmos que diferem de fabricante para fabricante, a capacidade de deteção desse mesmo ponto.

No âmbito desta tese desenvolvida em ambiente industrial, foram analisados e demonstrados os métodos de preparação para a posta em serviço/comissionamento duma turbina eólica DFIG (*double feed induction machine*) do fabricante Alstom. Foi feita uma recolha de dados e posterior análise de possíveis falhas durante e após o início de produção de energia da mesma. Todos os dados e motivos de aprendizagem foram maioritariamente adquiridos no parque Eólico *Ashegoda* em *Mekele* na *Etiópia*. Um parque constituído por 54 máquinas do fabricante Alstom para o qual a Endiprev foi subcontratada para executar o comissionamento.

Importante evidenciar desde já que a dissertação de mestrado contém alguns pontos confidenciais que não podem em caso algum ser utilizados sem a devida autorização.

Palavras-chave: Eólica, Alstom, DFIG, Pré-operacionais e Comissionamento.

Abstract

Wind energy has coming to increase its importance all over the world. The development of the applicable technologies in this area leads this type of energy production to be well-accepted by the consumers. The use of wind to produce energy is not newness, this technique comes from ancient times. However, with the new emergent technologic concepts, was possible to introduce it through the worldwide.

With the increasing investments in this type of energy, new business opportunities are arising for big companies among this industry and therefore a healthy competition, providing an additional investment in the research and development of all electronic components used since the generators to power converters.

Nowadays, the manufacturers offer several solutions for controlling windmills (wind turbines). The models are mainly focused on the windmills design, on its type of generator and its type of power electronics to the grid connection. Studies of various concepts of production and control strategies are increasing in order to provide the most efficient systems, service quality and availability time of the equipment. The system performance is affected by the machine operating point. And so it is necessary to include it in the system's monitoring through algorithms, that might be different from manufacturer to manufacturer with regard to capability of detection that point.

Over this master's thesis that was developed at industrial environment, preparation methods of commissioning of a DFIG (double feed induction machine) windmills have been analyzed and demonstrated – Alstom was the windmills supplier. A data collection and subsequent analysis of possible failures was taken during and after the beginning of windmills production. All data were mostly collected in the Wind Ashegoda Park in Mekele, Ethiopia. This park is consisted by 54 Alstom Turbines to which the Endiprev was subcontracted to execute the project.

It is important to mention that this master's thesis contains confidential information which cannot be used without permission under any circumstances.

Keywords: Wind, Alstom, DFIG, Preoperational and Commissioning.

Índice

Agradecimentos	V
Resumo	VII
Abstract	IX
Lista de Figuras	XV
Lista de Tabelas	XIX
Lista de Abreviaturas	XXI
Capítulo 1	1
1. Estado da Arte	1
1.1 Introdução	1
1.2 Evolução dos recursos eólicos	2
1.3 Características do vento	5
1.3.1 Origem do vento	5
1.3.2 Variações globais do vento	7
1.3.3 Variações locais do vento	8
1.4 Potencial eólico	8
1.4.1 Proveniência Energética	8
1.4.2 Capacidade de exploração de energia de uma massa de ar	9
1.5 Tecnologias dos sistemas de produção	10
1.5.1 Topologias Utilizadas	11
1.5.2 Conceitos de Controlo de Potência	12
1.5.3 Conversores de frequência	14
1.5.4 Conceito de Gerador	15
1.5.5 Sistemas de Produção de Energia Eólica	16
Capítulo 2	18

2. Gerador Assíncrono Duplamente Alimentado	18
2.1 Introdução	18
2.2 Esquema equivalente	18
2.3 Modos funcionamento	21
2.4 Cascata Subsíncrona	22
2.5 Controlo do sistema	23
2.6 Conteúdo Harmónico	24
Capítulo 3	25
3. Máquina de indução duplamente alimentada ECO 74	25
3.1 Máquina estudada	25
3.2 Princípios de funcionamento	26
3.2.1 Descrição Mecânica	26
3.2.2 Descrição Elétrica	27
3.2.3 Componentes Constituintes	29
3.2.4 Modos de operação	31
Capítulo 4	37
4. Pré operacionais	37
4.1 Transformador	37
4.2 Armários	38
4.3 Gerador	39
4.4 Conversor	40
4.5 <i>Pitch</i>	40
4.6 Energização	42
4.7 Verificações Finais	43
Capítulo 5	45
5. Testes Operacionais	45
5.1 Recolha normal -TRA01	45
5.2 Recolha de emergência - TRA02	46

5.3	Regulação a 500 rpm - REG500	47
5.4	Regulação à velocidade de conexão - REG1100	49
5.5	Comissionamento do conversor	49
5.5.1	Falhas do sistema	50
5.5.2	<i>Trigger a OFF</i>	50
5.5.3	Ativação do sistema do lado linha (LSC)	51
5.5.4	Ativação do sistema lado máquina (MSC - standby)	51
5.5.5	Sincronismo	51
5.5.6	Paralelo	52
5.5.7	Produção Limitada - OPL01	53
5.5.8	Produção nominal - OPN01	54
5.6	Conclusão	54
Capítulo 6		55
6. Conclusões		55
Bibliografia		57
ANEXO A		59
ANEXO B		61
ANEXO C		67
ANEXO D		77
ANEXO E		80
ANEXO F		82

Lista de Figuras

Figura 1.1- Sail windmill [2]	2
Figura 1.2 - Post mill [2]	2
Figura 1.3 - Turbina eólica Charles Brush 1888[4]	2
Figura 1.4 - Turbina eólica de eixo vertical – <i>Darrius</i>	3
Figura 1.5 - Turbina eólica de eixo vertical - <i>Darrius</i> H	3
Figura 1.6 - Turbina eólica de eixo vertical - Savonius	3
Figura 1.7 - Movimentações do vento no globo terrestre[8]	6
Figura 1.8 - Espectro da velocidade do vento, parque eólico de Brookhaven (Nova York)	6
Figura 1.9 - Frequência de ocorrência da velocidade do vento (%) [10]	7
Figura 1.10 - Consequência de obstáculos na direção do vento	8
Figura 1.11 - Variáveis de estado duma turbina eólica	9
Figura 1.12 - Classificação turbinas das eólicas	11
Figura 1.13 - Curva de potência da turbina com controlo de <i>stall</i> ativo	13
Figura 1.14 - Soluções técnicas possíveis para os geradores[13]	16
Figura 2.1 - Esquema equivalente da máquina	19
Figura 2.2 - Esquema equivalente de Thevenin da máquina	20
Figura 2.3 - a) Velocidade subsíncrona b) Velocidade supersíncrona	22
Figura 2.4 - Cascata subsíncrona	23
Figura 3.1 - Estrutura mecânica	27
Figura 3.2 - Estrutura elétrica	28
Figura 3.3 - Indutâncias de Choke	29
Figura 3.4 - Filtro dv/dt	29
Figura 3.5 - Estrutura interna IGBT	30
Figura 3.6 - CSC4	30
Figura 3.7 - Contactador pré-carga	30
Figura 3.8 - Esquema Chopper	31
Figura 3.9 - Crowbar	31
Figura 3.10 - Modos de operação do conversor	32
Figura 4.1 – Escovas do rotor	39
Figura 4.2 – Rotor -verificação de isolamento do barramento	39
Figura 4.3 – Barramento do estator	39
Figura 4.4 - Encoder (overspeed mecânico)	40

Figura 4.5 - Encoder e overspeed	40
Figura 4.6 - Ligações internas	40
Figura 4.7 – Entradas CSC4	40
Figura 4.8 - Armário do conversor	40
Figura 4.9 -Transformadores de corrente	40
Figura 4.10 - Vista elétrica geral do <i>pitch</i>	42
Figura 4.11 - Consola de referência	42
Figura 4.12 - Sensores de fim de curso	42
Figura 4.13 - SlipRing	42
Figura 4.14 - Motor DC	42
Figura 4.15 - Sensor de vibrações	44
Figura 4.16 - Encoder yaw - sensor de torção dos cabos	44
Figura 4.17 - Sensores de velocidade e direção do vento	44
Figura 4.18 - Fusíveis e switches de sinais associados	44
Figura 4.19 - TCU Galileo	44
Figura 4.20 - Descarregadores de sobretensão	44
Figura 5.1 - TRA01 - Posição e velocidade da pá 1	46
Figura 5.2 - TRA02 - Posição e velocidade da pá 1	46
Figura 5.3 -REG500-Velocidade do vento velocidade do gerador e posição da pá 1	48
Figura 5.4 - Velocidade do gerador e posição da pá 1	49
Figura 5.5 -Velocidade do gerador, tensão de entrada do conversor e da rede	50
Figura 5.6 - Tensões à entrada do conversor, tensões da rede e do estator em sincronismo, tensões de excitação do rotor e velocidade do gerador	52
Figura 5.7 - Tensões do rotor, tensão da rede e do estator em sincronismo e DCLink controlado	53
Figura 5.8 - Velocidade do rotor, potência ativa e reativa, tensões do rotor e tensões do estator e da rede em sincronismo	54
Figura B.1 - Topologia com gerador síncrono de rotor bobinado	61
Figura B.2 - Topologia com gerador síncrono de ímanes permanentes	62
Figura B.3 - Topologia com motor de indução duplamente alimentado	63
Figura B.4 - Topologia de gerador de indução de rotor bobinado	64
Figura C.2 -Eixos d – q nas várias referências	71
Figura C.3 - Estrutura do controlo vetorial para o conversor do lado do rotor	73
Figura C.4 - Estrutura do controlo vetorial para o conversor do lado da rede	75

Figura D.1 - Estrutura Nacelle[26]	77
Figura D.2 - Estrutura torre	79
Figura D.3 - Visão geral do gerador[26]	79
Figura F.1 - FRM - ficheiro de operacionais	82

Lista de Tabelas

Tabela 1 - Turbinas eólicas predominantes em 2002 [7]	4
Tabela 2 – Condições dos modos de operação	22
Tabela 3 - Especificações técnicas da máquina	25
Tabela 4 - Principais componentes do conversor	29
Tabela 5 - Comparação entre conversor: Back-to-Back e conversor matricial	59
Tabela 6 - Comparação entre o conversor Back-to-Back e o conversor multinível	59
Tabela 7 - Informação técnica do conversor	80

Lista de Abreviaturas

Abreviatura	Descrição
AC	Alternating current
BT	Baixa tensão
CSC	Control system converter
DC	Direct current
DFIG	Double Feed Indution Machine
GE	General Electric
IGBT	Insulate Gate Bipolar Transistor
LSC	Line side converter
MSC	Machine side converter
MT	Média tensão
PD	Produção dispersa
PE	Power electric
PLC	Progammable logic controller
PMSG	Permanent magnetic synchronous generator
PWM	Pulse with modulation
SEE	Sistema elétrico de energia
TCU	Turbine control unit
USA	United States of America
VSC	Voltage sourced converter
WRSG	Wound rotor synchronous generator
WTC	Wind turbine control

Capítulo 1

1. Estado da Arte

1.1 Introdução

A produção de energia elétrica em Portugal apoiou-se em grandes grupos geradores. Portanto, o Sistema Elétrico de Energia (SEE) foi-se caracterizando como centralizado, onde as centrais hídricas e térmicas desempenharam um papel na produção apoiados por linhas de transporte de energia que possibilitavam a distribuição.

Ao longo dos anos, em Portugal mas também pela Europa e pelo Mundo, com o crescimento populacional, com a crescente necessidade de energia elétrica e o aumento do preço dos combustíveis fósseis (resultado das variações económico-sociais dos países fornecedores), o sector elétrico foi obrigado a arranjar alternativas viáveis. Muitas são as razões para a necessidade de mudanças dos SEE entre as quais, a procura de independência de recursos não renováveis e o desejo de produção mais limpa. A solução aparente foi a introdução de fontes de energia não poluentes e muito mais eficientes como são as renováveis.

Várias metas foram estabelecidas e incentivos atribuídos a nível global, no caso Europeu, a tentativa de alcançar objetivos coletivos definidas pela União Europeia levam ao forte desenvolvimento da produção descentralizada e logicamente à sua implementação.

A Produção Dispersa (PD), é associada geralmente a recursos renováveis, e é fundamental para melhorar a produção nos SEE. Depois de vários estudos de impacto, foi aumentando o número de unidades de PD sobre as redes de média (MT) e baixa tensão (BT), sendo possível ainda ligar diretamente pequenas unidades de produção a estas últimas. Surge assim o conceito de microprodução, isto é, a produção de energia elétrica através de instalações de pequena escala usando fontes renováveis.

Algumas das mais importantes vantagens da utilização de sistemas de micro geração são:

- ✓ Redução de perdas tanto na rede de distribuição como de transporte;
- ✓ Redução de dependência energética externa;
- ✓ Possibilidade de produção por parte do consumidor;
- ✓ Obtenção de uma produção mais limpa;
- ✓ Adiamento de investimento ao nível de reforço das redes de transporte.

Uma das tecnologias que tem vindo a ganhar importância a nível global, é a produção eólica, ou seja, a captação da energia do vento.

Esta dissertação tem como objetivo principal o estudo de produção através da energia eólica. Mais concretamente são apresentados os procedimentos habituais para conectar uma turbina DFIG (*Double Feed Induction Generator*) pela primeira vez à rede.

1.2 Evolução dos recursos eólicos

Historial Eólico

O termo “*Eólico*”, deriva do latim *aeolicus* que se relaciona com o termo *Eólos*, Deus dos ventos da mitologia Grega. Desde antigamente que o homem utiliza esta forma de energia com diversos objetivos sendo que numa fase inicial as primeiras aplicações práticas seriam movimentar barcos à vela, bem como para fazer girar os moinhos com o efeito de produzir farinha.[1]

Como são os antecessores diretos dos aerogeradores atuais é importante compreender a sua história. Originários do Médio Oriente por volta do século *VII*, ganharam uma grande importância na moagem dos grãos que consequentemente impulsionou a economia rural. No que diz respeito à Europa, foi na Inglaterra e na Holanda que surgiram os primeiros no séc. *XI*, introduzidos pelas cruzadas. Ao contrário dos originais, estes, continham eixo horizontal em deterioramento de vertical e apresentavam velas de pano, designados por *Sail windmill* (figura 1.1). Posteriormente deram lugar aos moinhos de bombeamento de água como os *post mill* representados na figura 1.2 [2].



Figura 1.1- Sail windmill
[2]



Figura 1.2 - Post mill [2]

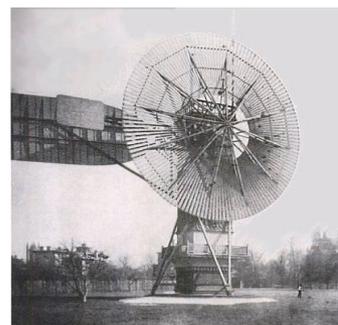


Figura 1.3 - Turbina eólica
Charles Brush 1888[4]

Durante o séc. *XVIII* , o brilhante cientista *Charles Brush*, um dos impulsionadores da indústria elétrica Americana, desenvolveu então um dínamo DC capaz de produzir energia elétrica quando instalado numa turbina. Foi a primeira vez que alguém colocou um sistema autónomo a produzir energia elétrica a partir do vento. Em 1887, foi então implementada a primeira turbina de

madeira (figura 1.3) capaz de atingir uma produção de 12 kW, com 144 lâminas, 17 metros de diâmetro e 18 metros de altura. Permaneceu intacta a carregar baterias de ácido-chumbo durante 20 anos[3].

Muitos foram os cientistas que intervieram no desenvolvimento das turbinas elétricas, no entanto alguns desenvolveram alguns modelos alternativos. *George Darrius*, cientista francês, despendeu de 30 anos da sua vida para desenvolver uma turbina vertical oval. A partir desta apareceriam novas variantes denominadas *H-Darrius* e mais tarde *Savanius*. Representadas nas figuras 1.4, 1.5 e 1.6 da esquerda para a direita, respetivamente [4, 5].



Figura 1.4 - Turbina eólica de eixo vertical - *Darrius*



Figura 1.5 - Turbina eólica de eixo vertical - *Darrius*



Figura 1.6 - Turbina eólica de eixo vertical - *Savonius*

H

Nos anos 40 (*séc. XX*), foi construída a primeira turbina com o objetivo de alimentar eletricamente um consumidor final. Com 1,25 MW, 16 toneladas e 53 metros de diâmetro, a máquina era dotada de um gerador síncrono ligado diretamente à rede elétrica[6]. Porém, o projeto foi um fracasso e devido a problemas estruturais a máquina funcionou apenas 46 dias. De 1941 a 1979, a turbina desenvolvida por *Palmer Putman* prevaleceu como a de maior potência instalada até então.

Vários modelos iam surgindo ao longo dos anos, mas com a evolução, as turbinas eólicas foram ganhando importância, até que nos anos 50 surgiram na Alemanha os primeiros parques eólicos concebidos por *Allgeier*[1]. Situados na costa Alemã chegaram a funcionar durante 40 anos. Eram constituídos por máquinas de apenas 10 kW de potência, 10 metros de diâmetro e já capacitadas de possível regulação das pás.

Como seria de esperar a aposta neste tipo de energia está relacionado com o preço dos combustíveis fósseis, como tal, entre os anos das décadas de 1950 e 1970 houve um aumento de preço e com ele o interesse exponencial nesta energia, que seria uma alternativa viável. Foi ainda nesta altura que surgiram algumas das empresas pioneiras na área de investigação

desenvolvimento e projeto que ainda hoje estão no topo do mercado, entre elas a Boing, a Enercon, a Gamesa e a Nordex.

Obviamente o crescimento do potencial energético das turbinas aumentou e muitos foram os parques instalados nos anos de 1980. Os países que detinham o poderio deste ramo eram os países do norte da Europa.

Entre 1998 e 2002 o mercado já dispunha de turbinas na gama do megawatt. As dez melhores empresas nesta data eram a Vestas (Dinamarca), Gamesa (Espanha), Enercon (Alemanha), NEG Micon (Dinamarca), Bonus (Dinamarca), Nordex (Alemanha e Dinamarca), GE-Wind/Enron (USA), Ecotechnia (atual Alstom Espanha), Repower (Alemanha) e Made (Espanha). Nesta altura, a Vestas era o maior fabricante de turbinas eólicas do mundo, seguida da Enercon, NEG Micon e Gamesa.

Tabela 1 - Turbinas eólicas predominantes em 2002 [7]

Fabricante	Mercados principais	Modelo da turbina	Conceito	Gerador
Vestas (Dinamarca)	Alemanha, Dinamarca, USA, Holanda, Austrália e Itália	V80 -2MW	- Controlo de passo; -DFIG velocidade variável.	WRIG
		V80-1.8 MW	- Controlo de passo; - <i>Optislip</i> -velocidade variável.	WRIG
Enercon (Alemanha)	Alemanha, Holanda, Índia, Itália e Grécia	4.5MW	- Velocidade variável.	WRSG Multipolar (sem caixa)
		E66 -2MW	- Controlo de passo; -Velocidade variável.	WRSG Multipolar (sem caixa)
NEG Micon (Dinamarca)	Espanha, Dinamarca, Holanda, Índia, Austrália e Grécia	NM80-2.75MW	- Controlo de passo; -DFIG -Velocidade variável.	WRIG
		NM72-2MW	- Controlo <i>Stall</i> ; -Velocidade fixa.	SCIG
Gamesa (Espanha)	Espanha	G83-2MW	- Controlo de passo; -DFIG -Velocidade variável	WRIG
		G80-1.8MW	- Controlo de passo; - <i>Optislip</i> -Velocidade variável.	WRIG
GE Wind (USA)	Alemanha, USA	GE104-3.2MW	- Controlo de passo; -DFIG -Velocidade variável	WRIG
		GE77-1.5MW	- Controlo de passo;	WRIG

Analisando a tabela verifica-se que o tipo de gerador mais utilizado na época seria o de indução. Apenas a Enercon utilizava uma solução com máquina síncrona, sem recorrer à caixa de velocidades [7]. Entre 1998 e 2002 o conceito DFIG ganhou especial destaque em relação às

topologias de velocidade fixa e marca uma era de mudança que tornou esta topologia uma das mais utilizadas no ramo eólico.

Na maior parte do mundo a energia eólica corresponde a uma pequena fração da energia total produzida, sendo que em algumas zonas nem produção existe. Em contrapartida na Europa existem alguns países com forte dependência deste tipo de produção como Alemanha, Dinamarca, Bélgica e Suécia.

No futuro, muitos serão os países por todo o Mundo que quererão experimentar uma penetração similar da potência produzida desta forma, não só como forma de reduzir as emissões de CO₂ mas também porque é uma área de negócio rentável em zonas com ventos apropriados. A penetração da energia eólica nesses países terá como principal obstáculo o facto que a integração de altos níveis de produção eólica (> 30%) em grandes sistemas de produção requer uma reorganização dos mesmos, tanto a nível físico como a nível de operação.

1.3 Características do vento

1.3.1 Origem do vento

Nesta secção, será discutido com mais detalhe o vento como fonte de produção de energia, incluindo o seu carácter flutuante e limites físicos quando utilizado como recurso natural.

A energia eólica é originária do aquecimento disforme da superfície terrestre. Os pontos mais quentes são os trópicos e opostamente com temperaturas mais baixas os polos devido à distância de proximidade ao sol. Como é visível na figura 1.7, o ar quente localizado nas regiões tropicais tende a subir, como consequência, as massas de ar frio das regiões polares deslocam-se em direção contrária. O vento no fundo é o resultado da diferença de temperatura e consequente movimentação destas mesmas massas de ar.

Para aproveitamento de potencial eólico é necessário identificar e avaliar locais passíveis de instalação de turbinas. Estas avaliações têm uma duração média de 3 anos e são feitas na sua maioria por anemómetros que medem a velocidade e direção do vento. O vento mais forte e constante movimenta-se a alturas superiores a um quilómetro de altura do solo, mas como é óbvio a impossibilidade de instalar máquinas a essa altura faz com que a instalação se proceda a poucos metros da superfície da terra tendo em conta obstáculos circundantes, rugosidade e relevo do terreno no local de instalação[9].

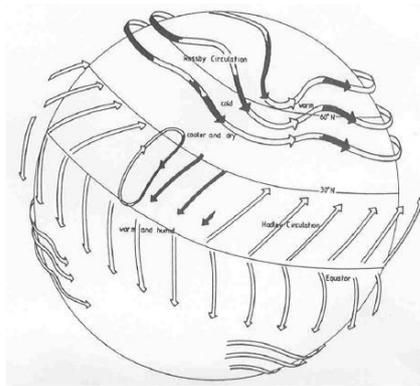


Figura 1.7 - Movimentações do vento no globo terrestre[8]

A diferença de radiação solar recebida pela superfície terrestre origina vários tipos de ventos, que são caracterizados pela sua densidade, velocidade e duração, podendo ser nomeados de: monções, brisas, ciclones, tufões, tornados, furacões e vendavais.

O vento varia de forma contínua em função do tempo e da altura. Na figura 1.8 seguinte é apresentado um espectro com a frequência do vento, dividida em três zonas energéticas: *Synoptic peak* (período de tempo de alguns dias, associado a movimento de grandes massas de ar), *Turbulent peak* (período de tempo de alguns segundos) e *Diurnal peak* (compreendido entre algumas horas e alguns minutos). Cada zona espectral tem associado variações correspondentes. Em intervalos inferiores a um ano as monções são previstas com alguma segurança, devido a variações mais lentas que dependem da estação do ano. As brisas, devido à sua grande variação de intensidade em intervalos curtos de tempo, apenas se conseguem prever com alguns dias de antecedência. Para intervalos de tempo que não duram mais que alguns minutos, existem grandes variações de tempo as quais se designam por turbulência [10].

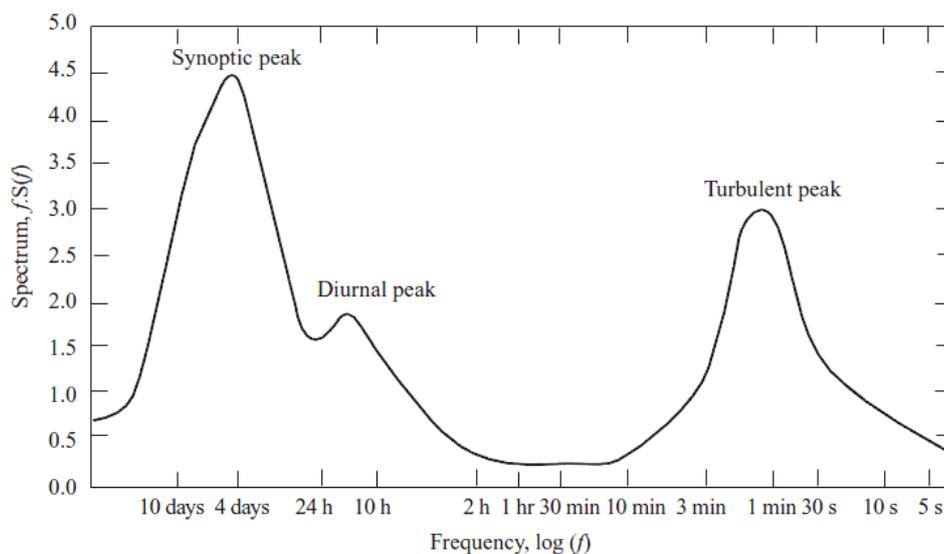


Figura 1.8 - Espectro da velocidade do vento no parque eólico de Brookhaven (Nova York)

Para anteceder a capacidade eólica dum parque numa dada região do globo é necessário compreender em pormenor as características associadas a cada tipo de vento. Sabendo que as monções são ventos periódicos, consequentemente há alguma certeza no espaço, nunca maior que um ano, já as brisas, apenas com alguns dias, são imprevisíveis.

1.3.2 Variações globais do vento

As movimentações das massas de ar podem ser fenómenos globais ou locais. Com o objetivo de tentar anteceder a produção eólica muitos são as tentativas de prever a intensidade do vento num determinado local. A longo prazo este pode ser uma situação muito complicada, mas uma forma de contornar o problema é através duma distribuição de probabilidades. Registam-se assim, durante pelo menos 3 anos, as ocorrências da velocidade média em função do total de horas de análise. O resultado do estudo será a frequência de ocorrência de uma determinada velocidade do vento. Para expor os resultados é utilizada normalmente a distribuição de *WEIBULL*, que pode ser apresentada sobre a forma de expressão matemática seguinte [11],

$$F_{Weibull} = \frac{k}{c} \times \left(\frac{v}{c}\right)^{k-1} \times e^{-\left(\frac{v}{c}\right)^k} \quad (1.1)$$

onde k é um valor adimensional e c é um fator de escala em m/s. Duas constantes que são definidas por forma a conseguir a maior aproximação da distribuição por parte da equação.

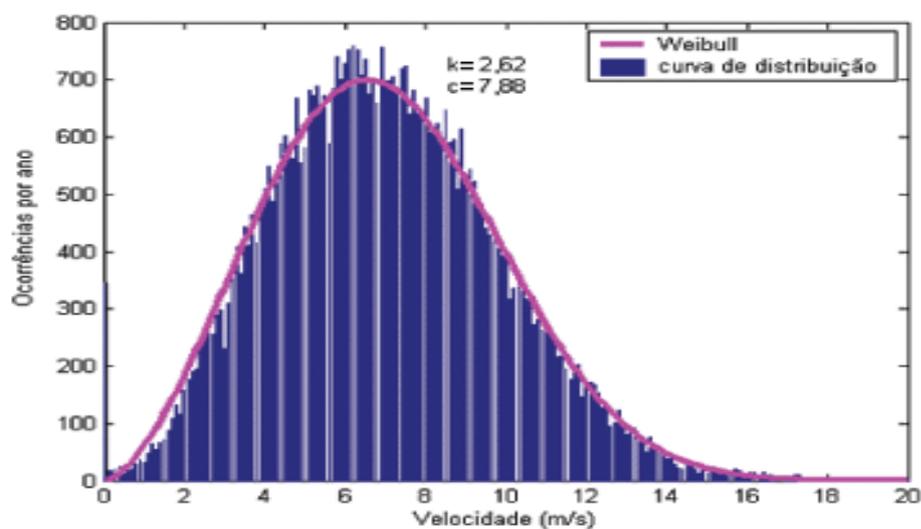


Figura 1.9 - Frequência de ocorrência da velocidade do vento (%) [10]

1.3.3 Variações locais do vento

Para além da análise global, é também importante perceber o comportamento do mesmo a nível local. As condições climáticas e as características dos locais influenciam a intensidade, velocidade e direção do vento a nível local. Um bom exemplo da importância do estudo deste tipo de vento é a turbulência com intensidade e direção não linear, muitas vezes originada pela presença de obstáculos, da rugosidade da superfície e fenómenos naturais.

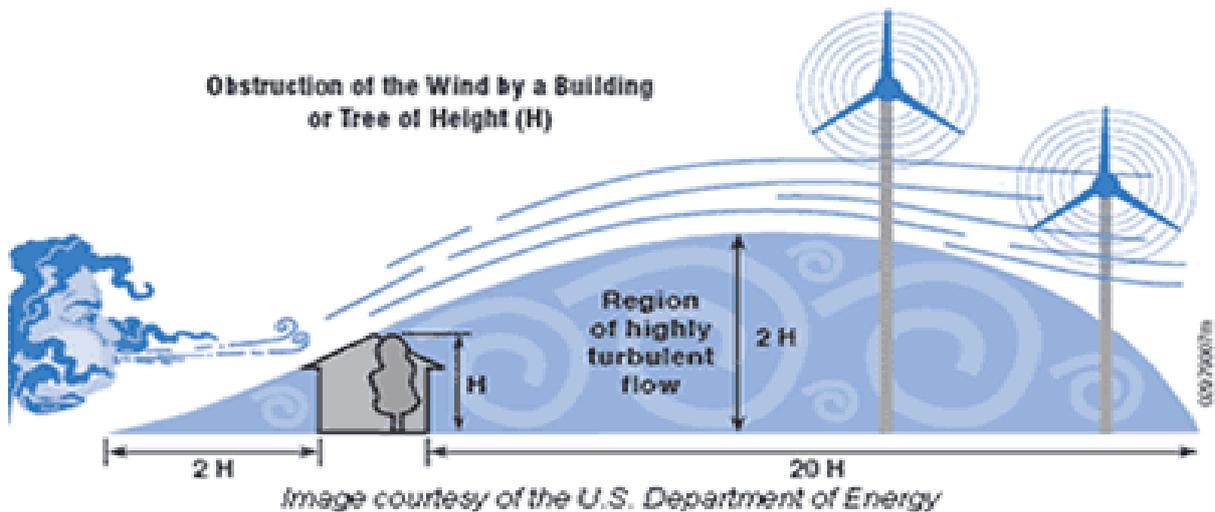


Figura 1.10 - Consequência de obstáculos na direção do vento

A figura 1.10 mostra que há uma relação entre as superfícies e o aproveitamento eólico, sendo que quanto mais lisa for a superfície mais constante é o vento, o que permite concluir que o mar é um ótimo local para implementação das turbinas eólicas. É baseado neste facto que a aposta na produção *offshore* tem vindo a crescer [10].

1.4 Potencial eólico

1.4.1 Proveniência Energética

A figura 1.11 representa o modelo de uma turbina eólica, onde estão indicadas as variáveis que influenciam a potência de saída:

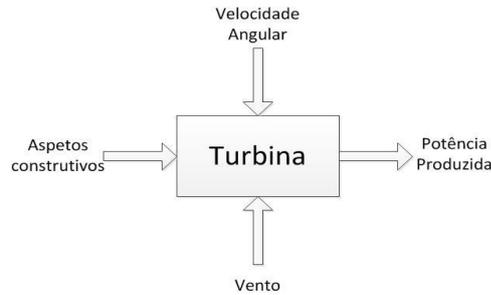


Figura 1.11 - Variáveis de estado duma turbina eólica

Durante o projeto da turbina são dimensionados os parâmetros construtivos, sendo que as características físicas são praticamente inalteráveis depois da instalação. A única alteração possível será o ângulo das pás da turbina. Durante toda a sua vida útil, a turbina estará sujeita à força da natureza, neste caso o vento, que varia independentemente do mecanismo instalado. A energia do vento transforma-se em energia mecânica, o que provoca uma rotação do rotor da turbina a uma determinada velocidade, velocidade essa que é sujeita a um intenso controlo no intuito de melhorar a qualidade de exploração do recurso, assim como evitar velocidade indesejadas.

Como resultado de todas estas variáveis de entrada, é originada uma grandeza de saída, denominada como potência mecânica, transformada posteriormente em energia elétrica.

1.4.2 Capacidade de exploração de energia de uma massa de ar

Como já foi referido, a fonte de energia de uma turbina eólica será sempre uma massa de ar em movimento. Na travessia pela turbina, todo o fluxo de ar transfere parte da sua energia, diminui a velocidade e sofre pequenas alterações das suas características.

A potência máxima ($P_{m\acute{a}x}$) de uma massa de ar que atravessa uma turbina que flui com uma velocidade v através de uma área $A_{turbina}$ pode ser calculada por:

$$P_{m\acute{a}x} = A_{turbina} \times \frac{\rho}{2} \times v_1^3 \text{ (watts)} \quad (1.2)$$

Onde $\rho = \text{densidade do ar (kg m}^{-3}\text{)}$, $v_1, v_2, v_3 = \text{velocidade do vento (m s}^{-1}\text{)}$.

A potência da massa de ar não pode ser totalmente absorvida pela turbina. No *séc. XX*, *Albert Betz*, físico alemão, relacionou a potência extraída de uma massa de ar com a comparação da secção reta A_1 e velocidade V_1 , numa primeira fase, com a resultante diminuição de velocidade V_3 e aumento de secção reta A_3 pela seguinte expressão [1, 9].

$$P_{vento} = A_{turbina} \times \frac{\rho}{2} \times (v_1^2 - v_3^2) \times v_2 \quad (1.3)$$

Da expressão anterior, concluiu-se que a potência máxima extraída duma massa de ar será:

$$P_{vento\ max} = A_{turbina} \times C_{P\ Betz} \times \frac{\rho}{2} \times (v_1^3) = A_{turbina} \times \frac{16}{27} \times \frac{\rho}{2} \times (v_1^3) \quad (1.4)$$

Como forma de conclusão, mesmo que exista um sistema com perdas praticamente nulas, apenas é possível atingir um máximo de 59% de potência extraída.

O coeficiente de potência C_p varia em função de (β, λ) , dentro dos limites de 0 e 0,59. O valor de λ é dado através da razão entre a velocidade tangencial na extremidade da pá e a velocidade do vento:

$$\lambda = \frac{\omega_t R}{v} \quad (1.5)$$

Onde ω_t será a velocidade angular instantânea, R o raio das pás e v a velocidade do vento. Já a expressão genérica utilizada para definir o coeficiente C_p é dada por:

$$C_p(\lambda, \beta) = c_1 \left(\frac{c_2}{\lambda} - c_3 \beta_3 - c_4 \right) e^{\frac{c_5}{\lambda}} + c_6 \lambda \quad (1.6)$$

$$C_p(\lambda, \beta) = c_1 \left(\frac{c_2}{\lambda} - c_3 \beta_3 - c_4 \right) e^{\frac{c_5}{\lambda}} + c_6 \lambda$$

Para $\frac{1}{\lambda} = \frac{1}{\lambda + 0.08\beta} - \frac{0.035}{\beta^3 + 1}$ e sabendo que os parâmetros $c_1, c_2, c_3, c_4, c_5,$ e c_6 estão relacionados com particularidades da aerodinâmica da turbina, calculados experimentalmente.

Para cada faixa de velocidade de vento tem-se o ponto de máxima potência que acontece para diferentes velocidades de operação da turbina. Portanto, caso a velocidade da turbina se ajuste às variações da velocidade de vento, um ganho de energia é obtido. Desta forma, os ganhos de energia de sistemas eólicos com velocidade variável oscilam entre 3% e 28% em relação aos sistemas de velocidade fixa. Este ganho percentual depende dos parâmetros da turbina e das condições de vento.

1.5 Tecnologias dos sistemas de produção

Com o desenvolvimento exponencial desta energia renovável, surgiram no mercado sistemas na gama dos Mega Watt capazes de satisfazer as necessidades dos sistemas de energia elétrica. A evolução da eletrónica de potência possibilitou a passagem de geradores de indução diretamente

ligados a rede elétrica (normalmente a trabalhar a velocidades constantes), sem controlo possível a nível de potência ativa e reativa, para aerogeradores totalmente controlados a todos os níveis.

Muitos aspetos foram levados em consideração por parte dos fabricantes para colocarem ao dispor dos clientes produtos muito eficientes e rentáveis. A figura 1.12 mostra um resumo da classificação possível para os vários tipos de turbinas.

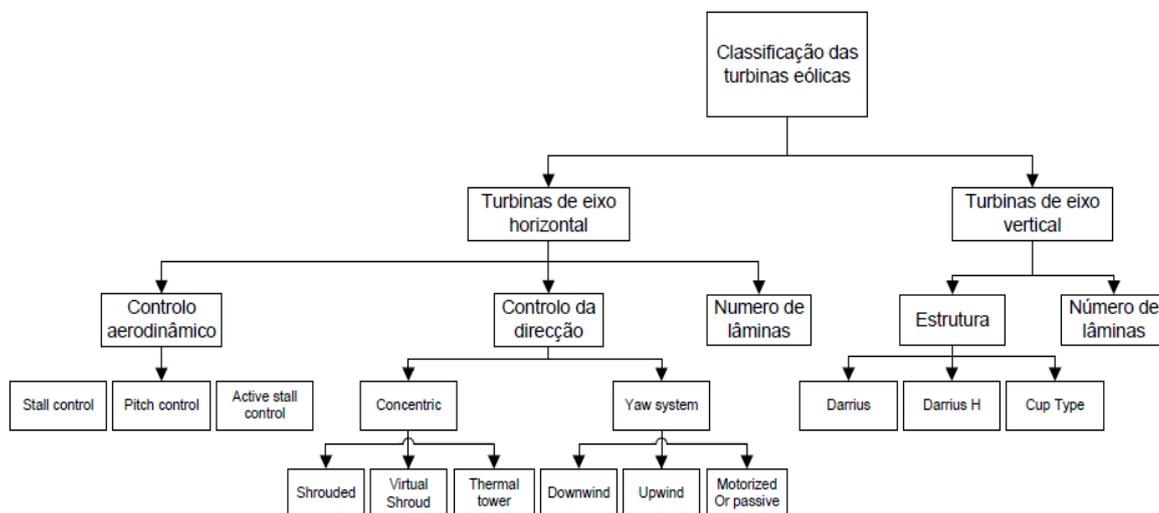


Figura 1.12 - Classificação turbinas das eólicas

1.5.1 Topologias Utilizadas

As turbinas eólicas podem ser caracterizadas pela sua velocidade de operação [9], pelo que podem ser divididas entre turbinas de velocidade fixa e velocidade variável.

Nos anos de 1990 foram instaladas as primeiras turbinas de velocidade fixa. Isto significa que estas turbinas, para qualquer velocidade do vento, apresentam uma velocidade do rotor fixa, velocidade essa determinada pela frequência da rede, pela constante de multiplicação da caixa multiplicadora e do *design* do gerador [5, 9].

Normalmente equipadas com um motor de indução, estas turbinas são diretamente ligadas à rede, com um arrancador suave e um banco de condensadores para reduzir a compensação de potência reativa. Podem apresentar mais que uma velocidade, comutando o número de polos, 8 para velocidades lentas e 4 a 6 para velocidades médias do vento.

Como vantagem apresentam a robustez e a simplicidade de construção, a fiabilidade e o facto de estarem bem desenvolvidas. As desvantagens passam pelo consumo de energia reativa, stress mecânico e limite no controlo da qualidade de potência produzida. Todas as flutuações do vento são transmitidas como flutuações mecânicas e consequentemente como flutuações elétricas.

Relativamente às turbinas eólicas de velocidade variável, elas têm vindo a ganhar grande preponderância no setor. São desenhadas para ter uma grande performance e aerodinâmica para uma grande gama de valores de velocidade do vento, sendo possível adaptar a velocidade mecânica w consoante as acelerações e reduções da velocidade do vento v . Desta forma o rácio λ é mantido constante num valor predefinido que corresponde ao coeficiente de potência máxima [9].

Ao contrário das máquinas com velocidade fixa, as variações de velocidade do vento são absorvidas pela variação da velocidade do gerador, deixando o binário mecânico constante. Contêm um sistema elétrico mais complicado que as anteriores, são normalmente dotadas com um motor de indução ou síncrono e são conectados à rede através de um conversor de potência. O conversor controla a velocidade do gerador, logo flutuações do vento são replicadas pela velocidade do gerador.

As vantagens deste tipo de turbinas são a grande capacidade de captura de energia com grande qualidade de produção e redução dos efeitos de variações do vento. No entanto, apresentam perdas nos sistemas elétricos, e utilizam um maior número de componentes, o que as torna mais dispendiosas.

Como conclusão, é notória a diferença entre as duas topologias, tendo ainda em conta que as turbinas de velocidade variável permitem inúmeras conjugações (gerador/conversor) e por isso acabam por ser uma melhor aposta.

1.5.2 Conceitos de Controlo de Potência

O *design* das turbinas é uma pequena parte do seu próprio controlo, isto significa que, há diferentes maneiras de controlar as forças aerodinâmicas a que o rotor da turbina está sujeito. Os três tipos de controlo encontrados na literatura são o controlo de *stall*, o controlo de passo e o mais completo, o controlo de *stall* ativo.

Controlo de *stall*:

É o mais simples e robusto dos três métodos utilizados, onde as pás da turbina estão conectadas ao *HUB* (parte estrutural da turbina onde são montadas as pás e o rotor) com ângulo fixo. O desenho da aerodinâmica do rotor da turbina provoca a perda de potência quando a

velocidade do vento é superior ao valor nominal. Não obstante a limitada potência captada pela máquina, tem a grande vantagem de não apresentar grandes variações [12].

Normalmente para velocidades acima da nominal, a potência extraída é algo superior à potência nominal, decaindo para valores inferiores à medida que o vento aumenta.

Controlo de passo:

No método de controlo de passo, as pás das turbinas são orientadas em torno do seu eixo longitudinal, alterando o ângulo de incidência com o vento. Quando a potência da máquina é superior à nominal, as pás começam a diminuir a zona de captação de vento de maneira a que incidência seja menor, o que conseqüentemente limita a produção. Existem duas formas de controlar o ângulo das pás, os sistemas hidráulicos e os sistemas elétricos (normalmente motores Dc) comandados por microprocessadores[8].

As vantagens deste tipo de controlo são a grande capacidade de controlo de potência, assistência no arranque e capacidade de paragem em caso de emergência. As desvantagens prendem-se com o fato de serem sistemas mais complexos e caros, apresentando ainda grandes variações de potência para ventos muito altos.

Controlo de stall ativo:

Caraterizado por ser a junção das duas técnicas anteriores. Este tipo de controlo permite o ajuste do ângulo das pás (controlo de passo). Para valores de velocidade do vento superiores, que possibilitam uma produção acima da potência nominal, o *design* das lâminas influencia na travagem (controlo *stall*). Para velocidades baixas, o controlador da turbina regula o ângulo com que as pás abordam o vento, por forma a obter a máxima eficiência [8].

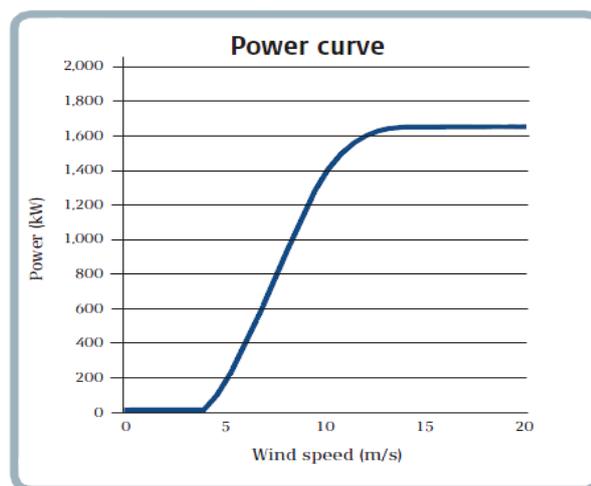


Figura 1.13 - Curva de potência da turbina com controlo de *stall* ativo

Sendo o controlo mais comumente utilizado hoje em dia, a grande vantagem que apresenta em relação aos métodos de controlo mencionados anteriormente é que mantém uma potência exata com um menor número de mudanças de passo.

1.5.3 Conversores de frequência

Durante estes últimos anos muitos foram os esforços para evoluir e tornar competitivos as várias topologias de conversores, topologias estas que se adequassem na perfeição à produção eólica com todas as suas características.[9] As que mais se destacam hoje em dia no mercado são: *Back-to-back*, Ressonant converters, multilevel converters, tandem converters e matrix converters.

As topologias apresentadas são todas utilizadas em alguma aplicação eólica, no entanto o conversor que tem ganho maior preponderância hoje em dia é o “*Back-to-Back*”. Segundo *L.H.Hansen* os conversores com mais capacidade competitiva no futuro serão o multinível e o conversor matricial, sendo que o seu estudo está em crescimento exponencial. No anexo A pode ver-se uma tabela comparativa entre os principais tipos de conversor.

O sistema “*Back-to-Back*” é um conversor de potência bidirecional constituído por dois VSC, controlados por PWM (*Pulse with Modulation*). A separação dos dois conversores é feita por um banco de condensadores denominado “DC link” que normalmente é dimensionado para obter uma tensão superior à tensão composta da rede com o objetivo de controlar o fluxo de corrente. À entrada do conversor verifica-se a existência de indutâncias de choque que são usadas no seu controlo, permitindo reduzir a distorção harmónica e ainda servir de proteção para eventuais perturbações da rede.

O banco de condensadores entre o inversor e o retificador permite ao conversor decompor o controlo dos dois conversores, compensando assimetrias de um lado e de outro, pode ainda dizer-se que o conversor serve de filtro para eventuais perturbações.

De uma maneira básica o conversor que interage diretamente com a rede é controlado por forma a manter a tensão do Dc Link constante, enquanto o conversor que fica ligado ao gerador é controlado consoante a necessidade de magnetização ou não do rotor.

Como forma de verificar a verdadeira importância deste tipo de conversores na atualidade, é necessário abordar uma comparação com os seus concorrentes diretos. Uma vez que este é o conversor estudado no âmbito desta tese, o estudo do controlo será aprofundado no capítulo 2.

1.5.4 Conceito de Gerador

O gerador eólico é o componente responsável pela produção de energia elétrica a partir da energia mecânica proveniente da movimentação da parte rotativa da turbina eólica. As principais características dimensionadas para cada gerador são a robustez, simplicidade de uso, a vida útil sempre com o objetivo de alcançar uma baixa manutenção e o baixo custo de aquisição.

Basicamente, as turbinas eólicas são equipadas por um dos geradores trifásicos encontrados no mercado, sendo que pela sua robustez os mais utilizados são os geradores síncronos e assíncronos.

O gerador assíncrono, também designado por gerador de indução, é o mais utilizado no setor devido às suas grandes vantagens, como são a robustez, a simplicidade mecânica e o baixo custo associado. A grande desvantagem é que o estator necessita de corrente reativa de magnetização. Não é possível a utilização de ímãs permanentes neste tipo de gerador pelo que há necessidade de recepção da potência reativa de outra fonte, que pode ser da própria rede ou de outro sistema de eletrônica de potência. O campo magnético do gerador é estabelecido apenas se estiver ligado à rede.

A velocidade de sincronismo do gerador de indução é determinada através da frequência da corrente e pelo número de polos do gerador. Portanto, se o rotor rodar a uma velocidade acima da velocidade de sincronismo, o excesso de energia disponível no veio resulta no fornecimento de potência ativa à rede através do circuito rotórico e do circuito estatórico.

O rotor dum gerador de indução pode ser desenhado em gaiola de esquilo (ou seja em curto circuito) ou bobinado.

O gerador síncrono é mais caro e mecanicamente mais complexo que um gerador de indução similar, no entanto a sua grande virtude prende-se com o fato de não necessitar de energia reativa de magnetização.

O campo magnético dos geradores síncronos pode ser criado com uso de ímãs permanentes ou os convencionais enrolamentos, denominando assim os dois tipos de geradores síncronos mais utilizados no ramo eólico. No caso de alguns geradores como os PMSG e WRSG que apresentam um número considerável de polos pode dispensar-se o recurso a uma caixa multiplicadora na produção. A máquina síncrona providencia uma maior facilidade de controlo de potência quando conectada diretamente à rede através dos conversores de potência. O conversor tem dois objetivos principais: servir como filtro a flutuações causadas pela não regularidade do vento bem como pelos transitórios vindos do lado da rede e ainda controlar a magnetização.

A figura 1.14 mostra as estruturas dos geradores que são possíveis encontrar no mercado:

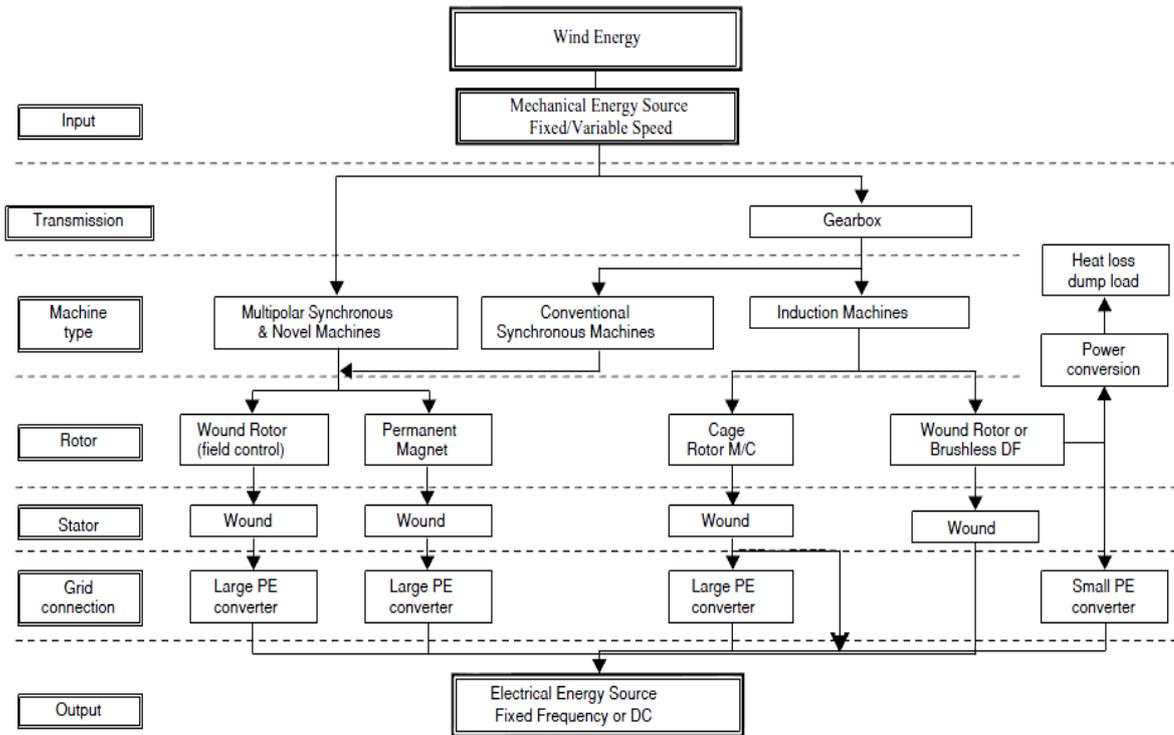


Figura 1.14 - Soluções técnicas possíveis para os geradores[13]

1.5.5 Sistemas de Produção de Energia Eólica

Muitas são as técnicas para utilizadas para controlar a produção, podendo ser mecânicas ou elétricas que passam um pouco pelo controlo dos conversores de potência. O aproveitamento da potência eólica depende essencialmente do vento que se faz sentir e a velocidade praticada pela turbina. Quanto maior a velocidade de rotação do gerador devido a uma maior velocidade do vento, maior será a potência de saída. Apenas é possível alterar a velocidade do gerador por forma a criar mais potência, alterando o ponto de funcionamento com esse propósito. No anexo B pode-se encontrar uma descrição dos vários tipos de sistemas de produção e os fatores que os destacam.

Facilmente se verifica que os aproveitamentos eólicos de velocidade fixa estão em desuso devido ao fraco rendimento das mesmas, desta forma será importante apresentar estruturas de velocidade variável bem desenvolvidas e enraizadas.

Capítulo 2

2. Gerador Assíncrono Duplamente Alimentado

2.1 Introdução

Neste capítulo descreve-se pormenorizadamente o funcionamento da máquina de indução duplamente alimentada.

Atualmente, todos os grandes fabricantes produzem tendencialmente sistemas eólicos equipados com geradores de indução com rotor bobinado, designado por máquina de indução duplamente alimentada (DFIG). A Alstom enquanto fabricante de turbinas eólicas não é uma exceção, e como tal a turbina eólica abordada nos capítulos seguintes também corresponde às características descritas anteriormente.

Como particularidade destes sistemas observa-se o facto de o rotor estar ligado à rede através de um conversor, tirando partido da energia de deslizamento, tornando-se assim um sistema de velocidade variável com frequência constante. De notar ainda que o controlo de potência é determinado pelo ângulo relativo das pás ou seja controlo tipo “pitch”.

Embora seja uma máquina complexa e cara verifica-se cada vez mais o uso da mesma, uma vez que aumenta significativamente a produção de energia elétrica devido à sua principal característica de possibilitar a transferência de energia para a rede, tanto pelo estator como pelo rotor.

Torna-se assim importante abordar alguns aspetos teóricos referentes à máquina que permitem perceber mais facilmente o comportamento da mesma e facilita o entendimento de alguns conceitos descritos em capítulos posteriores [18-22].

2.2 Esquema equivalente

A figura 2.1 ilustra o esquema equivalente duma máquina de indução num referencial síncrono com o campo girante do estator a girar a uma velocidade ω_s e em que os parâmetros do rotor se encontram referidos ao estator.

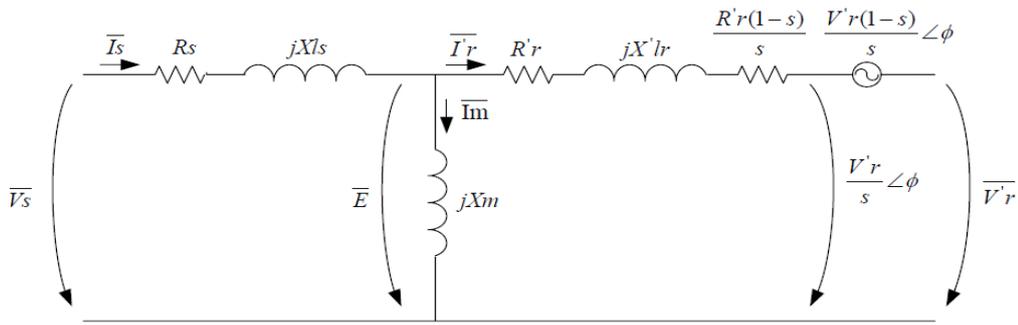


Figura 2.1 - Esquema equivalente da máquina

Pelo esquema equivalente, pode observar-se que os fasores correspondentes às tensões e correntes no estator são:

$$\overline{V}_s = V_s \angle 0 \text{ [V]} \quad (2.1)$$

$$\overline{I}_s = I_s \angle \delta \text{ [A]} \quad (2.2)$$

Onde δ , ϕ e θ são ângulos variáveis dos fasores em questão.

Da mesma maneira são assim apresentados os fasores correspondentes ao rotor referenciados ao estator:

$$\overline{V}'_r = V'_r \angle \phi \text{ [V]} \quad (2.3)$$

$$\overline{I}'_r = I'_r \angle \theta \text{ [A]} \quad (2.4)$$

Como forma de simplificar a análise do sistema, algumas alterações serão efetuadas a fim de obter o equivalente de *Thevenin* do esquema anterior:

$$\overline{V}_{th} = \frac{jX_m}{R_s + j(X_{ls} + X_m)} \overline{V}_s \text{ [V]} \quad (2.5)$$

$$Z_{th} = \frac{jX_m(R_s + jX_{ls})}{j(X_{ls} + X_m) + R_s} = R_{th} + jX_{th} \quad (2.6)$$

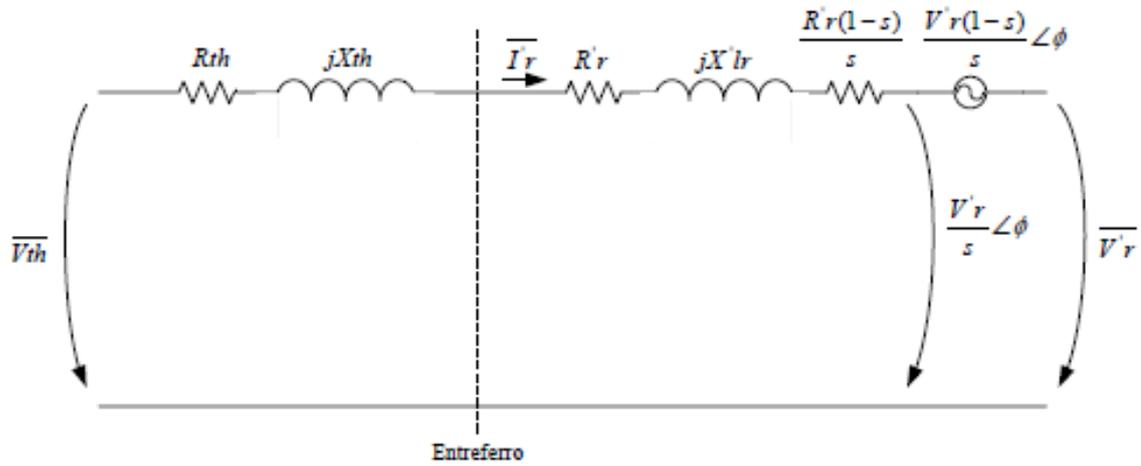


Figura 2.2 - Esquema equivalente de Thevenin da máquina

As equações que descrevem o regime permanente da máquina são as seguintes:

$$\bar{I}'_r = I'_r \angle \theta = \frac{\bar{V}_{th} - \frac{\bar{V}'_r}{s}}{R_{th} + \frac{R'_r}{s} + j(X_{th} + X'_r l_r)} \quad (2.7)$$

$$\bar{E} = \frac{\bar{V}'_r}{s} + \bar{I}'_r \left(\frac{R'_r}{s} + jX_{th} + X'_r l_r \right) \quad (2.8)$$

$$\bar{I}_m = \frac{\bar{E}}{jX_m} \quad (2.9)$$

$$\bar{I}_s = I_s \angle \delta = \bar{I}'_r + \bar{I}_m \quad (2.10)$$

O fluxo de potência total que circula no gerador pelo rotor e pelo estator é dada por:

$$P_s = 3V_s I_s \cos \delta \quad (2.11)$$

$$P_r = 3V'_r I'_r \cos(\phi - \theta) \quad (2.12)$$

A potência que atravessa o entreferro da máquina é igual ao somatório das frações s da potência dissipada por efeito Joule nos enrolamentos do rotor (P_{cur}) e a potência que é extraída através dos terminais do rotor (P_r), ou seja:

$$P_g = \frac{P_r}{s} + \frac{P_{cur}}{s} = \frac{3I'^2_r R'_r}{s} + \frac{3V'_r I'_r \cos(\phi - \theta)}{s} \quad (2.13)$$

Admitindo que a potência mecânica é igual a $P_m=(1-s)P_g$ a equação 2.13 do balanço de potência ativa no rotor da máquina pode ser rescrita da seguinte maneira:

$$P_g = P_{cur} + P_r + P_m \quad (2.14)$$

A convenção adotada para medir o fluxo de potência é P_m e P_g negativas para o funcionamento como gerador e positivas para o funcionamento como motor.

2.3 Modos funcionamento

O modo de operação da máquina de indução duplamente alimentada pode ser descrito em 3 situações distintas: Subsincronismo, Sincronismo e Supersincronismo. É importante salientar que o sincronismo é um caso muito peculiar do Supersincronismo, o que faz com que se admita que a máquina apenas atue em dois estados possíveis Subsincronismo e Supersincronismo [18].

Na região subsíncrona (figura 17 a)), a máquina funciona como gerador para deslizamentos positivos, ou seja, em situações em que a velocidade angular do campo girante (W_s) é maior que a velocidade angular do rotor (W_m). Ao desprezar as perdas por efeito Joule $P_r=sP_g$ e conseqüentemente, $P_r=sP_s$. Com o deslizamento a variar entre 0 e 1 só é possível o modo de funcionamento da máquina como gerador se for injetada uma componente negativa de potência no circuito rotórico e com uma frequência igual a frequência de deslizamento. No caso de uma máquina de indução convencional de rotor em gaiola de esquilo, sP_g é sempre positiva, o que impossibilita o funcionamento da máquina como gerador numa região subsíncrona.

Na região supersíncrona (figura 2.3 b)), a velocidade angular do campo girante é inferior à velocidade angular do rotor, a que corresponde um deslizamento negativo, variando entre 0 e s_n (deslizamento nominal, que corresponde a situação em que se atingem as características nominais da máquina).

Esta região tem como particularidade, o facto da potência mecânica que é transformada em elétrica, retirando-se as perdas, é transferida para a rede tanto pelo estator como pelo rotor. A potência enviada pelo rotor por intermédio de conversores de eletrónica de potência é normalmente cerca de 20 por cento da potência total produzida. A tensão V'_r aplicada ao rotor, com o objetivo de excitar o estator, não é sinusoidal apresentando valores de frequência e fases variáveis correspondentes ao estado em que se encontra a máquina.

De um modo resumido, as condições que caracterizam o modo de operação são as seguintes:

Tabela 2 – Condições dos modos de operação

Região Subsíncrona	Região Supersíncrona
$0 < s < 1$	$sn \leq s \leq 0$
$sPg < 0$	$sPg > 0$
$Pg < 0$	$Pg < 0$
$Pm < 0$	$Pm < 0$
$Pr < 0$	$Pr > 0$
$sPg = Pcur + Pr$	$sPg = Pcur + Pr$
$ Pm < Pg $	$ Pm > Pg $
$ Pr > Pcur$	

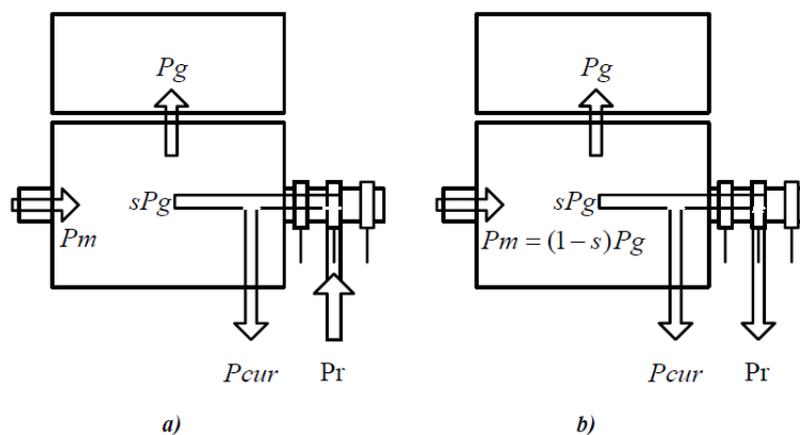


Figura 2.3 - a) Velocidade subsíncrona b) Velocidade supersíncrona

2.4 Cascata Subsíncrona

A topologia utilizada na máquina abordada nesta tese é a cascata subsíncrona (figura 2.4), com o controlo separado de dois conversores de potência ligados “back-to-back” no circuito do rotor. Esta topologia permite que a máquina opere como gerador para velocidades acima, abaixo e mesmo à velocidade de sincronismo. Alimentados por tensões e controlados por corrente com uma frequência de comutação dos semicondutores de potência, acionados por um controlo PWM [20], os conversores permitem reduzir a distorção harmónica nas correntes do estator e do rotor.

Este tipo de sistema é totalmente adequado à produção de energia elétrica por parte de aerogeradores, com grande qualidade, devido à independência do controlo do binário e excitação do lado do rotor e controlo do fator potência do lado da rede.

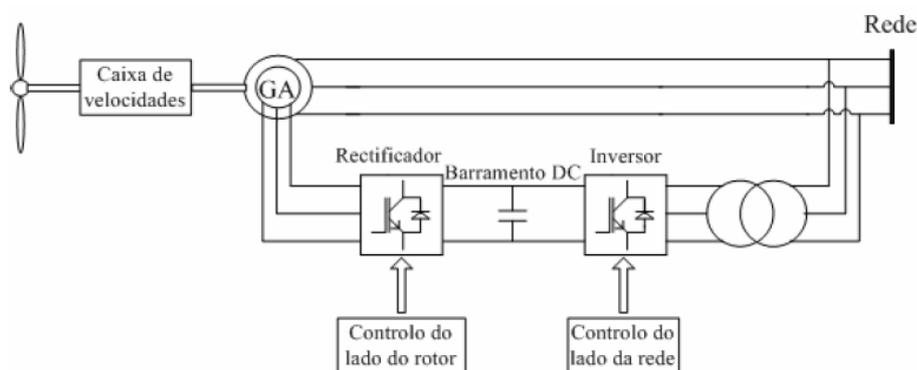


Figura 2.4 - Cascata subsíncrona

O rotor é alimentado por uma tensão alternada, com frequência variável, por forma a compensar a variação angular do rotor, que deve atingir uma frequência próxima da frequência de deslizamento $f_r = f_s$. Quando a frequência de excitação do rotor é 0, a tensão que o alimenta será contínua e o deslizamento terá valor nulo. Nestas condições, a máquina comporta-se como um gerador síncrono [18].

A potência que atravessa o rotor pode ser controlada através do deslizamento. Verifica-se que ao controlar a velocidade do rotor é possível limitar a potência que circula entre o rotor e a rede e vice-versa. Normalmente este fator faz com que este tipo de conversores seja dimensionado para uma gama de potência entre 20 a 30% da potência nominal, sendo que a velocidade de rotação do rotor fica também ela limitada entre 70 e 130% da velocidade nominal. O dimensionamento da turbina eólica tem em conta a situação mais crítica que corresponde à velocidade mais baixa do vento e consequentemente a uma velocidade de rotação mínima. Durante esta fase existe um grande fluxo de potência a circular no circuito do rotor.

O modelo matemático aprofundado da máquina de indução de rotor bobinado que permite perceber mais detalhadamente o modo de funcionamento pode ser encontrado no anexo C.

2.5 Controlo do sistema

Nesta fase é importante salientar os conversores de eletrónica de potência utilizados nesta topologia, equipados com semicondutores de alta frequência de comutação (normalmente *IGBT's*) e controlados por impulsos de altas frequências. São separados por um barramento DC constituído por condensadores, o que permite a produção de energia tanto pelo rotor como pelo estator devido

à bi direccionalidade do fluxo de potência. Todo o poder do gerador eólico é concentrado no sistema de controlo dos conversores, sendo o grande responsável pelo aproveitamento da energia proveniente do vento, mas também e não menos importante a maneira como essa energia é transferida para a rede. Com a evolução vertiginosa que se fez sentir neste ramo, os conversores de potência e o seu controlo permitem elevar o rendimento geral do sistema, manter a qualidade da tensão gerada (valor eficaz, frequência e estabilidade), reduzir o nível de injeção de harmónicos e controlar o fator potência [16].

O conversor do lado da rede e do lado do rotor são idênticos, e geralmente são dimensionados tendo em conta a gama de velocidades de funcionamento do gerador. Uma das particularidades deste sistema é que permite a variação de velocidades dentro de valores aceitáveis para o perfeito funcionamento e rendimento do sistema, ou seja, para velocidades entre 70% a 130% da velocidade de sincronismo é necessário apenas um conversor com capacidade para suportar 1/3 da potência nominal. O sistema de controlo vetorial é um dos métodos mais eficazes utilizados no ramo da eólica, permitindo uma resposta rápida à variação de velocidade, rápida resposta da variação do binário, controlo sobre o fluxo, bem como sobre as potências ativa e reativa, o que propicia uma estabilidade do fator potência.

Como tal e devido à estrutura da DFIG é fácil observar que é necessário praticar dois controlos independentes, um ao lado do rotor com o objetivo de excitar o estator, e outro ao lado da rede. Estes dois controlos baseados no controlo vetorial são explicados no anexo C.

2.6 Conteúdo Harmónico

Os harmónicos produzidos por esta topologia são provenientes dos dois conversores. Enquanto os harmónicos produzidos pelo conversor do lado da rede são injetados diretamente na mesma, os produzidos pelo conversor do lado do rotor são transferidos para o estator do gerador. Quando se verifica transferência da corrente, a frequência dos harmónicos modifica-se. A justificação para o sucedido é o valor do deslizamento da máquina e o sentido de rotação dos campos gerados por esses mesmos harmónicos. Neste caso, são injetados na rede harmónicos que não são múltiplos da frequência fundamental.

Uma das formas de minimizar os harmónicos provenientes do sistema é a adaptação de filtros à entrada do conversor. Para assegurar um menor conteúdo harmónico injetado na rede é necessário uma maior frequência de comutação. O grande problema associado a grandes velocidades de comutação são as perdas e daí a necessidade de encontrar um ponto ótimo que garanta a melhor solução. Uma boa estratégia de controlo é a modulação por largura de impulso (PWM), que faz com que os harmónicos mais prejudiciais estejam localizados na região de frequência de comutação [17]

Capítulo 3

3. Máquina de indução duplamente alimentada ECO 74

3.1 Máquina estudada

A dissertação de mestrado apresentada foi desenvolvida em ambiente industrial, como tal é importante referenciar o modelo ECO 74 PLATFORM. O trabalho apresentado apenas faz referência a uma parte mais técnica no que diz respeito aos procedimentos para colocar a turbina eólica apta a produzir energia elétrica. No entanto durante o período experimental foram acompanhados e desenvolvidos todos os trabalhos desde a montagem até aos testes de operação da turbina. Todos os procedimentos indicados nos capítulos seguintes dizem respeito a este modelo.

No capítulo 2 foi feita uma abordagem teórica do funcionamento da DFIG, característica inerente desta turbina em específico. Neste capítulo será descrito o modelo em causa.

ECO 74 é um aerogerador de eixo horizontal caracterizado por velocidade variável e controlo de *pitch*. O *design* da máquina foi desenvolvido por forma a respeitar o standard IEC-61400-1, ou seja a máquina pertence à Class II – A.

Tabela 3 - Especificações técnicas da máquina

Especificações	ECO 74
Operação	
Classe da turbina IEC/EN-61400-1	II-A
Potência Máxima	1,67 MW
Vento mínimo	3 m/s
Vento máximo	25 m/s
Rotor	
Diâmetro do rotor	80 m
Área abrangida pelo rotor	5027 m ²
Número de pás	3
Gama de velocidade	9.9-17.9 rpm
Gerador	
Tensão do barramento do estator	690 V
Classe de proteção	IP54
Frequência de funcionamento	50 Hz
Número de polos	4

As restantes características da máquina são apresentadas em forma de tabela no anexo D.

3.2 Princípios de funcionamento

3.2.1 Descrição Mecânica

A turbina eólica estudada é constituída por três elementos principais conectados por forma a rentabilizar da melhor maneira a produção de energia: o HUB (parte rotativa onde encaixam as pás), o módulo principal (permite a conexão dos restantes módulos ao cilindro vertical) e o bloco constituído por caixa desmultiplicadora e gerador. Os três módulos juntos dão forma à *Nacelle* que se ostenta no ar suportada por um cilindro metálico com cerca de 80 metros de altura [26][28].

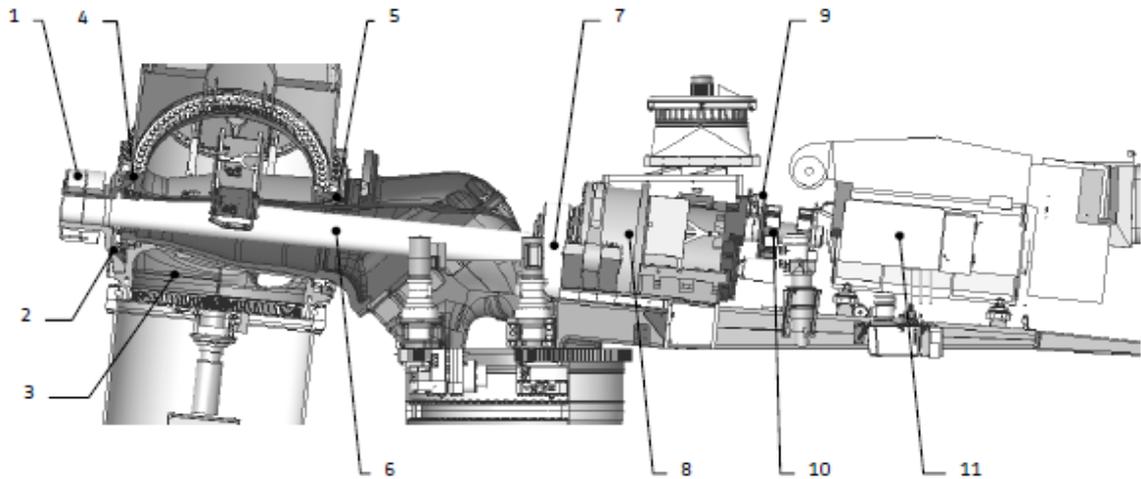
A parte rotativa engloba as pás, extensores de aço, um sistema de pitch e o HUB. Os extensores estão presos ao HUB por um sistema que permite a sua movimentação através dum atuador elétrico. Tudo isto permite a rotação das pás sobre o seu eixo vertical, explorando uma gama de valores de 86 (quando a máquina se encontra em repouso) a 2 graus (quando a máquina necessita do máximo embalo possível). Como seria de esperar, todo este controlo é protegido por sistemas de segurança que fazem com que as pás (alimentadas por baterias) recolham em caso de falhas de alimentação, situações de emergência, condições adversas, etc.,.

A movimentação do HUB faz girar o rotor a baixas rotações que é suportado diretamente por um módulo principal, módulo este que contém o sistema de orientação. É constituído por 4 motores, cada um com uma caixa desmultiplicadora que provoca a rotação *da Nacelle* sobre o eixo vertical para qualquer posição. Em repouso são ativos os 4 travões elétricos e 3 travões hidráulicos que não deixam a máquina oscilar quando em produção. Este módulo intermédio faz ainda a junção do último bloco.

A passagem de baixas para mais altas rotações é feita na caixa multiplicadora que é capaz de impor um aumento até 96 vezes (ou seja $N=96$). O rotor do gerador é ligado diretamente à caixa multiplicadora e daí a necessidade do aumento da velocidade. Deste último módulo pertence ainda todo um conjunto de armários que controlam todos os pormenores de produção. A máquina é ainda provida de um sistema hidráulico, acionado por uma bomba elétrica com numerosas aplicações.

A fim de entender melhor a descrição mecânica da máquina a figura 3.1 apresenta os principais sistemas mecânicos. O anexo D contém a descrição detalhada de todos os elementos da máquina.

Drive train



Drive train	1.	Shrink disc (hub coupling side)
(Nacelle without housing)	2.	Elastic coupling (hub)
	3.	Hub
	4.	Roller bearing (front)
	5.	Roller bearing (rear)
	6.	Low speed shaft
	7.	Shrink disc (gearbox side)
	8.	Gearbox
	9.	Park brake
	10.	Elastic coupling (high speed shaft)
	11.	Generator

Figura 3.1 - Estrutura mecânica

3.2.2 Descrição Elétrica

A figura seguinte mostra a estrutura geral do modelo referenciado, sendo ele uma turbina de velocidade variável com gerador duplamente alimentado. Cada bloco da figura representa uma parte crucial da máquina, sendo que a interação entre todos eles pode ser elétrica, mecânica ou apenas transmissão de dados, permitindo assim o controlo por parte do autómato principal.

São assim representados todos os elementos constituintes da parte mecânica da máquina, da parte de potência (traços pretos) e ainda da parte de controlo que pertence ao conversor.

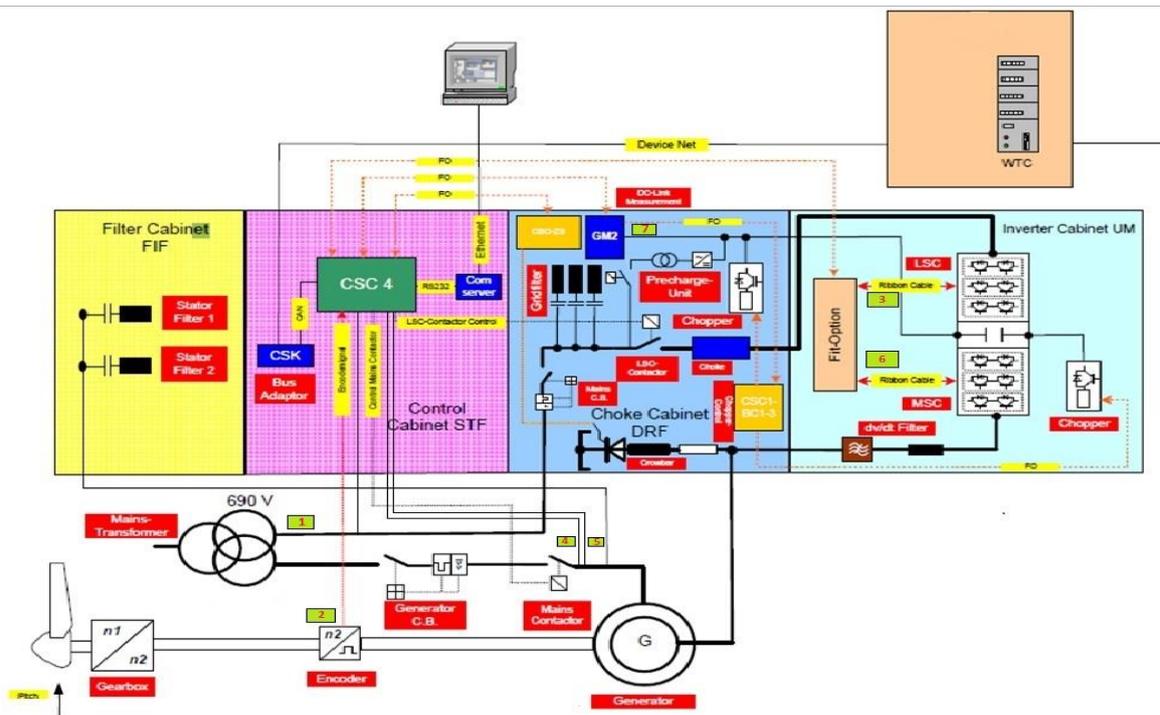


Figura 3.2 - Esquema elétrico

O conversor foi dimensionado para operar no controlo do gerador assíncrono duplamente alimentado instalado nesta máquina e construído com um barramento DC, apoiado por duas estruturas independentes de IGBT's. Este conversor trabalha com uma tensão de 1100V DC e é dividido em lado rede (LSC) e o lado máquina (MSC). Não é muito habitual, mas esta máquina devido à inexistência de uma grande potência dissipada em forma de calor, não é dotada de sistema de refrigeração. A máquina foi desenvolvida em volta do conceito que admite que quando está a produzir a corrente é positiva, sendo que a corrente consumida é negativa.

A velocidade e a posição do rotor são detetadas por um sistema de deteção incremental (Encoder), neste caso conectado à parte rotativa do gerador. Os IGBT's são controlados pelo controlador principal (CSC4) que emite sinais de alta frequência. Todos os pulsos de controlo são transmitidos através de uma linha de fibra ótica para unidade de controlo de IGBT's (FIT-), que posteriormente faz a conexão final.

Na figura 3.2, estão marcadas as 7 posições de medida fundamentais para o controlo do conversor e da turbina (números vermelhos delimitados por caixas verdes). O número 1 corresponde à medida analógica de tensão da rede e o valor serve como referência para o sincronismo da máquina. A informação vinda do Encoder (número 2) permite saber a velocidade da máquina, mas também em caso de falha do sistema conhecer a posição do rotor. Os números 3 e 6 são medidas digitais calculadas pela CSC4, correspondem à corrente do lado da rede e do lado máquina do conversor, respetivamente. É necessário ainda adquirir instantaneamente a tensão e a

corrente no estator da máquina (medidas 4 e 5). Por fim, mas não menos importante o GM2 mede constantemente a tensão do barramento DC (número 7).

Com o objetivo de proteger o barramento DC de grandes tensões inesperadas, é instalado no lado de alimentação do rotor do gerador um sistema de *bypass* constituído por tirístores.

3.2.3 Componentes Constituintes

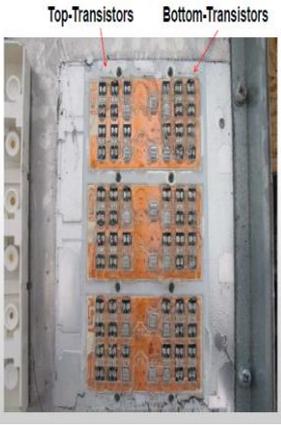
Para perceber na íntegra o funcionamento da máquina é necessário esmiuçar toda a sua estrutura, abordando alguns dos seus principais constituintes.

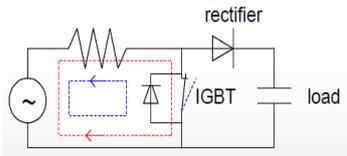
A estrutura mecânica serve de suporte a toda a conjuntura elétrica, sendo que a conexão principal é o rotor do gerador. O principal componente da turbina eólica é o gerador, sem ela a produção elétrica seria impossível. Esta máquina é dotada com um gerador de 1,67 MW [27].

A seguinte tabela apresenta os principais componentes do conversor, as suas características ficam mais evidentes quando analisado o anexo E.

Tabela 4 - Principais componentes do conversor

Componente	Descrição	Imagem
Indutâncias de Choke	<p>Este filtro encontra-se no armário de Choke. É normalmente constituído por três indutâncias conectadas em série com cada uma das três fases provenientes do transformador e que vão ligar ao conversor. Têm três objetivos principais:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Reduzir os harmónicos do lado da rede e as variações de corrente (di/dt); • Ajudar na retificação da tensão, durante a carga do DC link; • Servir como “Boost Chopper” de maneira a que o DC link atinja o seu valor nominal. <p>Caraterísticas técnicas: anexo E.</p>	 <p>Figura 3.3 - Indutâncias de Choke</p>
Filtro dv/dt	<p>Previne o envelhecimento precoce das bobinas do rotor. O filtro passa-baixo implementado à saída do inversor permite reduzir as variações bruscas de tensão bem como as correntes capacitivas entre as bobinas isoladas do rotor.</p>	 <p>Figura 3.4 - Filtro dv/dt</p>

<p>IGBT-UNIT</p>	<p>No armário do conversor, está localizada a IGBT-UNIT. Conjunto de dois módulos, constituídos por seis IGBT's cada um. O módulo LSC e MSC estão conectados à rede e ao rotor do gerador, respetivamente. A separação entre os dois é feita com um barramento de condensadores chamado DC link. Importante ainda, mencionar a FitBoard que serve como interface entre as fibras óticas vindas da CSC4 para controlar os IGBT's e os cabos Flat-cables onde posteriormente são conectados.</p> <p>Caraterísticas técnicas: anexo E.</p>	 <p>Figura 3.6 - Estrutura interna IGBT</p>
<p>CSC4</p>	<p>Talvez o componente mais importante da máquina, o CSC4 é o controlador principal do conversor, tem a capacidade de analisar, processar e guardar dados mantendo toda a informação propícia ao bom funcionamento da turbina. Entre muitas outras características este componente tem a capacidade de:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Regular a potência injetada na rede; • Regular a tensão no barramento Dc; • Definir todas as condições propícias ao sincronismo; • Comunicar com o PLC controlador do aerogerador; • Permite ainda acesso remoto para eventuais diagnósticos. 	 <p>Figura 3.7 - CSC4</p>
<p>Unidade de pré carga</p>	<p>A unidade de pré-carga é utilizada para carregar os condensadores constituintes do DC link numa primeira fase, de maneira a que sejam suportadas grandes correntes de carga.</p>	 <p>Figura 3.8 - Contactor pré-carga</p>

<p>Chopper</p>	<p>Absorve a energia do DC link em caso de excesso de carga (ex: durante falhas na rede) para proteger os condensadores de possíveis danos. A conexão com o DC link é feita através de um módulo de IGBT's.</p>	 <p>Figura 3.9 - Esquema Chopper</p>
<p>Crowbar</p>	<p>O crowbar protege o DC link contra sobre tensões provenientes do rotor. Em caso de erro o rotor é curto circuitado. A ativação deste circuito em condições normais não é necessário.</p> <p>O componente GM2 adquire o valor de tensão do DC link. Quando a tensão detetada pelo GM2 é superior ao valor nominal, um sinal de erro é enviado para a CSC4. Tão cedo quanto o possível o crowbar recebe a informação da CSC-ZS que faz atuar os tiristores e consequentemente fazer com que a potência em excesso desvaneça.</p>	 <p>Figura 3.10 - Crowbar</p>

3.2.4 Modos de operação

O computador de controlo de processos de operação coloca o sistema em 6 diferentes modos. A figura 3.11 serve como referência para explicação posterior. Todos os nomes estão em inglês porque assim são admitidos pelo controlador:

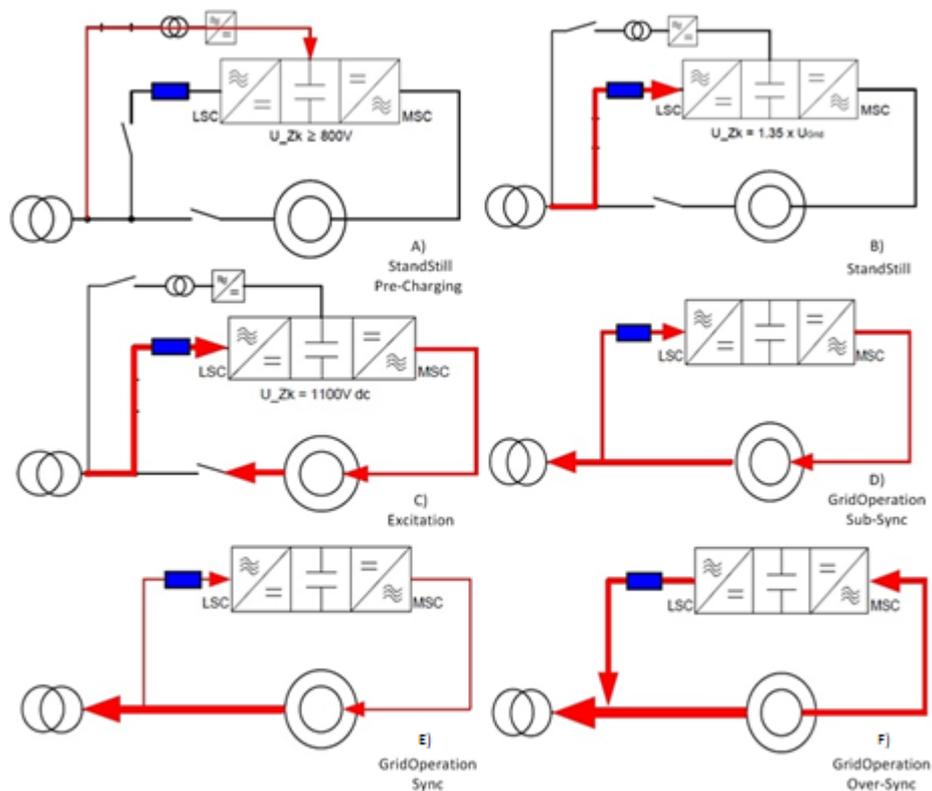


Figura 3.11 - Modos de operação do conversor

3.2.4.1 Modo Standstill

Nesta fase do processo o controlo de produção é separado da rede. O rotor do gerador não se encontra a rodar na gama de velocidades necessárias para produzir e o conversor está fora de serviço. Todo o controlo nesta fase inicial é feito pelo controlador do aerogerador que verifica se há condições para o arranque da máquina.

O controlador principal dá ordem ao sistema de orientação para se colocar em sincronismo com o vento, e posteriormente movimentar o ângulo das pás de maneira a que o rotor ganhe velocidade.

O contacto auxiliar de pré carga é fechado imediatamente a seguir à máquina entrar na gama de velocidade ideal para a produção. Isto significa que a tensão de rede, através do transformador e do retificador, alimenta o DC link que será pré alimentado para um valor aproximado de 900V. Com a tensão de 900 V no DC link, o contator LSC é fechado e coloca automaticamente toda a tensão de linha nos díodos reversíveis do conversor, tensão essa que é retificada para alimentar o DC link. O processo de alimentação é contínuo até atingir uma tensão de 1.35 vezes a tensão da rede, neste caso 931 V. Esta primeira fase está demonstrada na figura 3.11.

3.2.4.2 Modo Excitation

Se a máquina se encontrar dentro da gama de velocidade de operação e se o conversor estiver operacional, a tensão do gerador vai aumentar progressivamente alimentado pelo conversor do lado da rede até atingir o valor nominal.

Ao ativar o conversor LSC, o valor de tensão do DC link é regulado para o valor nominal de 1100V DC. Neste momento o conversor está a funcionar como “*boost*” (elevador de tensão). O processo de pré carga é finalizado e o sistema entra no modo *standby*. Nesta fase, como está demonstrado na figura 3.11 o conversor MSC é ativado e alimenta o rotor com uma corrente que permite induzir um campo magnético no estator, responsável final pela tensão criada no mesmo. O sistema finaliza o processo quando compara a tensão de rede e do estator e verifica que se encontram em sincronismo.

3.2.4.3 Modo Standby

O procedimento de excitação está concluído. O conversor do lado da máquina (MSC) ajusta a tensão aos terminais do estator do gerador no valor nominal. O controlador principal mantém a máquina dentro dos valores de velocidade de operação. Nesta fase, o conversor aguarda um sinal vindo do controlador que indica o início de produção “*Load Request*”.

3.2.4.4 Modo Grid Operation

Se o sinal “*Load Request*” é enviado para o controlo do conversor, a tensão aos terminais do gerador é sincronizada com a tensão de rede pelo controlador do conversor. Depois do processo de sincronismo, o contactor do estator é fechado e conecta o gerador ao transformador de rede. Durante a operação de paralelismo, o conversor do lado da rede (LSC) controla a tensão do barramento DC. O conversor do lado da máquina controla a potência injetada na rede de acordo com a informação vinda do sistema de controlo de rede.

O paralelo pode dividir-se em três fases que dependem da velocidade de rotação da máquina. Para uma máquina duplamente alimentada, em geral, tem que se ter em conta algumas equações.

A velocidade de sincronismo, no caso da turbina ECO 74, com 2 pares de polos e a trabalhar com uma frequência de rede de 50 Hz será:

$$n_s = \frac{f}{p} \times 60 = \frac{50}{2} \times 60 = 1500 \text{ rpm} \quad (3.1)$$

O deslizamento é assim calculado pela seguinte fórmula:

$$s = \frac{n_s - n_{mec}}{n_s} \quad (3.2)$$

Importante ainda, salientar a dependência que a frequência da tensão à saída do gerador tem, em relação à frequência de excitação do rotor e a velocidade mecânica:

$$f_{u_gen} = \pm f_{rot} + \frac{p \times n_{mec}}{60} \quad (3.3)$$

A frequência de excitação do rotor varia consoante a velocidade mecânica da máquina, criando assim os três modos de operação da máquina anteriormente referidos.

Com o rotor a rodar a uma velocidade inferior à de sincronismo (Sub-Sync alínea d), o conversor do lado da máquina (MSC) garante a excitação do rotor com uma corrente em que a frequência é positiva. Verifica-se a seguinte relação:

$$f_{u_gen} = f_{rot} + \frac{p \times n_{mec}}{60} \quad (3.4)$$

Pelo estator da máquina é garantida toda a produção de energia que é injetada na rede, sendo que uma pequena parte é utilizada pelo conversor para excitar o rotor, mantendo assim a tensão e frequência do estator constantes.

Desde que o rotor se movimenta a uma velocidade igual à de sincronismo, o rotor é alimentado pelo conversor com uma pequena corrente que mantém o campo magnético do entreferro constante (Sync alínea e)).

$$f_{u_gen} = \frac{p \times n_{mec}}{60} \quad (3.5)$$

Toda a energia produzida é transmitida para a rede pelos cabos conectados aos barramentos do estator. O conversor apenas providencia alimentação para a excitação do rotor. Nestas condições de operação, aproximadamente 2/3 da potência proveniente do vento é convertida em energia elétrica.

No estado de Supersincronismo (Over-Sync representado pela alínea f)) existe tensão induzida no rotor, o que provoca um aumento da tensão do barramento DC. O conversor permite dissipar este nível de potência elevada no DC link, injetando uma corrente na rede pelo conversor LSC.

$$f_{u_gen} = -f_{rot} + \frac{p \times n_{mec}}{60} \quad (3.6)$$

Os terminais do estator são responsáveis pela transmissão direta de 80% da energia produzida pelo gerador, juntamente com os 20% restantes que são inseridos na rede pelo lado do rotor.

Capítulo 4

4. Pré operacionais

O propósito deste capítulo é descrever detalhadamente as operações realizadas durante a colocação em serviço da turbina eólica abordada nesta tese. Por colocação em serviço ou mais comumente conhecido como comissionamento, denominam-se todas as atividades a realizar depois da turbina ser instalada, até aprovação de produção por parte das entidades competentes. Para todas as técnicas de comissionamento existem diretrizes e instruções que devem ser seguidas à risca para assegurar tanto a eficácia como a segurança das operações, algumas delas serão descritas posteriormente [26],[28].

Todos os trabalhos desenvolvidos no terreno são efetuados mediante as necessidades do cliente. De observar que se devem garantir sempre as condições de segurança.

Todos os processos descritos neste capítulo foram desenvolvidos em ambiente industrial. A cronologia dos eventos, as denominações e as verificações efetuadas dependem da marca do fabricante em questão, das exigências do cliente e ainda do país onde se desenrolam os projetos. Já foi frisado anteriormente, mas nunca é demais lembrar que toda a informação contida é confidencial e necessita de aprovação da *AlstomWind* para qualquer utilização em futuras aplicações. Para simplificar a explicação, mas também para não expor alguns pormenores confidenciais as instruções apresentadas não são totalmente iguais às utilizadas na prática. Depois de montadas e instaladas, ainda antes de se poderem energizar, as máquinas precisam de uma verificação prévia dos mais diversos sistemas mecânicos e elétricos.

4.1 Transformador

Antes de mais o transformador é um dos componentes principais de qualquer turbina eólica, como tal requer muita atenção na sua verificação. Não fugindo à regra habitual, o transformador é conectado à rede por um interruptor principal (*switchgear*). Evidencia-se como uma forma de proteção, mas também como maneira eficaz de assegurar o isolamento energético em caso de necessidade.

Os requisitos de segurança definem que antes de começar a verificação do transformador é necessário comprovar a ausência de tensão no interruptor principal. Só depois é permitida a entrada no compartimento fechado, que necessita duma chave acessível apenas quando um seccionador do interruptor principal que alimenta o transformador está fechado.

As características do transformador em causa podem ser encontradas no anexo E.

Verificação do transformador:

- ✓ Verificar se todos os terminais do transformador estão isolados, tanto o primário como o secundário devem estar completamente desconectados;
- ✓ Desconectar o neutro do transformador;
- ✓ Proceder ao teste de isolamento (*megger*) a 1000V, ambos os secundários devem ser testados em relação à terra. A 1000V para o transformador em causa deve verificar-se uma resistência de $10\Omega/kV$;
- ✓ Verificar a sequência de cabos dos secundários para os devidos barramentos;
- ✓ Conectar todos cabos novamente.

4.2 Armários

A máquina está dividida por armários que servem de suporte para o controlo e alimentação dos diversos sistemas. Nesta fase toda a máquina deve encontrar-se sem energia. Todos os componentes estão desligados e as proteções estão baixadas.

Em todos os disjuntores, guarda-motores, interruptores diferenciais, contactores e componentes da máquina é necessário:

- ✓ Verificar o aperto das ligações;
- ✓ Conferir a sequência de cores dos cabos de alimentação, ou seja, a sequência de cabos que mais tarde provocará a sequência de fases;
- ✓ Verificar taras (valores de proteção e ajuste calculados de acordo com as especificações técnicas da máquina;
- ✓ Verificar curto-circuitos e passagens à terra;

Já depois de energizada, a máquina encontra-se disponível para que se programe o controlador que contém um cartão de memória onde se instala o *software* pré definido facultado pela marca. O protocolo de comunicação mais utilizado na máquina é *Ethernet* e serve de suporte para praticamente todas as ligações computador/máquina. Também o sistema de comunicação remota tem de ser programado.

4.3 Gerador

Depois de verificar que a chapa de características do gerador corresponde às especificações indicadas na *check list*, é importante fazer uma inspeção visual que permita entender o estado do mesmo. Ver anexo D.

Neste caso em concreto, o gerador é conectado à rede através do barramento do estator e ligado ao conversor pelo barramento do rotor. Em ambos os casos, e porque a conexão é feita por múltiplos cabos, é importante garantir que a sequência de cabos é a correta (depois de energizada a máquina com recurso a um fasímetro é necessário verificar a sequência de fases). Para isso são removidas todas as escovas do lado do rotor (figura 4.1 e 4.2) e desconectados todos os cabos do lado do estator (figura 4.3). Já com o sistema totalmente isolado, cada cabo é verificado e colocado na posição correta. São ainda verificadas possíveis passagens à terra ou curto-circuitos. Todos os cabos devem ser apertados com o binário descrito nos esquemas e as escovas devem ser devidamente limpas e colocadas na sua posição original.

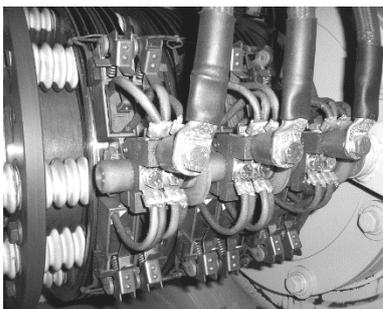


Figure 4.1 - Escovas do rotor



Figure 4.2- Rotor -
verificação de isolamento do
barramento



Figure 4.3- barramento
do estator

O gerador é dotado do *encoder* (figura 4.4 e 4.5) que é um dos mais importantes sensores da máquina. Fixo na parte não rotativa do gerador tem um pinhão que liga à parte rotativa. Tem a capacidade de ler não só a velocidade mas também a posição do gerador num determinado momento. Para isso é conectado via 6 fios à CSC4 (figura 4.6 e 4.7). Uma das verificações que tem que fazer é analisar se a conexão dos cabos está de acordo com aos planos elétricos. Este sensor é ainda dotado de um encoder mecânico que, para uma rotação superior a 2300rpm, ativa dois sinais elétricos que cortam a linha de segurança e acionam uma variável de erro para o controlador. É importantíssimo testar este sensor por uma questão de segurança.

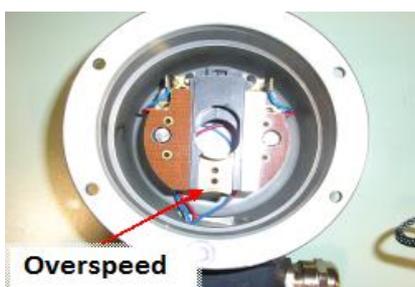


Figure 4.4- Encoder (overspeed mecânico)



Figure 4.5 - Encoder e overspeed



Figura 4.6 - Ligações internas

4.4 Conversor

O armário do conversor, ilustrado na totalidade na figura 4.8, pela quantidade de componentes e barramentos que podem estar várias vezes com potencial elevado, necessita de uma inspeção visual redobrada onde se garanta que não há nenhuma peça solta em contacto com partes metálicas. A entrada de duas gamas de tensão 400V e 690V exige que se verifiquem as sequências de fase desde a sua proveniência até aqui, bem como as ligações dos transformadores de corrente no barramento de entrada por fase (figura 4.9). Devem testar-se passagens à terra e curto-circuitos com o conversor isolado e já com os contactores forçados para que estenda a todo o circuito da periferia [27].

Depois de energizado o armário, programa-se o conversor com o *firmware* adequado, seleccionando ainda o tipo de rede elétrica, de gerador e de transformador.



Figura 4.7 – Entradas CSC4



Figura 4.8 - Armário do conversor



Figura 4.9 -Transformadores de corrente

4.5 Pitch

Pela zona rotativa onde é instalado, pela importância que desempenha que o leva a ter imensas redundâncias de segurança e por necessitar de uma rápida comunicação com o

controlador, o sistema de *pitch* é muito complexo. Seja qual for o evento, é obrigatório que as pás recolham para uma posição de repouso.

Em cada pá existe um armário que armazena um variador, sistemas de proteção e um módulo de baterias que servem de base para o controlo do motor DC (figura 4.10 e 4.14), que faz rodar a pá sempre que necessário. O controlo do movimento de cada pá é feito individualmente por cada variador que recebe o ângulo de referência vinda do TCU (*turbine control unit*). Tudo isto em condições normais. Em caso de falha, um sistema automático regulado por um conjunto de contactores vai recolher sempre as pás para a posição de repouso a 86°, com recurso a energia fornecida pelas baterias.

Quando são instaladas as pás na turbina, ainda não há energia no sistema e como tal as pás têm que ser referenciadas numa gama de valores que varia entre 86° e 0° (posição de repouso e bandeira respetivamente). A referenciação é efetuada individualmente por pá, recorrendo a conectividade por computador a cada variador. Obviamente que para entender na íntegra o procedimento de todo o sistema tinha que ser explicado aprofundadamente, o que não é possível. No entanto, todos os passos são apresentados numa maneira resumida:

- ✓ Ainda antes de energizar todo o sistema, todas as ligações entre armários devem ser verificadas. Devem abrir-se todos os armários e garantir que não existem peças soltas uma vez que todo o HUB vai rodar;
- ✓ Medir a tensão das baterias (260V DC) e garantir que todos os 4 módulos de baterias estão bem apertados;
- ✓ Testar curto circuitos e passagens à terra;
- ✓ Verificar que os cabos de alimentação e comunicações estão bem conectados na zona que faz a ligação entre a parte rotativa e a parte móvel (slip-ring apresentado na figura 4.13);
- ✓ Os armários das pás devem ser alimentados sequencialmente, ainda com todos os componentes desligados, logo depois é necessário programar os controladores e switch de comunicação;

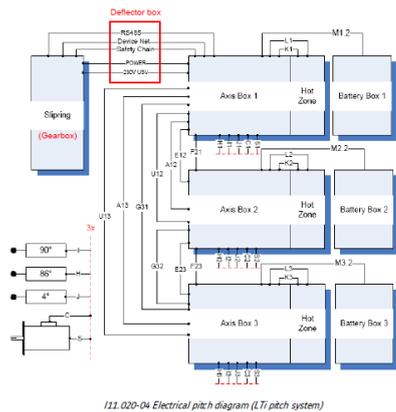


Figura 4.10 - Vista elétrica geral do *pitch*



Figura 4.11 - Consola de referência

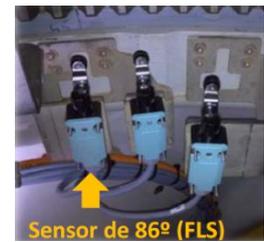


Figura 15.12 - Sensores de fim de curso

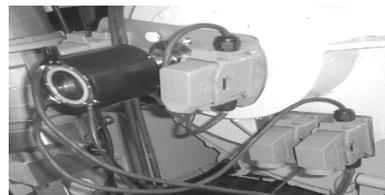


Figura 4.13 - SlipRing



Figura 4.14 - Motor DC

- ✓ Referenciar as pás: a parte rotativa do HUB e a pá em questão ambos têm uma marcação que indica o ponto 0°, usado como indicação de referência com o recurso a uma consola que se conecta diretamente ao variador (figura 4.11). Move-se a pá até os dois pontos coincidirem e então é dado o valor que o encoder vai adquirir nesse ponto. O motor DC tem acoplado um encoder que envia constantemente a posição atual da pá ao controlador;
- ✓ É ainda necessário ajustar três sensores de posição em cada pá, para evitar que a mesma se mova para além dos limites máximos de posicionamento: sensor de fim de curso de bandeira máxima a 0°, sensor de fim de curso de repouso a 86° e ainda sensor de fim de curso de proteção a 90° (figura 4.12).

Desta forma, o *pitch* supostamente estará pronto para utilizar, no entanto e de maneira a evitar falhas tem que ser testado durante as provas operacionais.

4.6 Energização

A energização tem que ser feita por partes e necessita de aprovação da equipa que comprova as linhas de média tensão a montante.

O primeiro passo é ter uma boa comunicação com o centro de controlo na subestação. Dada a garantia que está tudo conforme os protocolos e que há luz verde para energizar a turbina deve testar-se a forma de chegada de tensão ao interruptor principal de média tensão (*switchgear*). Depois de verificado que todos os disjuntores a jusante do transformador estão desligados, sem pessoas na torre e cumprindo as normas de segurança pode então energizar-se o transformador. Por

norma o transformador deve estar energizado durante 24 horas (depende de fabricante para fabricante) antes da turbina produzir a primeira vez.

Os vários armários da máquina vão sendo energizados sequencialmente até se verificar um estado operacional da máquina.

4.7 Verificações Finais

Como foi descrito anteriormente, a máquina contém uma linha de 24V DC (denominada linha de segurança) que passa pelos principais e mais importantes componentes da turbina eólica e que força a sua paragem automática em caso de ativação. Esta é uma das verificações com mais importância de todos os pré-operacionais, uma vez que garante não só a segurança da máquina, mas também a dos técnicos que farão posteriormente as provas de operacionais.

Deve comprovar-se que o relé de ativação da linha de segurança comuta cada vez que se ativa um dos seguintes sensores:

- ✓ Botões de pressão/emergência posicionados ao longo da máquina – servem com segurança para os técnicos;
- ✓ Sensor centrífugo do gerador – trava a máquina em caso de velocidades excessivas (*overspeed* figuras 4.4 e 4.5);
- ✓ Sensor de torção dos cabos (figura 4.16) – o sistema de orientação é dotado por um *encoder* que tem que ser referenciado. Situado na cremalheira de orientação vai receber uma referência 0° quando os cabos que vão do topo da *nacelle* para a fundação estiverem totalmente desenrolados. Para evitar que os cabos se enrolem durante a orientação da máquina, este *encoder* tem um sistema mecânico de proteção que comuta o sinal de 24V da linha de segurança assim que se atinja $\pm 720^\circ$.
- ✓ Sensor de rotação – é um sensor indutivo colocado propositadamente para medir a velocidade do eixo lento. Também ele vai enviar um sinal que provoca a falha da linha de segurança em caso de velocidade excessiva.

Para além dos sensores apresentados como principais, há inúmeros componentes elétricos espalhados pela máquina: sondas de temperatura, pressoestatos, sensores de movimento como são os sensores de velocidade e direção do vento (figura 4.17), sinais de proteção (figura 4.18 e 4.20), electroválvulas, sensores de humidade, que têm associados sempre uma variável que é constantemente lida e tratada pelo TCU (figura 4.19). Todas estas variáveis têm que ser forçadas e monitorizadas de maneira a verificar que realmente o sistema de comutação está funcional.



Figura 4.15 - Sensor de vibrações



Figura 4.16 - Encoder yaw - sensor de torção dos cabos



Figura 4.17 - Sensores de velocidade e direção do vento



Figura 4.18 - Fusíveis e switches de sinais associados



Figura 4.19 - TCU Galileo



Figura 4.20 - Descarregadores de sobretensão

Capítulo 5

5. Testes Operacionais

Depois de verificados todos os sistemas relevantes da máquina, dependendo apenas da aprovação do cliente e do estado atual do mesmo, podem realizar-se as provas finais que permitem a produção de energia elétrica por parte da máquina. Nesta fase é normal que se encontrem erros no TCU. Existem muitas possibilidades de erros que têm que ser corrigidos antes de se poderem efetuar as provas finais. Para realizar os testes que habilitam a máquina a produzir energia, tem que haver garantias que todos os sistemas a montante do interruptor principal estão em perfeitas condições para receber energia. Os controladores de rede têm que ser informados e só depois da sua confirmação há a possibilidade de avançar [23].

Durante a realização das provas operacionais, os resultados obtidos têm que ser registados numa folha de registo equivalente à apresentada no anexo F. Uma nota importante é que a explicação deste capítulo fica completa pela análise de preenchimento dessa mesma folha [29].

5.1 Recolha normal -TRA01

A primeira prova a ser efetuada (figura 5.1), prende-se pela verificação da capacidade do sistema de pitch a funcionar em pleno. Como há dois modos de funcionamento, um em condições normais e outro em emergência, comprovam-se ambos os casos para certificar que tudo está devidamente instalado, programado e que os componentes funcionam. Como seria de esperar, por uma questão de segurança a máquina tem o rotor bloqueado para que em caso de não recolha das pás, o eixo lento não comece a girar desgovernadamente.

O objetivo da prova é verificar se o pitch move as pás de forma controlada com velocidade e binário adequados:

- ✓ As pás encontram-se em posição de repouso 86° ;
- ✓ Assume-se através do TCU, o controlo manual do *pitch* (3 pás de forma simultânea);
- ✓ Altera-se a variável de controlo para 2° e verifica-se que as pás se movem;
- ✓ Ativar o registo de dados da máquina e alterar a variável novamente para 86° ;
- ✓ Verificar que a velocidade de recolha é de $5 \pm 0,5$ %/s e o valor de binário não ultrapassa os 250 Nm.

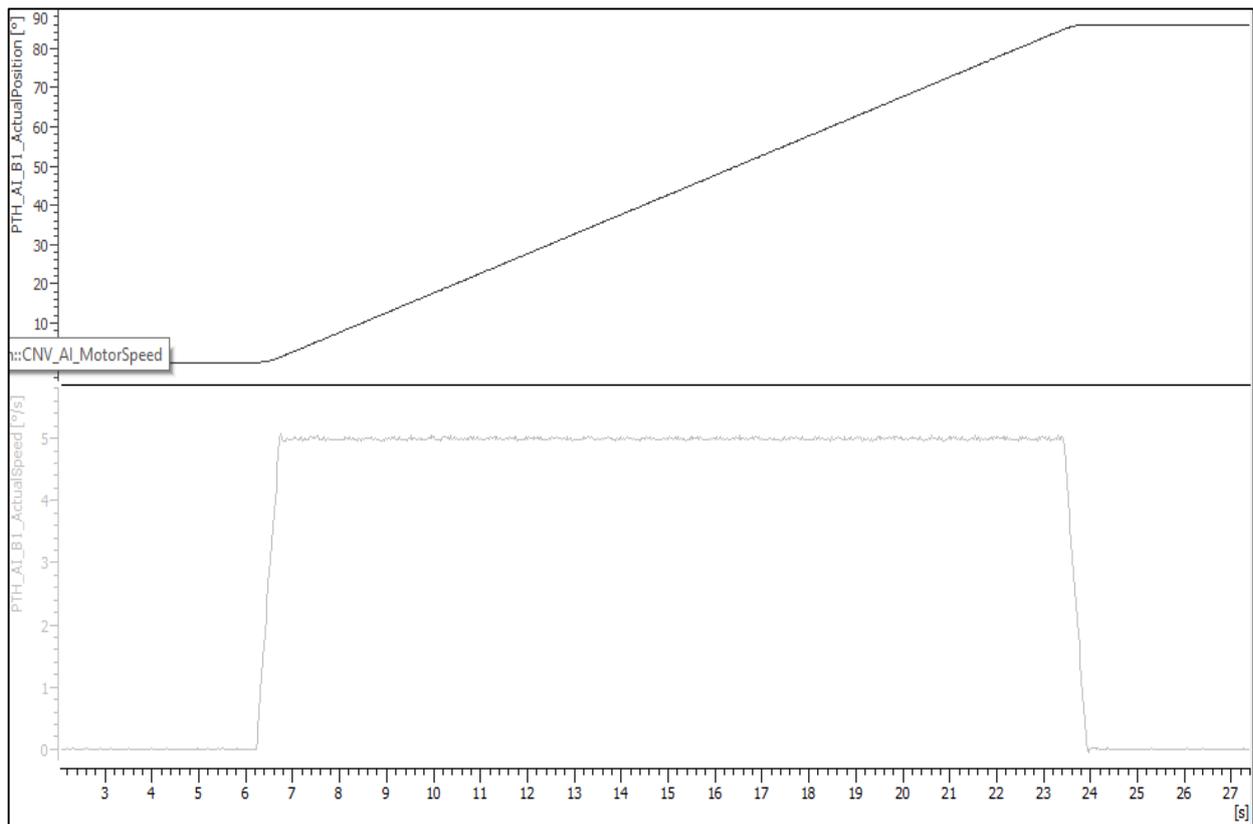


Figura 5.1 - TRA01 - Posição e velocidade da pá 1

5.2 Recolha de emergência - TRA02

Este tipo de recolha só se verifica em caso de falha grave num dos sistemas do aerogerador. Está desenhado para que até no acaso mais extremo em que falha a energia na máquina a recolha seja algo possível e obrigatório. Para isso, cada vez que há um erro grave é acionado um contactor que ativa um conjunto de baterias de 260V DC por pá.

O objetivo desta prova passa por verificar a correta sequência de entrada dos módulos de baterias num caso de falha provocada. Como a descarga energética não é controlada a velocidade de recolha pode variar entre 4,5 e 7,5 %/s. O procedimento é o seguinte:

- ✓ As pás inicialmente encontram-se em posição de repouso 86°;
- ✓ Assume-se o controlo manual do *pitch* através do TCU;
- ✓ Altera-se a variável de controlo do ângulo das pás para 2° e verifica-se que efetivamente as pás se movem;
- ✓ Inicia-se a gravação de dados, pressiona-se uma dos botões de emergência, provocando uma falha na linha de segurança;
- ✓ Verificar que as três pás recolhem dentro de uma gama de velocidades descrita anteriormente.

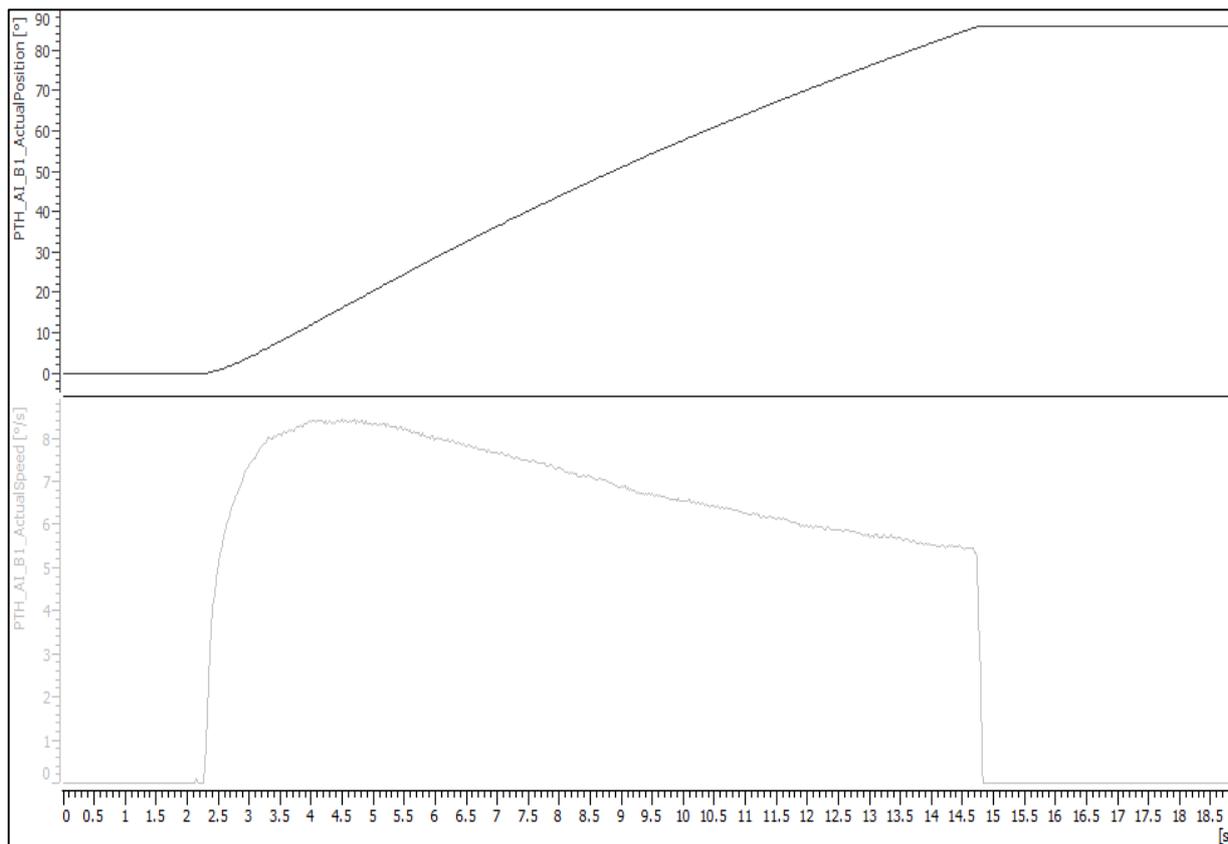


Figura 16.2 - TRA02 - Posição e velocidade da pá 1

A figura 5.1 e 5.2, apresentam a posição e respectiva velocidade de recolha de uma das pás durante as provas apresentadas. De notar que durante a TRA02, o movimento é gerado por alimentação não controlado e como tal a velocidade numa fase inicial atinge um pico máximo mais elevado.

5.3 Regulação a 500 rpm - REG500

Como seria de esperar a primeira prova de rotação é efetuada a baixa velocidade por uma questão de segurança. Já com o rotor da máquina desbloqueado, são alteradas algumas variáveis do controlo para que a velocidade de rotação do gerador não ultrapasse as 500 rpm. Como nesta fase ainda não há produção de energia, nem controlo do gerador por parte do conversor, o controlo da velocidade vai ser totalmente efetuado pelo TCU. Através do algoritmo de controlo, o TCU vai ajustar o ângulo das pás de maneira a que, dependente do valor do vento atual, nunca supere a velocidade de rotação limite. Neste caso específico as variáveis mais importantes a modificar são o limite de velocidade do gerador, a potência produzida que deve ser 0 e o limite máximo de vento que por uma questão de controlo não pode ultrapassar 11 m/s.

Antes de iniciar a prova que deve ter uma duração mínima de 5 minutos é necessário começar o registo e retirar o *Stop Manual* da máquina, ou seja, deixar a máquina funcionar automaticamente. É importante verificar que o sentido de rotação do gerador é no sentido dos ponteiros do relógio, a uma velocidade de rotação que não ultrapassa as 500 rpm, que não existem ruídos estranhos, que todos os sistemas hidráulicos não têm fugas, que não existe fricção entre partes móveis e que as vibrações e oscilações da torre estão dentro dos parâmetros normais.

Na figura 5.3 é perceptível a relação existente entre a velocidade do vento, a posição das pás (neste caso apenas representada a pá 1) e a velocidade que o gerador da turbina atinge. Para velocidades próximas de repouso as pás mantêm-se a 86°, assim que há necessidade do aumento de velocidade a posição vai diminuindo até a velocidade do gerador atingir 500 rpm. Nesta fase o TCU através do algoritmo de controlo controla a velocidade nesse limite através da regulação da posição das três pás.

Ainda na figura pode ler-se *MotorSpeed* no entanto a velocidade registada é do gerador, esta é uma nomenclatura do fabricante.

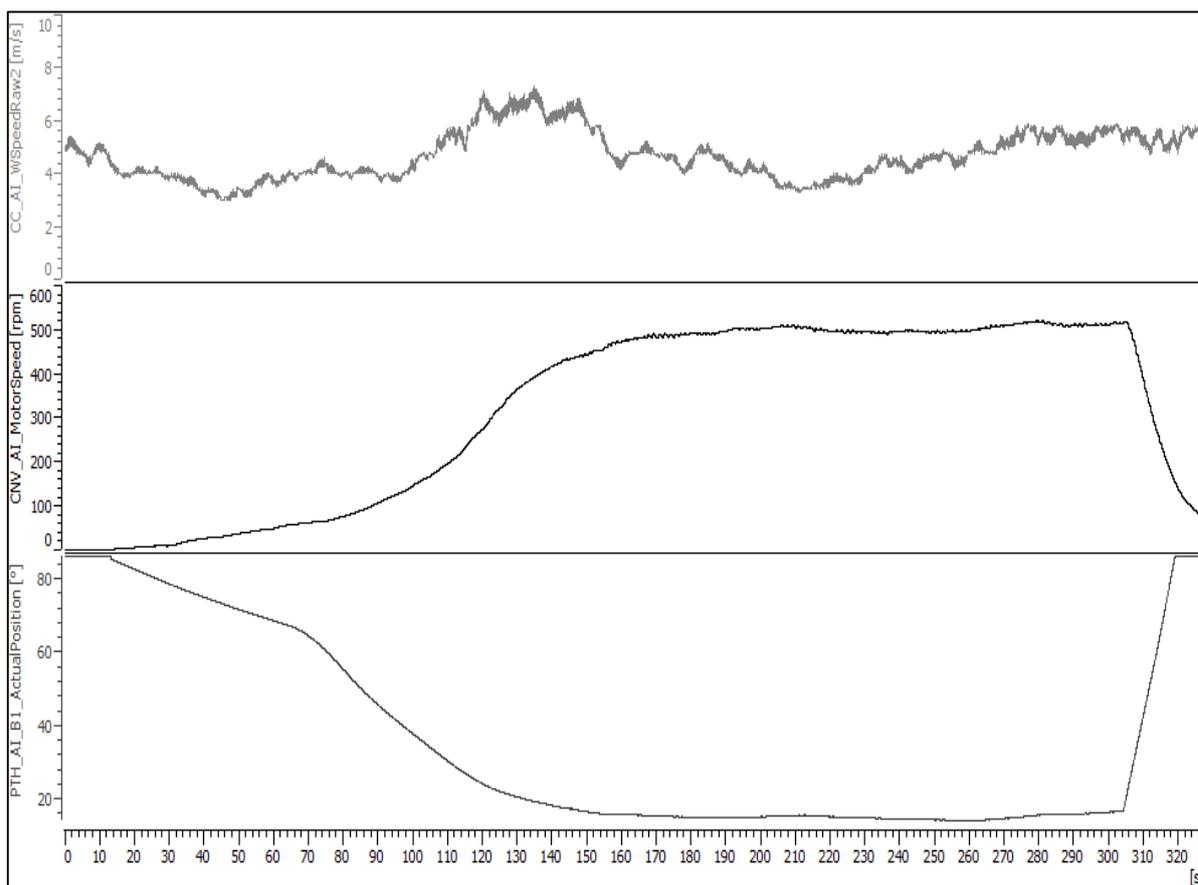


Figura 5.3 - REG500 - Velocidade do vento, velocidade do gerador e posição da pá 1

5.4 Regulação à velocidade de conexão - REG1100

Depois de verificar que está tudo bem com a máquina e após efetuada a regulação a baixas velocidades, tem que se fazer uma prova idêntica à descrita anteriormente, desta vez para uma velocidade de 1100 rpm (velocidade de conexão do conversor), ou seja, a velocidade que permite que o conversor entre em funcionamento. O processo é em todo idêntico ao anterior e são verificadas as mesmas condições, obviamente com valores de controlo alterados. A figura 5.4 evidencia as mesmas relações.

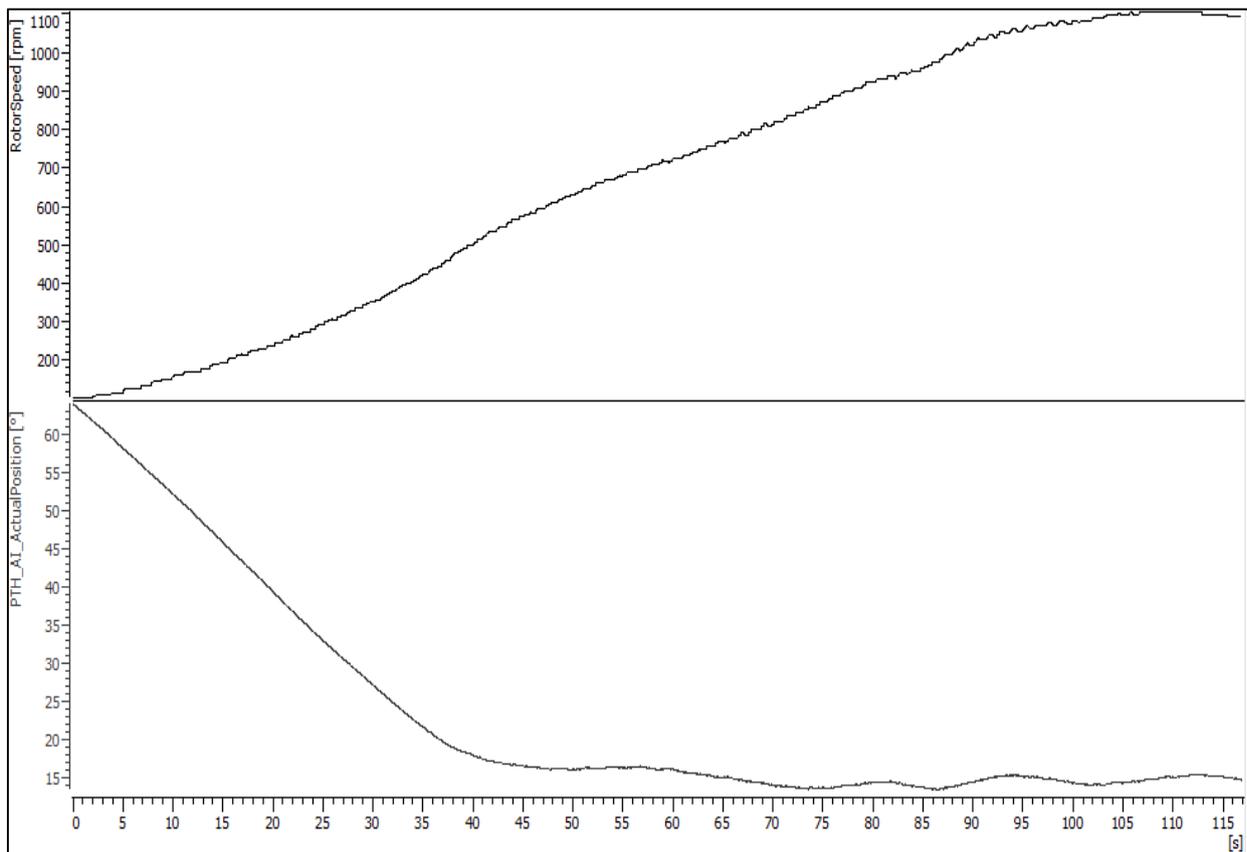


Figura 17.4 - Velocidade do gerador e posição da pá 1

5.5 Comissionamento do conversor

Assumindo as condições e a modificação das variáveis da prova anterior, a máquina está assim em condições de assumir o comissionamento do conversor [25]. Note-se que antes de iniciar o processo, a máquina deve estar a girar à velocidade de conexão. Para este efeito e porque o conversor pertence a um fabricante em particular, é utilizado um *software* específico para criar uma ligação direta ao controlador do conversor, e que regula todos os passos necessários que devem ser efetuados [24].

Os passos do comissionamento dependem exclusivamente dos estados de funcionamento possíveis da máquina explicados no capítulo 3. Só a verificação de um dos passos permite a passagem para o seguinte, evitando assim possíveis erros [27].

5.5.1 Falhas do sistema

Este passo de comissionamento serve para verificar que o sistema está livre de falhas. Uma lista possível de falhas é gerada e só é permitido passar para os passos seguintes quando todas as falhas estiverem resolvidas.

5.5.2 *Trigger* a OFF

É necessário fazer uma verificação da sequência de fases da rede (*mains voltage*), da sequência de fases do barramento de entrada do conversor (*LSC*) e a medição da velocidade do gerador (*Speed*). Para isso faz-se um registo de todas as variáveis que o conversor adquire momentaneamente (*trigger* -nome técnico utilizado pela fabricante do conversor) com o conversor ainda num estado onde apenas está alimentado. A figura 5.5 representa o interface gráfico da aquisição de dados efetuada. Pode ver-se que as duas sequências de fase estão de acordo.

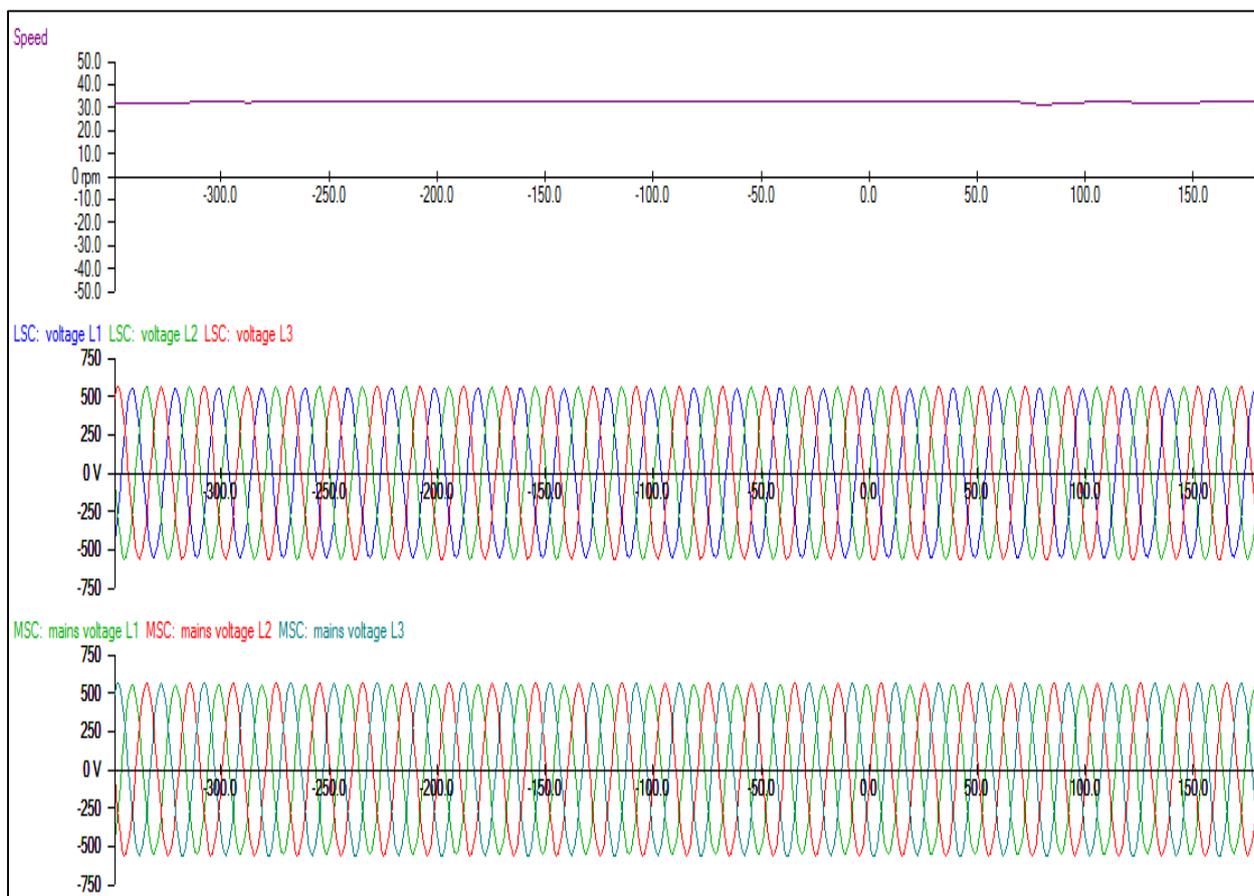


Figura 5.5 - Velocidade do gerador, tensões de entrada do conversor e tensões da rede

5.5.3 Ativação do sistema do lado linha (LSC)

Neste passo o objetivo é regular a tensão do *DCLink* para o valor desejado. O controlador começa por inicializar a pré carga do banco de condensadores através de um um circuito auxiliar, para evitar excesso de corrente. Só depois de atingir um valor de tensão de 850V DC são conectados os IGBT's do conversor do lado da rede até atingir uma tensão final de 1100V DC. O passo está completo quando se verifica que essa tensão é mantida constante sem alterações.

5.5.4 Ativação do sistema lado máquina (MSC - standby)

Nesta fase do comissionamento o controlador vai verificar se a velocidade do rotor está dentro da gama de valores admissíveis para concluir a conexão. O DCLink está carregado e a energia está pronta para ser invertida com o objetivo de excitar o rotor.

5.5.5 Sincronismo

Quando ativado este passo, o controlo de comutação dos IGBT's do conversor do lado máquina vai servir para que a excitação do rotor permita alcançar uma tensão no estator, idêntica à medida na rede. Neste passo é fulcral analisar todos os dados que são gerados pelo controlador.

Pela análise da figura 54, é possível verificar que as três fases do estator (*MSC statorvoltage*) e da rede (*MSC mainsvoltage*) estão em sincronismo, sendo que cada fase corresponde a uma cor distinta e as fases homólogas estão sobrepostas. Também as tensões do rotor estão com o formato e sequência indicada.

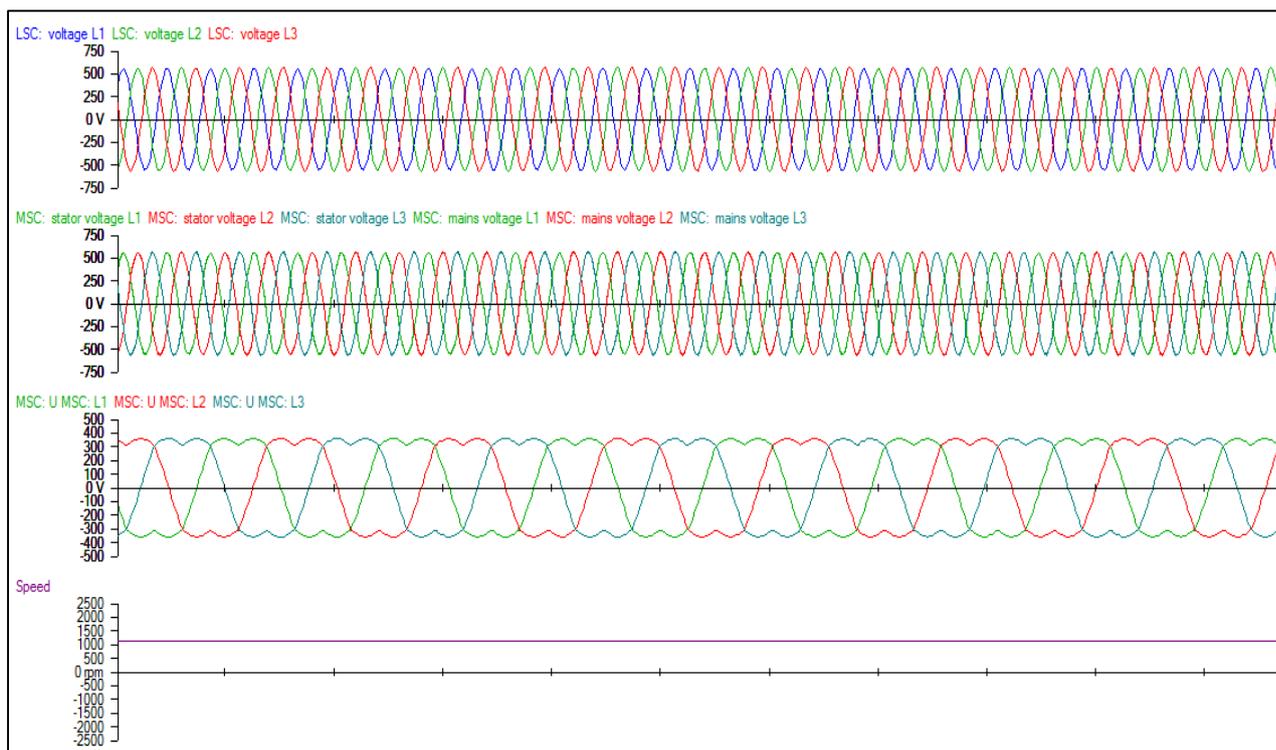


Figura 5.6 - Tensões à entrada do conversor, tensões da rede e do estator em sincronismo, tensões de excitação do rotor e velocidade do gerador

5.5.6 Paralelo

Por fim e depois da verificação dos dados anteriores, é permitido o acesso ao passo em que a máquina vai fechar pela primeira vez o contactor do estator e fazer o paralelismo entre o gerador e a rede, ainda que não se verifique produção. Embora a potência esteja definida como 0, é necessário entrar em contacto com o operador de rede para pedir permissão, uma vez que podem surgir falhas.

Depois de efetuados e verificados todos os passos com sucesso pode-se passar finalmente para as provas finais de produção, com a máquina a funcionar sem controlo manual.

A figura 5.7 apresenta as tensões num modo paralelo para 1100 rpm mas ainda numa fase onde a potência produzida é nula.

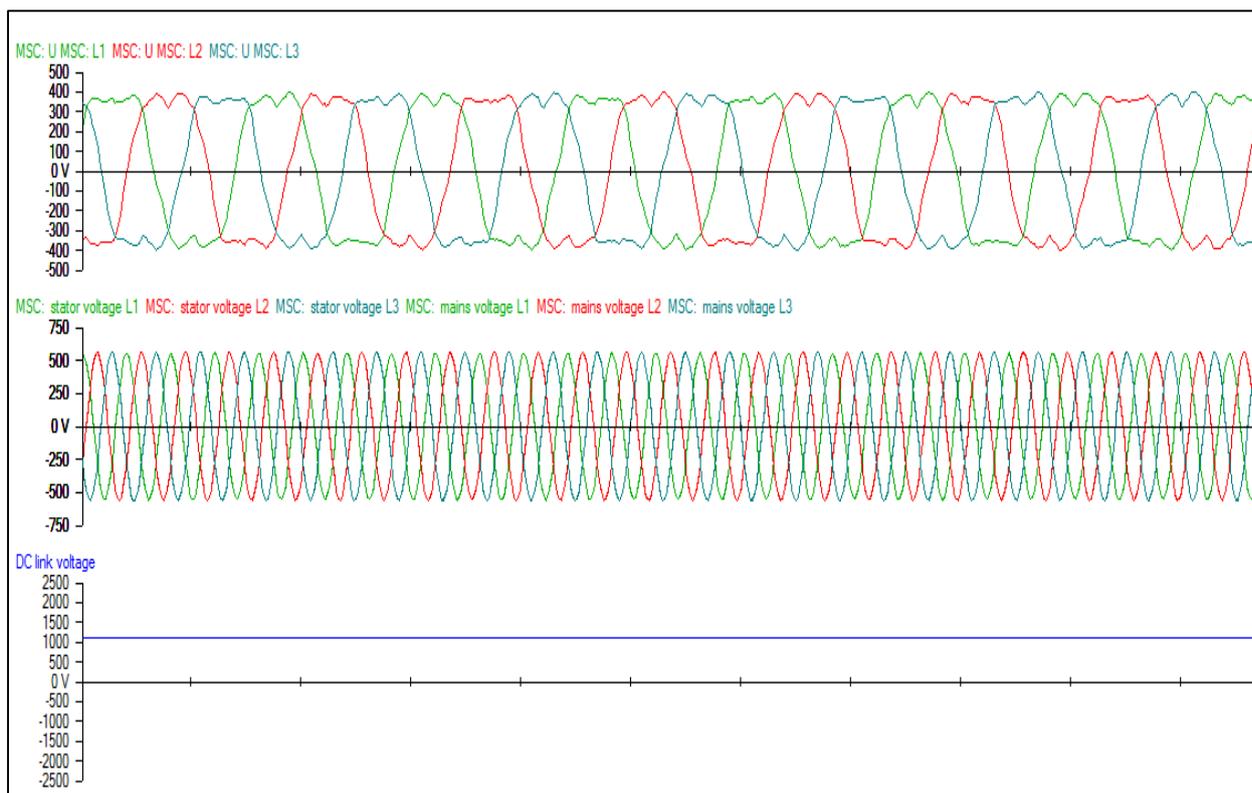


Figura 5.7 - Tensões do rotor, tensão da rede e do estator em sincronismo e DClink controlado

5.5.7 Produção Limitada - OPL01

Esta é a primeira prova em que a máquina vai produzir energia e ao mesmo tempo funcionar de forma autónoma. Nenhum dos passos que foram descritos anteriormente vão ser controlados manualmente. A única limitação desta prova é a potência que estará limitada a 1MW. Durante 30 minutos a máquina é supervisionada de maneira a controlar todos os sistemas: orientação, pitch, transformador, conversor, lubrificações, temperaturas, oscilações e ruídos estranhos.

É importante verificar pelos dados recolhidos que a potência é coerente ($P=\omega*\tau$).

No final da prova deve realizar-se uma paragem de emergência forçada com a máquina a produzir em pleno. Depois disto, a máquina deve permanecer limitada a 1MW durante 72 horas.

A figura 5.8 apresenta um estado de produção inicial onde é possível ver o controlo do fator potência que será aproximadamente unitário.

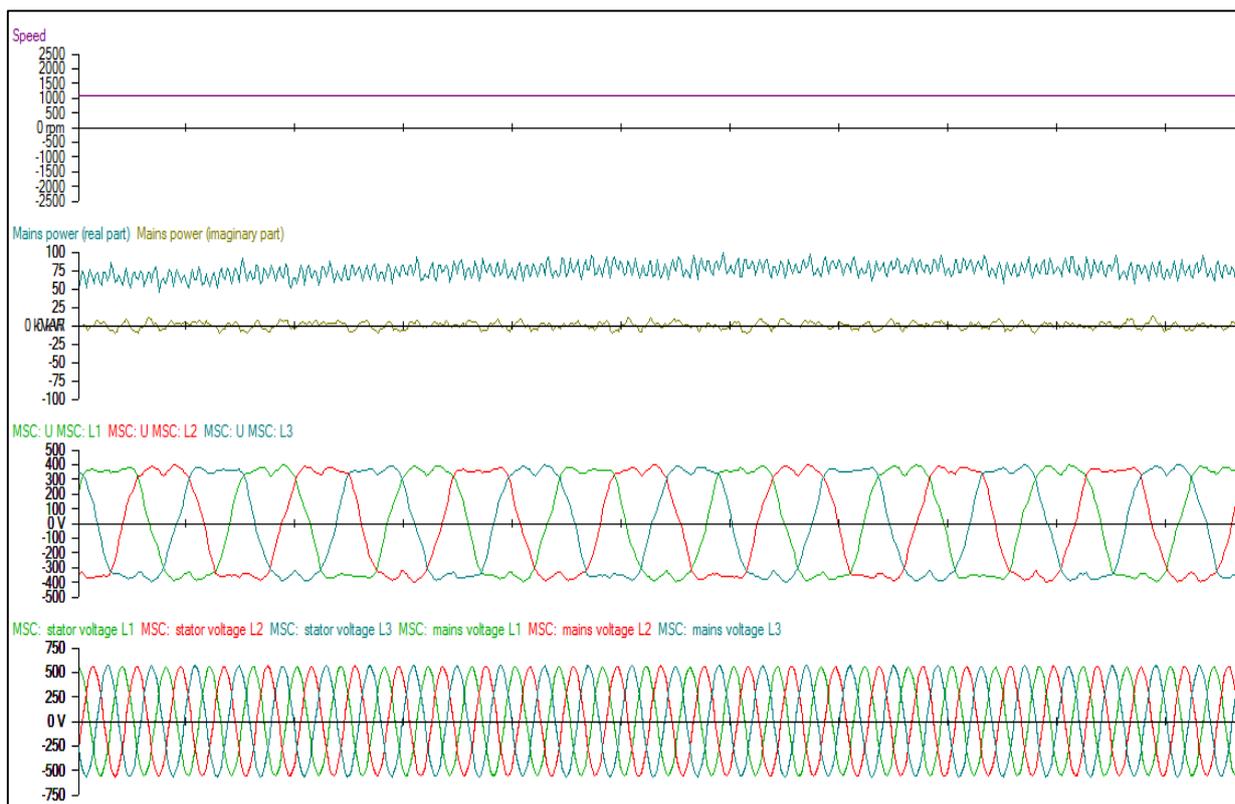


Figura 5.8 - Velocidade do rotor, potência ativa e reativa, tensões do rotor e tensões do estator e da rede em sincronismo

5.5.8 Produção nominal - OPN01

Finalmente durante 30 minutos a máquina é colocada a produzir com uma potência máxima de 1,67MW. Esta prova só será validada se estiverem ventos superiores a 11 m/s, ou seja, potências superiores a 1MW durante todo o período de duração da prova. Depois de descartar possíveis anomalias analisadas nos dados registados, a máquina está pronta a produzir à potência máxima intermamente.

5.6 Conclusão

Numa primeira fase todos os sistemas da máquina devem ser acompanhados, as temperaturas analisadas e mais tarde realizadas termografias nos principais barramentos de potência da máquina. Há ainda uma última prova que tem como objetivo comprovar se a curva de potência realmente coincide com o estipulado.

Capítulo 6

6. Conclusões

Na verdade alguns dos processos descritos no âmbito desta tese carecem de alguma profundidade de exposição. Isso deve-se à impossibilidade de apresentar todos os sistemas, documentação, interfaces gráficos de softwares entre outros, por causa dos termos de confidencialidade. Portanto, a apresentação de conteúdos foi obrigatoriamente cuidada e por vezes não permitia a total explicação dos pontos em causa, obviamente que no terreno há sempre algum procedimento extra que necessita de atenção.

Ao longo de dois anos de trabalho muitas foram as competências adquiridas mas a capacidade que alcancei na universidade de interpretação do conteúdo teórico, levou a que todo este trabalho complexo que é colocar uma turbina eólica com 90 metros de altura e um gerador de 1,67Mw de potência a produzir, se torna-se um pouco mais fácil.

A prova de que este ramo está em constante actualização e remodelação é que a máquina que serviu de base para esta tese, foi descontinuada e o próprio fabricante admite não implementar mais máquinas deste modelo. A AlstomWind neste momento só implementa máquinas com potência superior a 2,5Mw.

Em relação aos procedimentos descritos nesta tese, e por experiência de comissionamento noutros fabricantes, pode-se afirmar que servem como base para demonstração do que é a posta em serviço de grande parte dos geradores eólicos. Todos os fabricantes seguem parâmetros muito idênticos que vão de encontro aos aqui apresentados.

A tese não reflete na integra todo o trabalho de aprendizagem desenvolvido para a total compreensão da máquina, ficando assim muito dele por documentar. Não houve espaço para abordar as múltiplas falhas e avarias que tiveram que ser resolvidas. Durante o desenvolvimento da mesma, foram implementadas algumas modificações e melhorias nos mais diversos sistemas da máquina, outro ponto que foi impossível abordar.

Como conclusão final, fica o facto de ficar muito mais por explicar e as limitações que levaram a essa não explicação.

Bibliografia

1. Wiley, S.H., Grid integration of wind energy conversion systems. 2006.
2. Museum., D., . Available: <http://www.deutsches-museum.de/>. Acedido Janeiro de 2014.
3. P. W. Carlin, e.a., "The history and state of the Art of Variable-Speed Wind Turbine Technology," 2001.
4. Association, D.W.I., Available: <http://guidedtour.windpower.org/>. Acedido em Julho de 2014,.
5. Hau, E., , Wind turbines: fundamentals, technologies, application, economics: Springer. 2006.
6. Resende, F., Tecnologias de conversão de energia eólica para grandes sistemas ligados à rede - Evolução histórica. Renováveis Magazine. , (2010)
7. A. Hansen, e.a. "Review of contemporary wind turbine concepts and their market penetration". Wind Engineering, 2004. vol. 28, pp. 247-263.
8. Council, W.E.). Renewable energy projects handbook. 2004.
9. Burton, T., Wind energy handbook. Chichester [etc]: John Wiley & Sons. 2001.
10. Castro, R., Introdução à Energia Eólica. 2009.
11. Chang, T.P., "Performance comparison of six numerical methods in estimating Weibull parameters for wind energy application,". 2011. Applied Energy, vol. 88, pp. 272-282.
12. M. Kaltschmitt, e.a., Renewable energy: technology, economics, and environment: Springer. 2007.
13. Chen, F.B.a.Z., Power electronics for modern wind turbines: Morgan & Claypool Publishers. 2006.
14. K. W. E. Cheng, e.a. "Review of the wind energy generating system,". in Advances in Power System Control, Operation and Management (APSCOM 2009), 8th International
15. X. Yu-Shi, e.a. "Optimal design and comparison of different PM synchronous generator systems for wind turbines" in Electrical Machines and Systems. 2008. ICEMS 2008. International Conference on, 2008, pp. 2448-2453.
16. Ramos, C.J. "Modelação e Controlo de Conversores de Tensão Aplicados à Máquina Assíncrona Duplamente Alimentada". Dissertação de Doutoramento, FEUP, Porto, 2010.
17. IEEE Task Force, "The Effects of Power System Harmonics on Power System Equipment and Loads", *IEEE Trans. Power App. And Systems*, vol.104, n.º.9, Set 1985, pp. 2555-2563.

18. Çadirci, I. and Ermis, M., “Double-output induction generator operating at subsynchronous and supersynchronous speeds: steady-state performance optimisation and wind-energy recovery”, *IEE Proceedings-B*, vol.139, n°.5, Set. 1992, pp 429-442.
19. Dubey G.K., *Fundamentals of Electrical Drives*, Narosa Publishing House, New Delhi, 1995.
20. Pena R.S., Clare J.C., Asher G.M., “Double fed induction generator using back-to-back PWM converters and its application to variable-speed wind-energy generation”, *IEE Proc.-Electr. Power Appl.*, Vol. 143, N° 3, May 1996, pp 231-241.
21. Krause P.C., *Analysis of Electric Machinery*, McGraw-Hill, New York, 1986.
22. Bose B.K., *Modern Power Electronics and AC Drives*, Prentice-Hall, New Jersey, 2002.
23. Silva K.F., *Controle e integração de centrais eólicas à rede eléctrica com geradores de indução duplamente alimentados*, Tese de Doutorado, Universidade de São Paulo, São Paulo, Brasil, 2006.
24. Woodward, "CONCYCLE® Operating Instructions," 2013.
25. Woodward, "Commissioning protocol for Concycle-Converter," vol. 2, 2008.
26. T. Kraft., ECO 80 PLATFORM MAINTENANCE MANUAL Vol 0. Introduction 154, 2010.
27. Woodward, "KP-38638_Concycle_Basics," vol. 23, 2014.
28. A. P. Thomas Kraft. 2009, MAN-0449 ECO 80 PLATFORM MAINTENANCE MANUAL. 176.
29. Ramirez Rúben. 2007, MAN-0023 ECO 80 PLATAFORM COMMISSIONING Manual. 234

ANEXO A

Tabela 5 - Comparação entre conversor: Back-to-Back e conversor matricial

Vantagens	Desvantagens
<ul style="list-style-type: none">• Em caso da falha da rede o conversor matricial não tem a mesma capacidade de resposta;• Conversor matricial apresenta perdas de condução;	<ul style="list-style-type: none">• Ao ser um conversor com grande capacidade de comutação verifica-se uma maior potência de perdas;• A utilização de DC link num conversor reduz a sua vida útil bem como a eficiência total do sistema comparado com um conversor que não o tenha.
<ul style="list-style-type: none">• Limite mais baixo de tensão de saída, maior conteúdo harmónico;• Tecnologia mais desenvolvida e estudada.	

Tabela 6 - Comparação entre o conversor Back-to-Back e o conversor multinível

Vantagens	Desvantagens
<ul style="list-style-type: none">• Tecnologia mais desenvolvida;• Menos complexidade;	<ul style="list-style-type: none">• Maior conteúdo harmónico, e consequentemente maior necessidade de filtros à entrada do conversor;• Os conversores multinível apresentam um melhor espectro de harmónicos injetados tanto na rede como no gerador.
<ul style="list-style-type: none">• Menor custo associado.	

Para concluir, os conversores “Back-to-Back” são ainda os mais utilizados, no entanto tanto os conversores matriciais como os multinível apresentam características que depois de desenvolvidas podem contribuir para um aumento da sua implementação [20].

ANEXO B

Sistemas de velocidade variável sem caixas de velocidade

Este conceito não apresenta caixa de velocidades, o que resulta na diminuição do custo do sistema principalmente ao nível da manutenção, fornecendo ainda robustez extra. A grande diferença entre sistemas com e sem caixa é a velocidade de rotação do rotor, assim é grande a discrepância entre a baixa velocidade dum gerador que não apresenta caixa com uma velocidade bem mais elevada dum que contenha caixa. Os geradores com baixa velocidade necessitam de binário elevado para certas potências, e conseqüentemente apresentam um número elevado de pólos e um aumento do diâmetro do gerador o que pode ser um inconveniente [14].

Sistemas sem caixas de velocidade apresentam normalmente elevada eficiência e simplicidade de solução e implementação.

Gerador Síncrono de Rotor Bobinado

Como mostra a figura neste sistema é utilizado um gerador síncrono com rotor bobinado.

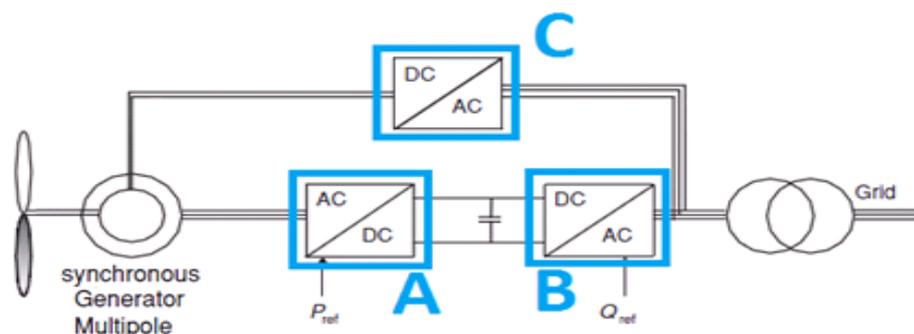


Figura A.1 - Topologia com gerador síncrono de rotor bobinado

Esta topologia tem mais um grau de liberdade para controlo, isto deve-se ao facto, de ser possível controlar a excitação do rotor do gerador, controlando da melhor maneira o binário da máquina.

A excitação do rotor é controlada através do conversor (DC/AC), que se comporta como uma fonte de tensão variável. É possível o controlo de velocidade em toda a gama de funcionamento, e permite a regulação independente da potência ativa e reativa. Estas são as vantagens mais preponderantes sendo que a mais importante resulta do facto de não necessitar de ímãs permanentes o que torna esta solução mais barata.

Como desvantagens, é importante salientar a implementação de três conversores de eletrônica de potência, o que origina um grande controlo complexo. A presença do conversor de alimentação do rotor do gerador obriga a dotar o sistema com anéis e escovas. O custo da topologia aumenta devido ao custo extra que uma elevada manutenção obriga. Devido ao rotor bobinado, perdas adicionais são inevitáveis [14].

A Enercon é um fabricante especializado na construção desta topologia, que ainda e mais implementada no mercado face à PMSG.

Gerador Síncrono Multipolar de Ímanes Permanentes

Esta topologia apresenta grande margem de manobra de evolução devido às suas características inerentes.

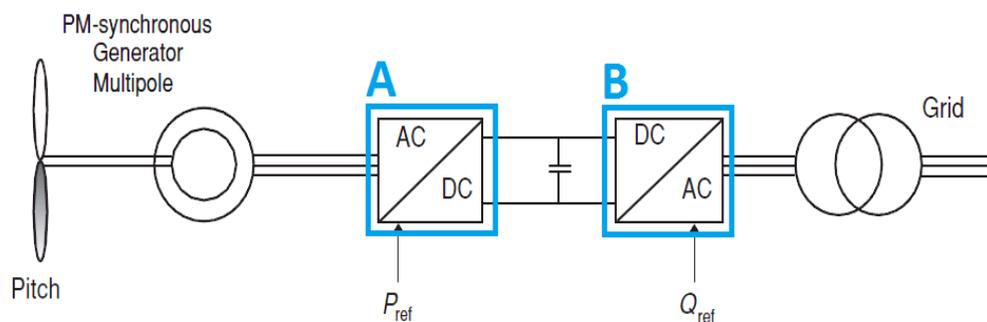


Figura A.2 - Topologia com gerador síncrono de ímanes permanentes

É também uma turbina que explora a velocidade variável através do controlo dos conversores de eletrônica de potência.

O bloco do lado esquerdo é em tudo responsável pela exploração do ponto de funcionamento da máquina, tendo como função controlar o binário elétrico do gerador. A resultante de binários, mecânico (imposto pelo vento e características da turbina) e elétrico (imposto pelo conversor do lado esquerdo), permite acelerar ou abrandar a velocidade da turbina para o ponto de funcionamento que rentabiliza assim o melhor funcionamento do gerador [15].

Do lado da rede o conversor tem com função manter constante o nível de tensão nos terminais do condensador no seu valor de referência e é responsável ainda por controlar o trânsito de potência reativa, regulando o desfasamento entre a corrente que é transmitida para a rede e tensão da mesma.

Esta solução tem vindo a ser bastante implementado pois tem uma configuração simples pela eliminação da excitação externa do rotor do gerador. O rotor bobinado é assim substituído pelo rotor de ímanes permanentes, aumentando a eficiência da máquina devido à inexistência de perdas

por efeito de Joule. É de prever que sem efeito de Joule o aquecimento é muito menor e o sistema deixa de depender de um sistema de refrigeração a água, eliminam-se assim algumas partes mecânicas, bem como alguns componentes de desgaste (como escovas e anéis) do gerador. O que torna o sistema mais robusto e com manutenção reduzida.

Como desvantagens, destaca-se o fato de ao não conter caixa de velocidade o atravancamento do gerador aumenta. Os conversores têm uma potência nominal igual à instalada no gerador. Este sistema ainda não se encontra totalmente desenvolvido o que torna bastante dispendioso, sendo que surgem ainda alguns problemas frequentes, como por exemplo, a sobrecarga do gerador pode provocar a desmagnetização dos ímanes.

Esta topologia encontra-se em fase de desenvolvimento e é apontada como o futuro da produção eólica.

Sistemas de velocidade variável com caixas de velocidade

Gerador de Indução Duplamente Alimentado

Este é o tipo de sistema abordado nesta tese daí apenas ser necessária uma ligeira apresentação. O nome resulta da sua topologia, a máquina possui tensão nos terminais do estator porque está diretamente ligada à rede, verifica-se ainda a existência de tensão nos terminais do rotor através da ligação das três fases ao conversor de eletrônica de potência, que serve de intermediário.

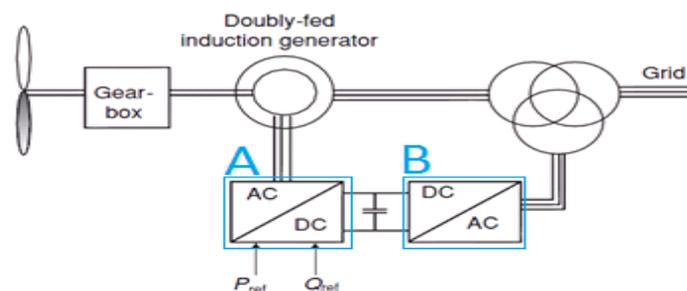


Figura A.3 - Topologia com motor de indução duplamente alimentado

O sistema apresentado na figura permite o funcionamento do gerador a velocidade variáveis devido à variação do vento, sendo que o conversor assume o controlo de toda a produção [16].

O conversor é dividido em dois blocos principais com diferentes objetivos, primeiro o que conecta diretamente com a rede é responsável por manter a tensão no barramento DC constante para um dado valor de referência. A corrente que circula neste bloco é imposta pela necessidade de consumo ou produção inerente no bloco conectado ao rotor. O segundo bloco controla então a corrente rotórica de modo a manter entre o gerador e a rede, a potência ativa e reativa de referência.

Com a variação de frequência das correntes rotóricas é possível ajustar a velocidade de rotação do gerador [13].

As principais vantagens prendem-se essencialmente com o fato deste conversor funcionar com velocidade variável o que permite regular a potência da máquina numa forma dinâmica, é possível a separação do controlo da potência reativa e ativa produzidas e por fim o dimensionamento dos conversores de potência é muito inferior à potência total instalada no gerador.

A grande desvantagem é a necessidade de peças de desgaste como são as escovas e anéis, contém ainda caixa desmultiplicadora que necessita de uma grande manutenção (para grandes máquinas é super dispendiosa) [16].

A variação de velocidade está limitada a mais ou menos 30% da velocidade nominal, o que se traduz numa limitação diminuindo a gama de velocidades operacionais. Pode necessitar de um sistema de refrigeração a água implementado no conversor o que aumenta tanto o preço como o custo de manutenção.

Gerador de indução

A topologia a seguir apresentada denomina-se gerador de indução com roto bobinado. O funcionamento deste tipo de gerador vai ao encontro do apresentado no gerador síncrono multipolar daí a não necessidade de aprofundar o conhecimento desta topologia, que é maioritariamente aplicada pela Siemens.

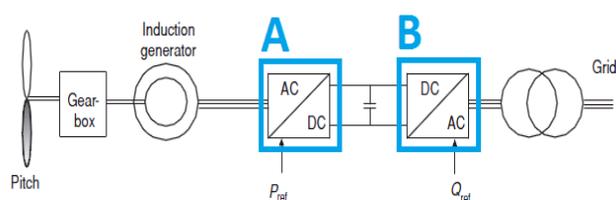


Figura A.4 - Topologia de gerador de indução de rotor bobinado

Permite o controlo independente da potência ativa e reativa, assim como o controlo da velocidade em toda a extensão de velocidades do gerador. São pequenas as vantagens desta aplicação sendo que é implementada em pequenos aproveitamentos eólicos de baixa potência como em sistemas isolados [9].

Como seria de esperar ao possuir conversores de eletrónica de potência dimensionados para a potência nominal igual à do gerador e a presença de caixa desmultiplicadora são grandes entraves à sua implementação. É uma solução bastante difícil de colocar em funcionamento de forma

robusta devido à necessidade da existência de um banco de condensadores, que serve como fornecedor de potência reativa que a máquina assíncrona necessita para se manter excitada.

ANEXO C

Modelo matemático da máquina de indução de rotor bobinado

As equações de *Park*, com variáveis expressas no sistema d (*eixo directo*), q (*eixo de quadratura*), Φ (*homopolar*), são extremamente úteis no estudo dos transitórios da máquina assíncrona. Estas equações podem ser equacionadas em relação aos eixos de referência direto e em quadratura (d - q) ortogonais e rotativos à velocidade síncrona (referencial síncrono), tendo em conta o fato que a alimentação do estator e do rotor são equilibradas. Para facilitar o estudo, o eixo d coincidirá com o eixo da fase a do estator na fase inicial, ou seja, $t=0$.

O modelo proposto corresponde à máquina de indução constituída por seis circuitos magneticamente ligados, se não for efetuada uma ligação do neutro, a soma das correntes do rotor e das correntes do estator serão nulas (o fluxo homopolar, tensão homopolar e corrente homopolar são iguais a zero $u_{\phi s} = \psi_{\phi s} = i_{\phi s} = u_{\phi r} = \psi_{\phi r} = i_{\phi r} = 0$).

As equações que descrevem o fluxo e as tensões do tanto do lado do rotor como do estator são as seguintes:

$$\psi_{\phi s} = L_{\phi s} i_{\phi s} \quad (C.1)$$

$$\psi_{ds} = L_s i_{ds} + L_{gr} i_{dr} \quad (C.2)$$

$$\psi_{qs} = L_s i_{qs} + L_{gr} i_{qr} \quad (C.3)$$

$$\psi_{\phi r} = L_{\phi r} i_{\phi r} \quad (C.4)$$

$$\psi_{dr} = L_r i_{dr} + L_{gr} i_{ds} \quad (C.5)$$

$$\psi_{qr} = L_r i_{qr} + L_{gr} i_{qs} \quad (C.6)$$

$$u_{ds} = R_s i_{ds} + \frac{d}{dt} \psi_{ds} - w_a \psi_{qs} \quad (C.7)$$

$$u_{qs} = R_s i_{qs} + \frac{d}{dt} \psi_{qs} + w_a \psi_{ds} \quad (C.8)$$

$$u_{\phi s} = R_s i_{\phi s} + \frac{d}{dt} \psi_{\phi s} \quad (C.9)$$

$$u_{dr} = R_r i_{dr} + \frac{d}{dt} \psi_{dr} - (w_a - w_m) \psi_{qr} \quad (C.10)$$

$$u_{qr} = R_r i_{qr} + \frac{d}{dt} \psi_{qr} + (w_a - w_m) \psi_{dr} \quad (C.11)$$

$$u_{\phi r} = R_r i_{\phi r} + \frac{d}{dt} \psi_{\phi r} \quad (C.12)$$

Para calcular as restantes tensões, correntes e fluxos podem ser determinadas com base na resolução das equações anteriores e com base nas transformações de eixos abc para eixos $dq\phi$ das tensões e das correntes de alimentação do estator e do rotor.

Em relação às tensões do estator são adquiridas da seguinte maneira, onde $\theta_a = \omega_s t$ (ω_s : velocidade angular de sincronismo) e como se trata dum referencial síncrono $\omega_a = \omega_s$:

$$\begin{bmatrix} u_{ds} \\ u_{qs} \\ u_{\phi s} \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos(\theta_a) & \cos\left(\theta_a - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta_a + \frac{2\pi}{3}\right) \\ -\sin(\theta_a) & -\sin\left(\theta_a - \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta_a + \frac{2\pi}{3}\right) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_{as} \\ u_{bs} \\ u_{cs} \end{bmatrix} \quad (C.13)$$

Para $\beta = (\omega_s - \omega_m)t$, e sabendo que a velocidade angular de deslizamento é a diferença entre a velocidade angular de sincronismo e a velocidade angular do rotor ($\omega_d = \omega_s - \omega_m$). Apresentando deslizamento como $s = \frac{\omega_s - \omega_m}{\omega_s}$, tem-se que $\omega_d = s\omega_s$ e $\omega_m = (1-s)\omega_s$.

As tensões do rotor podem ser calculadas de maneira idêntica:

$$\begin{bmatrix} u_{dr} \\ u_{qr} \\ u_{\phi r} \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos(\beta) & \cos\left(\beta - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\beta + \frac{2\pi}{3}\right) \\ -\sin(\beta) & -\sin\left(\beta - \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\beta + \frac{2\pi}{3}\right) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_{ar} \\ u_{br} \\ u_{cr} \end{bmatrix} \quad (C.14)$$

Depois de deduzir as equações que quantificam as grandezas da máquina, a figura seguinte apresenta circuito da DFIG em regime dinâmico:

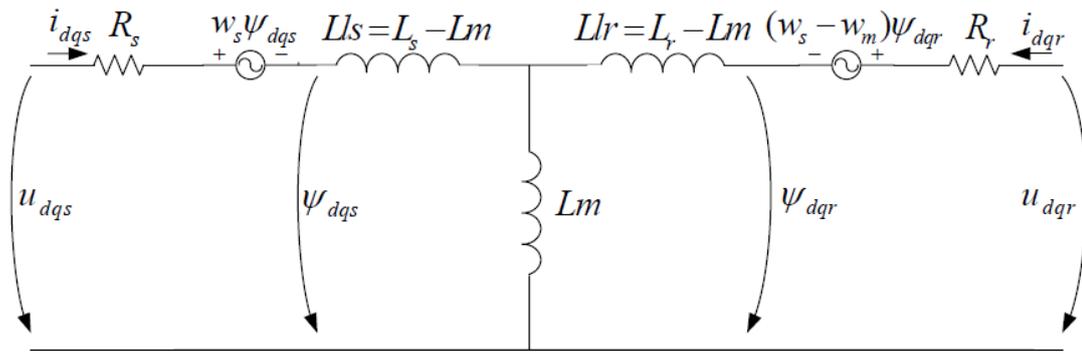


Figura C.1 - Circuito equivalente da máquina assíncrona em regime dinâmico

Algumas observações importantes:

- Os parâmetros $L_{\phi r}$, L_r , R_r , $L_{\phi s}$, L_{sr} , L_s , R_s , são obtidos com base nos parâmetros do esquema equivalente em regime estacionário;
- Os parâmetros R_s , Ll_s , Ll_r , L_m , R_r , são obtidos através dos ensaios económicos em vazio e com o rotor travado;
- Em regime estacionário ψ_{ds} , w_d , ψ_{dr} , ψ_{qs} , ψ_{qr} são constantes;
- $L_s = Ll_s + L_m$, $L_{\phi r} = Ll_r$, $Ll_{sr} = L_m$, $L_{\phi s} = Ll_s$, $L_r = Ll_r + L_m$.

As expressões da potência que circula tanto pelo estator como pelo rotor são as seguintes:

$$P_s = \frac{3}{2} (u_{ds}i_{ds} + u_{qs}i_{qs}) \quad (C.15)$$

$$P_r = \frac{3}{2} (u_{dr}i_{dr} + u_{qr}i_{qr}) \quad (C.16)$$

$$Q_s = \frac{3}{2} (u_{ds}i_{qs} - u_{qs}i_{ds}) \quad (C.17)$$

$$Q_r = \frac{3}{2} (u_{dr}i_{qr} - u_{qr}i_{dr}) \quad (C.18)$$

A expressão do binário eletromagnético desenvolvido pela máquina é assim descrita:

$$T_{em} = \frac{3}{2} p (\psi_{qr}i_{dr} - \psi_{dr}i_{qr}) = \frac{3}{2} p L_{gr} (i_{qs}i_{dr} - i_{ds}i_{qr}) \quad (C.19)$$

Controlo Vetorial

Quando se fala de controlo da DFIG rapidamente se faz uma associação à máquina de corrente continua, muito em parte, por as suas características. Com uma resposta rápida do controlo do binário principalmente nos transitórios, associado a características construtivas, que permitem manter o fluxo de excitação da corrente da armadura, situação ideal onde se atinge o binário

máximo. O Fluxo da máquina é diretamente proporcional à corrente de excitação (excluindo a saturação), que normalmente é mantido no seu valor nominal [16][19].

O binário é por sua vez proporcional ao produto vetorial do fluxo pela corrente da armadura. Sendo estas, variáveis ortogonais, o binário produzido é máximo, transferindo ao acionamento características de um controlo de velocidade preciso, mesmo durante a variação de cargas; rápido controlo de aceleração, desaceleração e grande estabilidade do sistema.

Como forma de reproduzir o comportamento de um acionamento da máquina de corrente continua num acionamento de máquina de corrente alternada é normalmente utilizado o controlo vetorial.

Ao depender da frequência, o fluxo que nas máquinas AC é rotativo exige um novo referencial com o objetivo do fluxo se tornar fixo, para isso é necessário determinar a posição instantânea do “Vetor Fluxo”.

Alinhando então o eixo “d” rotativo e ortogonal, com o vetor fluxo da máquina e através da determinação da corrente do estator e da corrente do rotor neste referencial, atinge-se o objetivo pretendido. Aplicando-se as equações de *Park*, com algumas simplificações, mais especificamente as que resultam do alinhamento do eixo “d” com o fluxo do estator, então:

$$\psi_{qs} = 0 \quad (C.20)$$

O que implica que:

$$\psi_s = \psi_{ds} = L_s i_{ds} + L_{sr} i_{dr} = L_{sr} i_{ms} \quad (C.21)$$

Definindo $i_{ms} = i_{dr} + \frac{L_s}{L_{sr}} i_{ds}$, como a corrente de magnetização do estator.

$$i_{ds} = \frac{L_{sr}}{L_s} (i_{ms} - i_{dr}) \quad (C.22)$$

Com:

$$\psi_{qs} = 0 = L_{Ls} i_{qs} + L_{sr} i_{qr} \quad (C.23)$$

$$i_{qr} = -\frac{L_s}{L_{sr}} i_{qs} \quad (C.24)$$

A figura seguinte, ilustra os eixos d-q referenciados ao estator (e), e ao rotor (r) e eixo de excitação síncrono (s). Os eixos referenciados ao estator como não poderia deixar se ser são

estacionários, os do rotor rodam a uma velocidade angular correspondente à velocidade do rotor (w_m) e os eixos com sobrescrito “s” são rotativos e a sua velocidade de rotação corresponde à velocidade angular de sincronismo (w_s) em relação aos eixos estacionários.

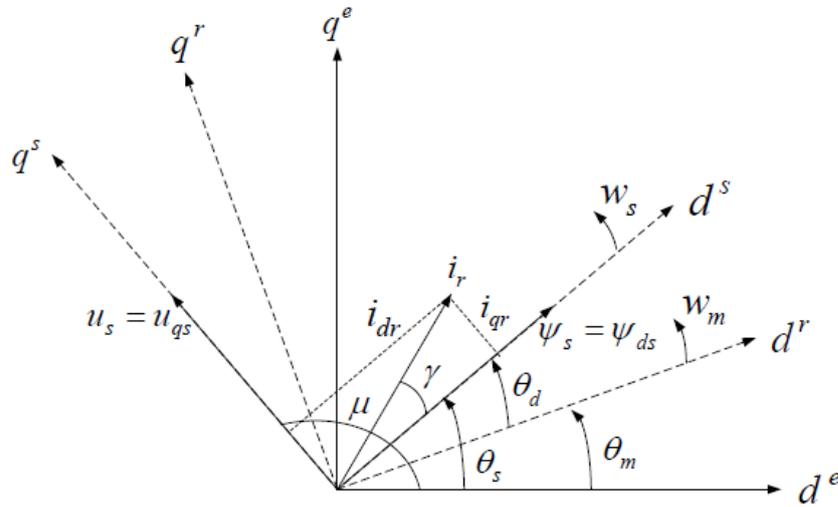


Figura C.2 -Eixos d – q nas várias referências

O ângulo θ_s é o formado entre os eixos “s” e “e”. O seu valor é instantâneo, uma vez que os eixos “s” estão em rotação e os “e” estão parados. O ângulo θ_d é constante se o eixo do rotor estiver em rotação ns , e portanto a sua derivada dará zero ($w_d = 0$). Dois dos vetores mais importantes para o controlo da máquina são o vetor corrente do rotor que estará desfasado do eixo “e” num determinado momento γ graus, e ainda o vetor tensão do estator que da mesma maneira apresenta um desfasamento de μ graus.

Controlo do Conversor do Lado do Rotor

O sistema de controlo do lado do rotor tem as seguintes finalidades:

- Encontrar o ângulo de orientação;

Normalmente um gerador eólico está conectado à rede (considerado um barramento infinito), como tal para determinar o ângulo de orientação do fluxo do estator, basta medir correntes e tensões de fase do estator e transformá-las através das equações de Park em eixos d-q ($u_{as}, u_{bs}, u_{cs} \rightarrow u_{ds}^e, u_{qs}^e$). A partir da equação de tensão do estator nos eixos estacionários “e”, $u_s = R_s i_s + \frac{d}{dt} \psi_s$, Pode-se obter as equações de fluxo encadeado com o estator, em relação aos eixos d-q, isto é:

$$\psi_{qs}^e = \int (u_{qs}^e - R_s i_{qs}^e) dt \quad (C.25)$$

$$\psi_{ds}^e = \int (u_{ds}^e - R_s i_{ds}^e) dt \quad (C.26)$$

O ângulo instantâneo do vetor da tensão do estator é então facilmente obtido $\theta_s = \tan^{-1}\left(\frac{\psi_{qs}^e}{\psi_{ds}^e}\right)$, o que permite ainda calcular $\psi_s = \psi_{ds}$ e $i_{ms} = \frac{\psi_{ds}}{L_{sr}}$.

- Controlo do binário da máquina;

Resultado de algumas equações importantes deste capítulo, o binário elétrico do gerador é obtido por:

$$T_{em} = -\frac{3}{2} p \frac{L_{sr}^2}{L_s} i_{ms} i_{qr} \quad (C.27)$$

Admitindo $i_{ms} = \text{constante}$ uma vez que a máquina está ligada a um barramento infinito, o binário eletromagnético pode ser controlado por i_{qr} .

- Controlo da potência reativa e ativa;

Sendo que i_{dr} permite variar o fluxo do gerador, i_{qr} permite atuar diretamente no binário eletromagnético e que as duas variáveis tem controlo totalmente independente, característica esta que permite uma resposta rápida e dinâmica do sistema bem como o controlo perfeito da potência ativa e reativa do gerador [16][18] [20].

O controlo da velocidade sustentado pelo controlo vetorial, processa-se da seguinte forma: para ventos com valores inferiores ao do vento nominal a velocidade é ajustada de forma a obter-se a velocidade específica ótima, o que garante a maximização da produção da potência pela turbina. A corrente i_{qr} controla o binário eletromagnético que por sua vez controla a velocidade do gerador. A corrente i_{dr} controla a magnetização da máquina e consequentemente a potência reativa do estator. Para ventos acima do vento nominal, a velocidade continua a ser controlada até atingir o valor limite permitido pelo sistema de controlo, tipicamente $1.3 N_s$ (130% da velocidade de sincronismo). Por outro lado, no nível de controlo do rotor eólico a potência de referência é ajustada no valor nominal, sendo comparada com a potência ativa gerada. O erro de velocidade comanda a atuação do ângulo de passo somente quando a velocidade limite for excedida, ou seja, sempre que a velocidade do rotor da turbina atingir o valor superior limite, o ângulo de passo será ajustado para reduzir o rendimento aerodinâmico e o binário da turbina, o que resulta assim numa

redução da velocidade, sendo ajustada no valor limite permitido. Um exemplo estrutural do controle descrito está representado na figura seguinte:

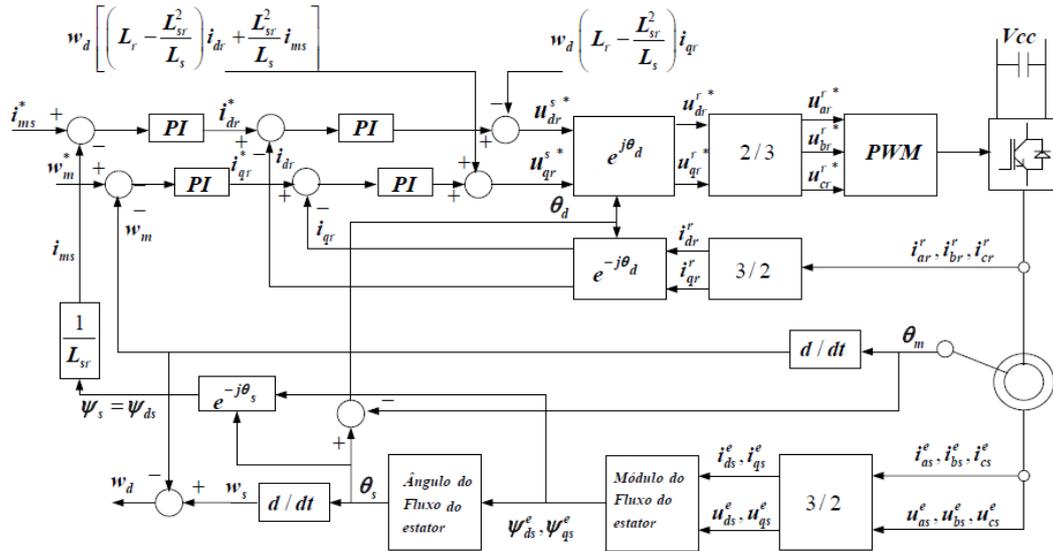


Figura C.3 - Estrutura do controle vetorial para o conversor do lado do rotor

Assim i_{qr}^* é o erro de saída da malha de velocidade, que tem (w_m) a velocidade medida por um Encoder (ou até mesmo estimada) e a velocidade angular ótima desejada (w_m^*) como entrada. w_m propiciará o máximo rendimento da potência em função da velocidade do vento (Tip Speed Ratio) e do ângulo “ β ” de ataque das pás da turbina. Já i_{dr}^* é obtida a partir da potência reativa de referência do estator e a partir da estimação do fluxo magnético do estator. Através de w_m e w_s é obtido w_d ($w_d = w_s - w_m$) que permite determinar a frequência associada ao deslizamento que o conversor do lado do rotor usará para a alimentação. Para concluir as malhas de corrente, é necessário medir os valores i_{ar} , i_{br} , i_{cr} dos eixos “r” com o fim de obter i_{dr} e i_{qr} , através da transformação d-q, tendo em conta o desfasamento θ_d .

É necessário ainda calcular os valores ótimos das tensões usadas como referência:

$$u_{dr}^* = R_r i_{dr} - w_d \left(L_r - \frac{L_{sr}^2}{L_s} \right) i_{qr} \quad (C.28)$$

$$u_{qr}^* = R_r i_{qr} - w_d \left(L_r - \frac{L_{sr}^2}{L_s} \right) i_{dr} + w_d \frac{L_{sr}^2}{L_s} i_{ms} \quad (C.29)$$

As equações das tensões rotóricas serão utilizadas para o projeto das malhas de controle de correntes. Verifica-se entretanto que existe um acoplamento entre as duas malhas de corrente com grandezas do eixo “d” que interferem com grandezas do eixo “q” e vice-versa.

Controlo do Conversor do Lado da Rede

Tal como o conversor do rotor, o conversor do lado da rede é constituído por uma ponte trifásica de semicondutores com a capacidade de bi direccionalidade de potência, operando como retificador e inversor. Esta ponte é constituída por um conversor fonte de tensão, com um método de modulação por largura de pulso (PWM). O controlo deste conversor é praticado com os seguintes objetivos:

- ✓ Manter a tensão do barramento DC constante;
- ✓ Controlar o desfasamento entre a corrente e a tensão do conversor, ou seja, controlar o fator potência.

Alinham-se então os eixos “*d*” do referencial d-q rotativo e ortogonal “*s*” com o vetor tensão do estator. Neste caso o referencial d-q de excitação estará avançado 90° em relação ao abordado no controlo vetorial neste capítulo, ou seja, o eixo “*q*” anterior passa a ser o eixo “*d*” neste caso (u_{qs} passa a ser u_{ds}). Desta forma, u_{qs} passa a ser 0 e $u_s = u_{ds}$ passam a ser constantes uma vez que se deseja obter um valor eficaz e frequência constantes.

Como os eixos d-q de excitação giram à velocidade angular constante $\omega_s = 2\pi f$, o ângulo instantâneo para o sistema de referência é o ângulo μ , do vetor tensão do estator. Este ângulo é obtido a partir das tensões de fase do estator que depois de transformadas dão origem às tensões estacionárias, sendo assim calculado:

$$\mu = \arctg\left(\frac{u_{qs}^e}{u_{ds}^e}\right) \quad (C.30)$$

As potências ativa e reativa na entrada do conversor são determinadas por:

$$P = \frac{3}{2}(u_d i_d + u_q i_q) \quad (C.31)$$

$$Q = \frac{3}{2}(u_d i_q - u_q i_d) \quad (C.32)$$

Como u_q é igual a zero as duas potências podem ser controladas por *id* e *iq*, respetivamente, de forma desacoplada.

Na implementação dos controladores de corrente do lado da rede i_d^* (valor desejado) é o erro da tensão continua (Vcc) ou seja, a diferença entre o valor desejado (constante) e o valor real (medido) da tensão de Vcc.

O fluxo da potência ativa regula a tensão do barramento DC, uma vez que a quando o fluxo de potência ativa fornecida pelo conversor é maior que o gerado, a tensão DC cai. Ao contrário, se a potência ativa gerada não for totalmente consumida a tensão DC sobe.

Quanto a i_q^* , esta será proporcional ao valor desejado de energia reativa gerada pelo conversor. Desta forma controla-se o desfasamento entre a corrente e a tensão do conversor. Normalmente $i_q^* = 0$ para obter o fator de potência unitário. Obviamente, dependendo da necessidade do sistema, este valor pode ser diferente de zero, assumindo valores positivos ou negativos. É necessário ainda, pelo mesmo motivo que para o conversor do lado do rotor, calcular as referências de tensão do conversor do lado da rede para que se possa impor as correntes desejadas.

O balanço das tensões envolvidas na saída do conversor, onde R e L são a resistência e indutância de linha, são as seguintes:

$$u_d^* = -Ri_d - L \frac{d}{dt} i_d + \omega_s L i_q + u_d \quad (C.33)$$

$$u_q^* = -Ri_q - L \frac{d}{dt} i_q - \omega_s L i_d \quad (C.34)$$

A figura seguinte, mostra um diagrama de blocos da estrutura do controle vetorial:

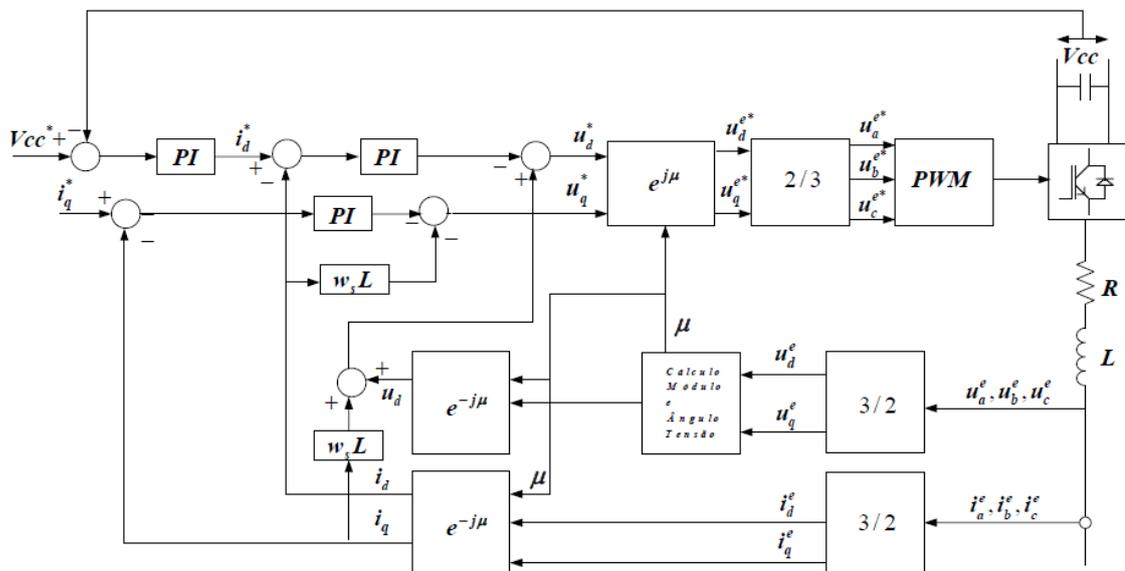
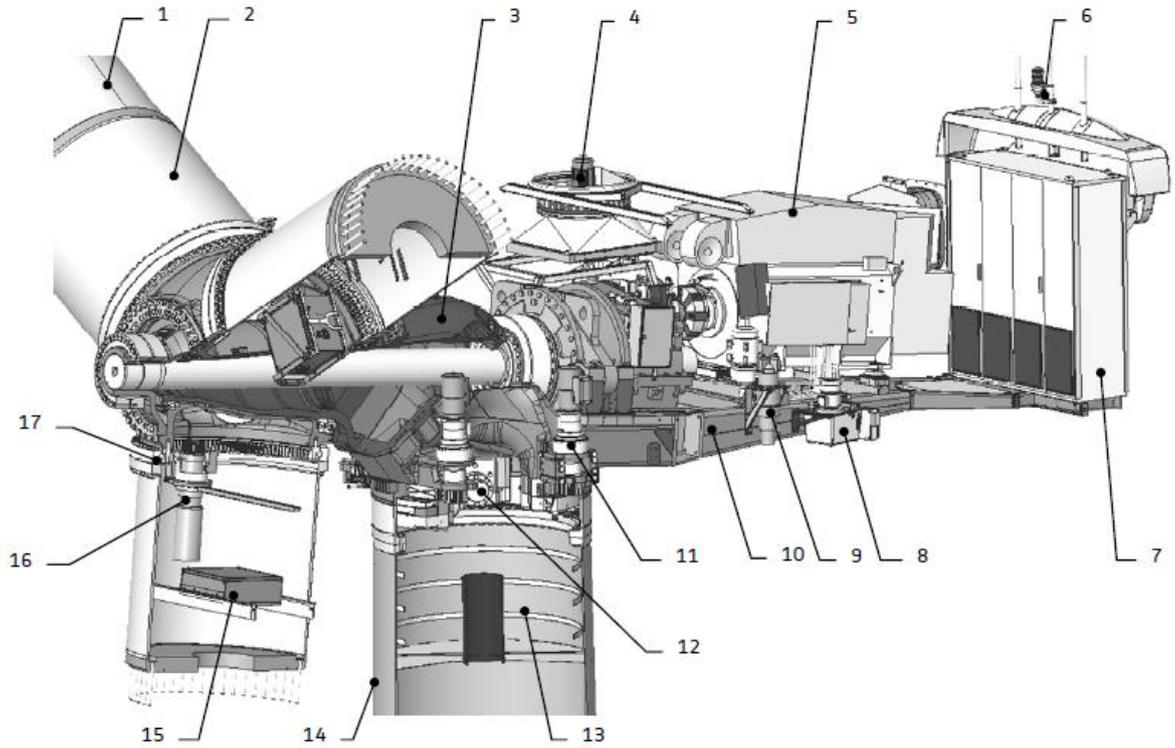


Figura C.4 - Estrutura do controle vetorial para o conversor do lado da rede

ANEXO D

Nacelle and tower top

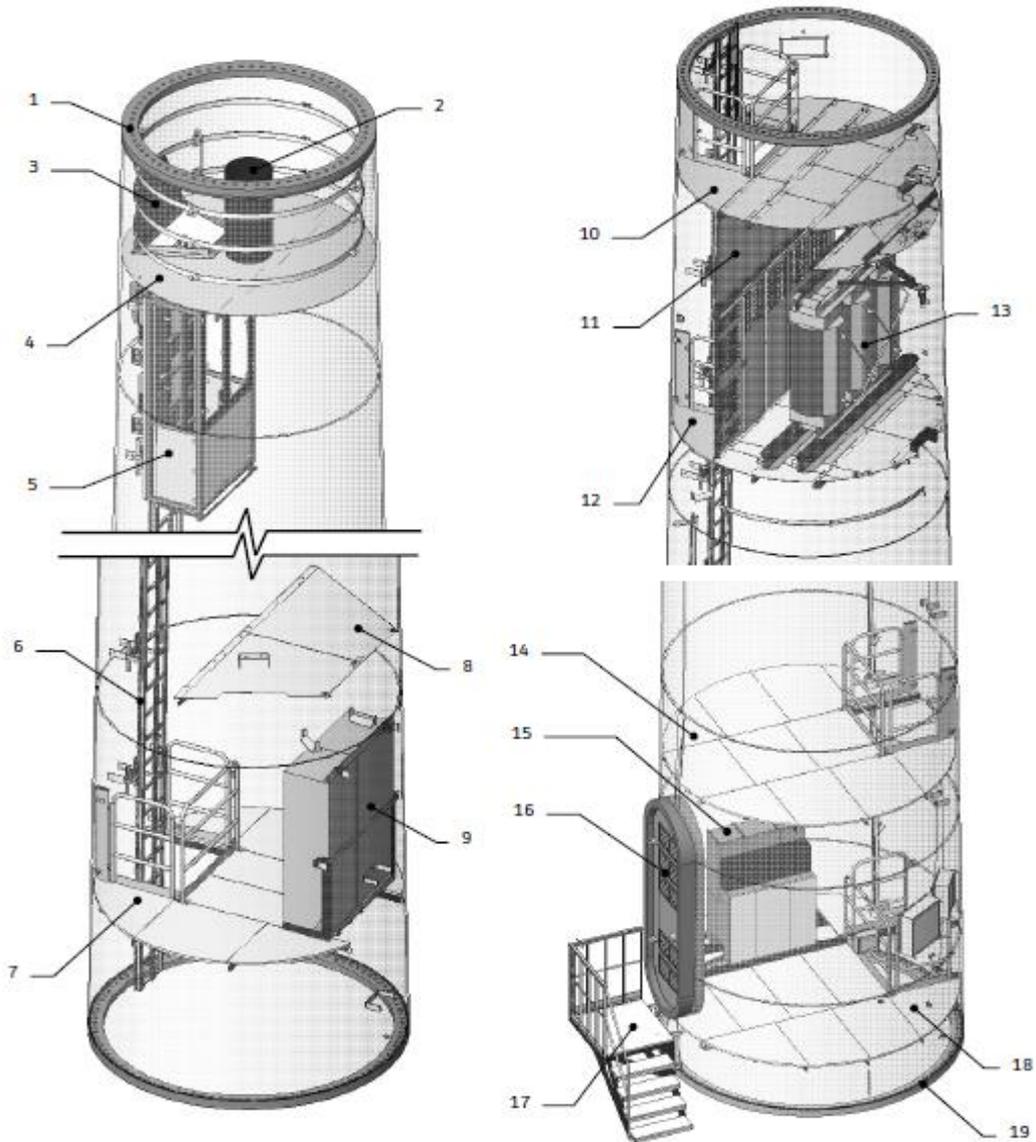


Nacelle and tower top
(housing not represented)

1.	Blade
2.	Steel extender
3.	Main frame (cast iron mainframe)
4.	Gearbox cooling system
5.	Generator cooling system
6.	Wether station and light
7.	Inverter cabinet
8.	Hydraulic unit
9.	Filter-pump unit
10.	Main frame (welding)
11.	Yaw motorgears
12.	Yaw brake actuators
13.	Tower top platform
14.	Tower
15.	Electrical pitch
16.	Electro-mechanical pitch
17.	Pitch bearing

Figura D.1 - Estrutura Nacelle[26]

Tower

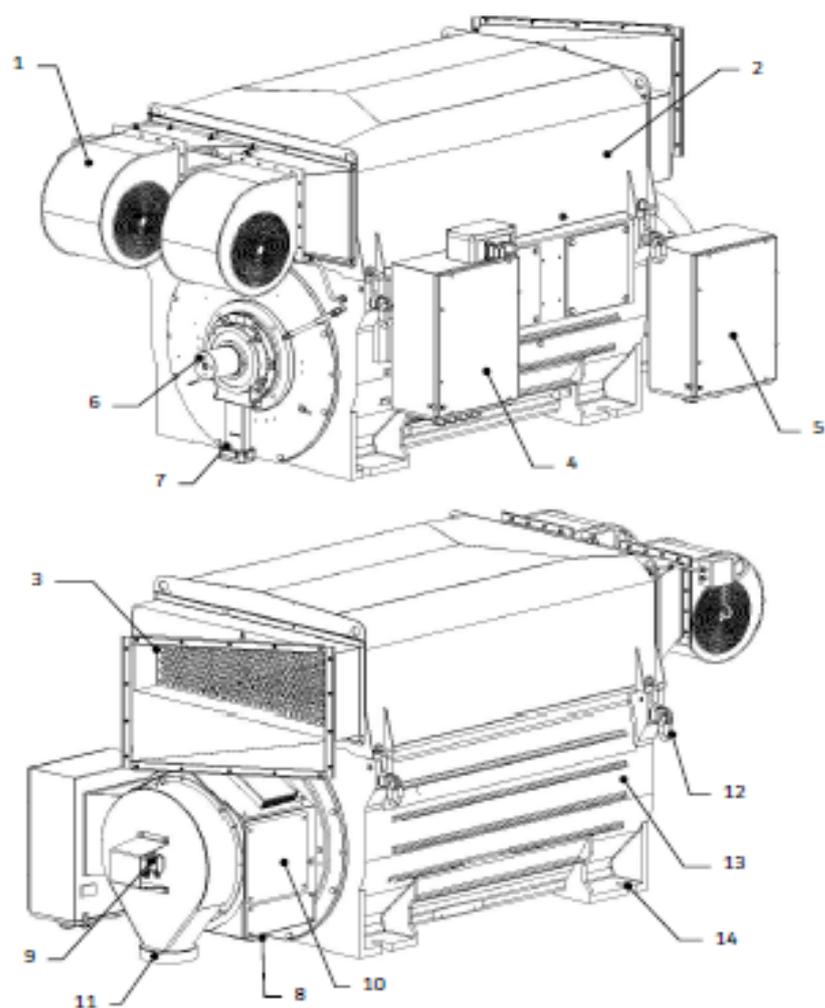


Tower. Upper steel section

- | | |
|----|--------------------------------|
| 1. | Nacelle union flange |
| 2. | Power cable tube |
| 3. | Upper trap door |
| 4. | Upper platform |
| 5. | Elevator's cabin (up) |
| 6. | Elevator's rack and ladder |
| 7. | Power cabinet platform |
| 8. | Power cabinet protection cover |
| 9. | Power cabinet |

Tower. Intermediate steel section (up)	10.	Transformer protection cover
	11.	Transformer's room wall
	12.	Transformer's platform
	13.	Transformer
Tower. Lower steel section (down)	14.	Tower platform protection cover
	15.	Cell (mains' switch)
	16.	Tower's door entrance
	17.	Entrance ladder
	18.	Tower base platform
	19.	Foundation union flange

Figura D.2 - Estrutura torre



1	Cooler fans	8	Waste grease chamber (rear)
2	Air cooler box	9	Incremental encoder
3	Hot air exhaust duct	10	Slip ring box
4	Stator connection	11	Slip ring ventilation duct
5	Rotor connection	12	Lifting anchorages
6	Rotor input shaft	13	Generator housing
7	Waste grease chamber (front)	14	Generator's legs

Figura D.3 - Visão geral do gerador[26]

ANEXO E

Tabela 7 - Informação técnica do conversor

Technical converter data	
rated active power	1700, kW
rated voltage	690V \pm 10%
rated frequency	50Hz \pm 8%
rated slip	-0,2
slip area	-0.3 ... 0.35
loadfactor, fundamental	0.9underexcited...0.95overexcited
line-side-converter (LSC)	
rated voltage	690 V
apparent power	490 kVA
max. current, continous	410 A
max. current, transient	515 A
maschine-side-converter (MSC)	
max. voltage	750 V
apparent power	750 kVA
max. current, continous	580 A
max. current, transient	670 A
power semiconductors*	
type LSC	1513 GB 172-3
number of modules LSC	1
coolant LSC	air cooler
type MSC	2403 GB 172-3
number of modules MSC	1
coolant MSC	air cooler
cooling medium	air
max. coolant temperatur	45 °C
amount of cooling mediun	3780 m ³ /h

voltage of intermediate circuit	1100 V
mains choke	
number of phases	~3
system voltage	690 V
system frequency	50 Hz
du	84 V \pm 3%
thermal current	423 A
du/dt	10 kV/us
indutance	0.535 mH
DClk capacitors	
rated DC voltage	1100 V
Ac voltage max	250 V
capacitance	415 μ F
Cn tolerance	\pm 10%
Generator data	
producer	Siemens
type	1RR4 508-4HW90-Z
ESB-Nr.	146336
rated stator voltage	690 V
rated stator frequency	50 Hz
connection stator	Δ
connection rotor	Y
no load current stator	271 A
Tranf. ratio refer to the rotor	2,739
locked rotor voltage	1847 V

ANEXO F

FRM-1697 V03		OPERATING TESTS: ECO14, ECO80, ECO86, ECO100, ECO110				DATE:		WIND TURBINE:		PROJECT:		TECHNICIAN:			
Date: 07/07/2010		Written by: BC		Aim of the revision: 60Hz adaptation and eqg. a 2 hours of function				Checked by: TK							
Mode	Description	Value ref.	Unit	Tolerance		V1:		V2:		V3:		T1:	T2:	T3:	Catalyzer
		5	%	-0.5	V1:	V2:	V3:	T1:	T2:	T3:					
PITCH and CONVERTER	Manual operation of pitch in normal mode	T=3500h	Nm	4.5 +V -2.7	V1:	V2:	V3:	T1:	T2:	T3:				REG500	
	Manual operation of pitch in emergency mode	5	%	4.5 +V -2.7	V1:	V2:	V3:							REG500	
	Adjustment to 500rpm				Rpm=Rpm _{nom} +100		Oil CH Y MUL		Leak		Friction				
	Check adjustment to 500rpm				Wind (m/s):		Orient		Gearbox		Generator				
	Verify gearbox and generator behavior (no vibrations, abnormal noises and friction)				Rpm=Rpm _{nom} +100		Commissioning Converter		Leak		Friction				
	Check that there is no friction on moving parts, hydraulic leaks and cooling circuit leaks				Wind (m/s):		Orient		Gearbox		Generator				
	Adjustment to connection speed and Commissioning of Converter				Wind (m/s):		Commissioning Converter		Leak		Friction				
	Check adjustment to connection speed and do the commissioning of the converter				Wind (m/s):		Orient		Gearbox		Generator				
	Verify gearbox and generator behavior (no vibrations, abnormal noises and friction)				Wind (m/s):		Orient		Gearbox		Generator				
	Check that there is no friction on moving parts, hydraulic leaks and cooling circuit leaks				Wind (m/s):		Orient		Gearbox		Generator				
CONNECTION TO LIMITED POWER	Counter records before connection to limited power				Brake release time (ms.):		Production time (ms.):		Produced energy (kWh):						
	Record the values of the counters if existing. Brake release time, production time and produced energy.				Hydraulic Level		Absence of leaks in Hydr.		Gearbox Level		Absence of leaks in Lub.				
	Lubrication and hydraulic systems:				Vc:		Vc:		Vc:		Vc:				
	Visual inspection of oil levels, absence of leaks and yaw				Vc:		Vc:		Vc:		Vc:				
	Main measurements				Vc:		Vc:		Vc:		Vc:				
	Check that the currents and the voltages are homogeneous				Vc:		Vc:		Vc:		Vc:				
	Check that the pitch cosine is 1				Vc:		Vc:		Vc:		Vc:				
	Check that the inverter and control measurements are approximately the same				Vc:		Vc:		Vc:		Vc:				
	Generator oscillations and alignment				Vc:		Vc:		Vc:		Vc:				
	Check the correct rotation of the connection and the lack of excessive rpm, torque and power ripples.				Vc:		Vc:		Vc:		Vc:				
CONNECTION TO NOMINAL	Perform an emergency stop				Addie Power (MW):		Reactive Power:		PHI cos:		PHI cos (m/s):				
	Record the values of the counters if existing. Brake release time, production time and produced energy.				Wind (m/s):		Power (MW):		Acceleration:		rpm _{max} max:				
	Temperature after 2 hours of operation with average production >0.5MW				POWER AVERAGE:		GEN:		GEN BEAR:		GEN BEAR:				
	Counter records before connection to nominal power				TRANSPONER:		GEARBOX:		GD BEAR:		GD BEAR:				
	Record the values of the counters if existing. Brake release time, production time and produced energy.				Brake release time (ms.):		Production time (ms.):		Produced energy (kWh):						
	Lubrication and hydraulic systems:				Hydraulic Level		Absence of leaks in Hydr.		Gearbox Level		Absence of leaks in Lub.				
	Visual inspection of oil levels, absence of leaks and yaw				Vc:		Vc:		Vc:		Vc:				
	Main measurements				Vc:		Vc:		Vc:		Vc:				
	Check that the currents and the voltages are homogeneous				Vc:		Vc:		Vc:		Vc:				
	Check that the pitch cosine is 1				Vc:		Vc:		Vc:		Vc:				
Check that the inverter and control measurements are approximately the same				Vc:		Vc:		Vc:		Vc:					
Generator oscillations and alignment				Vc:		Vc:		Vc:		Vc:					
Check the correct rotation of the connection and the lack of excessive rpm, torque and power ripples.				Vc:		Vc:		Vc:		Vc:					
Temperature after 2 hours of operation with average production >0.5MW				POWER AVERAGE:		GEN:		GEN BEAR:		GEN BEAR:					
Counter records before connection to nominal power				TRANSPONER:		GEARBOX:		GD BEAR:		GD BEAR:					

Figura F.1 - FRM - ficheiro de operacionais

Como é visível na figura ao longo da execução das provas operacionais há a necessidade de preenchimento deste ficheiro. O ficheiro é da autoria da Alstom e não pode ser copiado, no entanto é apresentado no âmbito desta tese para demonstrar com mais exatidão o tipo de testes que são obrigatórios fazer para colocar a máquina operacional. Ao longo da execução laboral onde foram verificadas e colocadas a produzir 54 máquinas, foram anexados ficheiros idênticos a este apresentado. Importante salientar que também o conversor tem um protocolo idêntico.

É de prioritária exigência o total preenchimento e assinatura dos dois protocolos por parte dos técnicos de comissionamento para que a máquina seja dada como apta a produzir. Ou seja, os técnicos intervenientes ficam automaticamente responsáveis por alguma falha não natural que possa surgir[27].

Também para as provas de pré operacionais existe um ficheiro equivalente que por a sua extensão é impossível abordar nesta tese. No entanto resumidamente é uma *check list* onde se assinalam algumas das verificações já abordadas até então.