

FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO PORTO

Controlo da Potência Eléctrica Produzida em Grupos
Geradores de Pequena/Média Dimensão com o Objectivo
de Optimizar as Condições de Ligação à Rede Eléctrica

Orlando Manuel de Castro Ferreira Soares

Mestre em Engenharia Electrotécnica e de Computadores pela
Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto

Dissertação submetida para satisfação dos requisitos do grau de Doutor em
Engenharia Electrotécnica e de Computadores

Dissertação realizada sob orientação do Professor Doutor Adriano da Silva Carvalho e do
Professor Doutor António José de Pina Martins, do Departamento de Engenharia Electrotécnica e
de Computadores da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto

Porto, 15 de Setembro de 2008

*Aos meus filhos
Bernardo e Mafalda.*

Agradecimentos

Quero expressar os meus sinceros agradecimentos a todos que contribuíram para a realização deste trabalho, e em especial:

- à minha esposa e aos meus filhos pelo apoio e paciência nos momentos mais difíceis e pelos momentos de ausência;
- ao Henrique Gonçalves pela amizade, companheirismo, ajuda, disponibilidade e apoio sempre presentes nesta jornada conjunta, especialmente nos momentos mais difíceis;
- aos meus orientadores, Professor Doutor Adriano da Silva Carvalho e Professor Doutor António José de Pina Martins pelo empenho que colocaram na obtenção das condições que possibilitaram a realização deste trabalho e pelo apoio manifestado;
- à Escola Superior de Tecnologia e Gestão do Instituto Politécnico de Bragança e ao FSE e Ministério da Educação - PRODEP III, pelo apoio financeiro e condições de trabalho;
- à Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto e ao Instituto de Sistemas e Robótica, pela disponibilização de instalações e equipamentos.



Resumo

O uso da energia eólica como fonte de energia renovável ganha especial interesse quando utilizado em grande escala. Algumas características relacionadas com a integração na rede, apresentando problemas na produção de energia eólica ao nível do controlo da potência entregue à rede, continuam a justificar o aperfeiçoamento dos sistemas de energia eólica de forma a não causar problemas de estabilidade e qualidade. As flutuações da potência de saída das turbinas eólicas conectadas à rede podem afectar consideravelmente a qualidade da energia fornecida.

O crescimento actual da potência instalada torna necessário desenvolver capacidades e estratégias do controlo de parques eólico que possuam as características de potência equivalentes das centrais convencionais. Estas características incluem capacidades para controlar a potência total de saída do parque eólico, o controlo da potência reactiva e a robustez às falhas na rede. Isto permitirá que a potência dos parques eólicos seja incluída como componente activo da rede.

O objectivo do sistema de controlo de uma turbina eólica é conseguir um seguro e automático funcionamento da turbina, dentro de uma estrutura de optimização da potência gerada. Isto reduz custos de operação, fornece uma resposta dinâmica consistente e melhora a qualidade, e ajuda a assegurar a segurança pela maximização da captação da energia do vento face à minimização de carga da turbina.

Este trabalho descreve modelos do sistema de conversão de energia eólica, tais como a turbina, gerador, conversor electrónico de potência e controlador, de forma a realizar a análise da estabilidade e o controlo da turbina com o objectivo de maximizar a potência gerada com o mais baixo impacto possível na tensão e na frequência da rede durante a operação normal e sob diversos distúrbios, tais como num curto-circuito à terra na linha de transmissão.

O método discutido considera turbinas eólicas equipadas com o Gerador de Indução Duplamente Alimentado e um conversor conectado entre o rotor e a rede; com o ângulo das pás *pitch* constante ou variável e para velocidades variáveis do vento. O estudo é executado dentro da ferramenta de simulação *Matlab/Simulink*. Este sistema permite também o controlo desacoplado das potências activa e reactiva usando o controlo vectorial baseado em controladores PI e Redes Neurais Artificiais.

Abstract

The application of wind power as a renewable energy source gains specific emphasis on large-scale. Some issues related to integration with grid continue to justify improvement of operation of the wind systems. The special characteristics of the wind power generation arises problems at level of control and power flux into the grid network in order not to cause problems to power system stability and quality. Wind turbines connected to electric grid may affect considerably the supplied power quality, as a result of the fluctuations character of their output power.

Present growth and related installed power level make necessary to develop wind farm control capabilities and strategies that had features equivalent to conventional power plants. These features include capabilities to control the output power of the total wind farm, control of the reactive power and robustness to faults in the grid. This will enable wind power plants to be included as active components of the power supply system.

The purpose of the control system of a wind turbine is to manage the safe, automatic operation of the turbine, within a framework of optimizing generated power. This reduces operating costs, provides consistent dynamic response and improved product quality, and helps to ensure safety by maximize wind energy capture due to minimization of turbine loads.

This work describes wind generation models, such as turbine, generator, power electronics converter and controller, for operation within power system in order to perform stability analysis and turbine control to maximize the power generated with the lowest impact on the connected-grid voltage and frequency during normal operation and under several disturbances, such as a transmission line earth fault.

The discussed method considers wind turbines based on The Double Fed Induction Generator and a converter rotor-grid connected with constant or variable blade angle applied to variable speed wind turbines. The study is performed within the multiple technologies design tool *Matlab/Simulink*. This system also allows the control of both active and reactive power using on vectorial control based on PI controller and Artificial Neural Networks.

Résumé

L'utilisation de l'énergie éolienne comme source d'énergie renouvelable gagne spécial intérêt quand utilisée à large échelle. Quelques caractéristiques rapportées avec l'intégration dans le réseau continuent à justifier le perfectionnement des systèmes d'énergie éolienne. Ces caractéristiques apportent des problèmes dans la production d'énergie éolienne au niveau du contrôle de la puissance livrée au réseau de manière à ne pas provoquer des problèmes de stabilité et de qualité. Les turbines éoliennes reliées au réseau peuvent affecter considérablement la qualité de l'énergie fournie, en étant le résultat des fluctuations de la puissance de sortie.

La croissance actuelle et le niveau de puissance installés rendent nécessaire développer des potentialités et des stratégies de contrôle dans le parc éolien qui possèdent les caractéristiques équivalentes de celles des parcs installés. Ces caractéristiques incluent des potentialités pour contrôler la puissance de sortie totale du parc éolien, le contrôle de puissance réactive et la robustesse aux imperfections du réseau. Ceci permettra que la puissance des parcs éoliens soit incluse comme composante active du réseau.

La finalité du système de contrôle d'une turbine éolienne est de réussir à un fonctionnement, automatique et sûr de la turbine, à l'intérieur d'une structure d'optimisation de la puissance produite. Ceci réduit des coûts d'opération, fournit une réponse cohérente dynamique, améliore la qualité, et aide à assurer la sécurité en maximisant la captation de l'énergie du vent dû à la réduction au minimum de chargements de la turbine.

Ce travail décrit des modèles du système de conversion d'énergie éolienne, tels que la turbine, le générateur, le convertisseur électronique de puissance et contrôleur, pour analyser la stabilité et le contrôle de la turbine de manière à maximiser la puissance produite au plus bas impact dans la tension du réseau et la fréquence pendant l'opération normale et sous les diverses perturbations, comme on peut constater dans un court-circuit à terre dans une ligne de transmission.

La méthode discutée considère des turbines éoliennes équipées d'un Générateur d' Induction Doublement Alimenté et un convertisseur lié entre le rotor et le réseau ; à l'angle des pales constant ou variable ainsi que pour des vitesses variable du vent. L'étude est réalisée dans l'outil de conception multiple de technologies *Matlab/Simulink*. Ce système permet également la commande de la puissance active et réactive en utilisant la commande vectorielle basée sur le contrôleur PI et les réseaux neurologiques artificiels.

Índice

Capítulo 1 - Introdução	1
1.1. Histórico	1
1.2. Situação Actual	2
1.2.1. Situação Portuguesa	4
1.3. Motivação	7
1.4. Objectivos	9
1.5. Organização da Tese	11
Capítulo 2 - Sistemas de Conversão de Energia Eólica	13
2.1. Enquadramento Geral	13
2.2. O Recurso Eólico	14
2.3. Interligação à Rede Eléctrica	15
2.4. Qualidade de Energia	18
2.4.1. Amplitude da Tensão	19
2.4.2. Flicker	20
2.4.3. Transitórios	22
2.4.4. Distorção Harmónica e Inter-harmónica	24
2.5. Produção de Energia Activa e Reactiva	25
2.6. Controlo de Sistemas de Conversão de Energia Eólica	26
2.7. Conclusões	31
Capítulo 3 - Caracterização e Modelização do Sistema	33
3.1. Turbinas Eólicas	33
3.1.1. Aerodinâmica da Pá da Turbina	33
3.1.2. Modelo Aerodinâmico	36
3.1.3. Implementação - Diagrama de Blocos	42
3.1.4. Resultados	43

3.2. Trem Mecânico - Engrenagens.....	45
3.2.1. Implementação - Diagrama de Blocos.....	48
3.2.2. Resultados.....	48
3.3. Gerador de Indução	49
3.3.1. O Gerador de Indução Duplamente Alimentado	50
3.3.2. Equações das Tensões do Estator e do Rotor	51
3.3.3. Equações do Fluxo	51
3.3.4. Modelo num referencial arbitrário $qd0$	53
3.3.5. Equações da Tensão $qd0$	54
3.3.6. Relações $qd0$ do Fluxo	56
3.3.7. Equações $qd0$ do Binário	58
3.3.8. Equação do Movimento do Rotor.....	60
3.3.9. Esquema Eléctrico do Gerador	61
3.3.10. Implementação - Diagrama de Blocos.....	62
3.3.11. Resultados.....	65
3.4. Conversor Trifásico	67
3.4.1. Conversor Pulsados Trifásicos Tipo Fonte de Tensão	68
3.4.2. Modelo de um Rectificador Trifásico.....	71
3.4.3. Modelo de um Inversor Trifásico	74
3.4.4. Implementação - Diagrama de Blocos.....	76
3.4.5. Resultados.....	77
3.5. Conclusões.....	81
Capítulo 4 - Controlo de Sistemas de Produção de Energia Eólica – Controlo	
Vectorial	83
4.1. Controlo do Parque Eólico	83
4.2. Estratégias de Controlo de Aerogeradores ligados à Rede Eléctrica.....	85
4.2.1. Controlo Dinâmico do Gerador/Conversor	87
4.2.2. Controlo do Conversor do lado da rede.....	89
4.2.3. Controlo do Conversor do lado do rotor.....	93
4.2.4. Implementação - Diagramas de Blocos	96
4.2.5. Resultados.....	98

4.3. Conclusões	113
Capítulo 5 - Controlo do Sistema usando Redes Neurais Artificiais	115
5.1. Introdução	115
5.2. As Redes Neurais Artificiais – RNAs.....	116
5.2.1. Histórico das RNAs	118
5.2.2. Aplicações de RNAs	121
5.2.3. Neuro-computação	122
5.2.4. Inspiração Biológica das RNAs	123
5.2.5. Funções de Activação	126
5.2.6. Architecturas das RNA e suas aplicações.....	128
5.2.7. Processo de Aprendizagem	130
5.2.8. Dinâmica das RNA	131
5.3. Modelos de RNAs e Algoritmos de Aprendizagem.....	132
5.3.1. Redes Lineares	132
5.3.2. Perceptrons – Regra de Aprendizagem do Perceptron.....	133
5.3.3. ADALINE E MADALINE – Regra Delta	134
5.3.4. Perceptrons de Múltiplas Camadas – Algoritmo de Retropropagação	137
5.3.5. Implementação	143
Processo de Aprendizagem	143
Algoritmo de Retropropagação	147
Factores que afectam a aprendizagem das redes neuronais	148
5.4. Aplicação das Redes Neurais	150
5.4.1. Controlador do lado do Rotor	150
5.4.2. Controlador do lado do Estator	154
5.4.3. Diagramas de Blocos.....	156
5.4.4. Resultados	158
5.5. Controlo do Parque Eólico	171
5.6. Conclusões	174
Capítulo 6 - Conclusões Gerais.....	177
6.1. Conclusões	177

6.2. Desenvolvimentos Futuros	182
Referências	183
Anexo A - Lista de Acrónimos e Símbolos	191
Anexo B - Características da Turbina Eólica	195

Índice de Figuras

Figura 1.1: Evolução da potência instalada em Portugal Continental.	4
Figura 1.2: Caracterização da produção e horas de produção equivalente.	6
Figura 1.3: Evolução mensal da produção eólica em Portugal Continental.	6
Figura 2.1: Classificação dos fenómenos relacionados com a Qualidade de Energia.	19
Figura 2.2: Característica de uma Turbina Eólica.....	27
Figura 3.1: Sistema de forças num perfil alar [49].....	34
Figura 3.2: Decomposição das forças nas suas componentes.....	35
Figura 3.3: Variação de C_p com λ [51].....	37
Figura 3.4: Variação de C_p com λ e β	41
Figura 3.5: Bloco da aerodinâmica da turbina.	42
Figura 3.6: Diagrama de bloco da Turbina Eólica.	43
Figura 3.7: Blocos de implementação do coeficiente de potência C_p da turbina..	43
Figura 3.8: Potência Aerodinâmica e Coeficiente de Potência da Turbina, em pu.....	43
Figura 3.9: Binário Aerodinâmico da Turbina e Velocidade de rotação do eixo da turbina, em pu.....	44
Figura 3.10: Potência Aerodinâmica e Coeficiente de Potência da Turbina, em pu, para uma variação do Ângulo de Pitch.	44
Figura 3.11: Binário Aerodinâmico da Turbina e Velocidade de rotação do eixo da turbina, em pu, para uma variação do Ângulo de Pitch.	45
Figura 3.12: Modelo do sistema mecânico mais engrenagens da Turbina Eólica.	45
Figura 3.13: Bloco das Engrenagens.....	48
Figura 3.14: Diagrama de Blocos das Engrenagens.....	48

Figura 3.15: Binário Mecânico (a azul) e Binário Electromagnético (a vermelho).....	48
Figura 3.16: Referenciais para a Máquina de Indução Trifásica para o Estator....	52
Figura 3.17: Relação entre os referenciais qd0 e abc para o Rotor.	53
Figura 3.18: Relação entre os referenciais qd0 e abc.	56
Figura 3.19: Circuito equivalente do gerador de indução num referencial qd0 arbitrário: a) Componente em quadratura; b) Componente directa; c) Componente homopolar.	62
Figura 3.20: Bloco do Gerador de Indução Duplamente Alimentado.....	62
Figura 3.21: Diagrama de blocos do gerador.	63
Figura 3.22: Diagrama de blocos de implementação do bloco do Rotor.	63
Figura 3.23: Diagrama de blocos de implementação do bloco do Estator.	63
Figura 3.24: Diagrama de blocos de implementação do bloco do Fluxo Mútuo...	64
Figura 3.25: Diagrama de blocos de implementação de cálculo dos senos e co- senos dos ângulos.	64
Figura 3.26: Diagrama de blocos de implementação da transformação de abc para qd.	64
Figura 3.27: Diagrama de blocos de implementação da transformação de qd para abc.....	64
Figura 3.28: Componentes em quadratura (verde) e directa (azul) dos Fluxos do rotor e do estator, em pu.	65
Figura 3.29: Componentes em quadratura (verde) e directa (azul) da Corrente e da Tensão do rotor, em pu.	65
Figura 3.30: Correntes e Tensões trifásicas do rotor, em pu.	66
Figura 3.31: Componentes em quadratura (verde) e directa (azul) da Corrente e da Tensão do estator, em pu.	66
Figura 3.32: Correntes e Tensões trifásicas do estator, em pu.	67
Figura 3.33: Interruptor Genérico.....	68
Figura 3.34: Braço de um Conversor Genérico.....	69
Figura 3.35: Braço de um Conversor, representado como um comutador de duas posições.	70

Figura 3.36: Modelo de média de um braço de um conversor.....	70
Figura 3.37: Rectificador Pulsado Trifásico.	71
Figura 3.38: Modelo de média de um rectificador trifásico, com coordenadas no referencial abc.	71
Figura 3.39: Relação entre os referenciais qd e $\alpha\beta$	73
Figura 3.40: Modelo de média de um rectificador trifásico, com coordenadas no referencial qd.....	74
Figura 3.41: Rectificador Pulsado Trifásico.	75
Figura 3.42: Modelo de média de um inversor trifásico, com coordenadas no referencial abc.	75
Figura 3.43: Modelo de média de um rectificador trifásico, com coordenadas no referencial dq.....	76
Figura 3.44: Bloco do Conversor de Tensão.....	76
Figura 3.45: Diagrama de blocos de implementação do Conversor.	76
Figura 3.46: Bloco gerador do sinal PWM.	77
Figura 3.47: Diagrama de blocos do gerador da componente de baixa frequência do sinal PWM.....	77
Figura 3.48: Bloco do Barramento DC.	77
Figura 3.49: Diagrama de blocos de implementação do Barramento DC.....	77
Figura 3.50: Tensão numa fase dos conversores do lado da rede (a azul) e do lado do rotor (a verde), em pu.	78
Figura 3.51: Corrente numa fase dos conversores do lado da rede (a azul) e do lado do rotor (a verde), em pu.	78
Figura 3.52: Sinais PWM de controlo dos conversores do lado da rede e respectiva componente de baixa frequência.....	79
Figura 3.53: Sinais PWM de controlo dos conversores do lado do rotor e respectiva componente de baixa frequência.....	80
Figura 3.54: Potências dos conversores do lado da rede (a azul) e do lado do rotor (a verde), em pu.....	81
Figura 3.55: Tensão contínua no Barramento DC.	81
Figura 4.1: Interligação entre os níveis de controlo de um parque eólico.	84

Figura 4.2: Estados de funcionamento de turbinas eólicas.....	85
Figura 4.3: Estratégias de controlo gerais.	86
Figura 4.4: Configuração típica do Gerador de Indução Duplamente Alimentado e do conversor.....	88
Figura 4.5: Diagrama de blocos genérico do controlador.	88
Figura 4.6: Estrutura do controlo vectorial do conversor do lado da rede.	93
Figura 4.7: Estrutura do controlo vectorial do conversor do lado do rotor.	95
Figura 4.8: Bloco do sistema de controlo vectorial do conversor do lado da rede.	96
Figura 4.9: Diagrama de blocos do regulador da tensão DC.....	96
Figura 4.10: Diagrama de blocos do regulador de corrente do conversor lado da rede.	97
Figura 4.11: Bloco do sistema de controlo vectorial do conversor do lado do rotor.	97
Figura 4.12: Diagrama de blocos do regulador da potência reactiva.	97
Figura 4.13: Diagrama de blocos do regulador de corrente do conversor do lado do rotor.	98
Figura 4.14: Diagrama de blocos da rede eléctrica.	99
Figura 4.15: Potências reactivas de referência, a azul, e medida, a vermelho, no barramento de saída.	100
Figura 4.16: Componente directa da corrente de referência do Rotor.....	100
Figura 4.17: Variação do nível do sinal de Tensão no barramento de saída do aerogerador.	101
Figura 4.18: Potência activa medida produzida pelo gerador.	102
Figura 4.19: Velocidade de rotação do rotor e Binário Electromagnético.	102
Figura 4.20: Valor medido da potência activa do gerador.	103
Figura 4.21: Componentes da corrente i_{dq} do rotor: valores de referência (verde) e medido (azul).	103
Figura 4.22: Velocidade de rotação do rotor e Binário Electromagnético.	104
Figura 4.23: Valores medidos das Potências activa e Reactiva do gerador.	104

Figura 4.24: Variação do nível do sinal de Tensão no barramento de saída do aerogerador.....	105
Figura 4.25: Tensões e Correntes trifásicas no barramento de interligação à rede eléctrica.	106
Figura 4.26: Frequências da tensão no barramento de interligação à rede à rede eléctrica.	106
Figura 4.27: Tensões e Correntes trifásicas no barramento afastado do ponto de interligação à rede.	106
Figura 4.28: Potência Activa e Potência Reactiva.	107
Figura 4.29: Velocidade de rotação e Binário Electromagnético.	107
Figura 4.30: Tensões e Correntes trifásicas no barramento de interligação à rede eléctrica.	108
Figura 4.31: Frequências da tensão no barramento de interligação à rede à rede eléctrica.	108
Figura 4.32: Tensões e Correntes trifásicas no barramento afastado do ponto de interligação à rede.	109
Figura 4.33: Potência activa e Potência Reactiva.	109
Figura 4.34: Velocidade de rotação e Binário electromagnético.	109
Figura 4.35: Tensões e Correntes trifásicas no barramento de interligação à rede eléctrica.	111
Figura 4.36: Frequência da tensão no barramento de interligação à rede eléctrica.	111
Figura 4.37: Tensões e Correntes trifásicas no barramento afastado do ponto de interligação à rede.	111
Figura 4.38: Potência activa e Potência Reactiva.	112
Figura 4.39: Binário Electromagnético e Velocidade de rotação.	112
Figura 5.1: Modelo do neurónio biológico.	124
Figura 5.2: Modelo genérico de um neurónio artificial.	125
Figura 5.3: Rede multicamada.	138
Figura 5.4: Diagrama esquemático do processo de propagação.	144
Figura 5.5: Diagrama esquemático do processo de propagação e retropropagação.	147

Figura 5.6: Variação dos parâmetros da função sigmoideal assimétrica e simétrica.	149
Figura 5.7: Evolução do erro durante o processo de aprendizagem.	152
Figura 5.8: Sinais pretendidos e as saídas antes da aprendizagem.	153
Figura 5.9: Sinais pretendidos e as saídas após a aprendizagem.	153
Figura 5.10: Evolução do erro durante o processo de aprendizagem.	155
Figura 5.11: Sinais pretendidos e as saídas antes da aprendizagem.	155
Figura 5.12: Sinais pretendidos e as saídas após a aprendizagem.	156
Figura 5.13: Rede neuronal do controlador do lado do rotor.	156
Figura 5.14: Esquema da rede neuronal do controlador do lado do rotor.	157
Figura 5.15: Diagrama da rede neuronal do controlador do lado do rotor.	157
Figura 5.16: Rede neuronal do controlador do lado do estator.	157
Figura 5.17: Esquema da rede neuronal do controlador do lado do estator.	158
Figura 5.18: Diagrama da rede neuronal do controlador do lado do estator.	158
Figura 5.19: Tensão v_{dq} de referência do estator, na situação de variação da potência reactiva.	159
Figura 5.20: Tensão v_{dq} de referência do rotor, na situação de variação da potência reactiva.	159
Figura 5.21: Potência Activa e Potência Reactiva.	160
Figura 5.22: Velocidade de rotação e Binário Electromagnético.	161
Figura 5.23: Variação e frequência da tensão no barramento de interligação à rede eléctrica.	161
Figura 5.24: Tensão v_{dq} de referência do estator, na situação de variação da velocidade de rotação.	162
Figura 5.25: Tensão v_{dq} de referência do rotor, na situação de variação da velocidade de rotação.	162
Figura 5.26: Potência Activa e Potência Reactiva.	162
Figura 5.27: Velocidade de rotação e Binário Electromagnético.	163
Figura 5.28: Variação e frequência da tensão no barramento de interligação à rede eléctrica.	163
Figura 5.29: Diagrama de blocos da rede eléctrica.	163

Figura 5.30: Tensão v_{dq} de referência do estator, na situação de um curto-circuito assimétrico no barramento de interligação à rede.....	164
Figura 5.31: Tensão v_{dq} de referência do rotor, na situação de um curto-circuito assimétrico no barramento de interligação à rede.....	164
Figura 5.32: Potência Activa e Potência Reactiva na rede.....	165
Figura 5.33: Velocidade de rotação e Binário Electromagnético.	165
Figura 5.34: Tensões e Correntes trifásicas no barramento de interligação à rede eléctrica.	166
Figura 5.35: Tensões e Correntes trifásicas no barramento afastado do ponto de interligação à rede.	166
Figura 5.36: Tensão v_{dq} de referência do estator, na situação de um curto-circuito assimétrico no barramento afastado da interligação à rede.	167
Figura 5.37: Tensão v_{dq} de referência do rotor, na situação de um curto-circuito assimétrico no barramento afastado da interligação à rede.....	167
Figura 5.38: Potência Activa e Potência Reactiva na rede.....	167
Figura 5.39: Velocidade de rotação e Binário Electromagnético.	168
Figura 5.40: Tensões e Correntes trifásicas no barramento de interligação à rede eléctrica.	168
Figura 5.41: Tensões e Correntes trifásicas no barramento afastado do ponto de interligação à rede.	168
Figura 5.42: Tensão v_{dq} de referência do estator, na situação de surgir uma cava de tensão.....	169
Figura 5.43: Tensão v_{dq} de referência do rotor, na situação de surgir uma cava de tensão.....	169
Figura 5.44: Potência Activa e Potência Reactiva na rede.....	170
Figura 5.45: Velocidade de rotação e Binário Electromagnético.	170
Figura 5.46: Tensões e Correntes trifásicas no barramento de interligação à rede eléctrica.	171
Figura 5.47: Tensões e Correntes trifásicas no barramento afastado do ponto de interligação à rede.	171

Figura 5.48: Potências Activa e Reactiva durante uma perturbação da tensão na rede.	172
Figura 5.49: Estrutura simplificada do sistema de controlo do parque eólico. ...	173

Índice de Tabelas

Tabela 1.1: Caracterização da potência eólica instalada em Portugal Continental.	5
Tabela 1.2: Caracterização dos parques eólicos por potência instalada em Portugal Continental.	5
Tabela 1.3: Potência licenciada (desde atribuição de ponto de Recepção).....	7
Tabela 3.1: Regimes de funcionamento dos perfis alares [50].	36
Tabela 5.1: Comparação entre o cérebro e o computador.....	122
Tabela 5.2: Comparação entre os computadores e os neuro-computadores.	123
Tabela 5.3: Parâmetros da RNA das tensões de referência do controlador do lado do rotor.	151
Tabela 5.4: Parâmetros da rede neuronal das tensões de referência do controlador do lado do estator.....	154

Capítulo 1

Introdução

1.1. Histórico

A energia eólica é utilizada há milhares de anos, em vários tipos de aplicações e sob diversas formas. Há registos do uso de moinhos de vento no Japão e China em 2000 AC e na Babilónia em 1700 AC. A primeira referência histórica sobre a possível utilização da energia eólica que não fora para navegação, data do ano de 1700 AC e corresponde aos projectos de irrigação do imperador Hammurabi [1]. Por volta do ano 200 AC, na Pérsia (actual Irão), usava-se a força eólica para bombeamento de água e moagem de grãos [2].

A navegação à vela constitui a mais antiga aplicação da energia eólica. Os egípcios utilizavam a força do vento para impulsionar as suas embarcações à vela no rio Nilo; igualmente, as culturas Sumérias utilizavam a navegação à vela para navegarem nos rios Eufrates e Tigre.

Os moinhos de vento são usados desde a Idade Média. Os de eixo horizontal devem ter surgido na Pérsia, provavelmente antes da época Islâmica. A sua invenção veio responder à necessidade de adaptar as máquinas eólicas de eixo vertical ao bombeamento de água. A disposição do rotor nos sistemas de eixo horizontal é a mais adequada para mover uma nora sem ter que variar a direcção da força motora mediante uma engrenagem.

Até ao século X não é possível encontrar um documento histórico irrefutável em que se mencionem os moinhos de vento como prática generalizada. No século XII, a utilização dos moinhos de vento também se estende através da

civilização islâmica em todo o Mediterrâneo meridional. A partir do século XIV apareceram na Europa os moinhos trípole e os de torre, com uma secção circular e ortogonal. É no século XVIII que aparecem as primeiras melhorias tecnológicas, sobretudo nos mecanismos de orientação e de transmissão.

O gerador multipás lento aparece na Europa no século XIX, mas é na América onde se desenvolve fortemente a partir de 1870, conhecido hoje por “moinho americano”. No início do século XX apareceram os primeiros moinhos tipo Darrieus, que foram os primeiros moinhos rápidos que movimentaram geradores eléctricos [3] e [4].

A energia eólica para produção de energia eléctrica foi pioneiramente utilizada pela Dinamarca [5] há pouco mais de cem anos. Desde então, muito já se investigou para que a produção de energia eléctrica a partir do vento seja cada vez mais viável, tanto do ponto de vista técnico, como do económico.

1.2. Situação Actual

A energia eólica é “limpa”, tem custo baixo de manutenção e o “combustível” é fornecido gratuitamente pela natureza. A diminuição dos custos da electrónica está a proporcionar o desenvolvimento de novas tecnologias cada vez mais eficientes, o que torna este tipo de produção de energia economicamente mais competitiva.

Devido ao estado actual do desenvolvimento tecnológico das turbinas eólicas e do seu uso já em larga escala, estima-se que, actualmente, a energia eléctrica eólica é a segunda mais barata das energias renováveis, perdendo apenas para a energia hidroeléctrica [6].

Um factor que em muito contribuiu e continua a contribuir para a expansão da energia eólica na União Europeia foi a implementação de políticas de incentivos, regulamentação e financiamentos, além dos imperativos de ordem ambiental.

A imposição de taxas sobre fontes de energia que emitam dióxido de carbono deve permitir que as metas do Protocolo de Quioto, proposto em

conferência das Nações Unidas em Quioto – Japão, em 1997, na qual 160 países negociaram limites de emissão de gases poluentes, principalmente do dióxido de carbono, sejam atingidas. Através desse protocolo, os países signatários comprometam-se a uma redução média de 5,2% na emissão global dos gases causadores do efeito estufa, em relação à emissão de 1990, com prazo estipulado de 2008 a 2012. Essa atitude incentiva o uso de energias renováveis, nomeadamente a energia eólica, que é das mais económicas entre as formas de produção de energia renováveis.

A Europa é o continente que tem liderado a investigação e utilização de fontes de energia eólicas, com destaque para Alemanha, Espanha, Dinamarca, Inglaterra e Holanda.

Na Alemanha, a prioridade energética envolve a utilização de fontes de energia renováveis, com destaque para a eólica. Com capacidade de produção eólica instalada de 12.000 MW em 2003, é o país líder no uso deste tipo de fonte de energia [7].

A Espanha é o terceiro país do mundo que mais utiliza energia eléctrica eólica, depois da Alemanha e dos E.U.A. As perspectivas governamentais apontam para que, em 2010, a potência instalada seja de 8.000 MW [8].

A Dinamarca, pioneira na utilização da energia eléctrica de origem eólica, já conta com cerca de 10% da sua produção de energia eléctrica baseada neste tipo de produção, devendo chegar a 50% até 2030, com pelo menos 4.000 MW *offshore* [9], [10]. Hoje, são os principais exportadores no mundo de equipamentos e tecnologia em turbinas eólicas [5].

Também o Japão tem como uma de suas prioridades energéticas o uso da energia eólica. Na região de Hokkaido e Tohoku, a potência instalada passou de 28 MW para 140 MW de 1998 a 2000. Um comunicado emitido em 2002 pelo Ministério da Economia, Comércio e Indústria daquele país, divulgou a necessidade de incrementar a capacidade instalada em energia eólica para 3.000 MW até o ano de 2010 [11].

1.2.1. Situação Portuguesa

Portugal tem grandes tradições no aproveitamento da energia do vento, desde a moagem de cereais à navegação à vela.

Na produção de energia eléctrica, a incorporação de fontes renováveis tem vindo a reduzir o peso das centrais térmicas no sistema produtor eléctrico, contribuindo para a prossecução do objectivo de reduzir as emissões gasosas, visando o cumprimento do estabelecido em Quioto.

De acordo com as estatísticas da Direcção Geral de Geologia e Energia de Junho de 2005 [12], o total de potência instalada renovável atingiu 5.962 MW no final do 1º semestre de 2005, tendo o aumento de 47 MW sido verificado na potência eólica instalada.

O acréscimo de potência instalada verificado em Junho deveu-se à entrada em funcionamento de mais três novos parques eólicos com uma potência instalada de 28 MW e a um reforço de potência de 19 MW nos parques já existentes.

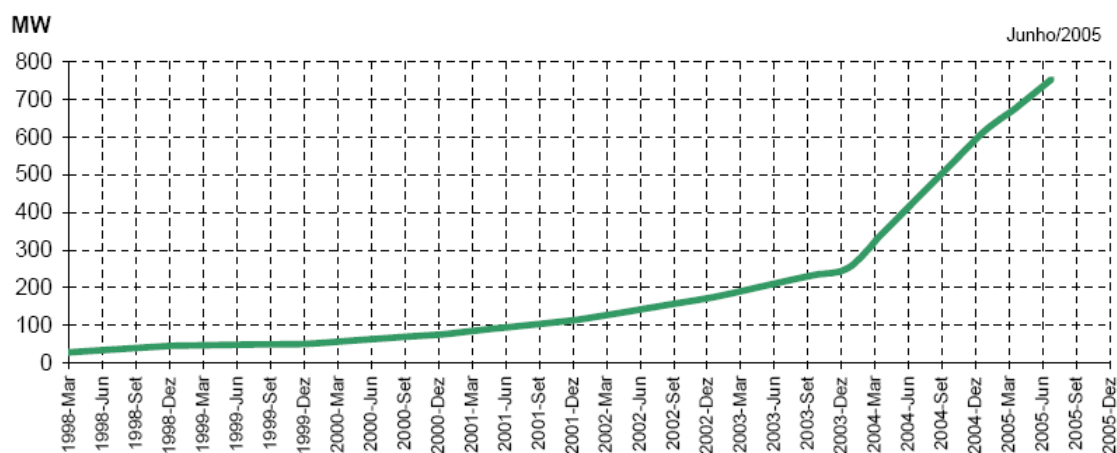


Figura 1.1: Evolução da potência instalada em Portugal Continental.

A potência eólica instalada no final de Junho de 2005 situava-se em 754 MW, distribuída por 84 parques, com um total de 536 aerogeradores ao longo de todo o território Continental.

Tabela 1.1: Caracterização da potência eólica instalada em Portugal Continental.

	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	Junho 2005
Potência Instalada (MW)	45	51	76	114	175	253	616	754
N.º de parques instalados	5	7	9	16	24	42	71	84
N.º de aerogeradores instalados	89	94	123	173	213	276	478	536

Potência média dos parques (MW)	9,1	7,2	8,4	7,2	7,3	6,0	8,7	9,0
Potência média dos aerogeradores	0,5	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,3	1,4

Mais de 80% da potência instalada situa-se em parques com menos de 25 MW.

Tabela 1.2: Caracterização dos parques eólicos por potência instalada em Portugal Continental.

MW	N.º de Parques		Potência (MW)	
	Junho 2005	%	Junho 2005	%
Total	84	100	754	100
$P \leq 1$	15	18	9	1
$1 < P \leq 10$	40	48	206	27
$10 < P \leq 25$	26	31	399	53
$25 < P \leq 50$	2	2	60	8
$P > 50$	1	1	80	11

A produção tem-se mantido acima das 2200 horas equivalentes por MW, com 44% da energia gerada em instalações com mais de 2500 horas em 2004.

Os distritos com maior potência instalada, em Junho de 2005, são Vila Real, Viseu, Braga e Lisboa (139, 108, 106 e 99 MW). Os distritos com maior recurso vento, em 2004, foram Porto, Coimbra e Viana do Castelo (2.832, 2.688 e 2.560 horas equivalentes).

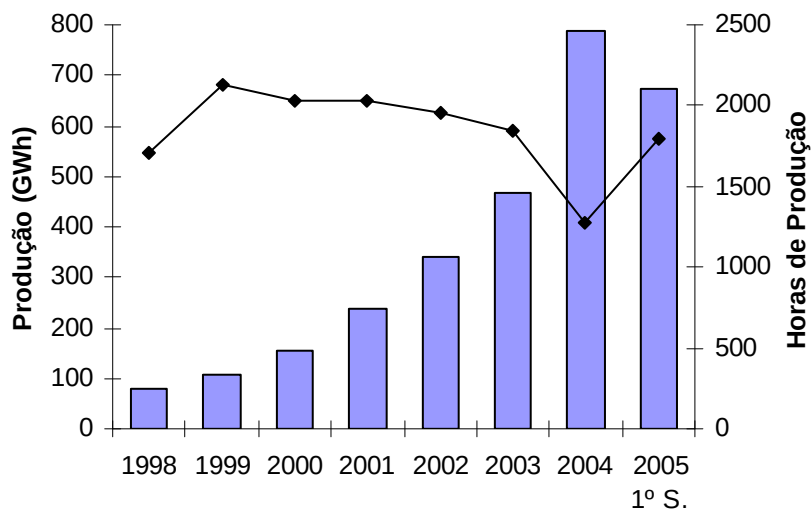


Figura 1.2: Caracterização da produção e horas de produção equivalente.

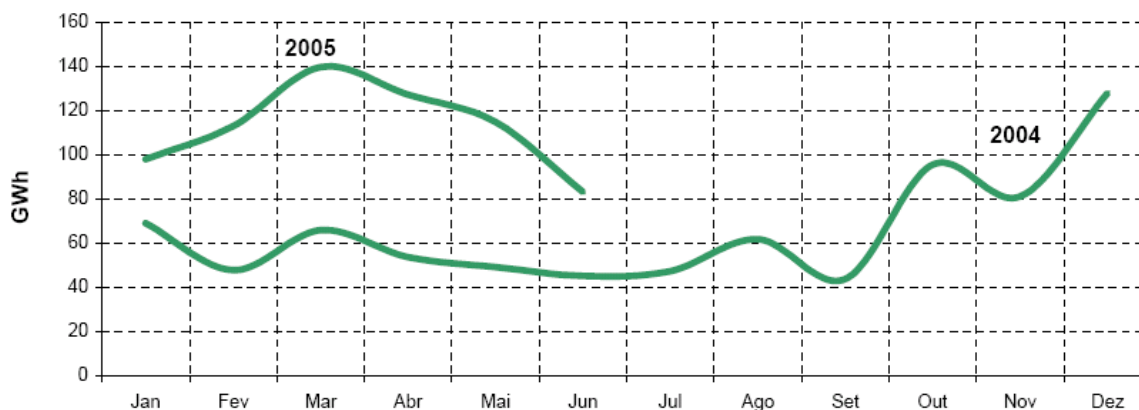


Figura 1.3: Evolução mensal da produção eólica em Portugal Continental.

Em 2003 e 2004 registou-se um aumento muito significativo do licenciamento de parques eólicos (+800 MW/ano). Estão, até Junho de 2005, licenciados 2.325 MW de potência eólica. Se considerarmos que o tempo previsto, desde a licença de estabelecimento à construção, é de 2 anos, até 2007 deveremos ter mais de 2.000 MW de potência eólica no sistema eléctrico nacional.

Tabela 1.3: Potência licenciada (desde atribuição de ponto de Recepção).

	Potência (MW)
Até 2002	591
2003	812
2004	713
1º Trimestre 2005	141
2º Trimestre 2005	67
Total	2324

1.3. Motivação

O domínio da produção de energia eléctrica em sistemas de pequena/média potência tem vindo a sofrer um incremento significativo, devido, nomeadamente, à aposta definitiva na produção baseada em fontes de energia renovável.

De entre as diversas fontes de energia renovável ressalta a importância relativa da energia eólica, essencialmente por dois tipos de razões:

A quantidade de energia armazenada nas massas de ar em movimento é elevada e traduz uma recolha importante da quantidade de energia de fonte solar absorvida pela Terra. Acresce que os níveis de potência associados a este armazenamento se mostram também elevados e exploráveis em boas condições de operação;

O aproveitamento principal deste tipo de energia baseia-se numa sequência de duas conversões de potência – potência mecânica linear do ar em movimento/potência mecânica rotativa de um veio mecânico e potência mecânica rotativa de um veio mecânico/potência eléctrica fornecida a uma rede eléctrica de distribuição de energia – tecnologicamente implementáveis com boas condições de rendimento.

É sabido que a primeira destas conversões é implementada por recurso a

turbinas eólicas e que o rendimento desta conversão é fortemente dependente da velocidade de rotação desta máquina.

Convencionalmente, os sistemas de produção eólica optimizaram o funcionamento das turbinas, por melhoria do seu rendimento, “esquecendo” a segunda conversão, tipicamente realizada com recurso a máquinas eléctricas de indução, assíncronas, rodando numa primeira fase a velocidade constante – com prejuízo do rendimento do conjunto – numa segunda geração com máquinas de duas velocidades por modulação da amplitude polar, e evolução para máquinas síncronas, capazes de introduzirem o conceito de velocidade variável e associada melhoria de rendimento das turbinas para diferentes regimes de vento.

No entanto, apesar de ser a “melhor” máquina eléctrica para efeitos de controlo, a máquina síncrona é mais complexa, e por consequência também mais custosa que a máquina assíncrona, de tecnologia bastante mais simples, validada e, aspecto não desprezável, com tecnologia dominada a nível de empresas nacionais.

Neste quadro, o desenvolvimento actual no domínio da produção eólica está fortemente ligado ao desenvolvimento de métodos e tecnologias capazes de proporcionarem a produção de energia eólica baseada em gerador assíncrono de indução. Este desenvolvimento apenas é possível com a associação da máquina eléctrica com conversores estáticos de potência capazes de imporem a este tipo de máquina condições de funcionamento a velocidade variável para os níveis actuais de potência das unidades de produção de energia.

Acresce que a produção de energia neste domínio é baseada na operação conjunta de várias máquinas associadas em parques, devido a um melhor aproveitamento dos “túneis” de vento e a uma repartição da produção global por máquinas de menor potência nominal.

Neste quadro de produção integrada, baseada em máquinas assíncronas de velocidade variável, três grandes domínios estão presentes no funcionamento conjunto do parque:

Métodos de controlo do trânsito de potência na máquina eléctrica a partir de determinadas condições de accionamento do veio;

Métodos de controlo da qualidade da tensão eléctrica noutro sentido da qualidade da fonte de tensão criada no sistema de produção com estabelecimento optimizado do conteúdo harmónico da corrente eléctrica injectada na rede eléctrica;

Os métodos de previsão e controlo dos pontos de funcionamento de cada máquina a partir do conhecimento da velocidade do vento e das condições climatéricas de modo a optimizar a potência total produzida. O objectivo é produzir de acordo com capacidade máxima para cada regime de ventos.

A aplicação das técnicas de inteligência artificial nos campos da electrónica de potência e sistemas de controlo têm vindo a crescer. Estas técnicas baseadas em sistemas espertos, a lógica difusa e as redes neuronais artificiais necessitam de uma grande base de dados ou conhecimentos que descrevam o funcionamento juntamente com uma análise lógica, em vez de uma análise matemática para controlar sistemas e facilitar a tomada de decisões. Uma destas técnicas corresponde às redes neuronais artificiais que imitam o funcionamento do cérebro humano.

As redes neuronais artificiais foram e são bastante usadas para o reconhecimento de imagens e sons para o processamento de dados e sinais. Actualmente, tendem a ser aplicadas no campo da electrónica de potência e nos sistemas de controlo. Esta tendência leva-nos a substituir algumas partes dos sistemas normais de controlo vectorial por um sistema de controlo baseado em redes neuronais artificiais.

1.4. Objectivos

O trabalho de investigação aqui apresentado é focado neste último domínio e suportado em modelos adoptados pela comunidade de investigadores para os outros dois domínios.

Assim, em primeiro lugar, este trabalho propõe-se estudar um modelo da máquina de indução a operar em velocidade variável. Pretende-se com esta ferramenta ter controlo sobre todas as características “desejáveis” de rendimento

da turbina, nomeadamente as que impõem condições que optimizem a potência produzida nas condições de funcionamento de um determinado parque.

Numa segunda fase, desenvolver modelos para os controladores baseados em redes neuronais artificiais para o conjunto de máquinas de um parque, de modo a estabelecer um modelo integrado de todo o sistema que permita optimizar o projecto.

Neste estudo apresenta-se uma aplicação de redes neuronais artificiais nos sistemas de controlo vectorial para um gerador de indução duplamente alimentado. Esta tecnologia, relativamente nova neste tipo de aplicação, será utilizada para poder substituir eficientemente os equipamentos analógicos já existentes.

Para um sistema de controlo vectorial serão utilizadas redes neuronais artificiais do tipo *feedforward backpropagation* para substituir algumas partes do sistema de controlo vectorial, como seja a estimação das correntes de referência de controlo das variáveis do sistema. Cada rede neuronal foi projectada, treinada e comprovada como uma parte do conjunto do sistema de controlo.

Depois de estabelecido o controlo individual de cada unidade de produção, é apresentada uma forma de optimizar a gestão do conjunto de todas as unidades produtoras de energia eólica, tendo em conta a qualidade da potência injectada na rede eléctrica.

A geometria do parque e da rede eléctrica interna, a rugosidade e topografia do terreno e a disponibilidade do vento são alguns dos factores que contribuem para a complexidade do algoritmo de controlo do parque. Este algoritmo deve ser preparado para lidar com a forte não-linearidade do sistema a controlar, pelo que as Redes Neuronais são uma ferramenta útil na implementação das acções de controlo devido à sua capacidade de adaptação e aprendizagem face a situações imprevisíveis e de falhas a que podem estar sujeitos.

Assim, na parte final é mostrado como a Rede Neuronal Artificial do tipo *feedforward backpropagation* pode ser usada para gerar as potências de referência das potências activa e reactiva de cada máquina. Essas referências são obtidas tendo em conta a disponibilidade do vento, as ordens recebidas pela entidade

reguladora externa e o estado actual de cada aerogerador.

Assim, é feita uma abordagem interactiva suportada num modelo integrado a desenvolver em ambiente *Matlab/Simulink* de modo a estudar completamente o sistema de produção de energia eólica.

1.5. Organização da Tese

Esta tese encontra-se organizada em seis capítulos:

No Capítulo 1, “Introdução”, é feito um enquadramento da tese no panorama actual e situação energética portuguesa, e são apresentadas as motivações que levaram à realização deste trabalho assim como os objectivos que se pretenderam alcançar com esta tese.

No Capítulo 2, “Sistemas de Conversão de Energia Eólica”, é apresentado um resumo bibliográfico de forma a mostrar o estado actual das tecnologias dos sistemas de conversão de energia eólica, em termos de investigação científica e desenvolvimento técnico.

No Capítulo 3, “Caracterização e Modelização do Sistema”, são apresentados os modelos matemáticos dos diferentes sub-sistemas que constituem um sistema de conversão de energia eólica com utilização do gerador de indução duplamente alimentado. Deste modo, são apresentadas as equações e fundamentos dos modelos encontrados na bibliografia para a aerodinâmica da turbina, engrenagens, máquina de indução e conversores.

No Capítulo 4, “Controlo de Sistemas de Produção de Energia Eólica – Controlo Vectorial”, realiza-se a simulação de todo o sistema mediante as equações matemáticas dos modelos apresentados no Capítulo 3 com realce para simulação do gerador de indução duplamente alimentado num sistema de coordenadas arbitrário. Também é apresentado um sistema de controlo vectorial tradicional da máquina baseado em controladores PI. Esta simulação resulta de

utilidade para o estudo do comportamento desta máquina quando alimentada pelo rotor por meios de sistemas electrónicos de potência. Também é feito o estudo do gerador para diferentes condições de funcionamento, tais como a variação da carga, curto-circuitos em diferentes pontos da rede e para diferentes regimes de potência activa e reactiva.

No Capítulo 5, “Controlo do Sistema usando Redes Neurais”, é apresentada um breve resumo sobre redes neuronais artificiais e os seus fundamentos. Também se descrevem alguns tipos de funções, estruturas de redes neuronais artificiais e alguns métodos de implementação. Igualmente é apresentado um modelo de rede neuronal tipo *feedforward backpropagation* usando a ferramenta *Matlab* com implementação em *Simulink*. Finalmente, estas redes são usadas para substituir algumas partes do sistema de controlo para estimar as correntes (tensões) de referência do estator e do rotor no sistema de controlo vectorial. As estruturas das redes neuronais propostas são treinadas como parte integrante do sistema de controlo. Assim, são apresentadas comparações entre os sistemas tradicionais com controladores PI e os sistemas com uso de redes neuronais.

No capítulo 6, “Conclusões Gerais”, apresentam-se algumas conclusões gerais da tese e são indicadas algumas sugestões de continuação deste trabalho, seguido pelas referências bibliográficas.

Capítulo 2

Sistemas de Conversão de Energia Eólica

2.1. Enquadramento Geral

Neste momento, a quantidade de energia produzida por parques eólicos num grande sistema de energia eléctrica apenas cobre uma pequena parte das necessidades de energia eléctrica. A restante grande parte é coberta pelas centrais térmicas e hidroeléctricas (no caso de Portugal) e por centrais nucleares em alguns países da União Europeia.

No entanto, a tendência verificada de aumento da quantidade de electricidade produzida por parques eólicos mostra que pode começar a influenciar o comportamento do sistema, tornando-o difícil de operar apenas por controlo de grandes centros de produção [13].

Face à natureza não-despachável da energia eólica, em condições de elevado nível de penetração e de pequenas cargas, podem ser atingidas situações perigosas. Como esse nível de penetração ainda não foi alcançado na maioria dos países, torna-se necessário realizar novos estudos de modo a assegurar uma operação dinâmica segura. As recentes tecnologias tendem para uma facilidade de controlo e para dispositivos de velocidade variável que parecem ter uma melhor influência do que os dispositivos de velocidade fixa em sistemas dinâmicos. Particularmente o Gerador de Indução Duplamente Alimentado que vem assumindo um papel cada vez mais importante na produção de energia eólica.

Normalmente os parques eólicos não influenciam o controlo da tensão e da frequência e, se ocorrer um distúrbio na rede, os aerogeradores são desligados e

são apenas recolocados em serviço quando a falha for detectada e reparada. Assim, apesar de não desprezar a presença de aerogeradores, a frequência e a tensão são mantidas por controlo dos grandes centros produtores de energia eléctrica como se não houvesse qualquer aerogerador presente. Isto só é possível enquanto a penetração de energia eólica for baixa.

Como consequência do aumento da quantidade de energia eléctrica produzida por este tipo de energia renovável, num futuro próximo os parques eólicos poderão influenciar o comportamento dos sistemas de energia eléctrica. Para investigar o impacto da penetração de parque eólicos existem vários trabalhos publicados onde são apresentados estudos dinâmicos sobre o sistema de energia tais como em [13] e [14].

2.2. O Recurso Eólico

Os ventos são causados por diferenças de pressão ao longo da superfície terrestre, devidas ao facto de a radiação solar recebida pela terra ser maior nas zonas equatoriais do que nas zonas polares. A origem do vento é, portanto, a radiação solar.

A velocidade do vento é o dado necessário mais crítico para avaliar o potencial eólico de um local uma vez que a velocidade e a direcção do vento estão permanentemente a variar. As suas características são influenciadas pelo sistema meteorológico, pelas características locais do terreno, e da altura acima do nível do mar.

Como a velocidade do vento varia por minuto, hora, dia, estação e ano, o valor médio anual da velocidade do vento deverá ser calculada com base em 10 anos ou mais. Mas tendo em conta que este período se tornaria muito caro e que a maior parte dos projectos não podem esperar tanto tempo, em geral são considerados tempos mais curtos, como por exemplo, um ano.

Embora Portugal não seja dos países mais ventosos da Europa tem condições favoráveis ao aproveitamento da energia do vento. Estudos cobrindo a maioria das zonas onde se estima que estejam concentrados os recursos, apontam

como viável o valor de 2000 MW, num cenário de restrição ambiental moderada, considerando um patamar de rentabilidade de 2500 horas brutas anuais equivalentes de funcionamento a plena carga. Assumindo um valor mínimo de 2000 horas brutas anuais obtém-se um potencial nacional claramente superior a 3500 MW [15].

Como o vento depende do sol e das estações do ano, as características do vento geralmente repetem-se num período de um ano. A velocidade do vento num determinado local é determinada pela média dos dados em alguns meses. A variação da velocidade num determinado período pode ser descrita por uma função de distribuição de probabilidade.

As variações da velocidade do vento são melhor caracterizadas pela função de distribuição de probabilidade de Weibull f com dois parâmetros, o parâmetro de forma k e o parâmetro de escala c . Assim, a probabilidade de o vento ter velocidade v durante um intervalo de tempo é dada pela expressão:

$$f(v) = \left(\frac{k}{c}\right) \left(\frac{v}{c}\right)^{(k-1)} e^{-\left(\frac{v}{c}\right)^k} \quad (2.1)$$

para $0 < v < \infty$.

Esta expressão tem uma correlação muito próxima com as curvas de frequência de ventos, pelo que é amplamente utilizada no processamento de dados para base de cálculo da energia, não sendo, no entanto, objectivo deste trabalho a modelização do comportamento do vento.

2.3. Interligação à Rede Eléctrica

Existe um problema com a penetração deste tipo de energia, em Portugal e em geral no resto da Europa, que é o facto de possuírem uma fraca ligação à rede. A maior parte dos grandes parques eólicos (cerca de 24 MW) estão interligados aos níveis baixos de transmissão ou subtransmissão sendo os seus efeitos

dinâmicos ainda não bem conhecidos.

No entanto, vários autores, mostraram que a interligação de geradores às redes de distribuição afecta o funcionamento dessas redes de várias formas. Estes estudos mostram que a interligação de geradores:

- a. pode aumentar o nível de falhas a um ponto que obrigue o reforço da rede, [10], [13] e [16];
- b. requer novas práticas de protecção de modo a fornecer uma protecção da rede contra condições anormais incluindo condições de falhas e de isolamento [8], [13] e [16];
- c. afecta as perdas na rede de distribuição[10] e [16];
- d. introduz problemas de estabilidade, [13] e [14];
- e. causa problemas na qualidade da energia, [13] e [14].

Além disso, um dos maiores problemas que se coloca com o aumento da penetração da energia eólica é quando ocorre uma falha num ponto próximo de uma grande produção de energia eólica e cujo efeito da queda rápida da tensão pode trazer sérias consequências. O abaixamento da tensão implica uma redução na potência de saída enquanto a potência mecânica de entrada permanece constante, acelerando a máquina. Quando o curto-circuito é resolvido, a potência teve um aumento e, assim, a corrente e a energia reactiva consumida aumenta, produzindo um decréscimo na tensão que reduz a capacidade dos condensadores para fornecerem energia reactiva. A combinação destes efeitos pode produzir a desligamento do parque eólico devido à rapidez de actuação das protecções. Nesta situação fica uma grande quantidade de produção de energia desconectada da rede que poderá vir a ser fornecida por países vizinhos e sobrecarregar as redes de transporte.

No caso de não haver protecção para estas situações podem ocorrer grandes oscilações na tensão que poderão causar entretanto o desligamento do parque eólico que então não tinha sido desligado. Nesta situação, deverá ser instalado um sistema de protecção selectivo que poderá desligar o parque eólico mais próximo, deixando os restantes ligados. Quando os geradores eólicos são

Geradores de Indução Duplamente Alimentados, a recuperação da tensão é mais rápida, e os sistemas de protecções actuais seriam menos adequados [14].

O tempo de recuperação de uma falha é da ordem dos 0,2 a 0,5 segundos, ou em situação de operações de reengate pode chegar a alguns segundos. Um período forçado de interrupção na produção da energia eléctrica a partir de uma grande produção de energia eólica num sistema com grande penetração deste tipo de energia, pode levar à instabilidade do sistema e até a um *black-out* [16].

As desvantagens acima assinaladas podem ser aperfeiçoadas se forem utilizados elementos de armazenamento de energia capazes de armazenar a energia fornecida pelo vento durante curtos intervalos, da ordem dos segundos. Como meios de armazenar de energia podem considerar-se os capacitivos, os indutivos, os químicos e os mecânicos.

Os elementos de armazenamento indutivos têm certas vantagens como elementos armazenadores para tempos curtos devidos às suas características construtivas e possuem uma elevada capacidade de armazenamento de energia. Dokopoulos [16] investigou os efeitos dos parâmetros de um armazenador indutivo na suavização da penetração da energia eólica e no desligamento de turbinas eólicas durante uma falha na rede. Concluiu que o armazenamento indutivo pode reduzir as variações da potência injectada na rede, e também pode manter as turbinas a funcionarem durante alguns segundos durante uma falha na rede melhorando o comportamento dinâmico do sistema durante as falhas.

No que concerne à legislação nacional relativamente à injeção de potência na rede, esta tem sofrido alterações desde a publicação do Decreto-Lei n.º 189/88, de 27 de Maio, que veio estabelecer normas relativas à actividade de produção de energia eléctrica por pessoas singulares ou por pessoas colectivas de direito público ou privado, e no qual se impunha um máximo para a potência injectada de 5% da potência de curto-circuito mínima no ponto de interligação, como forma de evitar excessivas perturbações de tensão na rede. Mais tarde, com o Decreto-Lei n.º 168/99, de 18 de Maio, esse valor foi alterado para 8%. Por outro lado, os objectivos traçados pela Directiva Comunitária 2001/77/CE vieram

fixar novas metas que foram enquadradas no Decreto-Lei n.º 312/2001, de 10 de Dezembro, que define o regime de gestão da capacidade de recepção de energia eléctrica nas redes do Sistema Eléctrico de Serviço Público proveniente de centros electroprodutores do Sistema Eléctrico Independente, e que veio promover a produção de electricidade a partir de fontes de energia renováveis.

2.4. Qualidade de Energia

A qualidade de energia relaciona-se com factores que descrevem a variabilidade do nível de tensão, assim como a distorção das formas de onda da tensão e da corrente. Os vários parâmetros de qualidade de energia podem dividir-se em diferentes categorias, de acordo com o tempo de duração. Já foram publicados muitos trabalhos relacionados com a qualidade da energia. Van Vyk [17] mostra uma breve introdução histórica à qualidade de energia que inclui uma bibliografia seleccionada de cerca de 300 referências bibliográficas. No que se refere à qualidade só alguns problemas são relevantes. Existem alguns trabalhos publicados relativos à qualidade da energia injectada pelos parques eólicos e sobre melhoramentos na interligação de turbinas eólicas à rede eléctrica.

A qualidade de energia de turbinas eólicas pode ser subdividida segundo diferentes fenómenos. Existem alguns trabalhos publicados que referem diferentes fenómenos de qualidade de energia relacionados com variações na tensão da rede; emissão de *flicker* e harmónicos (e inter-harmónicos); protecção contra descargas atmosféricas e sobretensões; análise em regime transitório e estabilidade; e análise de trânsito de potências. Também existem alguns trabalhos relativos a standardizações internacionais da qualidade de energia de turbinas eólicas e sistemas de medição da qualidade de energia de turbinas eólicas e no desenvolvimento de processos de medição para diferentes capacidades da rede eléctrica de interligação em regime estacionário. Alguns autores ainda estudaram a qualidade de energia para diferentes geradores e diferentes tipos de operação.

Sintetizando, uma qualidade da energia perfeita significa que a tensão é continuada e sinusoidal, de amplitude e frequência constantes, podendo ser

expressa em termos de características físicas e propriedades eléctricas. É muitas vezes descrita em termos de tensão, frequência e interrupções. A qualidade da tensão deve preencher os requisitos estipulados em padrões nacionais e internacionais. Nestes padrões, os distúrbios na tensão são divididos em variações da tensão, *flicker*, transitórios e distorção harmónica, definidos na Norma EN 50160 [18]. A Figura 2.1 mostra a classificação de diferentes fenómenos associados à qualidade da energia.

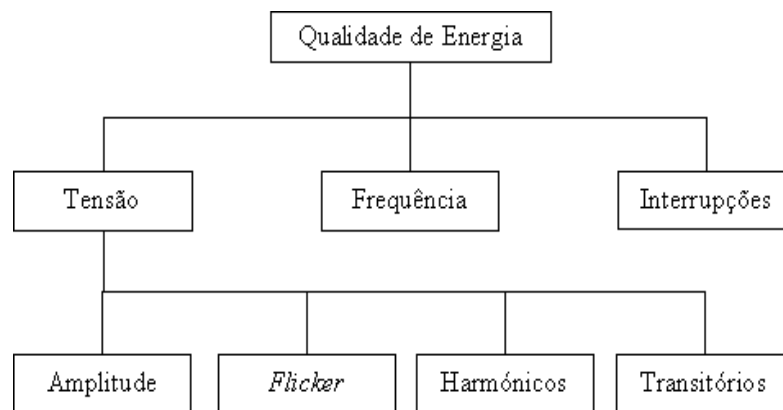


Figura 2.1: Classificação dos fenómenos relacionados com a Qualidade de Energia.

De todos os fenómenos indicados na figura anterior, aquele que tem suscitado mais interesse de estudo por parte dos investigadores, e consequentemente mais referência bibliográficas, é o dos *flicker*.

2.4.1. Amplitude da Tensão

A injeção de energia eólica na rede eléctrica afecta a amplitude da tensão. O impacto depende da “força” da rede e da energia activa e reactiva da instalação eólica. A energia eólica provoca menos desvios na tensão quanto maior for a potência de curto-circuito no ponto de interligação à rede. Além disso, para a mesma potência de curto-circuito uma potência injectada igual pode provocar um aumento ou uma diminuição na amplitude da tensão dependendo do ângulo de fase da impedância da rede [19].

O impacto da turbina eólica na amplitude da tensão é normalmente mais crítica se a turbina eólica e os consumidores partilham a mesmo meio de alimentação. Nestes casos a preocupação é que a energia eólica não provoque uma variação na amplitude da tensão para fora de limites aceitáveis. Normalmente, o valor máximo da tensão é encontrado assumindo a carga mínima e a produção máxima, e o valor mínimo da tensão é encontrado assumindo produção zero e carga máxima.

2.4.2. *Flicker*

As turbinas eólicas ligadas a uma rede eléctrica podem afectar consideravelmente a qualidade da energia fornecida, como resultado das características das flutuações da potência de saída, que contém quer componentes periódicas, devido aos fenómenos aerodinâmicos tal como o efeito *wind shear* (efeito da altura nas pás) e o efeito de sombra da torre, quer a variações aleatórias devido às rajadas de vento e, de forma geral, apenas devido a variações na velocidade do vento.

Dada a natureza instável da potência das turbinas eólicas, as variações da energia activa e reactiva das turbinas afecta a tensão da rede eléctrica onde estas estão conectadas. Este impacto é descrito nas normas relevantes [18] como variações “lentas” na tensão, devido às variações no diagrama de cargas, e variações “rápidas”, usualmente designadas por *flicker*. Enquanto as primeiras são facilmente estimadas usando métodos de cálculo de trânsito de potências, a estimação das segundas é mais complicada [20], especialmente no caso de envolver redes de distribuição complexas.

Além disso, e embora hajam métodos disponíveis para analisar a gravidade dos *flicker* baseados em medições na rede existente [21], [22] e [23], são possíveis modelizar na fase de projecto as características das turbinas eólicas e da rede de interligação para prever a emissão de *flicker* esperada de modo a evitar a violação dos limites permitidos. Também foram feitos teste e desenvolvidos modelos simples e complexos, dependendo do esquema equivalente utilizado para

representar a rede, para estimar *flicker* sob determinadas condições pré-estabelecidas [24] e [25].

Outros estudos sobre emissão de *flicker* ainda consideram diferentes tipos de turbinas eólicas (velocidade constante e variável), funcionando sob diversas condições do vento (valor médio e intensidades de turbulência) e características da rede e das cargas [26]. Camblong [27], modelizou, simulou e validou modelos para estudar as emissões de *flicker* de turbinas a operarem a velocidade fixa e a velocidade variável. Para isso, estabeleceu estratégias de controlo avançadas, que tendo em conta as causas da emissão de *flicker*, permitiram obter um índice de severidade de emissão de *flicker* baixo. Os resultados mostraram que a emissão de *flicker* foi menor nas turbinas a funcionarem a velocidade variável do que a velocidade fixa.

A emissão de *flicker* de uma turbina eólica pode ser descrita adequadamente pelo seu coeficiente de flicker, C_c . O coeficiente de *flicker* é uma medida normalizada da emissão de *flicker* de uma turbina eólica. Por isso, a medição do valor de *flicker* P_{st} - *short-term flicker severity*, aos terminais de uma turbina eólica ligada a uma rede eléctrica sem qualquer outra fonte de distúrbios corresponde a um coeficiente de *flicker* C_c dado pela expressão:

$$C_c = P_{st} \frac{S_{k,cc}}{S_{ref}} \quad (2.2)$$

onde $S_{k,cc}$ é a potência aparente de curto-circuito aos terminais da turbina e S_{ref} a potência aparente de referência da turbina eólica.

A influência do P_{st} no nível de curto-circuito e no ângulo de fase da impedância da rede é notoriamente muito importante, como seria de prever. Quanto mais “forte” for a rede, menor será a indução de *flicker* pela operação de turbinas eólicas. No caso do ângulo de fase da impedância Φ_{th} , existe um valor mínimo que depende do factor de potência da turbina eólica e da carga no local, [28]. Tande [19] mostrou que o coeficiente de *flicker* para uma determinada

turbina é função da velocidade do vento à altura do eixo da turbina eólica e do ângulo de fase da impedância da rede eléctrica.

Segundo [22] e [23], P_g aumenta aproximadamente de forma linear com a intensidade da turbulência. Até ao valor nominal da velocidade do vento, a emissão de *flicker* também aumenta monotonamente com a velocidade média do vento. A partir desse valor, a característica *stall* do rotor limita as flutuações do binário aerodinâmico, resultando numa redução na emissão de *flicker*. No entanto, é de salientar que a natureza dinâmica do fenómeno de *stall* das pás da turbina induzem binários transitórios significativos mesmo para além da velocidade nominal do vento e por isso poderão ocorrer, na prática, valores de *flicker* superiores aos esperados. Também é de apontar que a operação a velocidade variável reduz significativamente a emissão de *flicker*, melhorando significativamente a qualidade da potência fornecida pela turbina eólica [26].

Contudo, a emissão de *flicker* a partir de uma turbina deve ser limitada de modo a obedecer a condições de serviço. Aplicando a sugestão de [21], estes limites podem exceder durante 1% do tempo.

Uma conclusão importante da análise realizada por Papadopoulos [26] é que a representação das cargas não afecta criticamente o cálculo do índice de *flicker*. As cargas estáticas e dinâmicas produzem coeficientes de *flicker* semelhantes, sendo o nível de cargas activas e reactivas o factor que faz a diferença.

2.4.3. Transitórios

Os transitórios aparecem essencialmente durante o arranque e desligamento de turbinas de velocidade fixa [29] e de outros equipamentos e também em casos de falha de rede [30]. O arranque sequencial de uma turbina de velocidade fixa é feito em dois passos. Primeiro, o gerador é ligado e de modo a evitar a entrada súbita de corrente elevada, é utilizado um suavizador de arranque. Quando o suavizador começa a funcionar e o gerador é ligado à rede, as baterias de condensadores são ligadas. Estas baterias de condensadores são ligadas

directamente à rede sem dispositivos suavizadores. Assim, quando as baterias são conectadas ocorrem picos de corrente.

Os transitórios podem por vezes alcançar valores duas vezes superiores aos valores nominais da corrente e podem afectar substancialmente a tensão numa rede de baixa tensão. Os transitórios de tensão podem perturbar equipamentos sensíveis conectados à mesma parte da rede [31].

A amplitude da corrente produzida pela ligação de condensadores é determinada pela impedância da rede e da capacidade dos condensadores. A frequência dos transitórios pode ser aproximadamente determinada por:

$$f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{1}{LC}} \quad (2.3)$$

onde L é a indutância da rede e C a capacidade dos condensadores [32].

Por forma a melhorar o cálculo das correntes e tensão de ligação, podem ser utilizados modelos apropriados. A simulação de transitórios requer modelos para a rede e também para as turbinas. Os modelos das turbinas eólicas devem incluir os principais componentes eléctricos e modelos mecânicos considerando a flexibilidade nos sistemas de transmissão.

Os modelos aerodinâmicos são necessários para incluir os efeitos do ângulo de inclinação das pás durante o aparecimento de transitórios. Os modelos aerodinâmicos quasi-estáticos podem ser suficientes para a simulação de casos cuja velocidade seja inferior à velocidade nominal, mas quando a velocidade é superior então os efeitos de travagem podem ser significantes como na situação que pode ocorrer que é o caso de falha da rede. Os modelos da turbulência não são necessários para a simulação porque as variações devidas a turbulências são relativamente lentas comparadas com o fenómeno dos transitórios.

No estudo de transitórios, o uso do Electro Magnetic Transient Program (EMTP) torna-se mais adequado uma vez que permite usar parâmetros dependentes da frequência. Em [31] são apresentados os cálculos dos transitórios de arranque de duas turbinas conectadas a uma rede de baixa tensão. Em [30] são

utilizadas as ferramentas de simulação DigSILENT e EMTDC para determinar os transitórios considerando os modelos da rede eléctrica, da turbina eólica (modelo eléctrico e modelo mecânico) e também o modelo aerodinâmico.

2.4.4. Distorção Harmónica e Inter-harmónica

A injeção de uma corrente A.C. com um conteúdo elevado de harmónicos numa rede eléctrica pode causar distúrbios no sinal de tensão. É deste modo que existe uma necessidade de limitar a quantidade de harmónicos e inter-harmónicos de ordem elevada a um nível de modo a que não sejam ultrapassados os limites na forma de onda da tensão.

Uma turbina eólica com um gerador de indução ligado a uma rede eléctrica sem uso de conversores electrónicos de potência não causa uma significativa distorção de harmónicos durante o funcionamento em regime estacionário. Durante a operação de arranque podem ocorrer picos de distorção de curta duração devido ao arranque lento. No entanto, normalmente, estes picos não constituem um problema desde que não ocorram frequentemente e desde que a sua duração seja menor que algumas dezenas de segundos.

Uma turbina eólica com um conversor electrónico de potência, como por exemplo a operar a velocidade variável, produzirá uma quantidade limitada de distorção harmónica durante o seu funcionamento. A distorção pode ser limitada a um nível desejado de modo a respeitar as condições de serviço através da instalação de filtros. O tamanho e o custo dos filtros dependem basicamente da frequência de comutação dos conversores. Normalmente, os conversores que funcionam com frequências de comutação elevadas requerem filtros menos onerosos.

Geralmente, a distorção no sinal de onda da tensão devido a uma corrente de distorção é maior quanto mais fraca for a rede eléctrica. Assim, antes de ligar uma turbina eólica com conversores de electrónica de potência a redes eléctricas fracas, é absolutamente importante assegurar que as emissões de correntes de harmónicos e inter-harmónicos sejam suficientemente limitadas e sugeridas em

[33]. De acordo com estes limites devem ser instalados os filtros necessários.

2.5. Produção de Energia Activa e Reactiva

Actualmente, uma das mais importantes e economicamente viáveis fontes de energia renováveis é a energia eólica. Juntamente com a produção energia activa, há absorção de energia reactiva e os parâmetros da rede ao qual está conectado o parque eólico podem exceder os limites permitidos. Do ponto de vista do produtor, quanta mais energia for injectada na rede, maior serão os lucros retirados do parque. Consequentemente, será muito interessante arranjar a melhor forma de explorar a velocidade do vento que incide em cada pá dos aerogeradores.

Existem muitas referências bibliográficas, algumas referenciadas a seguir, relacionadas com as capacidades dos aerogeradores e onde muitas estratégias têm sido desenvolvidas nos últimos dez anos na tentativa de extrair a máxima energia a partir do vento.

A produção de energia activa deve ser mantida no nível óptimo e a energia reactiva deve ser mantida para o valor fixado pela companhia eléctrica. Tapia em [34], [35] e [36], entre outras publicações, sugere que no Gerador de Indução Duplamente Alimentado a energia activa e a energia reactiva devem ser reguladas separadamente. Isto significa que a produção de energia reactiva deve ser a mais precisa possível de acordo com os valores fixados pela companhia eléctrica, e ao mesmo tempo, a capacidade de produção de energia activa deve ser mantida próxima do valor óptimo para cada velocidade do vento.

O controlo da energia activa e da energia reactiva é baseado no controlo vectorial orientado pelo fluxo do estator, sendo possível usar dois *loops* com controladores separados para a energia activa e para a energia reactiva. Mesmo sendo possível regular a energia activa, actualmente o principal objectivo nesta área, é obter a máxima energia activa a partir da velocidade instantânea do vento, de acordo com a curva cúbica típica de Potência produzida vs Velocidade do vento. Por isso, este tipo de produção mantém-se sempre no máximo.

A principal contribuição de Tapia foi o desenvolvimento e a aplicação de controlo para a regulação da energia reactiva num parque eólico. Normalmente, os parques eólicos trabalhavam com um factor de potência unitário porque não era importante gerar ou consumir energia reactiva. Actualmente a contribuição dos parques eólicos para manter os parâmetros da rede de transporte/distribuição está-se a tornar mais importante e as companhias de electricidade fixam os valores da energia reactiva para os parques eólicos.

Também preocupado com a energia reactiva, Wiik [37] mostrou que um factor importante no projecto de parques eólicos são as perdas. Quando um grande parque eólico é projectado, um factor importante a ser estudado é o impacto que o parque eólico tem nas perdas externas na rede e também nas perdas internas da rede do parque. Há dois aspectos importantes a salientar que são: a importância da compensação da energia reactiva e as consequências de utilizar a máxima capacidade da rede. Quando é utilizada a capacidade máxima da rede externa, as perdas na rede aumentam, sendo estas dependentes do número de aerogeradores, assim como, das características da energia reactiva do parque eólico.

Os geradores de velocidade variável, onde a energia reactiva pode ser controlada com precisão, proporcionam as melhores características eléctricas e também permitem uma maior capacidade do parque eólico. As estratégias de compensação de energia reactiva também influenciam as perdas quer na rede interna do parque quer na exterior. Quando são usados geradores de indução, e não é feita compensação da energia reactiva, todas as perdas aumentam significativamente.

2.6. Controlo de Sistemas de Conversão de Energia Eólica

Existem muitas estratégias de controlo para turbinas a operar a velocidade variável. Tendo como objectivo o aproveitamento máximo da energia do vento, pode ser definida a partir da característica Binário-velocidade do vento uma Zona de Funcionamento Seguro – Safe Operation Area (SOAR) – limitada pelo Binário, velocidade e potência [38]. A partir desta área podem ser estabelecidas várias

Pela Figura 2.2 podemos concluir que o funcionamento a velocidade constante é o caso de DG e o funcionamento a velocidade variável com máximo Coeficiente de Potência C_p é ao longo da curva 0F. Em F é atingido o limite da potência de modo que a operação ao longo de FB, mantendo a potência máxima, é possível se for reduzido o Binário e cujo limite *pitch* é alcançado em B. Se apenas o binário e a velocidade limitam o funcionamento da turbina então a operação para um valor máximo de C_p até E seria possível com algum aperfeiçoamento da captura da energia do vento.

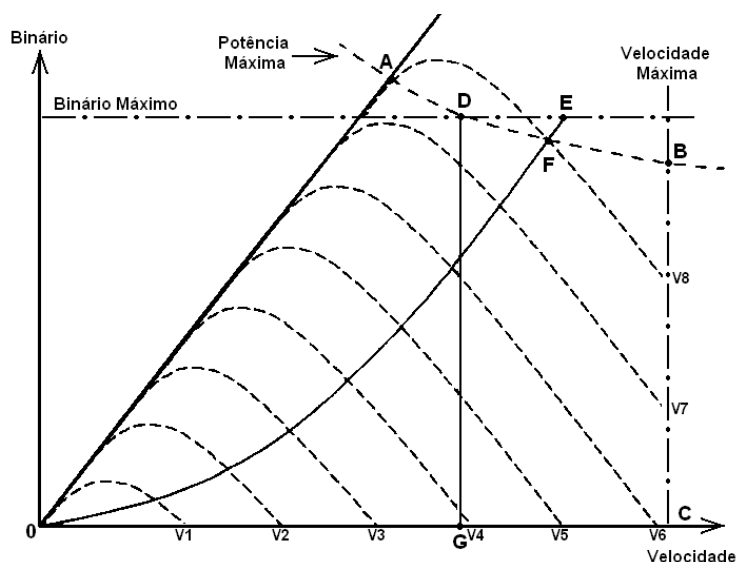


Figura 2.2: Característica de uma Turbina Eólica.

Quando um limite de operação é atingido deve evitar-se que o binário aumente mais com a velocidade do vento que usualmente é feito por controlo do ângulo de *pitch*, a seguir simplesmente designado de controlo *pitch*. No entanto, alguns fabricantes recorrem ao limite *yaw* (desvio da direcção do vento). No controlo *pitch* pode ser obtida a potência máxima usando técnicas apropriadas de controlo. Este tipo de controlo das pás tem sido utilizado de forma a reduzir a sobrecarga da turbina na presença de elevadas velocidades do vento. As técnicas utilizadas para o controlo *pitch* ainda podem ser classificadas de passivas e activas

[39].

Na regulação passiva, as pás da turbina são bloqueadas a uma determinada velocidade do vento superior à sua velocidade nominal de modo a mantê-la constante e igual ao valor nominal. Alguns sistemas possuem actuadores hidráulicos ou actuadores eléctricos independentes em cada pá. No controlo activo, o ângulo das pás é ajustado continuamente baseado nos parâmetros medidos para produzir uma determinada potência. Em alguns casos verifica-se que o controlo activo pode tornar o sistema instável durante condições de vento elevado.

Apesar disso, a maioria dos projectos de sistemas mecânicos de velocidade variável usam uma interface de electrónica de potência e técnicas modernas de controlo vectorial [38] que permitem que o binário do gerador seja controlado em função da velocidade do rotor.

Outros autores usam o conversor/inversor para controlar as flutuações na tensão, frequência e na potência de uma turbina eólica. O conversor converte as flutuações na saída do gerador para uma potência DC sendo depois convertida pelo inversor para uma saída AC em condições para alimentar as cargas. Para controlar o sinal de saída do inversor é usado um pulso modulado em largura – *Pulse Width Modulation* – PWM onde o controlo é conseguido por ajuste da largura do pulso.

Sharma [39] e Battista [40] utilizaram modelos dinâmicos de controlo para garantir a estabilidade e regulação da potência fornecida por turbinas eólicas. O primeiro utilizou o controlo *pitch* activo para reduzir as flutuações da saída do gerador e um controlo do conversor/inversor para suavizar a tensão e a potência de saída para uma ligação mais eficiente à rede. A combinação destes dois cenários de controlo resultou numa redução das flutuações da tensão e da potência conduzindo a um melhoramento significativo na qualidade da potência. O segundo propôs uma estratégia de controlo dinâmico de modo deslizante – *dynamic sliding mode control*. Battista define duas regiões de operação, a região normal e a região *stall*, dependendo do limite óptimo da velocidade do vento e que podem ser mostradas, respectivamente, pela região à direita e à esquerda da curva

OE da Figura 2.2. Assim, a metodologia de controlo tem a propriedade de impor um sinal de controlo necessário para o sistema adaptar-se de acordo com velocidade do vento.

Outros autores utilizaram outras técnicas para aumentar a performance dos sistemas de conversão de energia eólica. Por exemplo, Zhang [41] propôs um conversor matricial directo para controlar as correntes do rotor de um Gerador de Indução Duplamente Alimentado. Assim, a captura da energia máxima a partir do vento é obtida por regulação da corrente do rotor usando um algoritmo de controlo vectorial do fluxo do estator – *stator flux vector control* – conjugado com um conversor matricial directo AC-AC. Também mostrou que este esquema é possível e praticável para produção de energia eólica e, além disso, apresenta algumas vantagens tais como o facto de o conversor de potência não requerer dispositivos de armazenamento volumosos e onerosos e, além disso, o conversor utilizado ser mais simples do que os que normalmente são utilizados de dois estágios de conversão.

Também existem trabalhos que descrevem estratégias de controlo tecnicamente mais aperfeiçoadas, tais como Mullane [42] onde é usado um controlo adaptativo e Chedid [43] onde é usado um controlo inteligente baseado na lógica *fuzzy* em conjugação com redes neuronais. No primeiro caso, o autor desenvolveu um controlador orientado pelo campo e escolheu uma lei adaptativa para estimar o valor incerto e variável do binário. Após aplicar um controlador para o sistema linearizado baseado na teoria do controlo linear concluiu pelos resultados obtidos que este tipo de controlo é eficiente e que permite obter a captura máxima da energia capturada.

No segundo caso, a estratégia para o controlo proposta consiste em dois *loops*: um *loop* interno de excitação para regulação da tensão e do binário e um *loop* externo para maximizar a captura de energia e aumentar a robustez do sistema. No *loop* de excitação foi usado um modelo de controlador PI convencional de primeira ordem. Mas, quando o ponto de operação muda durante o funcionamento normal, ou se forem usadas turbinas de velocidade variável, o

controlador PI não consegue fornecer um amortecimento suficiente ou uma performance aceitável. Para combater esta deficiência o autor introduziu então um regulador de tensão e de potência *fuzzy*. Para o *loop* externo, sugere um controle adaptativo *pitch* cuja função é ajustar o ângulo *pitch* das pás de modo a maximizar a captura de energia e reduzir os esforços mecânicos. Mas, uma vez que as redes neurais oferecem mais vantagens do que os controladores adaptativos não lineares em termos de robustez, performance, capacidades de aprendizagem e maior flexibilidade, o autor sugere o uso de redes neurais para gerar o valor do Coeficiente de Potência C_p . Assim, mostrou que as redes neurais juntamente com os algoritmos de controle *fuzzy* podem ser implementados para o controle em tempo real de sistemas de conversão de energia eólica. Deste modo, o sistema implementado mostrou-se mais robusto e com uma performance superior aos sistemas que usam métodos de controle tradicionais. Uma estratégia idêntica à anterior, também baseada em dois níveis de controle, foi sugerida por Rodriguez-Amenedo [44].

Como já foi referido, a energia capturada por turbinas eólicas não depende apenas das condições específicas do vento verificadas no local onde as turbinas estão instaladas mas também depende da estratégia de controle adoptada para a turbina. Na evolução da tecnologia das turbinas eólicas durante a última década, muitas estratégias diferentes de controle foram desenvolvidas das quais algumas foram indicadas acima. Infelizmente, em determinadas publicações recentes existe alguma inconsistência nos resultados apresentados entre os diversos conceitos. Por exemplo, a referência Carlson [45] diz que a operação a velocidade variável produz um ganho em energia entre 2% e 7% do que a velocidade fixa. Ao contrário, Idan [46] assegura que esse ganho é cerca de 20% e finalmente Zinger [47] diz que é 38%. Esta diferença entre os valores é de cerca de um terço da energia capturada. Por isso, torna-se evidente que para os fabricantes/exploradores o risco da relação ganho/custo não seja conhecido com grau elevado de precisão.

Face a esta incerteza, Hoffmann [48] explica que as diferenças encontradas na literatura devem-se à consideração de diferentes condições e mostram a influência de algumas das condições mais importantes e dos principais parâmetros

de projecto na captura da energia eólica. Para tal, definiu vários conceitos para o controlo aerodinâmico (*stall* activo, *stall* passivo e *pitch*) e combinou-os com diferentes tipos de geradores (assíncronos, síncronos) a operar a diferentes velocidades (velocidade fixa, duas velocidades e velocidade variável). No mesmo estudo ainda considerou as perdas nas engrenagens, no gerador e no conversor, quando aplicadas, para os diferentes tipos de geradores.

2.7. Conclusões

Neste capítulo foi apresentada uma síntese bibliográfica do estado actual das tecnologias dos sistemas de produção de energia eólica, em termos de investigação científica e desenvolvimento técnico. Também foram apresentados as principais preocupações destes sistemas no que diz respeito à qualidade e disponibilidade da energia fornecida.

Verifica-se que o uso de técnicas de controlo com Redes Neurais não tem sido amplamente utilizado. Como foi referido atrás, apenas Chedid [43] apresentou um sistema de controlo baseado em Redes Neurais para gerar um valor do Coeficiente de Potência C_p . É neste contexto que esta tese irá contribuir, indo mais além, pela utilização das Redes Neurais para gerar os parâmetros de controlo de referência do gerador.

Depois de ser feito o enquadramento da tese no panorama actual e o estado da arte nos dois primeiros capítulos torna-se necessário prosseguir para o caso de estudo. Neste contexto é fundamental descrever e caracterizar os diversos subsistemas que constituem o sistema de produção, e em concreto das unidades de produção, que irão ser objectivo de estudo nesta tese.

Capítulo 3

Caracterização e Modelização do Sistema

3.1. Turbinas Eólicas

As Turbinas Eólicas são máquinas que transformam a energia cinética dos ventos em energia mecânica. Esta pode ser usada sob a forma de energia mecânica ou pode ser transformada em energia eléctrica, através do acoplamento de um gerador eléctrico ao eixo da turbina (rotor).

O modelo aerodinâmico da turbina eólica é uma parte comum nos modelos de sistemas de conversão de energia eólica independentemente do mecanismo de conversão. Esta representação é necessária uma vez que o modelo aerodinâmico permite obter um acoplamento entre a velocidade de rotação e o binário mecânico do rotor da turbina.

Nos mecanismos de variação do ângulo de passo (também designado por *pitch*), esses modelos fornecem uma relação entre o ângulo de *pitch* e a potência mecânica do rotor da turbina como veremos a seguir.

3.1.1. Aerodinâmica da Pá da Turbina

A geometria das pás do rotor, cuja secção recta tem a forma de um perfil alar, determina a quantidade de energia que é extraída para cada velocidade do vento. A Figura 3.1 ilustra as forças presentes num elemento do perfil alar da pá da turbina.

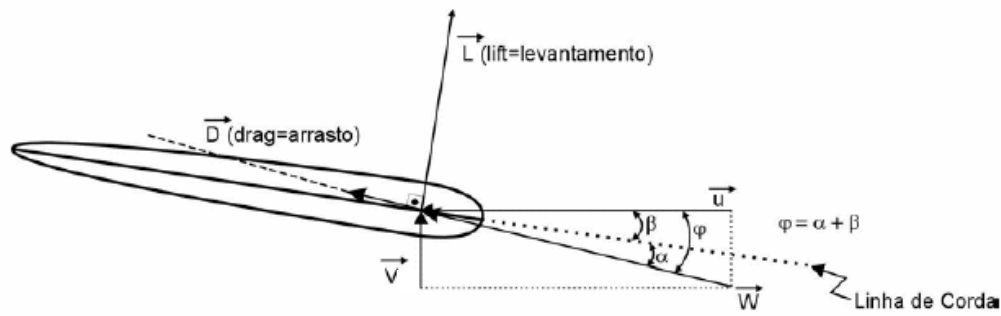


Figura 3.1: Sistema de forças num perfil alar [49].

Na Figura 3.1 Podemos identificar as grandezas intervenientes, que são as seguintes:

- O vector *velocidade relativa* do vento $\vec{W}$ que actua o elemento de pá, a qual resulta de duas componentes: a *velocidade do vento* $\vec{v}$ e a *velocidade tangencial* da pá $\vec{u}$.
- O *ângulo de ataque* α , definido como sendo o ângulo entre a linha que une os bordos de entrada e de saída do perfil (*linha de corda*) e a velocidade relativa; o *ângulo de passo* β (*pitch*), que é o ângulo entre o plano de rotação da pá e a linha de corda e; o *ângulo do escoamento* φ , tal que $\beta + \alpha = \varphi$.
- Duas forças: uma, que é sempre na direcção da velocidade relativa do vento, designa-se por *arrasto* $\vec{D}$ (*Drag*); e outra que é perpendicular, causada pelo efeito Bernoulli, designada por *sustentação* $\vec{L}$ (*Lift*).
- O vector força $\vec{F}$ pode, igualmente, ser decomposto na direcção do plano de rotação e na direcção perpendicular, obtendo-se a componente que contribui para o movimento da pá $\vec{N}$, e a componente que contribui para o binário motor $\vec{T}$, ver Figura 3.2.

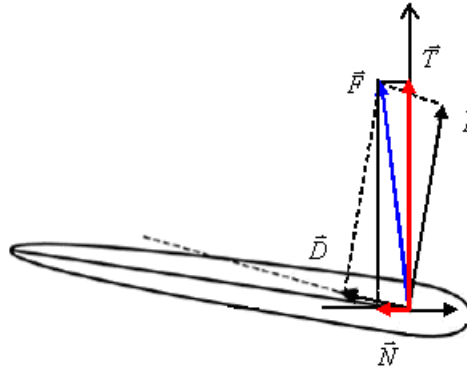


Figura 3.2: Decomposição das forças nas suas componentes.

Os valores das forças $\vec{N}$ e $\vec{T}$ podem ser, respectivamente, calculados por:

$$\begin{cases} N = L \sin \varphi - D \cos \varphi \\ T = L \cos \varphi + D \sin \varphi \end{cases} \quad (3.1)$$

É desejável que o desempenho da pá possa ser descrito, independentemente do seu tamanho e da velocidade com que está animada: por isso, é usual dividir a força de sustentação $\vec{L}$ e a força de arrastamento $\vec{D}$ pela força experimentada pela secção recta A de uma pá, animada da velocidade do vento v . Assim, obtém-se, respectivamente, o *coeficiente de sustentação* C_L e o *coeficiente de arrasto* C_D :

$$\begin{cases} C_L = \frac{L}{\frac{1}{2} \rho v^2 A} \\ C_D = \frac{D}{\frac{1}{2} \rho v^2 A} \end{cases} \quad (3.2)$$

em que ρ é a massa específica do ar.

Normalmente, apresentam-se as características das pás através das representações gráficas $C_L = f(\alpha)$ e $C_D = f(\alpha)$. Estas representações são obtidas

através de ensaios e medidas exaustivas efectuadas em túnel de vento e devem ser fornecidas pelo fabricante.

De um modo geral, o comportamento dos perfis alares em função do ângulo de ataque α pode ser dividido em três zonas de funcionamento, conforme se mostra na Tabela 3.1.

Tabela 3.1: Regimes de funcionamento dos perfis alares [50].

Ângulo de ataque	Regime
$-15^\circ < \alpha < 15^\circ$	Linear
$15^\circ < \alpha < 30^\circ$	Desenvolvimento de perda (<i>stall</i>)
$30^\circ < \alpha < 90^\circ$	Travão

Para os perfis normalmente utilizados em turbinas eólicas, verifica-se que o coeficiente de sustentação atinge o seu máximo para um ângulo de ataque de cerca de 10 a 15 °, a partir do qual decresce. O coeficiente de arrastamento mantém-se aproximadamente constante até se atingir o ângulo de ataque para o qual o coeficiente de sustentação atinge o seu máximo; para valores de α superiores, o coeficiente de arrastamento sofre um crescimento acentuado. No entanto, este coeficiente é mais difícil de calcular, porque depende, fortemente, da rugosidade da pá e de efeitos de fricção.

A fim de extrair do vento a máxima potência possível, a pá deve ser dimensionada para trabalhar com um ângulo de ataque tal, que a relação entre a sustentação e o arrastamento seja máxima.

3.1.2. Modelo Aerodinâmico

Além do exposto, se o rotor rodar devagar, é pequena a perturbação induzida no escoamento pelo movimento do rotor; ao contrário, se o rotor rodar muito depressa, o vento encara-o como uma parede. Daqui resulta que a velocidade de rotação deverá ser compatibilizada com a velocidade do vento, de forma a obter a máxima eficiência da conversão, isto é, um coeficiente de potência

C_P máximo.

A relação entre a velocidade linear (m/s) da extremidade da pá da turbina de raio R (m), a rodar à velocidade w_T (rad/s), e a velocidade do vento v (m/s) é caracterizada por um factor adimensional, conhecido por *razão de velocidades na pá* ou *velocidade específica na ponta da pá* – λ (*Tip Speed Ratio*).

$$\lambda = \frac{w_T R}{v} \quad (3.3)$$

A Figura 3.3 mostra uma curva experimental de variação do coeficiente de potência C_P com λ para uma turbina moderna. Pode observar-se que para manter o valor de C_P no máximo é necessário que a velocidade do rotor acompanhe as variações da velocidade do vento.

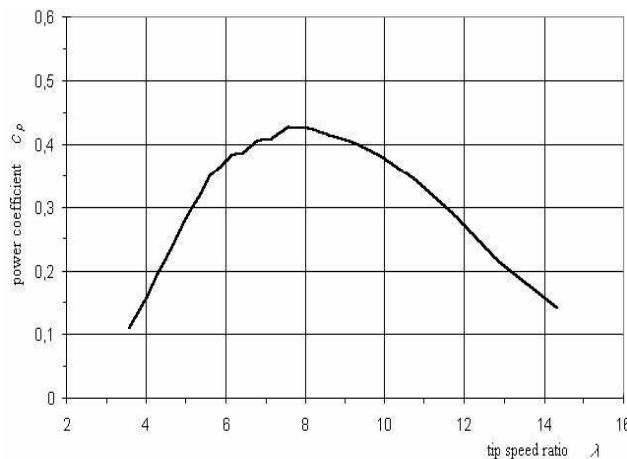


Figura 3.3: Variação de C_P com λ [51].

O estudo teórico do comportamento dos aerogeradores ganha se estiverem disponíveis expressões analíticas que descrevam o comportamento das grandezas relevantes. O cálculo da eficiência da turbina requer o uso da teoria elementar das pás [52] e [53]. Isto requer um conhecimento mais profundo de aerodinâmica e o cálculo pode ser algo mais complexo. Para a variação de C_P com λ , uma das expressões analíticas mais reportadas na literatura é [54] e [55]:

$$C_p = 0,22 \left(\frac{116}{\lambda_i} - 5 \right) e^{-\frac{12,5}{\lambda_i}} \quad (3.4)$$

$$\frac{1}{\lambda_i} = \frac{1}{\lambda} - 0,035 \quad (3.5)$$

A tarefa de regulação pode ser efectuada por meios passivos, isto é, desenhando o perfil das pás de modo a que entrem em perda aerodinâmica – *stall* – a partir de determinada velocidade do vento, sem necessidade de variação do passo, ou por meios activos, isto é, variando o passo das pás – *pitch* – do rotor.

As turbinas *stall* têm as pás fixas, ou seja não rodam em torno de um eixo longitudinal. Relativamente ao esquema da Figura 3.3, o ângulo de passo β é constante. A estratégia de controlo de potência assenta nas características aerodinâmicas das pás do rotor que são projectadas para entrar em perda a partir de uma certa velocidade do vento.

Uma vez que as pás estão colocadas a um dado ângulo de passo fixo, quando o ângulo de ataque aumenta para além de um certo valor, a componente de sustentação diminui, ao mesmo tempo que as forças de arrastamento passam a ser dominantes. Nestas condições, a componente $\vec{T}$ da força que contribui para o binário diminui: diz-se, neste caso, que a pá entrou em perda (de sustentação). Note-se que o ângulo de ataque aumenta quando a velocidade do vento aumenta, porque o rotor roda a uma velocidade constante ($\vec{u}$ é constante na Figura 3.1).

As turbinas *pitch* têm a possibilidade de rodar a pá em torno do seu eixo longitudinal, isto é, variam o ângulo de passo das pás, β . Nestas turbinas o sistema de controlo do passo da pá ajusta o ângulo β , pelo que é possível controlar o valor de C_p .

Têm sido desenvolvidas várias teorias e métodos para determinar a eficiência da turbina. Uma equação genérica baseada nas características da turbina e que pode ser utilizada como o modelo matemático para calcular o coeficiente de potência C_p , [52] e [56], é:

$$C_p(\lambda, \beta) = C_1 \left(\frac{C_2}{\lambda_i} - C_3 \beta - C_4 \right) e^{-\frac{C_5}{\lambda_i}} + C_6 \lambda_i \quad (3.6)$$

com:

$$\frac{1}{\lambda_i} = \frac{1}{\lambda + 0,08\beta} - \frac{0,035}{\beta^3 + 1} \quad (3.7)$$

Onde os coeficientes C_i podem tomar os seguintes valores, que foram utilizados no caso em estudo: $C_1=0.5176$, $C_2=116$, $C_3=0.4$, $C_4=5$, $C_5=21$, $C_6=0.0068$.

No entanto, uma das expressões mais referidas na literatura da especialidade e resultante da anterior é a seguinte [54]:

$$C_p = 0,22 \left(\frac{116}{\lambda_i} - 0,4\beta - 5 \right) e^{-\frac{12,5}{\lambda_i}} \quad (3.8)$$

O controlo do ângulo de passo só se encontra activo quando a turbina entra na zona de potência constante, ou seja, para valores da velocidade do vento superiores à velocidade nominal do vento. Para estas velocidades do vento, o sistema de controlo do passo actua de modo a que o binário motor produzido corresponda à potência nominal, isto é, provoca artificialmente, através de uma adequada inclinação da pá, uma diminuição do binário.

Na zona de velocidades do vento inferiores à velocidade nominal do vento, o ângulo de passo é mantido no valor zero. Teoricamente seria possível manter o valor de λ no seu valor óptimo (valor de λ para o qual C_p é máximo), controlando a velocidade do rotor da turbina em função da velocidade do vento, através do controlo do ângulo do passo das pás do rotor; contudo, verifica-se que o tempo de resposta do sistema de controlo do passo das pás do rotor é demasiadamente elevado para acompanhar as variações de velocidade do vento. Na prática, força-se a variação da velocidade do rotor da turbina, impondo um binário de carga à turbina que a conduza à rotação a uma velocidade tal que

mantenha λ no valor óptimo. É este o princípio de funcionamento dos geradores eólicos de velocidade variável.

É de salientar que o valor máximo do coeficiente de potência de qualquer turbina não pode exceder o limite teórico superior de $C_p^{\max} = 16/27 \approx 0.59$. Este valor é uma aproximação teórica e designado por Limite de Betz (1926) e é alcançado no funcionamento de turbinas em regime estacionário. Usualmente, a curva de C_p versus λ é fornecida pelos fabricantes de turbinas eólicas. Esta curva dá uma representação suficientemente detalhada da aerodinâmica da turbina. Desde que a velocidade do vento, v , seja estacionária e a velocidade da turbina w_T não varie muito e rapidamente, o funcionamento da turbina é apenas caracterizado por pequenos desvios da posição de equilíbrio. Esta consideração é satisfatória do ponto de vista de investigação da estabilidade do sistema e estudo de qualidade, sendo a potência dada pela expressão

$$P_{ae} = \frac{1}{2} \rho \pi R^2 v^3 C_p(\lambda) \quad (3.9)$$

Na maior parte dos estudos de estabilidade de tensão, as turbinas controladas são modelizadas usando a curva $C_p(\lambda, \beta)$. Isto pode ser entendido como um conjunto de curvas de $C_p(\lambda)$ da respectiva turbina para diferentes valores do ângulo de *pitch* β . Cada ponto de funcionamento de $C_p(\lambda)$ com um determinado β representa uma situação de equilíbrio. Assim, a representação das curvas de $C_p(\lambda, \beta)$ é baseada na consideração de que a turbina está em equilíbrio em qualquer ponto do seu funcionamento. Nestas considerações, a potência mecânica é dada pela expressão anterior mas usando $C_p(\lambda, \beta)$ em vez de $C_p(\lambda)$, ou seja:

$$P_{ae} = \frac{1}{2} \rho \pi R^2 v^3 C_p(\lambda, \beta) \quad (3.10)$$

A Figura 3.4 apresenta a curva de C_p para alguns valores do ângulo de

pitch β da turbina utilizada na simulação do caso em estudo. Pode verificar-se que quando o ângulo de *pitch* aumenta, a eficiência aerodinâmica da turbina diminui. Existe um factor λ para o qual o coeficiente de potência C_p é máximo. Esse valor, designado de nominal, é obtido para um ângulo de zero graus.

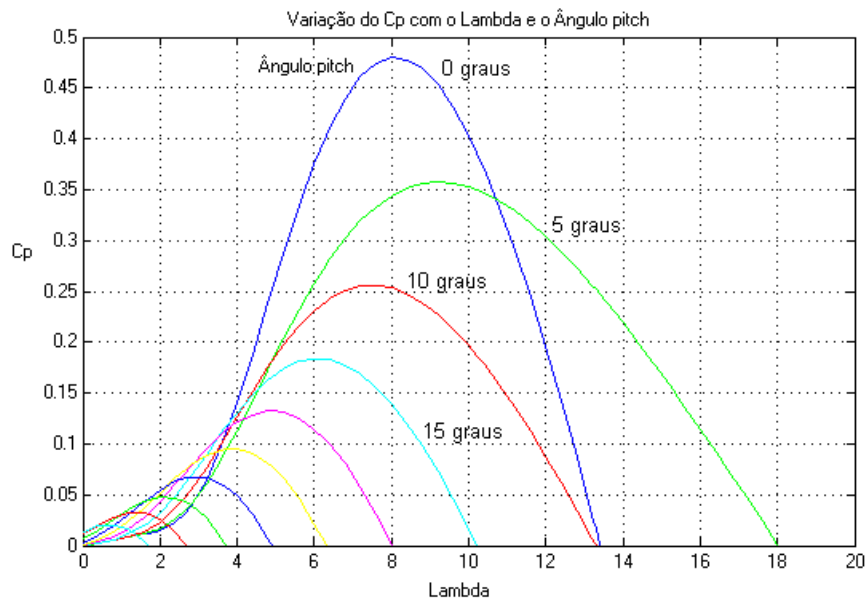


Figura 3.4: Variação de C_p com λ e β .

Por outro lado, a variação do ângulo de passo permite também a redução dos esforços de fadiga com vento muito forte, porque, nessa situação, a pá apresenta uma menor superfície frontal em relação ao vento.

As turbinas *pitch* permitem que o processo de arranque seja assistido, porque o ângulo de passo pode ser variado de modo a conseguir um embalamento do rotor até à velocidade de rotação nominal. A travagem também é melhorada, porque se o passo das pás for tal que $\beta = 90^\circ$ (posição de bandeira), o rotor move-se lentamente (Figura 3.1), e o sistema de travagem aerodinâmica pode ser dispensado.

Como a turbina de pás fixas não tem binário de arranque suficiente torna-se então necessário dispor de um motor auxiliar de arranque ou, então, usar o próprio gerador a funcionar como motor para trazer o rotor até à velocidade adequada. Nestas turbinas, no processo de paragem não é possível colocar as pás

na posição de bandeira, pelo que é exigido um sistema complementar de travagem por meios aerodinâmicos.

3.1.3. Implementação - Diagrama de Blocos

A formulação matemática apresentada para a caracterização da potência aerodinâmica da turbina resultou num bloco do sistema, descrito pela equação 3.10. Este bloco implementa um modelo da turbina eólica com *ângulo de pitch* variável.

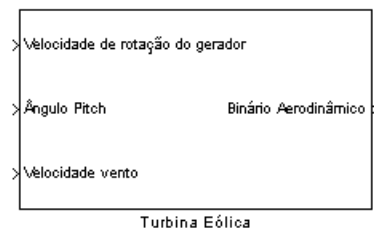


Figura 3.5: Bloco da aerodinâmica da turbina.

O Binário aerodinâmico relaciona-se com a potência pela equação:

$$T_{ae} = \frac{P_{ae}}{\omega_T} \quad (3.11)$$

O diagrama de blocos correspondente ao bloco da turbina eólica é o apresentado na Figura 3.6, onde o bloco de implementação das Equações 3.6 e 3.7, relativas ao cálculo do coeficiente de potência $C_p(\lambda, \beta)$ da turbina, em função do λ e do *ângulo pitch*, é apresentado na Figura 3.7.

O coeficiente de potência é função da velocidade do vento, da velocidade de rotação do eixo e do *ângulo de pitch*. O $C_p(\lambda, \beta)$ atinge o valor máximo quando o *ângulo de pitch* é zero graus, como se pode verificar pela característica do coeficiente de potência da turbina já foi apresentada na Figura 3.4.

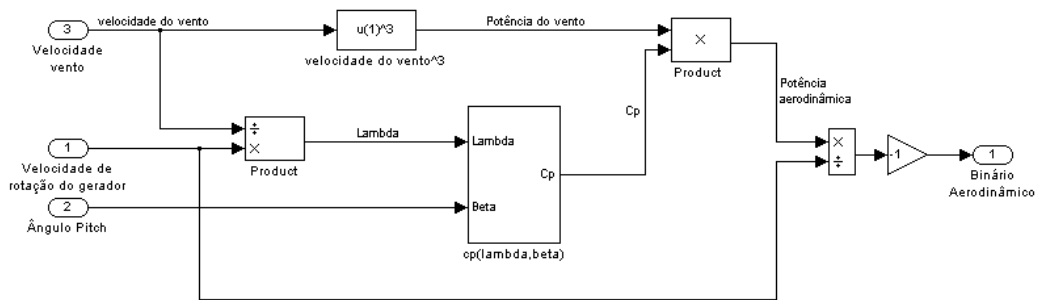


Figura 3.6: Diagrama de bloco da Turbina Eólica.

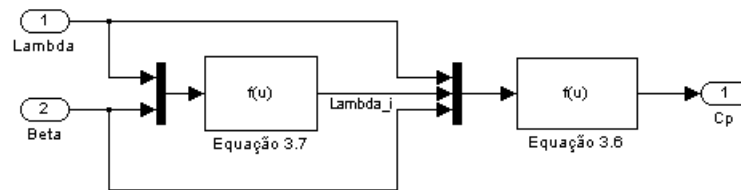


Figura 3.7: Blocos de implementação do coeficiente de potência C_p da turbina.

A inércia da turbina não foi considerada neste bloco sendo considerada no modelo apresentado no ponto 3.2.

3.1.4. Resultados

A seguir são apresentados alguns sinais de validação do modelo formulado e descrito nos pontos anteriores para a turbina, considerando um *ângulo de pitch* de 0 graus, um Momento de Inércia do grupo turbina/gerador J de 1000 Kg.m², uma velocidade do vento inicial constante e igual a 10 m/s e uma velocidade de rotação do eixo super-síncrona de 1.1 pu.

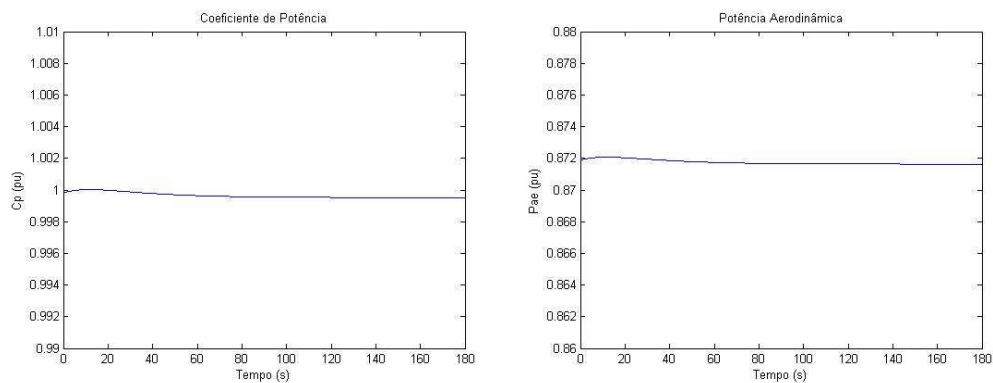


Figura 3.8: Potência Aerodinâmica e Coeficiente de Potência da Turbina, em pu.

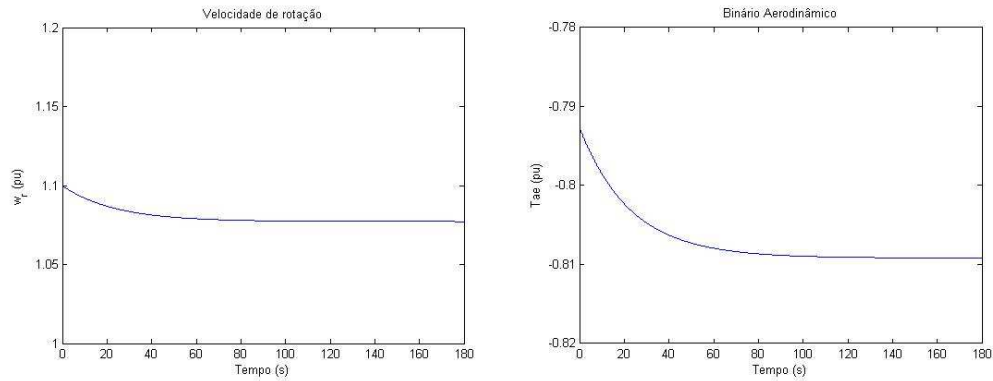


Figura 3.9: Binário Aerodinâmico da Turbina e Velocidade de rotação do eixo da turbina, em pu.

Pelos sinais apresentados verifica-se que a inicialização do modelo da turbina atinge o regime permanente próximo dos 3 minutos para as condições iniciais descritas e para os parâmetros do sistema apresentados no anexo B.

De seguida foi aplicado uma variação de um grau ao Ângulo de *pitch* no instante de 120 segundos, e foram registados os seguintes sinais para a potência capturada e para o Coeficiente de potência.

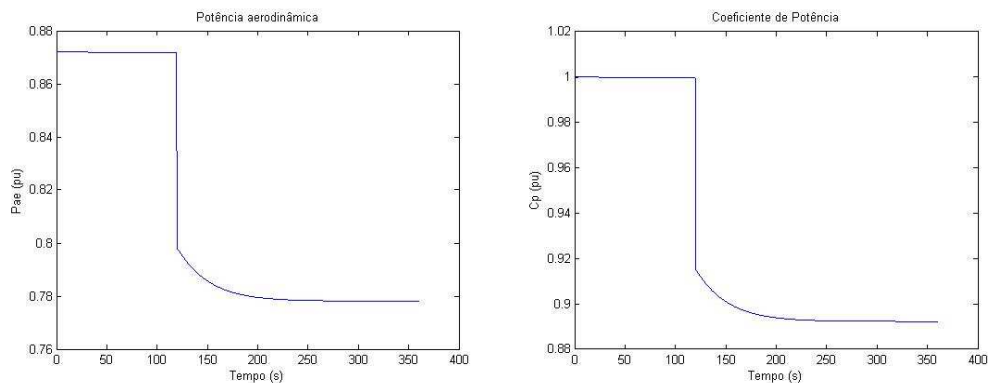


Figura 3.10: Potência Aerodinâmica e Coeficiente de Potência da Turbina, em pu, para uma variação do Ângulo de *Pitch*.

Verificou-se uma diminuição na potência de 0,11 pu, cerca de 200 KW, correspondendo a uma variação da potência e do Coeficiente de potência de 10 % relativamente ao valor inicial. Uma vez que o gerador já está a funcionar próximo da velocidade de sincronismo, apenas foi variado um grau permitindo ao gerador ainda funcionar acima da velocidade de sincronismo.

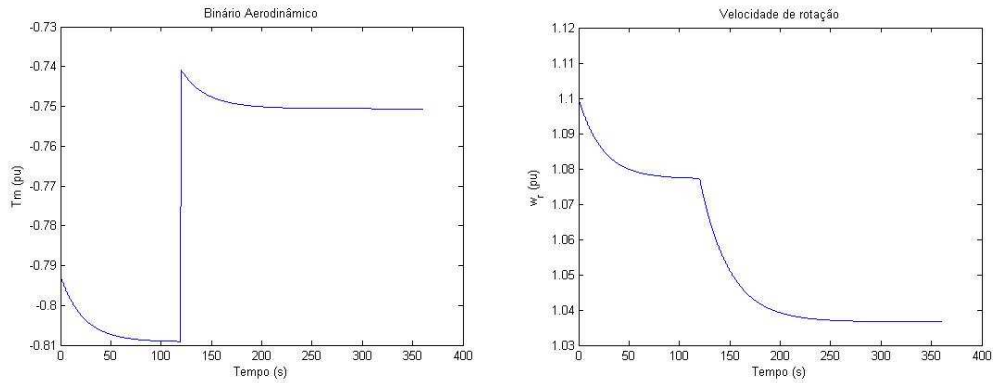


Figura 3.11: Binário Aerodinâmico da Turbina e Velocidade de rotação do eixo da turbina, em pu, para uma variação do Ângulo de *Pitch*.

Como seria de esperar a Velocidade de rotação e a Potência aerodinâmica diminuiram uma vez que a inclinação das pás e a aerodinâmica destas travam o movimento de rotação da turbina, mantendo-se a máquina ainda a funcionar como gerador, mas próximo da velocidade de sincronismo, ou seja $n_r > n_s$.

3.2. Trem Mecânico - Engrenagens

No modelo mecânico, Figura 3.12, é dado mais ênfase às partes da estrutura dinâmica da turbina que mais contribuem para as interferências com a rede. Assim, numa primeira abordagem, apenas será considerado o trem mecânico, uma vez que é esta parte da turbina que tem mais influência nas flutuações da potência entregue à rede [57].

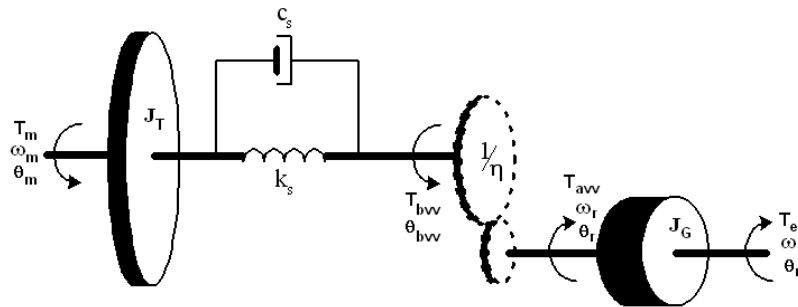


Figura 3.12: Modelo do sistema mecânico mais engrenagens da Turbina Eólica.

O trem mecânico converte o binário aerodinâmico do rotor da turbina T_m num binário com baixa velocidade do veio T_{bv} , que é escalado por intermédio de

uma engrenagem mecânica para um binário com alta velocidade do veio T_{avv} . O modelo do trem mecânico é um modelo típico de duas massas, conectadas por veio flexível com baixa velocidade, sendo modelizado por uma constante de rigidez k_v e um coeficiente de amortecimento c_v . Uma das duas massas usadas no modelo representa a inércia elevada da turbina, i. é., as pás e o eixo da turbina, J_T ; e a outra massa representa a inércia mais pequena representando o gerador J_G .

Além disso, também é incluída no modelo uma engrenagem ideal com razão de transformação $1/\eta$. A relação entre os binários dos veio a alta e baixa velocidade é assumida constante e igual a:

$$T_{avv} = \frac{T_{bvv}}{\eta} \quad (3.12)$$

Apesar do modelo apresentado conter a inércia do gerador, esta é implementada no modelo do gerador descrito no ponto a seguir, enquanto as restantes partes do modelo mecânico são descritas pelas equações dos espaços de estado.

Para o modelo [57] consideram-se as seguintes variáveis de entrada $\bar{u}$

$$\bar{u} = \begin{bmatrix} \omega_r \\ T_m \end{bmatrix} \quad (3.13)$$

, variáveis de saída $\bar{y}$

$$\bar{y} = \begin{bmatrix} T_{avv} \\ \theta_m \\ \omega_m \end{bmatrix} \quad (3.14)$$

e variáveis de estado $\bar{x}$

$$\bar{x} = \begin{bmatrix} \theta_k \\ \theta_m \\ \omega_m \end{bmatrix} \quad (3.15)$$

onde θ_k é a diferença angular entre os dois terminais do veio flexível, i.é.,

$$\theta_k = \theta_m - \theta_{bv} = \theta_m - \frac{\theta_r}{\eta} \quad (3.16)$$

Posto isto, as equações do espaço de estados do modelo mecânico são:

$$\dot{\bar{x}} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 \\ -\frac{k_v}{J_T} & 0 & -\frac{c_v}{J_T} \end{bmatrix} \bar{x} + \begin{bmatrix} \frac{1}{\eta} & 0 \\ 0 & 0 \\ \frac{c_s}{\eta J_T} & \frac{1}{J_T} \end{bmatrix} \bar{u} \quad (3.17)$$

$$\bar{y} = \begin{bmatrix} \frac{k_v}{\eta} & 0 & \frac{c_v}{\eta} \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \bar{x} + \begin{bmatrix} -\frac{c_v}{\eta^2} & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \bar{u} \quad (3.18)$$

O coeficiente de amortecimento do veio é dado pela expressão:

$$c_v = 2\xi\sqrt{k_v J_T} \quad (3.19)$$

onde ξ é a taxa de amortecimento que pode ser determinada usando o decremento logarítmico δ_v :

$$\xi = \frac{\delta_v}{\sqrt{\delta_v^2 + 4\pi^2}} \quad (3.20)$$

O decremento logarítmico é o logaritmo da razão entre a amplitude no início do período e a amplitude no fim do seguinte período da oscilação:

$$\delta_v = \ln \frac{A(t)}{A(t + t_p)} \quad (3.21)$$

onde A é a amplitude do sinal.

3.2.1. Implementação - Diagrama de Blocos

Apesar de ter sido apresentado o modelo de duas inércias no ponto anterior, e não sendo este sistema relevante para o estudo que se pretende fazer, apenas se implementou o modelo de uma inércia das engrenagens, que é apresentado nos blocos das figuras seguintes.

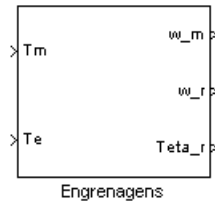


Figura 3.13: Bloco das Engrenagens.

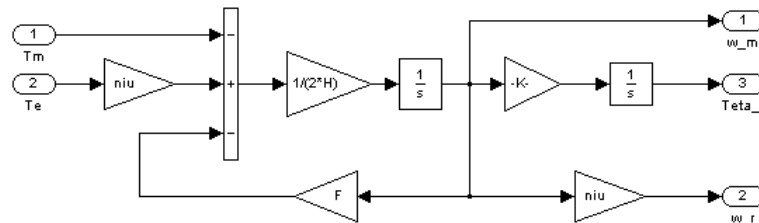


Figura 3.14: Diagrama de Blocos das Engrenagens.

3.2.2. Resultados

Os gráficos apresentados a seguir mostram os binários envolvidos no lado do gerador (velocidade elevada) e do lado da turbina (baixa velocidade). Também é mostrado o efeito de amortecimento das engrenagens.

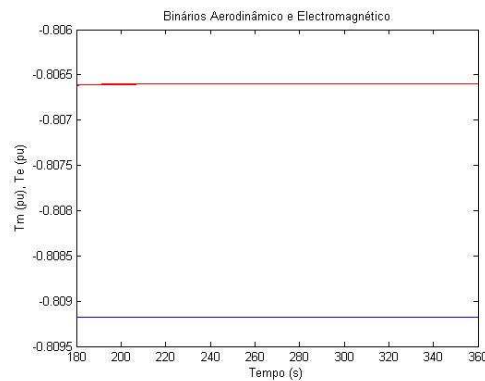


Figura 3.15: Binário Mecânico (a azul) e Binário Electromagnético (a vermelho).

Em regime permanente, o Binário mecânico T_m é balanceado pelo Binário Electromecânico T_e do gerador a menos do Binário de amortecimento T_D . Nesta situação, pode-se verificar pelo gráfico que $T_e - T_m > 0$.

3.3. Gerador de Indução

As Máquinas Eléctricas Rotativas podem ser usadas como motor ou gerador. Cada uma tem qualidades intrínsecas que, dependendo da aplicação permitem a sua utilização para um ou outro caso. As Máquinas Síncronas são normalmente usadas como geradores pela característica de produzir tensões com frequência fixa, por ter rotação fixa, independentemente da carga. O controlo da amplitude da tensão gerada é mais simples nestas máquinas, estando elas conectadas ou não à rede eléctrica. As Máquinas Assíncronas por sua vez, face à sua robustez, construção simples (principalmente as máquinas com rotor em gaiola de esquilo), baixo custo, ampla disponibilidade e alta relação potência-peso (W/Kg) [58], são normalmente utilizadas como motores. Quando são empregues na função de geradores de energia eléctrica, precisam de um controlo adequado para que, mesmo com rotação variável imposta ao eixo, possam manter a frequência e a tensão estabilizadas. Além disso, para produzirem potência activa, consomem potência reactiva indutiva. Para a optimização da energia produzida, a turbina usada para a captação da energia eólica, que gira o eixo do gerador eléctrico ao qual está acoplada, deve trabalhar com rotação variável dependente da velocidade e direcção do vento. Este facto favorece o emprego da Máquina Assíncrona como gerador eléctrico de uma turbina eólica, uma vez que não possui uma rotação fixa do eixo do gerador.

A máquina de corrente contínua também não é muito utilizada neste tipo de aplicação, uma vez que não há estudos modernos relevantes para a produção de energia eléctrica eólica a partir deste tipo de máquina, que são mais caras e têm maior custo de manutenção que as de corrente alternada.

Uma solução óptima para o problema consiste na utilização de gerador

assíncrono de indução com rotor bobinado de anéis, duplamente excitado, conectado via rotor a dois conversores estáticos em ligação *back-to-back* com circuito de tensão DC intermediário. Para viabilizar esse arranjo, é necessário o emprego de electrónica convencional e de potência. Este assunto será abordado mais à frente.

3.3.1. O Gerador de Indução Duplamente Alimentado

A máquina trifásica assíncrona de indução com rotor bobinado, duplamente excitada, possui, além do enrolamento trifásico do estator, enrolamento trifásico no rotor e anéis colectores no eixo para “acesso” ao enrolamento através de escovas de carvão. Essa máquina é dita duplamente excitada por ser alimentada simultaneamente pelo estator e pelo rotor.

É mais complexa que a máquina assíncrona com rotor em gaiola de esquilo e, portanto, mais cara, requerendo ainda maior manutenção. Apesar disso, é bastante empregue pela vantagem económica que adquire quando se pensa no custo total da instalação, ou seja, no custo do conjunto máquina-conversor. A máquina assíncrona com rotor em gaiola de esquilo necessita de um conversor para o estator, ou seja, esse equipamento deve ser dimensionado para a potência nominal [59], o que permite maior flexibilidade, mas implica em maior custo. Já a máquina de rotor bobinado em anéis, por usar o conversor no rotor, restringe a faixa de actuação do sistema para rotações do eixo entre 30 a 40% acima e abaixo da rotação síncrona (n_s). A potência do conversor utilizado é cerca de 30 a 40% da potência nominal da máquina [60].

Os Estudos de transitórios nas máquinas assíncronas empregam usualmente as equações de *Park* [61], com variáveis expressas no sistema d,q,0, equacionadas em relação aos eixos de referência directo e em quadratura (d-q) ortogonais e rotativos na velocidade do estator (síncrona). As equações de fluxos, tensões, potências e correntes são as apresentadas nos pontos seguintes.

3.3.2. Equações das Tensões do Estator e do Rotor

O modelo do Gerador de Indução utilizado está amplamente descrito na literatura e é utilizado por vários autores em trabalhos de análise de estabilidade no estudo de sistemas produção de energia eólica, [62], [63] e [64].

Usando uma aproximação do circuito de acoplamento e a notação do motor utilizada por Ong [62], as equações das tensões no circuito do rotor e do estator magneticamente acoplado podem ser escritas da seguinte forma:

$$v_{is} = i_{is} r_s + \frac{d\lambda_{is}}{dt}, \quad i = a, b, c. \quad (3.22)$$

$$v_{ir} = i_{ir} r_r + \frac{d\lambda_{ir}}{dt}, \quad i = a, b, c. \quad (3.23)$$

3.3.3. Equações do Fluxo

Em notação matricial, o fluxo dos enrolamentos do estator e do rotor, em termos de indutâncias e correntes, podem ser escritos de forma compacta como:

$$\begin{bmatrix} \lambda_s^{abc} \\ \lambda_r^{abc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_{ss}^{abc} & L_{sr}^{abc} \\ L_{rs}^{abc} & L_{rr}^{abc} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_s^{abc} \\ i_r^{abc} \end{bmatrix} \quad (3.24)$$

onde

$$\lambda_s^{abc} = \begin{bmatrix} \lambda_{as} \\ \lambda_{bs} \\ \lambda_{cs} \end{bmatrix} \text{ e } \lambda_r^{abc} = \begin{bmatrix} \lambda_{ar} \\ \lambda_{br} \\ \lambda_{cr} \end{bmatrix} \quad (3.25)$$

e

$$i_s^{abc} = \begin{bmatrix} i_{as} \\ i_{bs} \\ i_{cs} \end{bmatrix} \text{ e } i_r^{abc} = \begin{bmatrix} i_{ar} \\ i_{br} \\ i_{cr} \end{bmatrix} \quad (3.26)$$

e em que as sub-matrizes das indutâncias dos enrolamentos estator-estator e rotor-rotor são da forma:

$$L_{ss}^{abc} = \begin{bmatrix} L_{ls} + L_{ss} & L_{sm} & L_{sm} \\ L_{sm} & L_{ls} + L_{ss} & L_{sm} \\ L_{sm} & L_{sm} & L_{ls} + L_{ss} \end{bmatrix} \quad (3.27)$$

$$L_{rr}^{abc} = \begin{bmatrix} L_{lr} + L_{rr} & L_{rr} & L_{rr} \\ L_{rr} & L_{lr} + L_{rr} & L_{rr} \\ L_{rr} & L_{rr} & L_{lr} + L_{rr} \end{bmatrix} \quad (3.28)$$

As indutâncias mútuas estator-rotor são dependentes do ângulo do rotor
, isto é:

$$L_{sr}^{abc} = [L_{rs}^{abc}]^T = \begin{bmatrix} \cos \theta_r & \cos(\theta_r + 2\pi/3) & \cos(\theta_r - 2\pi/3) \\ \cos(\theta_r - 2\pi/3) & \cos \theta_r & \cos(\theta_r + 2\pi/3) \\ \cos(\theta_r + 2\pi/3) & \cos(\theta_r - 2\pi/3) & \cos \theta_r \end{bmatrix} L_{ss} \quad (3.29)$$

Quando as quedas da relutância no ferro são desprezadas, pode-se exprimir algumas destas indutâncias em termos das voltas dos enrolamentos, N_s e N_r , e da permeância electromagnética, P_g ,

$$\begin{aligned} L_{ss} &= N_s^2 P_g; & L_{rr} &= N_r^2 P_g \\ L_{sm} &= N_s^2 P_g \cos(2\pi/3); & L_{rm} &= N_r^2 P_g \cos(2\pi/3) \\ L_{sr} &= N_s N_r P_g \end{aligned} \quad (3.30)$$

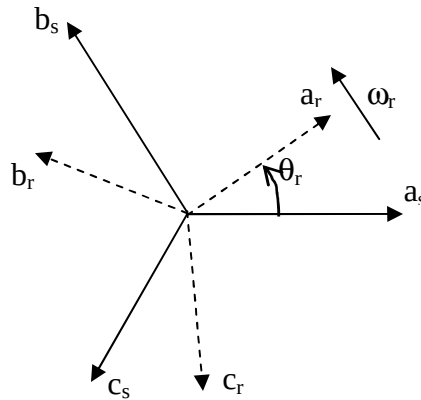


Figura 3.16: Referenciais para a Máquina de Indução Trifásica para o Estator.

3.3.4. Modelo num referencial arbitrário $qd0$

A transformação $qd0$ ou transformação de *Park* é conhecida por uma transformação trifásica para síncrona bifásica. A equação de transformação é do tipo:

$$\begin{bmatrix} f_q \\ f_d \\ f_0 \end{bmatrix} = [T_{qd0}(\theta)] \begin{bmatrix} f_a \\ f_b \\ f_c \end{bmatrix} \quad (3.31)$$

O novo referencial $qd0$ roda a uma velocidade ω , Figura 3.17, e o ângulo θ entre o eixo-d e o eixo-a do rotor é dado pela expressão:

$$\theta(t) = \int_0^t \omega(t) dt + \theta(0) \quad (3.32)$$

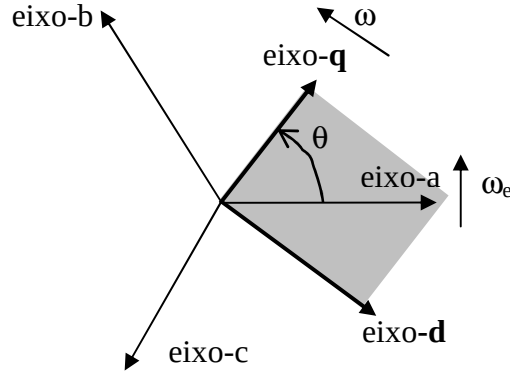


Figura 3.17: Relação entre os referenciais $qd0$ e abc para o Rotor.

onde $[T_{qd0}(\theta)]$ é a matriz de transformação definida por

$$[T_{dq0}(\theta)] = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos \theta & \cos(\theta - 2\pi/3) & \cos(\theta + 2\pi/3) \\ \sin \theta & \sin(\theta - 2\pi/3) & \sin(\theta + 2\pi/3) \\ 1/2 & 1/2 & 1/2 \end{bmatrix} \quad (3.33)$$

e cuja inversa é dada pela matriz

$$[T_{dq0}(\theta)]^{-1} = \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta & 1 \\ \cos(\theta - 2\pi/3) & \sin(\theta - 2\pi/3) & 1 \\ \cos(\theta + 2\pi/3) & \sin(\theta + 2\pi/3) & 1 \end{bmatrix} \quad (3.34)$$

A transformação $qd0$ é usada para transformar variáveis do rotor num referencial $qd0$ que é fixo com o rotor, com o lado positivo do eixo-q alinhado com o eixo magnético do campo girante. O lado positivo do eixo-d é definido por um desfasamento de $\pi/2$ em relação ao lado positivo do eixo-q.

O referencial $qd0$ é normalmente escolhido com base na sua conveniência ou compatibilidade com a representação de outros elementos da rede. Os dois referenciais mais comuns na análise de máquinas de indução são o referencial estacionário e o referencial de rotação sincronizada. Cada um tem as suas aplicações: no primeiro, as variáveis qd da máquina estão no mesmo referencial que as que normalmente são utilizadas para alimentar a rede. Esta opção é conveniente quando a rede de alimentação é grande e complexa. No segundo caso, as variáveis qd são estáticas no regime estacionário, que é um pré-requisito quando se pretende deduzir um modelo de pequenos sinais para escolha do ponto de funcionamento. O modelo $qd0$ será utilizado nos ensaios das páginas 67 e seguintes.

3.3.5. Equações da Tensão $qd0$

Em notação matricial, as equações das tensões nos enrolamentos abc do estator podem ser expressas por

$$v_s^{abc} = r_s^{abc} i_s^{abc} + \frac{d\lambda_s^{abc}}{dt} \quad (3.35)$$

Aplicando a transformação $[T_{qd0}(\theta)]$ à tensão, ao fluxo de indução magnética e à corrente, a equação anterior torna-se

$$v_s^{qd0} = [T_{qd0}(\theta)] r_s^{abc} [T_{qd0}(\theta)]^{-1} [i_s^{qd0}] + [T_{qd0}(\theta)] \frac{d}{dt} ([T_{qd0}(\theta)]^{-1} [\lambda_s^{qd0}]) \quad (3.36)$$

O seguinte termo pode ainda ser expresso por

$$\begin{aligned} & \frac{d}{dt} ([T_{qd0}(\theta)]^{-1} [\lambda_s^{qd0}]) = \\ & = \begin{bmatrix} -\sin \theta & \cos \theta & 0 \\ -\sin(\theta - 2\pi/3) & \cos(\theta - 2\pi/3) & 0 \\ -\sin(\theta + 2\pi/3) & \cos(\theta + 2\pi/3) & 0 \end{bmatrix} \frac{d\theta}{dt} [\lambda_s^{qd0}] + [T_{qd0}(\theta)]^{-1} \left[\frac{d\lambda_s^{qd0}}{dt} \right] \end{aligned} \quad (3.37)$$

Substituindo na equação 3.35 e rearranjando obtemos

$$v_s^{qd0} = r_s^{qd0} i_s^{qd0} + \omega \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \lambda_s^{qd0} + \frac{d\lambda_s^{qd0}}{dt} \quad (3.38)$$

onde

$$\omega = \frac{d\theta}{dt} \quad (3.39)$$

e

$$r_s^{qd0} = r_s \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.40)$$

Da mesma forma, as variáveis do rotor também devem ser alteradas para o referencial qd . Pela Figura 3.18 pode ver-se que a transformação do ângulo de fase para o rotor é $(\theta - \theta_r)$, em que,

$$\theta_r(t) = \int_0^t \omega_r(t) dt + \theta_r(0) \quad (3.41)$$

Usando a transformação $[T_{qd0}(\theta - \theta_r)]$, nas equações do rotor da mesma

forma que foi feita para as equações de tensão do estator, pode-se obter as seguintes equações da tensão $qd0$ do rotor:

$$v_r^{dq0} = (\omega - \omega_r) \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \lambda_s^{dq0} + \frac{d\lambda_s^{dq0}}{dt} + r_s^{dq0} i_s^{dq0} \quad (3.42)$$

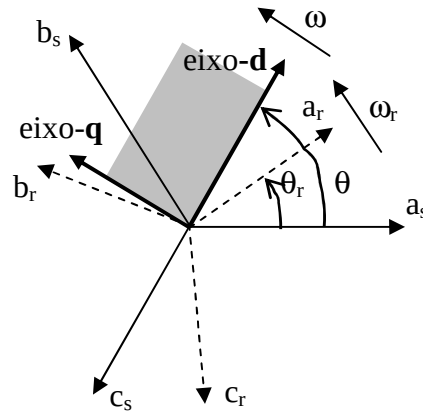


Figura 3.18: Relação entre os referenciais $qd0$ e abc .

3.3.6. Relações $qd0$ do Fluxo

O fluxo $qd0$ do estator é obtido por aplicação da transformação $[T_{qd0}(\theta)]$ ao fluxo abc à equação 3.24, que é

$$\lambda_s^{qd0} = [T_{qd0}(\theta)] (L_{ss}^{abc} i_s^{abc} + L_{sr}^{abc} i_r^{abc}) \quad (3.43)$$

Usando a transformação inversa apropriada para substituir as correntes abc do estator e do rotor pela correntes $qd0$ correspondentes. Assim a equação 3.43 vem

$$\lambda_s^{qd0} = [T_{qd0}(\theta)] L_{ss}^{abc} [T_{qd0}(\theta)]^{-1} i_s^{qd0} + [T_{qd0}(\theta)] L_{sr}^{abc} [T_{qd0}(\theta - \theta_r)]^{-1} i_r^{qd0} \quad (3.44)$$

ou seja

$$\lambda_s^{qd0} = \begin{bmatrix} L_{ls} + \frac{3}{2} L_{ss} & 0 & 0 \\ 0 & L_{ls} + \frac{3}{2} L_{ss} & 0 \\ 0 & 0 & L_{ls} \end{bmatrix} i_s^{dq0} + \begin{bmatrix} \frac{3}{2} L_{sr} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{3}{2} L_{sr} & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} i_r^{dq0} \quad (3.45)$$

De forma idêntica, o fluxo do rotor é dado por

$$\lambda_r^{qd0} = [T_{dq0}(\theta - \theta_r)] L_{rs}^{abc} [T_{dq0}(\theta)]^{-1} i_s^{dq0} + [T_{dq0}(\theta - \theta_r)] L_{rr}^{abc} [T_{dq0}(\theta - \theta_r)]^{-1} i_r^{dq0} \quad (3.46)$$

ou seja

$$\lambda_r^{qd0} = \begin{bmatrix} \frac{3}{2} L_{sr} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{3}{2} L_{sr} & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} i_s^{qd0} + \begin{bmatrix} L_{lr} + \frac{3}{2} L_{rr} & 0 & 0 \\ 0 & L_{lr} + \frac{3}{2} L_{rr} & 0 \\ 0 & 0 & L_{lr} \end{bmatrix} i_r^{qd0} \quad (3.47)$$

As relações dos fluxos das equações 3.45 e 3.47 podem ser compactadas na seguinte expressão:

$$\begin{bmatrix} \lambda_{qs} \\ \lambda_{ds} \\ \lambda_{0s} \\ \lambda'_{qr} \\ \lambda'_{dr} \\ \lambda'_{0r} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_{ls} + L_m & 0 & 0 & L_m & 0 & 0 \\ 0 & L_{ls} + L_m & 0 & 0 & L_m & 0 \\ 0 & 0 & L_{ls} & 0 & 0 & 0 \\ L_m & 0 & 0 & L'_{lr} + L_m & 0 & 0 \\ 0 & L_m & 0 & 0 & L'_{lr} + L_m & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & L'_{lr} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{qs} \\ i_{ds} \\ i_{0s} \\ i'_{qr} \\ i'_{dr} \\ i'_{0r} \end{bmatrix} \quad (3.48)$$

onde as variáveis do primário do rotor estão referidas ao estator de acordo com as seguintes relações:

$$\begin{aligned} \lambda'_{qr} &= \frac{N_s}{N_r} \lambda_{qr}; & \lambda'_{dr} &= \frac{N_s}{N_r} \lambda_{dr} \\ i'_{qr} &= \frac{N_s}{N_r} i_{qr}; & i'_{dr} &= \frac{N_s}{N_r} i_{dr} \\ L'_{lr} &= \left(\frac{N_s}{N_r} \right)^2 L_{lr} \end{aligned} \quad (3.49)$$

e L_m , a indutância de magnetização, é

$$L_m = \frac{3}{2} L_{ss} = \frac{3}{2} \frac{N_s}{N_r} L_{sr} = \frac{3}{2} \frac{N_s}{N_r} L_{rr} \quad (3.50)$$

Substituindo a equação 3.48 nas equações 3.38 e 3.42, e agrupando os termos em q , d e 0 , obtemos, as equações das tensões que traduzem o gerador de indução num referencial arbitrário $qd0$.

$$\begin{cases} v_{qs} = r_s i_{qs} + \omega \lambda_{ds} + \frac{d\lambda_{qs}}{dt} \\ v_{ds} = r_s i_{ds} - \omega \lambda_{qs} + \frac{d\lambda_{ds}}{dt} \\ v_{0s} = r_s i_{0s} + \frac{d\lambda_{0s}}{dt} \end{cases} \quad (3.51)$$

$$\begin{cases} v'_{qr} = r'_r i'_{qr} + (\omega - \omega_r) \lambda'_{dr} + \frac{d\lambda'_{qr}}{dt} \\ v'_{dr} = r'_r i'_{dr} - (\omega - \omega_r) \lambda'_{qr} + \frac{d\lambda'_{dr}}{dt} \\ v'_{0r} = r'_r i'_{0r} + \frac{d\lambda'_{0r}}{dt} \end{cases} \quad (3.52)$$

A notação com a plica indica que as grandezas do rotor estão referidas ao estator pela relação descrita nas equações 3.49.

3.3.7. Equações $qd0$ do Binário

A soma da potência de entrada instantânea para os seis enrolamentos do estator e do rotor é dada por

$$p_{in} = v_{as} i_{as} + v_{bs} i_{bs} + v_{cs} i_{cs} + v'_{ar} i'_{ar} + v'_{br} i'_{br} + v'_{cr} i'_{cr} \quad (3.53)$$

Em termos de quantidades $qd0$, a potência de entrada instantânea é

$$p_{in} = \frac{3}{2} (v_{ds} i_{ds} + v_{qs} i_{qs} + 2v_{0s} i_{0s} + v'_{dr} i'_{dr} + v'_{qr} i'_{qr} + 2v'_{0r} i'_{0r}) \quad (3.54)$$

Usando as equações 3.51 e 3.52 para substituir as expressões das tensões obtemos três tipos de termos: $i^2 r$, $i \frac{d\lambda}{dt}$ e $\omega \lambda i$. O primeiro representa as perdas no cobre; o segundo representa a taxa de troca de energia magnética entre os enrolamentos; e o terceiro representa a proporção de energia convertida em trabalho mecânico. O binário electromecânico é dado pela soma dos termos $\omega \lambda i$ divididos pela velocidade mecânica, isto é,

$$T_{em} = \frac{3}{2} \frac{p}{2\omega_r} [\omega (\lambda_{ds} i_{qs} - \lambda_{qs} i_{ds}) + (\omega - \omega_r) (\lambda'_{dr} i'_{qr} - \lambda'_{qr} i'_{dr})] \quad (3.55)$$

onde p é o número de pólos da máquina e ω_r a velocidade do rotor.

Usando os as relações dos fluxos da equação 3.48, podemos ver que

$$\lambda_{ds} i_{qs} - \lambda_{qs} i_{ds} = -(\lambda'_{dr} i'_{qr} - \lambda'_{qr} i'_{dr}) = L_m (i'_{dr} i_{qs} - i'_{qr} i_{ds}) \quad (3.56)$$

Então, a equação anterior pode ser descrita nas seguintes formas

$$\begin{aligned} T_{em} &= \frac{3}{2} \frac{p}{2} (\lambda'_{qr} i'_{dr} - \lambda'_{dr} i'_{qr}) \\ &= \frac{3}{2} \frac{p}{2} (\lambda_{ds} i_{qs} - \lambda_{qs} i_{ds}) \\ &= \frac{3}{2} \frac{p}{2} L_m (i'_{dr} i_{qs} - i'_{qr} i_{ds}) \end{aligned} \quad (3.57)$$

Para a simulação, o uso de uma expressão em vez de outra depende da metodologia de controlo e das variáveis disponíveis e necessárias para outras partes da simulação.

Por vezes estas equações são expressas em termos dos fluxos por segundo, $\psi = \omega_b \lambda$ [V/s] e reactâncias $x = \omega_b L$ [Ω], em vez de λ [We · espira] e L [H] resultando nas seguintes equações:

$$\begin{cases} v_{qs} = r_s i_{qs} + \frac{\omega}{\omega_b} \psi_{ds} + \frac{1}{\omega_b} \frac{d\psi_{qs}}{dt} \\ v_{ds} = r_s i_{ds} - \frac{\omega}{\omega_b} \psi_{qs} + \frac{1}{\omega_b} \frac{d\psi_{ds}}{dt} \\ v_{0s} = r_s i_{0s} + \frac{1}{\omega_b} \frac{d\psi_{0s}}{dt} \end{cases} \quad (3.58)$$

$$\begin{cases} v'_{qr} = r'_r i'_{qr} + \frac{\omega - \omega_r}{\omega_b} \psi'_{dr} + \frac{1}{\omega_b} \frac{d\psi'_{qr}}{dt} \\ v'_{dr} = r'_r i'_{dr} - \frac{\omega - \omega_r}{\omega_b} \psi'_{qr} + \frac{1}{\omega_b} \frac{d\psi'_{dr}}{dt} \\ v'_{0r} = r'_r i'_{0r} + \frac{1}{\omega_b} \frac{d\psi'_{0r}}{dt} \end{cases} \quad (3.59)$$

$$\begin{aligned} T_{em} &= \frac{3}{2} \frac{p}{2\omega_b} (\psi'_{qr} i'_{dr} - \psi'_{dr} i'_{qr}) \\ &= \frac{3}{2} \frac{p}{2\omega_b} (\psi_{ds} i_{qs} - \psi_{qs} i_{ds}) \\ &= \frac{3}{2} \frac{p}{2\omega_b} x_m (i'_{dr} i_{qs} - i'_{qr} i_{ds}) \end{aligned} \quad (3.60)$$

$$\begin{bmatrix} \psi_{qs} \\ \psi_{ds} \\ \psi_{0s} \\ \psi'_{qr} \\ \psi'_{dr} \\ \psi'_{0r} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_{ls} + x_m & 0 & 0 & x_m & 0 & 0 \\ 0 & x_{ls} + x_m & 0 & 0 & x_m & 0 \\ 0 & 0 & x_{ls} & 0 & 0 & 0 \\ x_m & 0 & 0 & x'_{lr} + x_m & 0 & 0 \\ 0 & x_m & 0 & 0 & x'_{lr} + x_m & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & L'_{lr} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{qs} \\ i_{ds} \\ i_{0s} \\ i'_{qr} \\ i'_{dr} \\ i'_{0r} \end{bmatrix} \quad (3.61)$$

onde ω_b é a velocidade de base e em que $\omega_b = 2\pi f_{nominal}$.

3.3.8. Equação do Movimento do Rotor

A equação do movimento do rotor é obtida igualando o binário de aceleração ao binário de inércia mais o atrito:

$$T_e - T_m = J_G \frac{d\omega_r}{dt} + D\omega_r \quad (3.62)$$

Nesta equação, $T_m > 0$ na condição de motor e $T_m < 0$ na condição de gerador. Para escrever esta equação em função da velocidade de base, i.e., utilizando a velocidade por unidade ω_r/ω_b , obtém-se:

$$T_e - T_m = \frac{2J_r \omega_b}{p} \cdot \frac{d\omega_r/\omega_b}{dt} + D\omega_r \quad (3.63)$$

Normalmente esta equação é escrita em termos da Constante de Inércia, H:

$$T_e - T_m = 2H \frac{d\omega_r/\omega_b}{dt} + D\omega_r \quad (3.64)$$

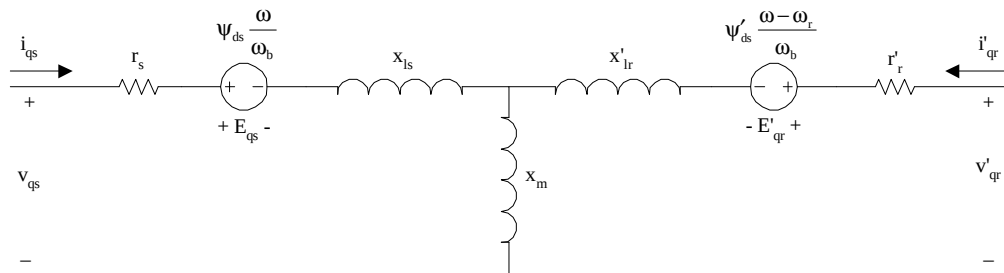
onde

$$H = \frac{J_G \omega_{bm}^2}{2S_b} \quad e \quad \omega_{bm} = \frac{2\omega_b}{p} \quad (3.65)$$

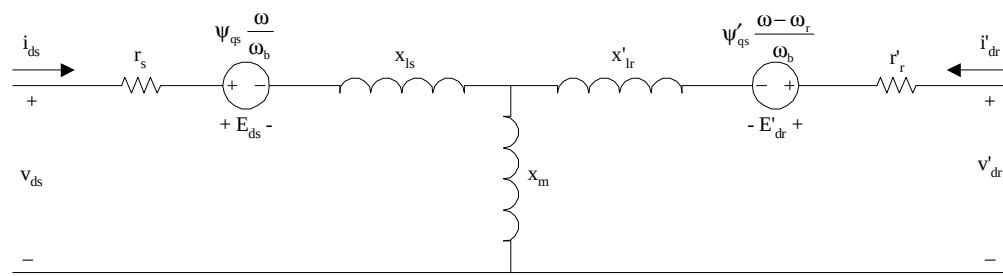
sendo S_b a potência de base.

3.3.9. Esquema Eléctrico do Gerador

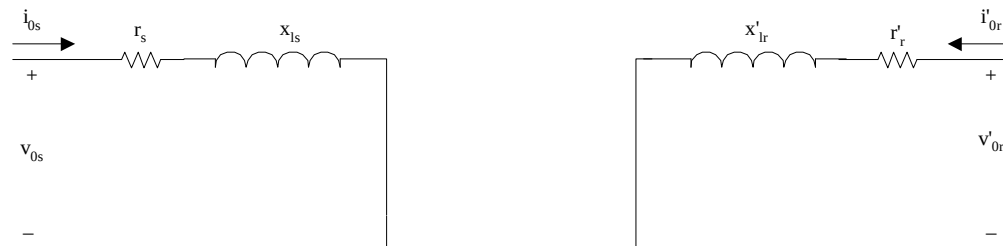
Das equações 3.58 e 3.59 resultam os esquemas eléctricos apresentados na Figura 3.19.



(a)



(b)



(c)

Figura 3.19: Circuito equivalente do gerador de indução num referencial $qd0$ arbitrário: a) Componente em quadratura; b) Componente directa; c) Componente homopolar.

3.3.10. Implementação - Diagrama de Blocos

A formulação matemática apresentada para o Gerador de Indução Duplamente Alimentado resultou no bloco apresentado a seguir. Este bloco implementa um gerador assíncrono modelizado no referencial dq , em que os enrolamentos do estator e do rotor estão conectados em estrela a um neutro interno.



Figura 3.20: Bloco do Gerador de Indução Duplamente Alimentado.

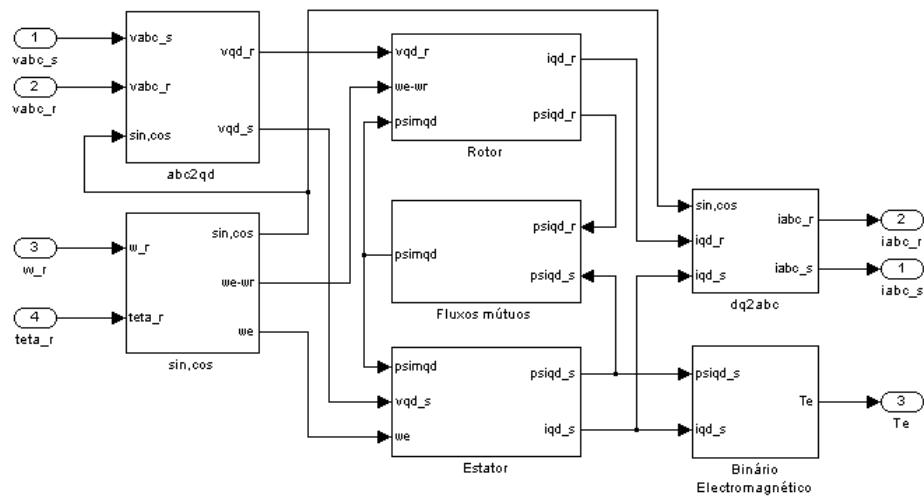


Figura 3.21: Diagrama de blocos do gerador.

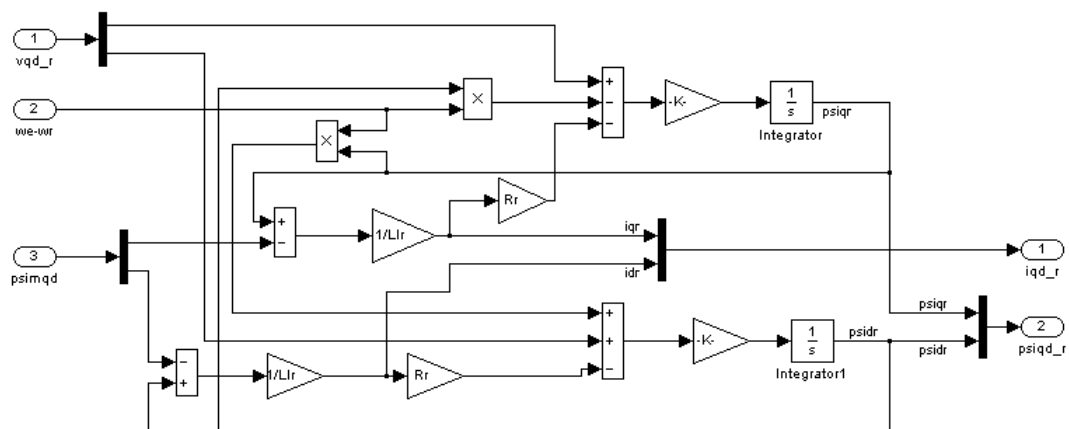


Figura 3.22: Diagrama de blocos de implementação do bloco do Rotor.

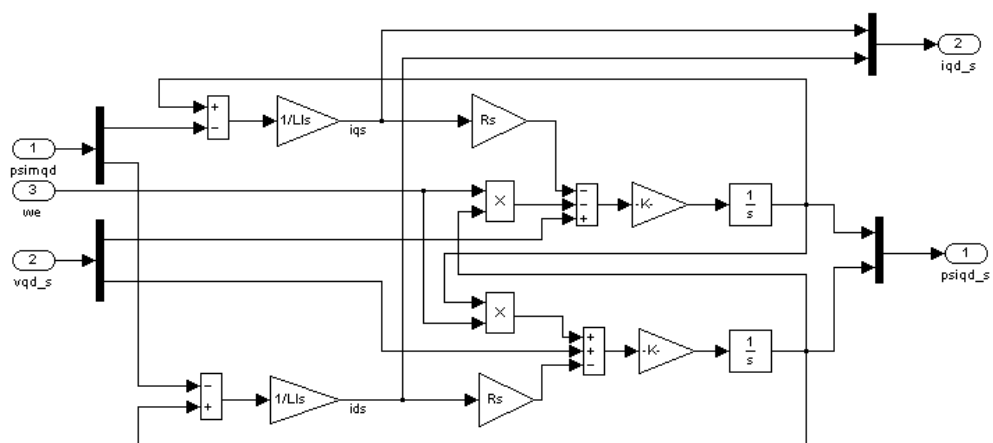


Figura 3.23: Diagrama de blocos de implementação do bloco do Estator.

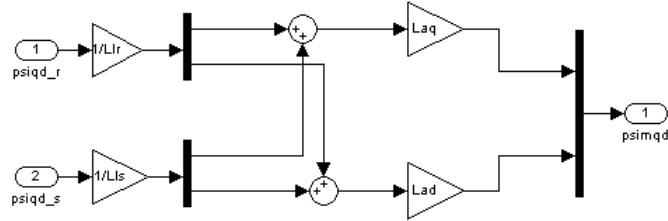


Figura 3.24: Diagrama de blocos de implementação do bloco do Fluxo Mútuo.

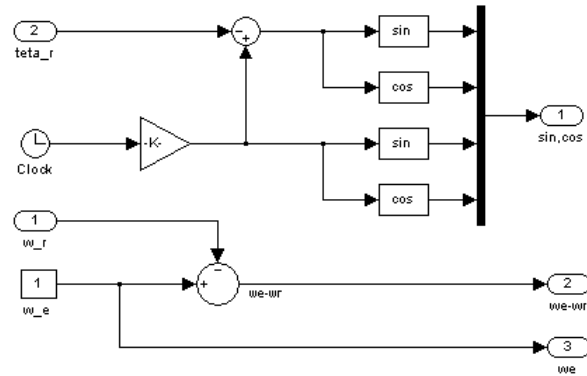


Figura 3.25: Diagrama de blocos de implementação de cálculo dos senos e co-senos dos ângulos.

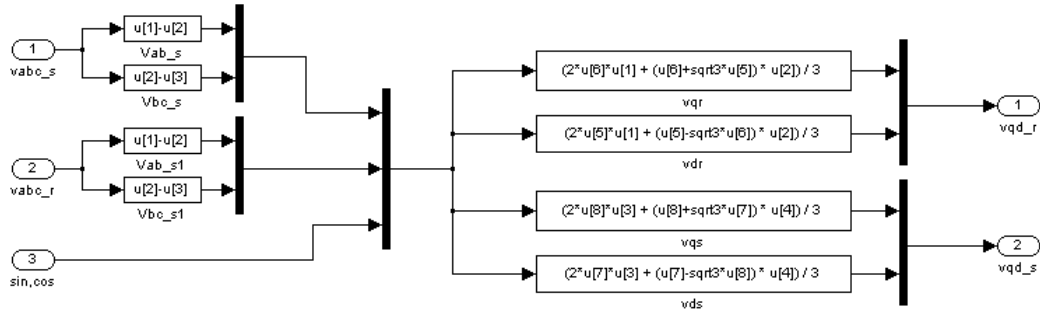


Figura 3.26: Diagrama de blocos de implementação da transformação de *abc* para *qd*.

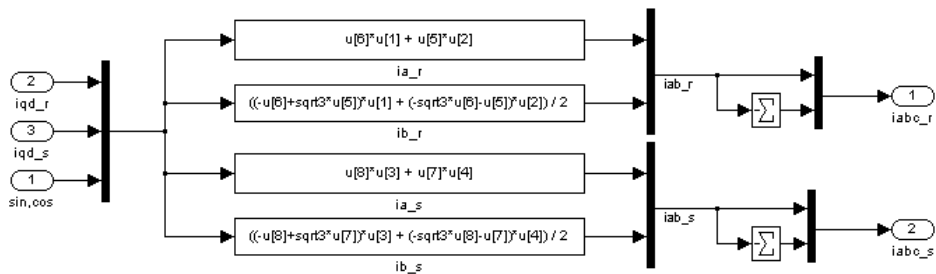


Figura 3.27: Diagrama de blocos de implementação da transformação de *qd* para *abc*.

3.3.11. Resultados

A seguir são apresentados alguns sinais em regime permanente de validação do modelo formulado e descrito para o Gerador de Indução Duplamente Alimentado, para uma velocidade do vento constante e igual a 10 m/s e um *ângulo pitch* de 0 graus. Ao rotor está aplicado um binário mecânico de cerca de 0.8 pu sendo a velocidade inicial de rotação do eixo de 1.1 pu. O estator do gerador é ligado a um barramento de 1.0 pu. Os valores dos parâmetros utilizados para a máquina simulada encontram-se no Anexo B. Alguns resultados já foram apresentados anteriormente, nomeadamente a velocidade de rotação do rotor e o binário electromagnético nas Figuras 3.9 e 3.15, respectivamente.

Nos sinais a seguir apresentados, a linha a cor verde representa sempre a componente em quadratura e a linha azul representa a componente directa, do fluxo, das correntes e das tensões do rotor e do estator no sistema ‘por unidade’.

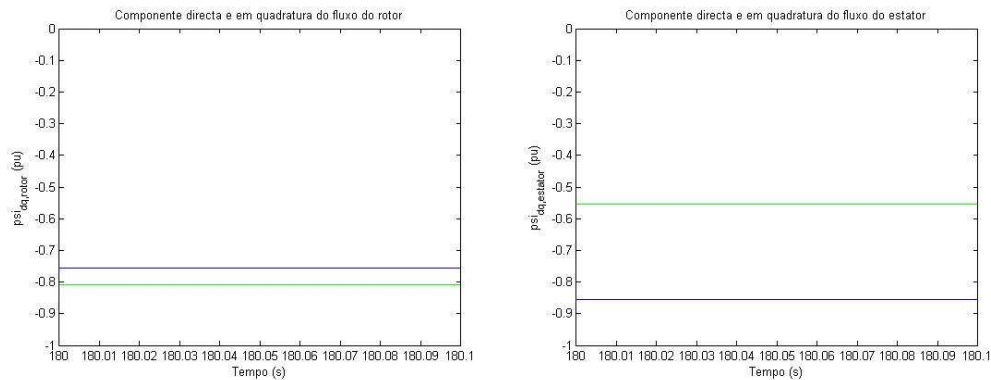


Figura 3.28: Componentes em quadratura (verde) e directa (azul) dos Fluxos do rotor e do estator.

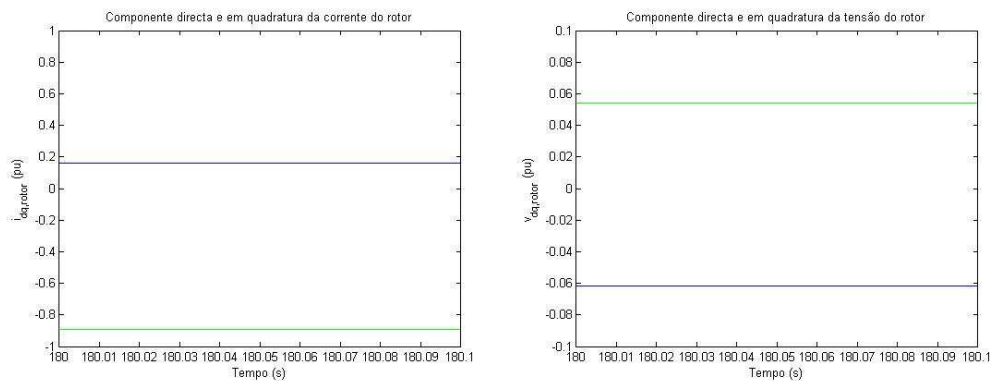


Figura 3.29: Componentes em quadratura (verde) e directa (azul) da Corrente e da Tensão do rotor.

O valor da tensão do rotor v_q , regulada pela corrente do rotor i_q , permite estabelecer a potência activa próxima da nominal; e o valor da corrente do rotor i_d , que regula a tensão v_d permite estabelecer um factor de potência igual à unidade, ou seja uma energia reactiva do estator igual a zero, e também para fornecer a corrente de magnetização ao rotor da máquina.

As figuras seguintes representam as correntes e as tensões trifásicas do rotor.

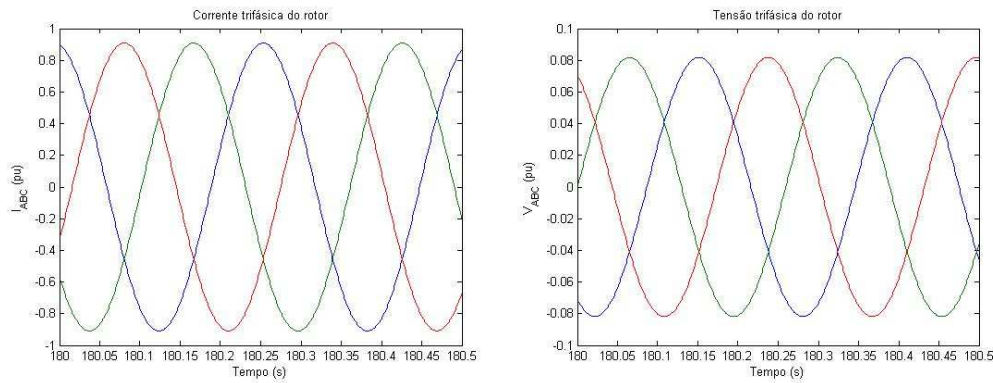


Figura 3.30: Correntes e Tensões trifásicas do rotor, em pu.

Os resultados a seguir apresentados referem-se aos mesmos parâmetros apresentados anteriormente, mas agora relativos às grandezas eléctricas do estator.

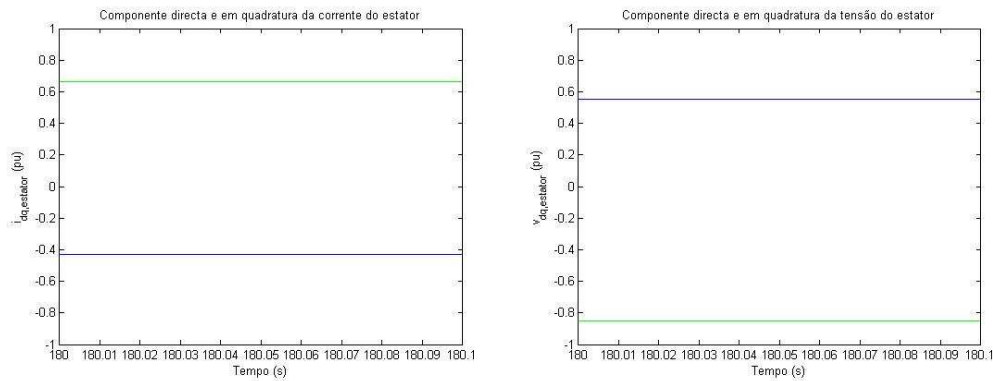


Figura 3.31: Componentes em quadratura (verde) e directa (azul) da Corrente e da Tensão do estator, em pu.

Os valores das componentes qd da tensão do controlador do lado do estator apresentados v_{qd} , também regulados pelas correntes respectivas, permitem que a tensão do barramento DC do conversor *back-to-back* ligado ao circuito do rotor

seja cerca de 2.0 pu. As figuras seguintes representam as correntes e as tensões do estator num sistema equilibrado e de frequência igual a 50 Hz.

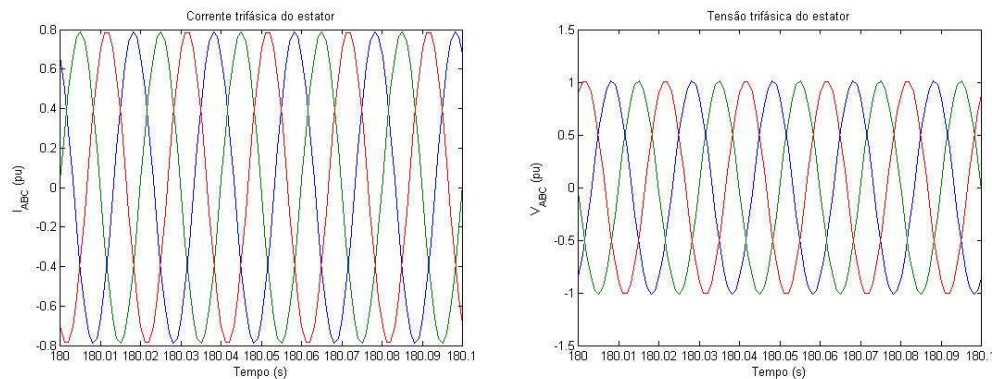


Figura 3.32: Correntes e Tensões trifásicas do estator, em pu.

Os resultados obtidos pelas simulações do modelo matemático apresentado para o gerador de indução duplamente alimentado apresentam-se correctos o que permite afirmar que o modelo é válido. Esta validade é reforçada pela comparação destes resultados com os obtidos por outros trabalhos publicados e foram sendo referidos na bibliografia.

3.4. Conversor Trifásico

Para a conversão da tensão alternada da rede eléctrica em tensão contínua, são vulgarmente utilizados rectificadores comutados pela rede, utilizando semicondutores como díodos e tirístores, que, devido à sua natureza não linear, introduzem harmónicos e perturbações na rede eléctrica.

O aumento do conteúdo harmónico da rede eléctrica, bem como a existência de factor de potência não unitário, leva ao surgimento de problemas tais como distorção da forma de onda da tensão e interferência electromagnética, afectando os utilizadores dessa mesma rede eléctrica, bem como maior necessidade de potência por parte do consumidor, entre outros. Deste modo torna-se imperativa a existência de conteúdo legislativo/normativo que limite a emissão de harmónicos, existindo hoje em dia as normas IEEE 519 e IEC 61000, entre outras, que regulam o sector.

O rectificador pulsado tipo fonte de tensão apresenta-se como uma solução para a substituição dos conversores anteriormente referidos. Trata-se de um conversor constituído por seis semicondutores com possibilidade de comando pela porta, por norma do tipo IGBT ou MOSFET. Além de permitir o controlo da tensão contínua, este tipo de conversor permite o controlo da forma de onda da corrente bem com da sua fase, minimizando assim a interferência com a rede, ao mesmo tempo que permite o funcionamento nos primeiro e segundo quadrantes, podendo ser utilizado para retirar potência da rede ou injectar a potência produzida por fonte de energia renovável (2ºquadrante). No entanto, apresenta como desvantagens o aumento do custo do hardware e da complexidade do controlo. Assim, um rectificador trifásico pulsado, tipo fonte de tensão, permite a conversão bidireccional de energia entre uma fonte de tensão alternada e uma fonte de tensão contínua.

3.4.1. Conversor Pulsados Trifásicos Tipo Fonte de Tensão

Na modelação do conversor tem-se duas situações de operacionalidade, numa tem-se o conversor a garantir a estabilidade da tensão no barramento DC, e noutra a conversão para corrente AC com uma determinada frequência. Estas são as duas situações que se pode ter no sistema de conversão de energia eólica.

Na modelação dos conversores, os semicondutores de potência são representados por interruptores genéricos, Figura 3.33, admitindo-se comutação em tempo nulo, e ausência de queda de tensão. Considera-se também que todos os elementos passivos são lineares e invariantes no tempo e que todos os sinais são sujeitos apenas a pequenas variações, em torno de um ponto de equilíbrio.

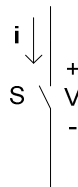


Figura 3.33: Interruptor Genérico.

A análise dos conversores é baseada na análise de cada um dos braços constituintes dos mesmos, [65], [66] e [67], como se irá ver a seguir, sendo utilizado o modelo de média que é mais adequado do que um modelo de comutação aos objectivos da dissertação.

De acordo com as simplificações referidas anteriormente, cada célula de comutação pode ser descrita como um interruptor genérico tal como demonstrado na Figura 3.33. Quando S está aberto, ou seja, nem o transístor nem o díodo conduzem, a corrente i é nula. Quando S está fechado, equivalente a o díodo ou o transístor conduzirem, a tensão v é nula. É assim possível definir a função de comutação s representada pela Equação 3.65.

$$S = \begin{cases} 0 & S \text{ está aberto } (i = 0) \\ 1 & S \text{ está fechado } (v = 0) \end{cases} \quad (3.66)$$

Num conversor com corrente bidireccional, pode definir-se uma unidade de comutação genérica, um braço do inversor, tal como é apresentado na Figura 3.34. Cada braço é composto por duas células, possuindo uma fonte de tensão (condensador) de um lado e outra de corrente (bobina) do lado oposto. Para o correcto funcionamento do braço é necessário que o condensador não seja curto-circuitado e que a bobina não se torne um circuito aberto. Daqui resulta que cada uma das células de um braço sejam complementares, ou seja, apenas uma pode estar fechada de cada vez.

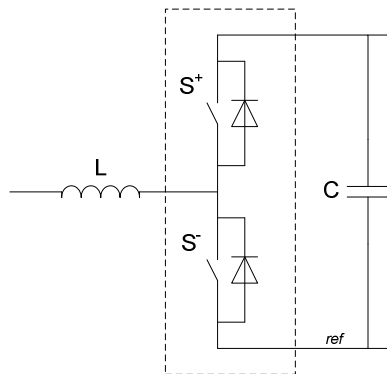


Figura 3.34: Braço de um Conversor Genérico.

Baseada na Equação 3.66 pode ser definida a função complementar representada pela seguinte equação

$$S_x^+ + S_x^- = 1 \quad (3.67)$$

Desta forma, cada braço pode ser representado por um comutador com duas posições tal como descrito na Figura 3.35.

As variáveis de entrada e saída são respectivamente a tensão no condensador e a corrente na bobina. Considerando um período T , d_x como o *duty-cycle* do interruptor S_x ou valor médio instantâneo do índice de modulação, e assumindo que a corrente I_x e a tensão V_{DC} são contínuas e com pequena ondulação pode-se estabelecer as Equação 3.68 e 3.69.

$$E_x = d_x V_{DC} \quad (3.68)$$

$$I^+ = d_x I_x \quad (3.69)$$

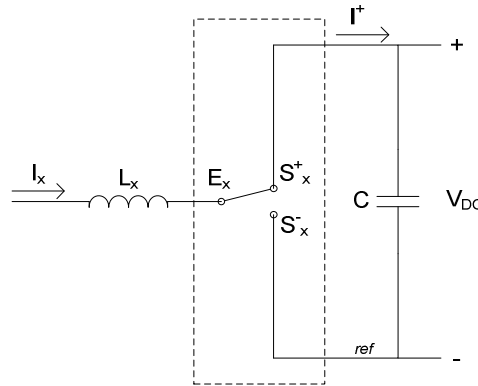


Figura 3.35: Braço de um Conversor, representado como um comutador de duas posições.

Deste modo é possível obter o modelo de média representado na Figura 3.36.

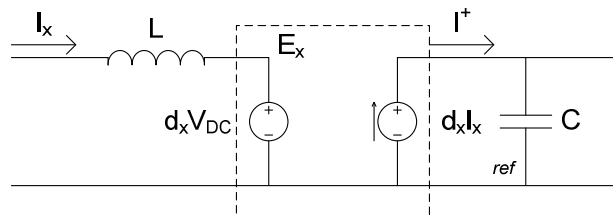


Figura 3.36: Modelo de média de um braço de um conversor.

3.4.2. Modelo de um Rectificador Trifásico

A Figura 3.37 mostra o esquema de um conversor pulsado trifásico a funcionar como rectificador:

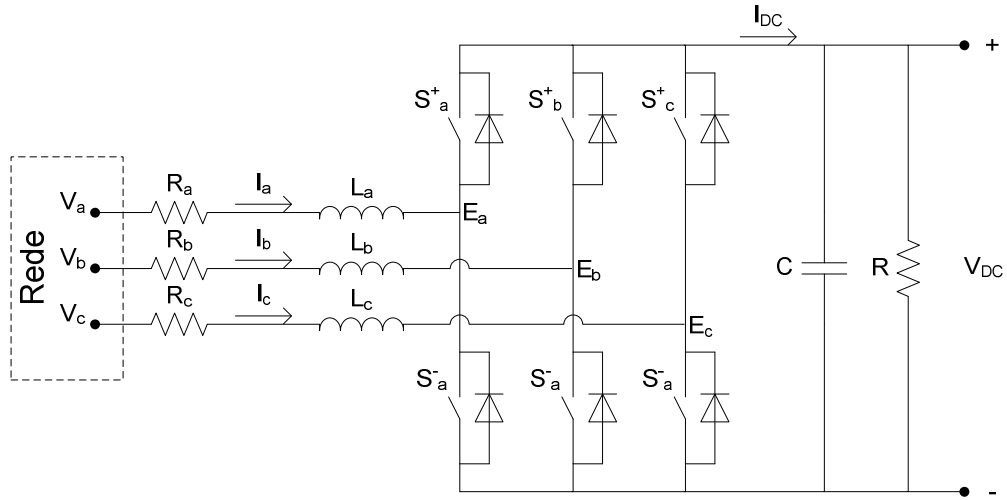


Figura 3.37: Rectificador Pulsado Trifásico.

A partir do modelo de média de um braço pode-se então obter o modelo de média para um rectificador trifásico, ligando três braços com o resto do circuito, tal como na Figura 3.38, sendo de considerar as Equações 3.70 e 3.71:

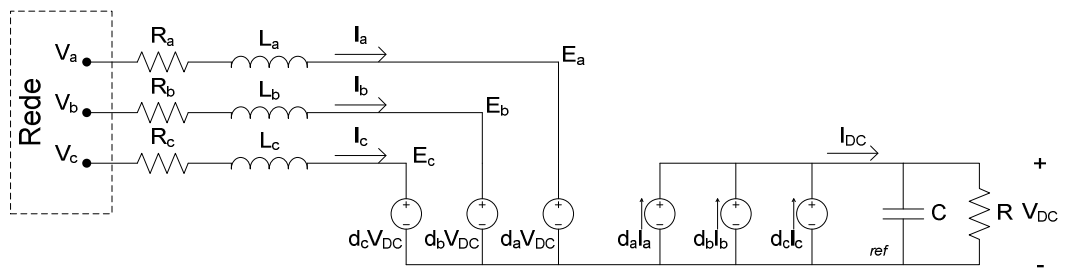


Figura 3.38: Modelo de média de um rectificador trifásico, com coordenadas no referencial abc .

$$I_{DC} = d_a I_a + d_b I_b + d_c I_c \quad (3.70)$$

$$I_a + I_b + I_c = 0 \quad (3.71)$$

O modelo em espaço de estados é dado pelas Equações 3.72 e 3.73, em que se considera que não existem componentes homopolares.

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} = \frac{1}{L_a} \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} - \frac{1}{L_a} \begin{bmatrix} d_a \\ d_b \\ d_c \end{bmatrix} V_{DC} - \frac{R_a}{L_a} \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} \quad (3.72)$$

$$\frac{dV_{DC}}{dt} = \frac{1}{C} [d_a \quad d_b \quad d_c] \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} - \frac{V_{DC}}{RC} \quad (3.73)$$

Em regime estacionário, a tensão contínua é controlada com um valor constante. A amplitude e a fase das correntes, I_a , I_b e I_c , são controladas de modo a que possuam forma sinusoidal e em fase com a tensão da rede, dada pela Equação 3.74.

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V \cos(\omega t) \\ V \cos(\omega t - 2\pi/3) \\ V \cos(\omega t + 2\pi/3) \end{bmatrix} \quad (3.74)$$

Para obter o ponto de funcionamento DC e linearizar o sistema utiliza-se um sistema ortogonal de coordenadas, em que as componentes de um vector espacial genérico $\vec{X}$ pode ser decomposto nas suas componentes $\alpha\beta$, da forma $\vec{X} = X_\alpha + jX_\beta$.

Considerando que esse vector gira no referencial $\alpha\beta$ com frequência ω , sendo $\theta = \omega t$, e considerando o sistema de eixos qd síncrono com a rede, obtém-se, um vector fixo nesse mesmo referencial qd , por aplicação da transformada de Park, $\vec{X} = \bar{X}e^{j\theta} = (X_d + jX_q)e^{j\theta}$, Figura 3.39.

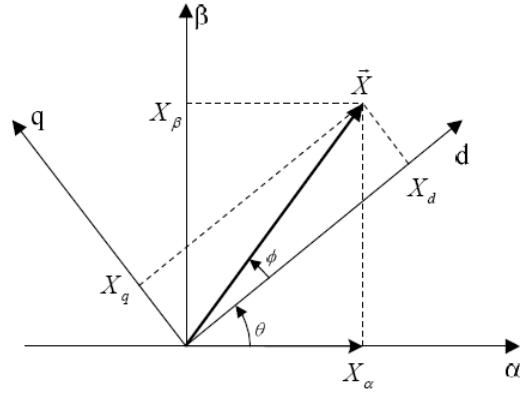


Figura 3.39: Relação entre os referenciais qd e αβ.

$$\frac{d\bar{I}}{dt} = \frac{\bar{V}}{L_a} - \frac{R_a}{L_a} \bar{I} - \frac{dV_{DC}}{L_a} \quad (3.75)$$

$$\frac{d\bar{I}}{dt} e^{j\theta} + \bar{I} e^{j\theta} j \frac{d\theta}{dt} = \frac{\bar{V} e^{j\theta}}{L_a} - \frac{R_a}{L_a} \bar{I} e^{j\theta} - \frac{dV_{DC} e^{j\theta}}{L_a} \quad (3.76)$$

$$\frac{d\bar{I}}{dt} = \frac{\bar{V}}{L_a} - \frac{R_a}{L_a} \bar{I} - j\omega \bar{I} - \frac{dV_{DC}}{L_a} \quad (3.77)$$

Isolando a parte real e a parte imaginária desta equação, consegue-se, assim, que as grandezas a controlar se tornem contínuas. A posição angular da rede $\theta = \omega t$ é obtida através do sincronizador. Obtém-se deste modo, um modelo de média do rectificador no referencial qd.

A sincronização é conseguida por um bloco que fornece a posição angular do vector de tensão da rede eléctrica. Este bloco emprega um PLL (*Phase Locked Loop*) que fornece um ângulo para a transformação *abc* para qd e vice-versa.

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} I_d \\ I_q \end{bmatrix} = \frac{1}{L_a} \begin{bmatrix} V_d \\ V_q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -\frac{R_a}{L_a} & \omega \\ -\omega & -\frac{R_a}{L_a} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_d \\ I_q \end{bmatrix} - \frac{1}{L_a} \begin{bmatrix} d_d \\ d_q \end{bmatrix} V_{DC} \quad (3.78)$$

$$\frac{dV_{DC}}{dt} = \frac{1}{C} \begin{bmatrix} d_d & d_q \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_d \\ I_q \end{bmatrix} - \frac{V_{DC}}{RC} \quad (3.79)$$

O circuito equivalente encontra-se representado na Figura 3.40.

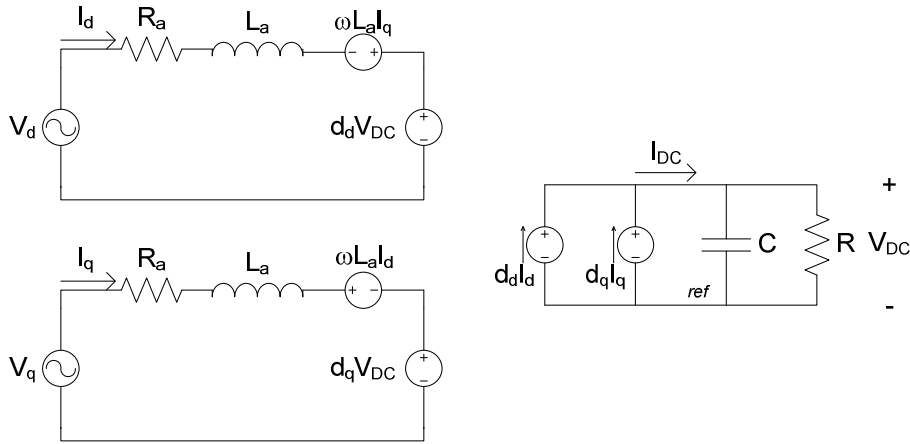


Figura 3.40: Modelo de média de um retificador trifásico, com coordenadas no referencial qd .

3.4.3. Modelo de um Inversor Trifásico

A Figura 3.41 mostra o esquema de um conversor pulsado trifásico a funcionar como inversor:

Tal como no modelo anterior, pode-se a partir do modelo de média de um braço obter o modelo de média para um inversor trifásico, ligando três braços com o resto do circuito, tal como mostra na Figura 3.42, considerando a Equação 3.80 e 3.81.

$$I_{DC} = d_a I'_a + d_b I'_b + d_c I'_c \quad (3.80)$$

$$I'_a + I'_b + I'_c = 0 \quad (3.81)$$

O modelo em espaço de estados é dado pela Equação:

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} I'_a \\ I'_b \\ I'_c \end{bmatrix} = \frac{1}{L'_a} \begin{bmatrix} d'_a \\ d'_b \\ d'_c \end{bmatrix} V_{DC} - \frac{1}{L'_a} \begin{bmatrix} V'_a \\ V'_b \\ V'_c \end{bmatrix} - \frac{R'_a}{L'_a} \begin{bmatrix} I'_a \\ I'_b \\ I'_c \end{bmatrix} \quad (3.82)$$

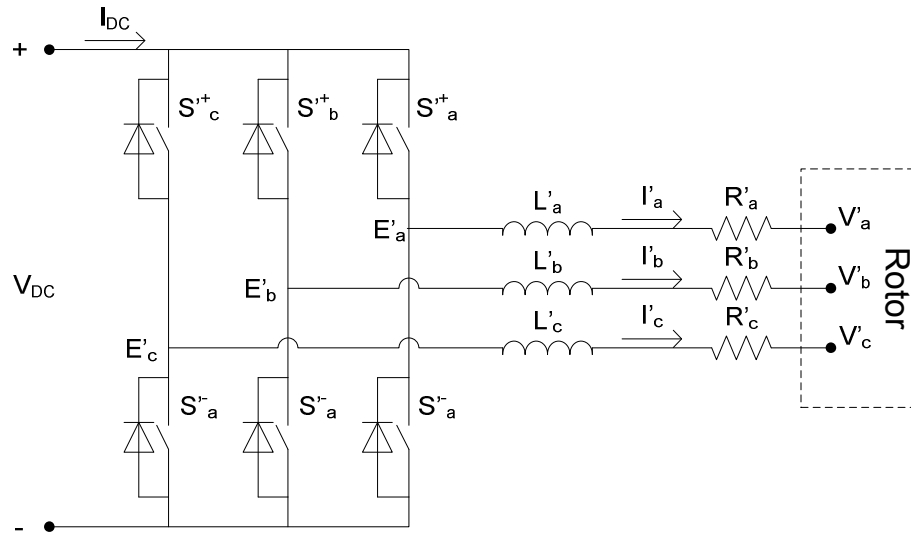


Figura 3.41: Rectificador Pulsado Trifásico.

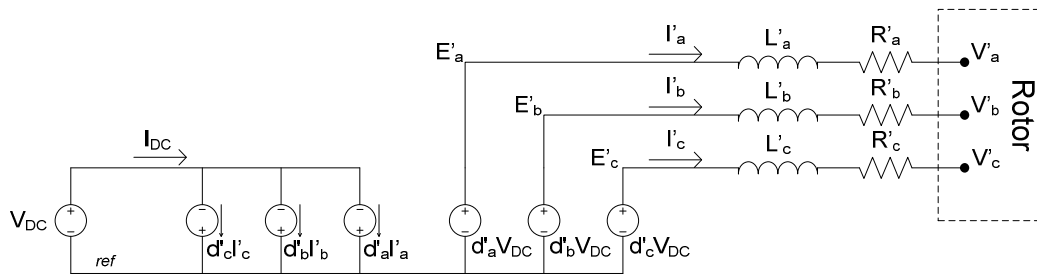


Figura 3.42: Modelo de média de um inversor trifásico, com coordenadas no referencial abc .

Pelos motivos anteriormente referidos, aplica-se a transformada de *Park* de forma a transformar as coordenadas para um referencial qd síncrono com a rede. Obtém-se assim um modelo no referencial qd .

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} I'_d \\ I'_q \end{bmatrix} = \frac{1}{L'_a} \begin{bmatrix} d'_d \\ d'_q \end{bmatrix} V_{DC} - \frac{1}{L'_a} \begin{bmatrix} V'_d \\ V'_q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -\frac{R'_a}{L'_a} & -\omega \\ \omega & -\frac{R'_a}{L'_a} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I'_d \\ I'_q \end{bmatrix} \quad (3.83)$$

O circuito equivalente encontra-se representado na figura a seguir

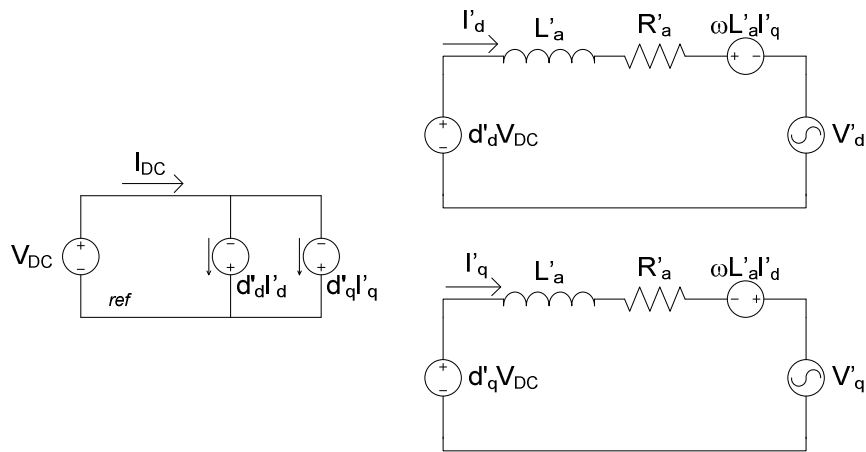


Figura 3.43: Modelo de média de um retificador trifásico, com coordenadas no referencial dq .

3.4.4. Implementação - Diagrama de Blocos

A seguir são apresentados os blocos relativos ao Conversor pulsado trifásico tipo Fonte de Tensão baseado no modelo de média, que pode funcionar como retificador ou como inversor. Também é apresentado um exemplo de um bloco gerador da componente de baixa frequência dos pulsos PWM de controle dos braços dos conversores, quer do lado do rotor, quer do lado da rede e, por último, é apresentado o bloco de implementação do barramento DC.

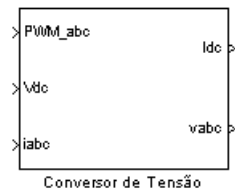


Figura 3.44: Bloco do Conversor de Tensão.

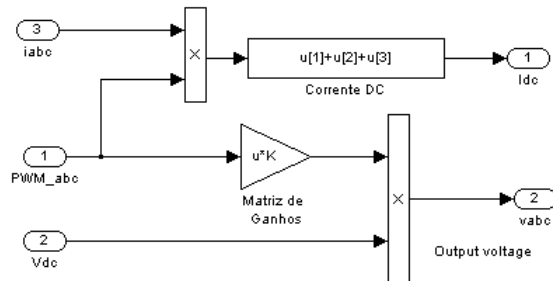


Figura 3.45: Diagrama de blocos de implementação do Conversor.

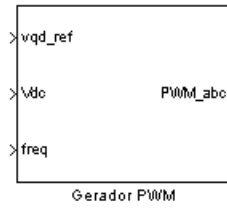


Figura 3.46: Bloco gerador do sinal PWM.

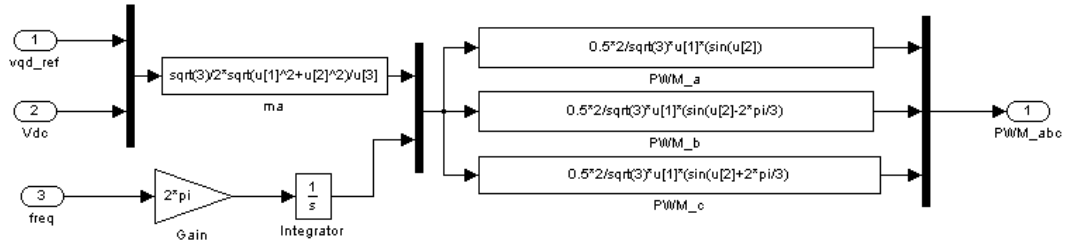


Figura 3.47: Diagrama de blocos do gerador da componente de baixa frequência do sinal PWM.

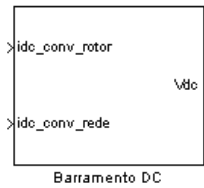


Figura 3.48: Bloco do Barramento DC.

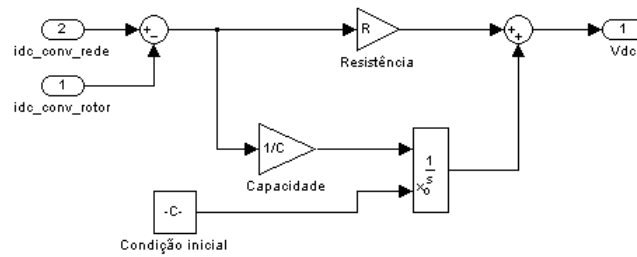


Figura 3.49: Diagrama de blocos de implementação do Barramento DC.

3.4.5. Resultados

Para uma impedância $R_a = 0$ e $L_a = 0.15$ pu fixou-se a corrente i_d do estator de modo a regular o nível de tensão do Barramento DC em 2.0 pu. Para o controle da tensão DC, é utilizado um controlador PI.

O factor de modulação utilizado é o necessário para gerar uma tensão de 1.0 pu pelos conversores. A capacidade utilizada no Barramento DC é de 0.7 pu. Ao rotor é aplicado um binário mecânico constante de cerca de 0.8 pu, sendo a sua velocidade de rotação inicial de 1.1 pu. O estator está ligado ao barramento de saída de 1.0 pu.

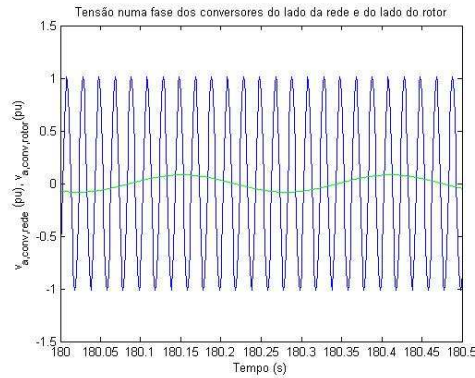


Figura 3.50: Tensão numa fase dos conversores do lado da rede (a azul) e do lado do rotor (a verde), em pu.

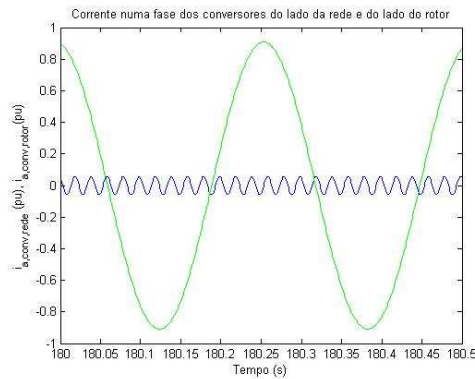


Figura 3.51: Corrente numa fase dos conversores do lado da rede (a azul) e do lado do rotor (a verde), em pu.

A seguir são apresentados, para ilustrar, os sinais dos pulsos PWM que seriam gerados a partir das tensões de controlo, para o respectivo controlo dos braços dos conversores, quer do lado do rotor, quer do lado da rede, assim como a potência envolvida em ambos os conversores e a evolução da tensão do barramento intermédio contínuo DC para a tensão contínua de referência de 2.0 pu.

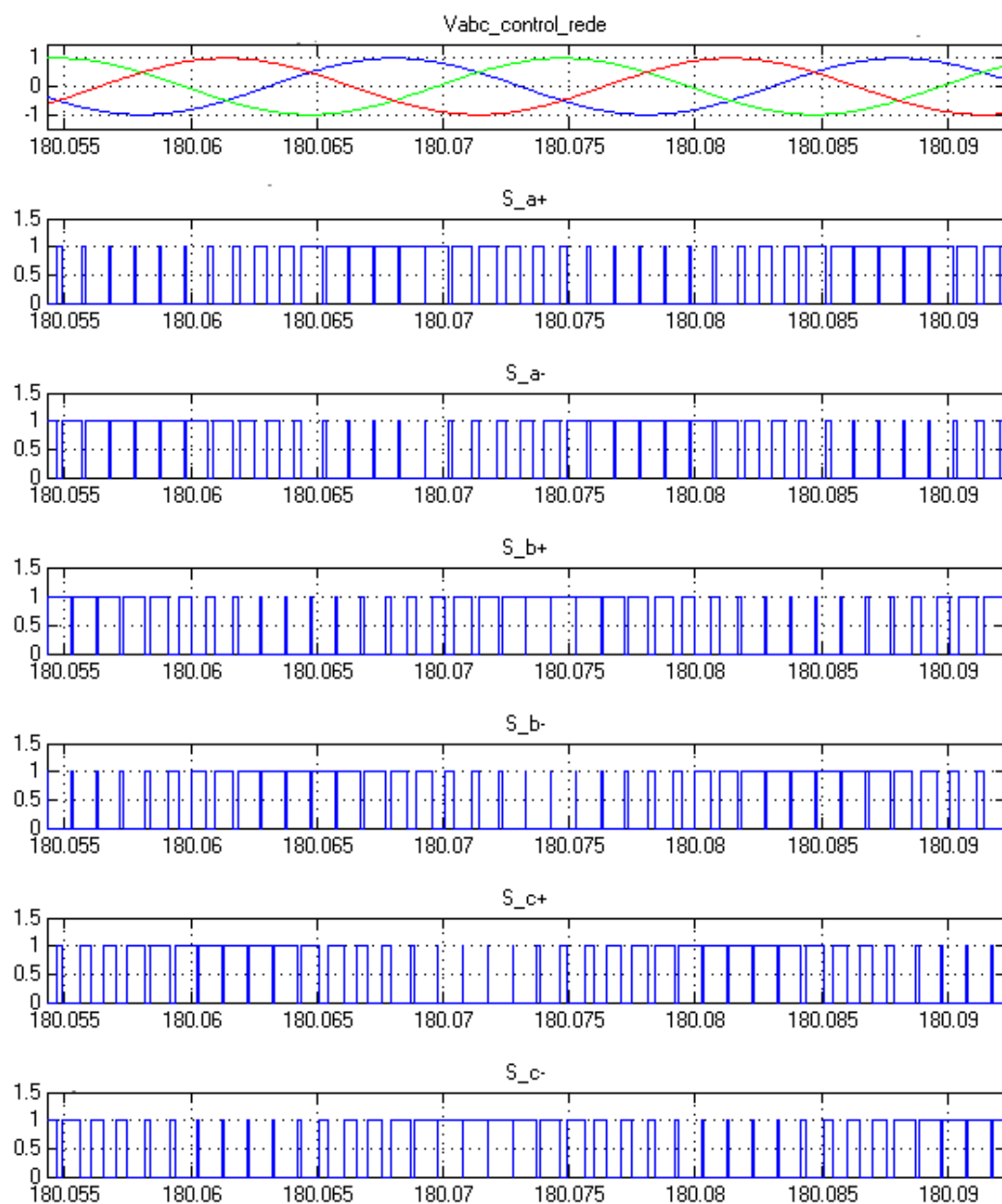


Figura 3.52: Sinais PWM de controle dos conversores do lado da rede e respectiva componente de baixa frequência.

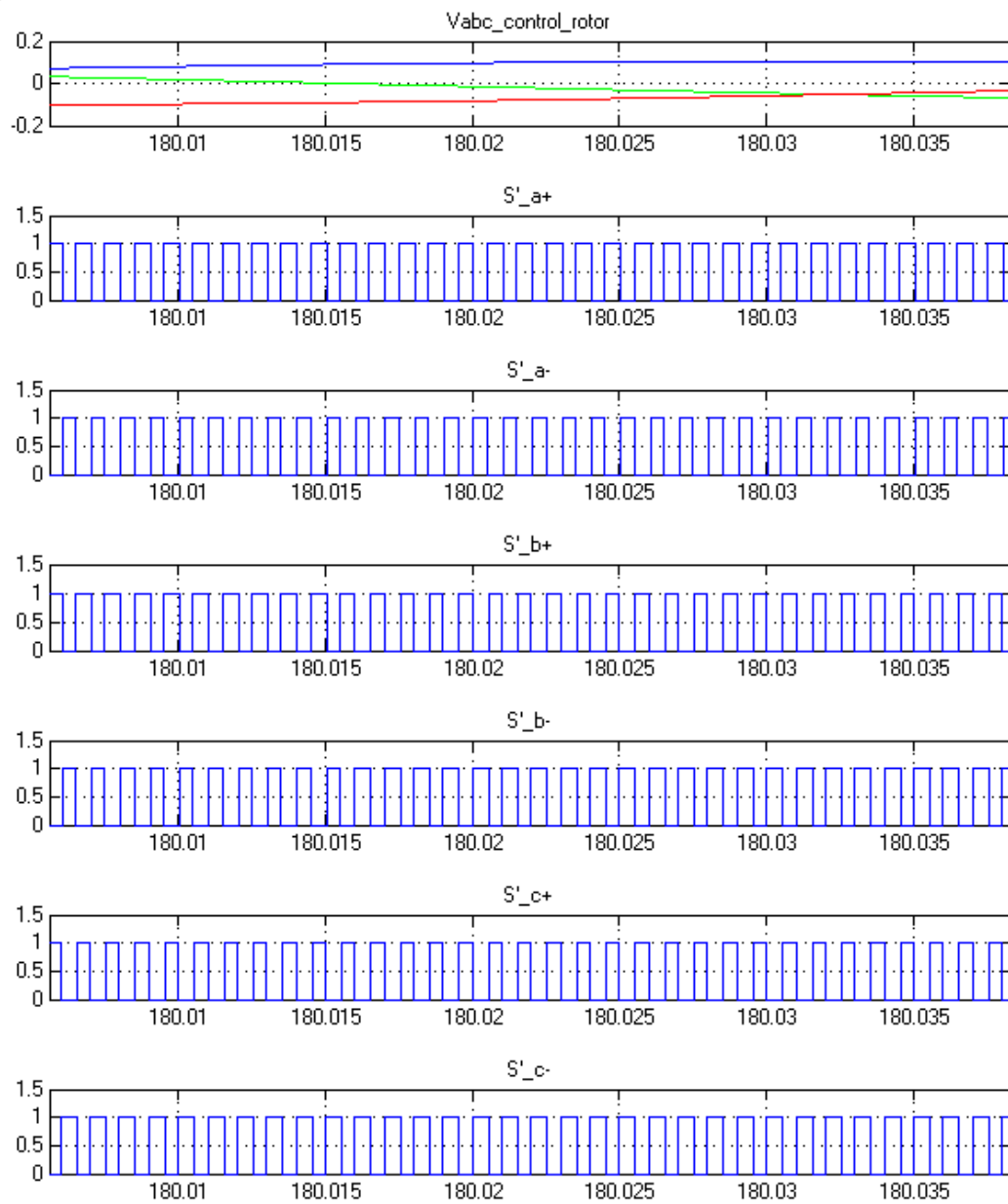


Figura 3.53: Sinais PWM de controle dos conversores do lado do rotor e respectiva componente de baixa frequência.

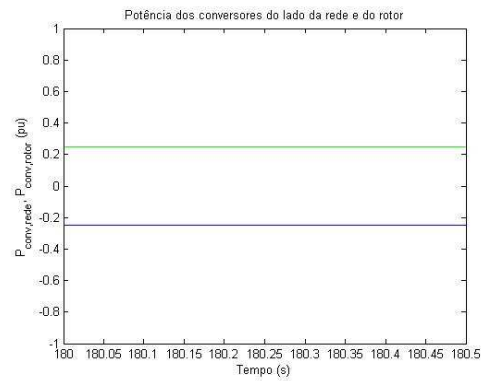


Figura 3.54: Potências dos conversores do lado da rede (a azul) e do lado do rotor (a verde), em pu.

O gráfico anterior mostra o fluxo de potência entre o rotor e o barramento DC (verde) e entre este e a impedância ligada ao lado do estator. Pode-se ver o trânsito de potências no conversor é feito do lado do estator para o lado do rotor e próximo de 0,25 pu.

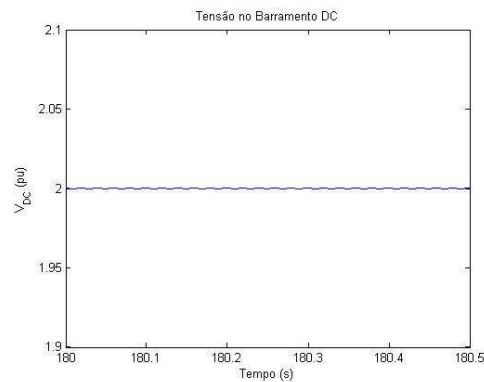


Figura 3.55: Tensão contínua no Barramento DC.

O nível da Tensão DC encontra-se estabilizado em 2.0 pu, apresentado apenas um *ripple* de 0,5%.

3.5. Conclusões

Neste capítulo foram apresentados os modelos matemáticos dos diferentes subsistemas que constituem um sistema de conversão de energia eólica. A máquina utilizada para efectuar a conversão mecânica-eléctrica foi o gerador de indução duplamente alimentado.

Para esta máquina foi apresentado um dos modelos disponíveis na bibliografia assim como os modelos para a aerodinâmica da turbina, engrenagens e dos dois conversores: um do lado da rede e outro do lado do rotor, com um barramento contínuo DC intermédio.

Para que seja possível efectuar o controlo desacoplado do trânsito das potências activa e reactiva, é necessário estabelecer um sistema de controlo que fornecerá as tensões de referência para a modulação PWM de controlo das tensões para os dois conversores. Será feita uma abordagem com controlo vectorial com controladores PI e mais tarde com Redes Neurais com vista à substituição destes controladores PI.

Capítulo 4

Controlo de Sistemas de Produção de Energia Eólica – Controlo Vectorial

4.1. Controlo do Parque Eólico

Para que seja produzida energia a partir do vento é necessário um sistema de controlo que permita o funcionamento dos diversos componentes.

O objectivo dos sistemas dinâmicos de controlo de aerogeradores é o de garantir uma operação segura e automática do aerogerador. Isto reduz o custo de operação, fornece uma resposta dinâmica consistente melhorando a qualidade de serviço e ajuda a garantir a segurança.

Os sistemas de controlo de aerogeradores podem ser divididos, funcionalmente e fisicamente, em três níveis:

- (1) um controlador que controla os vários aerogeradores do parque eólico,
- (2) um controlador de supervisionamento para cada aerogerador individual e
- (3) se necessário, controladores dinâmicos separados para os vários subsistemas de cada aerogerador.

Estes tipos de controladores funcionam hierarquicamente com anéis de controlo a interligá-los, sendo neste trabalho dado mais destaque ao estudo do último nível de controlo.

O controlador do parque eólico, normalmente designado por sistema

SCADA – *Supervisory Control And Data Acquisition*, pode iniciar e desligar qualquer aerogerador do parque e coordenar o funcionamento dos diversos aerogeradores. O sistema SCADA comunica com o controlador de cada aerogerador.

As funções dos controladores de supervisionamento de cada aerogerador são caracterizadas por reacções ao meio. Tipicamente, este controlador comuta o aerogerador entre estados de funcionamento, monitoriza o vento e as condições de falha, pára e arranca o aerogerador de forma ordenada e fornece entradas aos controladores dinâmicos.

Os controladores dinâmicos para os diversos equipamentos dos aerogeradores normalmente controlam um subsistema específico, deixando o controlo de outros subsistemas para outros controladores dinâmicos e a coordenação dos vários controladores para o sistema de controlo de supervisionamento.

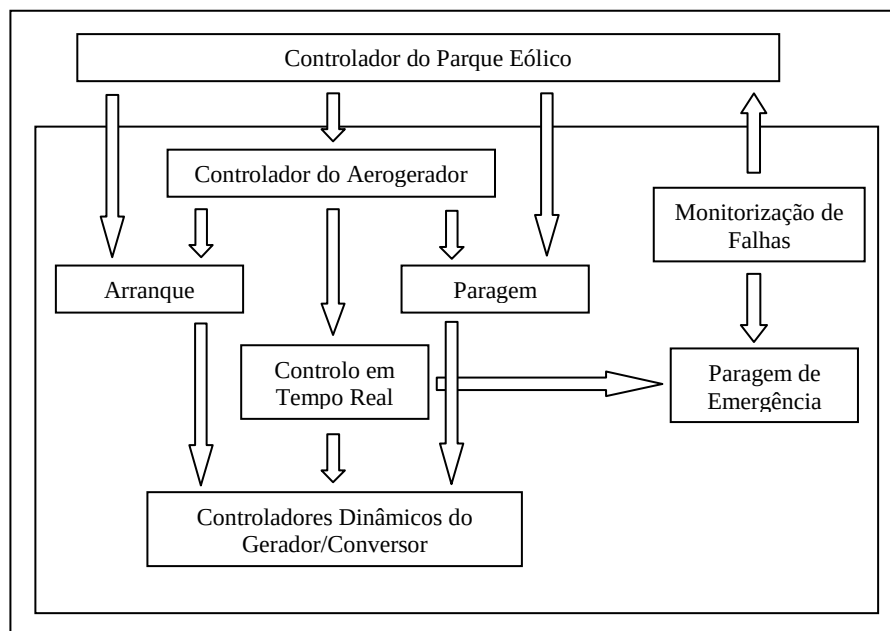


Figura 4.1: Interligação entre os níveis de controlo de um parque eólico.

As turbinas eólicas possuem vários estados de funcionamento: Verificação do sistema, Pronto para funcionar, Arranque, Ligação à rede, Produção de energia, Desligação da rede, Roda livre, Paragem e Paragem de emergência. Dependendo

do tipo de turbina, alguns destes estados podem não existir, ou alguns podem ainda dividir-se em múltiplos estados, ou então combinar vários estados num só.

Uma turbina pode manter-se num estado durante um período longo de tempo dependendo do vento e das condições de funcionamento. Estes estados são designados de estados estacionários. Os outros estados de funcionamento podem apenas ser estados de transição que ocorrem quando há alterações de um estado estacionário para outro, ver Figura 4.2.

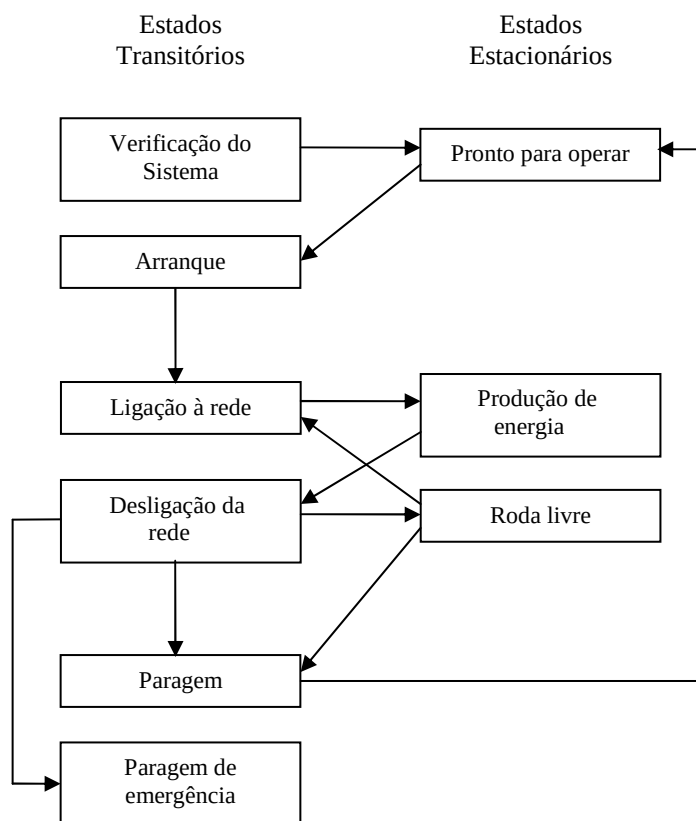


Figura 4.2: Estados de funcionamento de turbinas eólicas.

4.2. Estratégias de Controlo de Aerogeradores ligados à Rede Eléctrica

Na generalidade, os objectivos das estratégias de controlo de turbinas eólicas são:

1. maximizar a produção de energia;
2. controlar a energia reactiva;
3. garantir o funcionamento seguro da turbina;
4. minimizar os custos de operação e de manutenção através da redução de carga e aumento do tempo de vida útil.

Uma aproximação exacta do controlo de turbinas eólicas e os objectivos imediatos para a estratégia de controlo dependem do regime de operação da turbina. Abaixo da velocidade nominal V_n , geralmente tenta-se maximizar a produção de energia. Acima da velocidade nominal, o objectivo é limitar a potência. Por exemplo, as estratégias de controlo para máquinas reguladas por *pitch* e *stall* são em função da velocidade do vento e das opções de controlo, representadas na Figura 4.3.

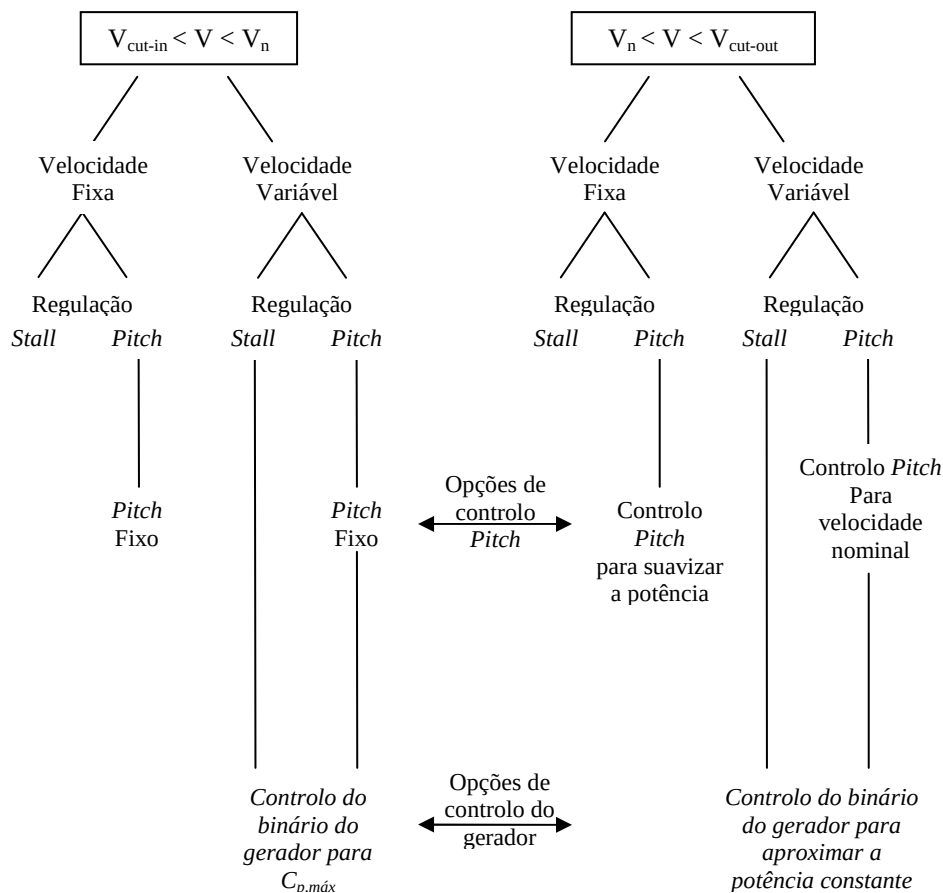


Figura 4.3: Estratégias de controlo gerais.

4.2.1. Controlo Dinâmico do Gerador/Conversor

Pretende-se controlar a potência fornecida por cada gerador de forma a otimizar o funcionamento do Parque Eólico com vista à entrega da potência activa máxima à rede em condições de qualidade de serviço e segurança. Também pretende controlar-se os fluxos de energia reactiva de acordo com valores especificados quer por limitação pelas normas em vigor ou por despacho.

Assim, através do uso de uma estratégia de controlo adequada pode-se:

- Controlar a energia activa fornecida pela turbina de modo a otimizar o ponto de funcionamento;
- Limitar a energia activa no caso de velocidades elevadas do vento;
- Controlar o intercâmbio da energia reactiva entre o gerador e a rede, especialmente no caso de redes fracas, onde podem ocorrer flutuações de tensão;
- Garantir a qualidade de serviço do parque eólico, nomeadamente no que se refere à tensão da rede;
- Minimizar o custo de exploração e de manutenção do parque eólico.

Numa primeira fase pretende-se controlar as energias por especificação de valores de referência. Uma forma de controlar as energias activa e reactiva fornecidas pelo gerador de indução à rede é conseguido por intermédio do controlo das correntes de excitação do rotor.

Diversas estratégias de controlo têm sido vastamente discutidas na literatura, e já referidas no Capítulo 2. Uma vez que o gerador já foi formulado para as componentes qd , pode-se utilizar o Controlo Vectorial que permite o desacoplamento das componentes q e d das correntes do rotor de forma a controlar o fluxo das energias activas e reactivas, respectivamente.

Uma configuração típica é ilustrada na Figura 4.4 e consiste num Gerador de Indução Duplamente Alimentado com os enrolamentos do estator ligados directamente à rede e os enrolamentos do rotor ligados a um conversor PWM convencional.

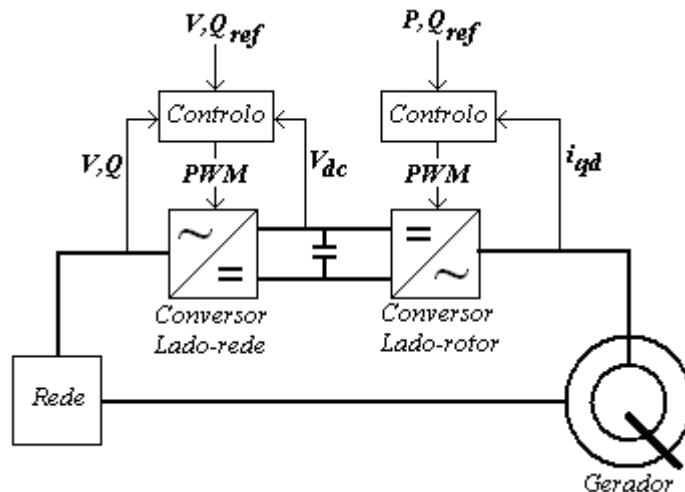


Figura 4.4: Configuração típica do Gerador de Indução Duplamente Alimentado e do conversor.

O conversor possui dois módulos de controlo, um do lado do rotor e outro do lado da rede. O objectivo do conversor do lado do rotor é o controlo independente das energias activa e reactiva. Estas energias não são controladas directamente mas por controlo das correntes do rotor. O objectivo do conversor do lado da rede é o de manter a tensão DC no condensador intermédio de modo a garantir um funcionamento do conversor com factor de potência unitário garantindo assim que a única troca de energia reactiva é através do estator.

O diagrama genérico do sistema de controlo do conversor do lado do rotor para controlo da energia activa e reactiva é mostrado na Figura 4.5.

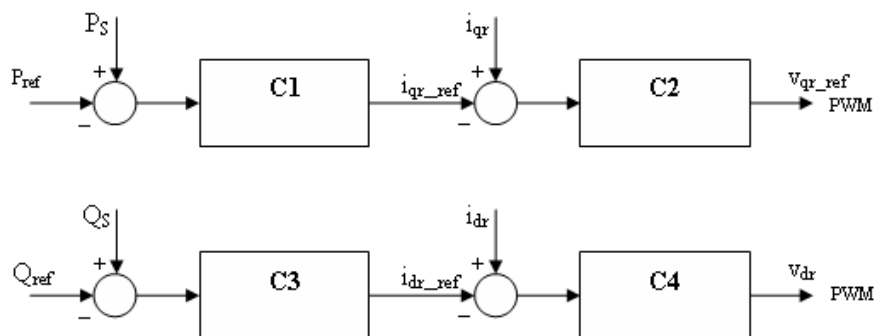


Figura 4.5: Diagrama de blocos genérico do controlador.

Na Figura 4.5 P_s é a potência activa e Q_s é a potência reactiva, medidas no

estator do gerador. P_{ref} é o valor óptimo para a potência activa e é obtido a partir da característica da turbina para a velocidade de rotação do veio e o ângulo *pitch*. O valor de Q_{ref} é definido de forma a manter a tensão no ponto de ligação à rede constante.

Num referencial de eixos ortogonais *qd*, as potências activa P_s e reactiva Q_s instantâneas do estator são determinadas pelas expressões (4.1) e (4.2), em que os valores i_{qs} e i_{ds} são as componentes *qd* das correntes do estator:

$$P_s = \frac{3}{2} (v_{ds} i_{ds} + v_{qs} i_{qs}) \quad (4.1)$$

$$Q_s = \frac{3}{2} (v_{qs} i_{ds} - v_{ds} i_{qs}) \quad (4.2)$$

Pretende-se agora criar os modelos dos controladores para os quatro blocos C1 a C4 apresentados na Figura 4.5. Neste capítulo serão apresentados os sistemas de controlo baseados num controlo vectorial, e no próximo capítulo, com base em redes neuronais.

4.2.2. Controlo do Conversor do lado da rede

O objectivo do conversor do lado da rede é o de manter uma tensão DC constante independentemente da amplitude e direcção da potência do rotor. Para isso, é utilizado uma estratégia de controlo vectorial considerando um referencial orientado com a posição da tensão do estator ou da rede. Isto permite o controlo independente da potência activa e reactiva entre o conversor e a rede. O Conversor PWM utilizado é regulado pela corrente: a componente directa i_d da corrente regula o nível DC da tensão e a componente em quadratura i_q da corrente regula a potência reactiva [68].

O conversor utilizado é normalizado e é apresentado na Figura 3.37. Considerando para a bobina de ligação que as resistências e indutâncias das fases são todas iguais a R e L , respectivamente, que ω_e é a frequência, e designando v_a , v_b e v_c as tensões da rede e por v_{a1} , v_{b1} e v_{c1} as componentes das tensões de

saída do inversor, obtém-se:

$$\begin{cases} v_a = Ri_a + L \frac{di_a}{dt} + v_{a1} \\ v_b = Ri_b + L \frac{di_b}{dt} + v_{b1} \\ v_c = Ri_c + L \frac{di_c}{dt} + v_{c1} \end{cases} \quad (4.3)$$

Usando a transformação para coordenadas $\alpha\beta$ para as tensões e correntes obtém-se:

$$\begin{cases} v_\alpha = \sqrt{3}v_{ab} + \frac{\sqrt{3}}{2}v_{bc} \\ v_\beta = \frac{3}{2}v_{bc} \end{cases}, \quad (4.4)$$

$$\begin{cases} i_\alpha = \frac{3}{2}i_a \\ i_\beta = \frac{\sqrt{3}}{2}i_b - \frac{\sqrt{3}}{2}i_c \end{cases} \quad (4.5)$$

Transformando, ainda, para um sistema ortogonal arbitrário com fase θ relativo ao eixo α resulta, ver Figura 3.39.

$$\begin{cases} v_d = v_\alpha \cos \theta - v_\beta \sin \theta \\ v_q = v_\alpha \sin \theta + v_\beta \cos \theta \end{cases} \quad (4.6)$$

Obtém-se, ainda:

$$\begin{cases} v_q = Ri_q + L \frac{di_q}{dt} + \omega_e Li_d + v_{q1} \\ v_d = Ri_d + L \frac{di_d}{dt} - \omega_e Li_q + v_{d1} \end{cases} \quad (4.7)$$

Se se alinhar o eixo-d do referencial com a posição da tensão do estator

$$\theta_e = \int \omega_e dt = \tan^{-1} \frac{v_\beta}{v_\alpha} \quad (4.8)$$

a componente v_q da tensão é nula e a componente v_d é constante e igual à tensão da rede. Assim, as potências activa e reactiva são directamente proporcionais às componentes da corrente i_d e i_q , respectivamente.

$$\begin{cases} P = \frac{3}{2}(v_d i_d + v_q i_q) = \frac{3}{2} v_d i_d \\ Q = \frac{3}{2}(v_q i_d - v_d i_q) = -\frac{3}{2} v_d i_q \end{cases} \quad (4.9)$$

Desprezando os harmónicos provocados pelas comutações dos interruptores do conversor e as perdas no conversor e sendo m_1 o índice de modulação em tensão, tem-se que:

$$V_{DC} i_{DCs} = 3v_d i_d \quad (4.10)$$

$$v_d = \frac{m_1}{2\sqrt{2}} V_{DC} \quad (4.11)$$

$$i_{DCs} = \frac{3}{2\sqrt{2}} m_1 i_d \quad (4.12)$$

$$C \frac{dV_{DC}}{dt} = i_{DCs} - i_{DCr} \quad (4.13)$$

Pela equação 4.10 conclui-se que a tensão DC é controlada pela corrente i_d . Assim, a estratégia de controlo utiliza duas malhas de controlo para as correntes i_d e i_q . A primeira deriva do erro da tensão DC na entrada de um controlador PI vulgar e a segunda determina o factor de potência. A função de transferência do controlador pode ser determinada a partir da equação 4.13 considerado que i_{DCr} representa um distúrbio e que pode ser desprezado. Assim, no domínio Laplace

$$sCV_{DC} = I_{DCs} \quad (4.14)$$

Substituindo na equação 4.12, obtém-se

$$sCV_{DC} = \frac{3}{2\sqrt{2}} m_1 i_d \quad (4.15)$$

ou seja,

$$F_1(s) = \frac{V_{DC}}{i_d} = \frac{3m_1}{2\sqrt{2}C} \cdot \frac{1}{s} \quad (4.16)$$

Desta expressão resulta o valor de referência para a corrente i_{d_ref} utilizado na malha de controlo mais externa.

Para as malhas de controlo internas é preciso determinar também as funções de transferência dos controladores PI. As funções de transferência dos controladores PI são determinadas por aplicação da transformada de Laplace às equações 4.7:

$$\begin{cases} v_q = (R + sL)i_q + \omega_e L i_d + v_{q1} \\ v_d = (R + sL)i_d - \omega_e L i_q + v_{d1} \end{cases} \quad (4.17)$$

Designando nas equações anteriores:

$$\begin{cases} v'_q = (R + sL)i_q \\ v'_d = (R + sL)i_d \end{cases} \quad (4.18)$$

as equações seguintes podem ser utilizadas no projecto dos anéis de controlo de corrente dos controladores, [68]:

$$F_{2,3}(s) = \frac{i_q}{v'_q} = \frac{i_d}{v'_d} = \frac{1}{R + sL} \quad (4.19)$$

Substituindo as equações 4.18 nas equações 4.17, respectivamente, e sendo $v_q(s)=0$, podem obter-se os valores de referência para as tensões v_{q1_ref} e v_{d1_ref} :

$$\begin{cases} v_{q1_ref} = -v'_q - \omega_e L i_d + v_q \\ v_{d1_ref} = -v'_d + \omega_e L i_q + v_d \end{cases} \quad (4.20)$$

Estes valores de referência são as entradas utilizadas no conversor PWM de forma a garantir o nível DC da tensão e factor de potência pretendidos.

O controlo do conversor pode ser modelizado de acordo com o esquema de controlo da Figura 4.6 para o qual podem ser aplicadas técnicas de projecto normalizadas.

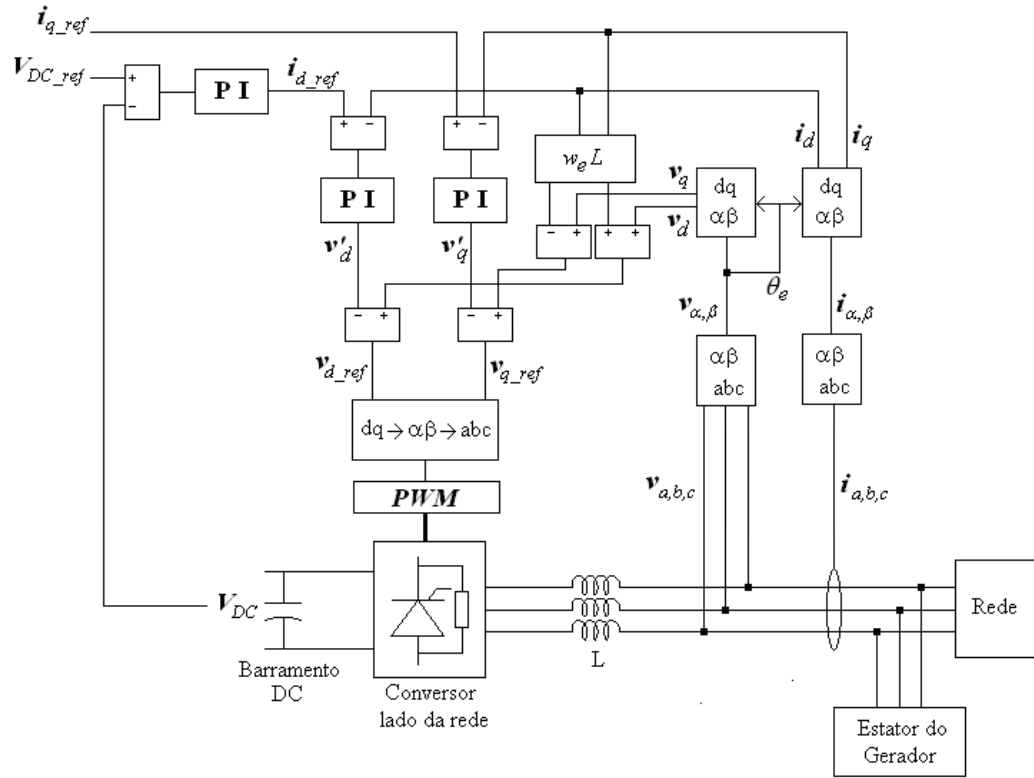


Figura 4.6: Estrutura do controlo vectorial do conversor do lado da rede.

O projecto do controlador da tensão DC pode ser obtido no domínio contínuo, sendo assumido que o ciclo correspondente a i_q é ideal. A função de transferência do subsistema a controlar é dada pela equação 4.16.

4.2.3. Controlo do Conversor do lado do rotor

O controlo do rotor do gerador de indução é realizado num referencial dq rotativo síncrono, com o eixo-d orientado ao longo da posição do fluxo do estator. Deste modo podemos obter o desacoplamento entre o binário electromagnético e a corrente de excitação do rotor. O conversor PWM actua sobre o rotor do gerador e

o controlo é efectuado mediante os sinais das correntes do rotor e do estator, a tensão do estator e a posição do rotor.

Como o estator está ligado à rede, a influência da resistência do rotor é desprezável, e por isso, a corrente de magnetização é considerada constante. A relação entre o binário e as grandezas eléctricas, podem ser descritas por [68].

$$\begin{cases} \lambda_d^s = L_0 i_{ms} = L_s i_d^s + L_0 i_d^r \\ \lambda_q^s = 0 \end{cases} \quad (4.21)$$

$$\begin{cases} \lambda_d^r = L_m i_{ms} + \sigma L_r i_d^r \\ \lambda_q^r = \sigma L_r i_q^r \end{cases} \quad (4.22)$$

$$\begin{cases} v_d^r = R_r i_d^r + \sigma L_r \frac{di_d^r}{dt} - \omega_{slip} \sigma L_r i_q^r \\ v_q^r = R_r i_q^r + \sigma L_r \frac{di_q^r}{dt} + \omega_{slip} (L_m i_{ms} + \sigma L_r i_d^r) \end{cases} \quad (4.23)$$

e

$$T_{em} = -\frac{3}{2} p L_m i_{ms} i_q^r \quad (4.24)$$

sendo

$$\omega_{slip} = \omega_e - \omega_r \quad (4.25)$$

$$\sigma = 1 - \frac{L_m}{L_r} \quad (4.26)$$

$$L_0 = \sqrt{L_m L_s} \quad (4.27)$$

O ângulo do fluxo do estator é determinado através das expressões

$$\begin{cases} \lambda_\alpha^s = \int (v_\alpha^s - R_s i_\alpha^s) dt \\ \lambda_\beta^s = \int (v_\beta^s - R_s i_\beta^s) dt \end{cases} \quad (4.28)$$

$$\theta_s = \tan^{-1} \frac{\lambda_\beta^s}{\lambda_\alpha^s} \quad (4.29)$$

onde θ_s corresponde à posição do fluxo do estator.

Pela equação 4.23 pode-se verificar que o binário electromagnético depende directamente da corrente i_{qr} podendo ser então regulado pela tensão v_{qr} , e a corrente de excitação do rotor i_{dr} pode ser controlada pela tensão v_{dr} .

Na Figura 4.7 é apresentado o diagrama de blocos do controlador do conversor do lado do rotor.

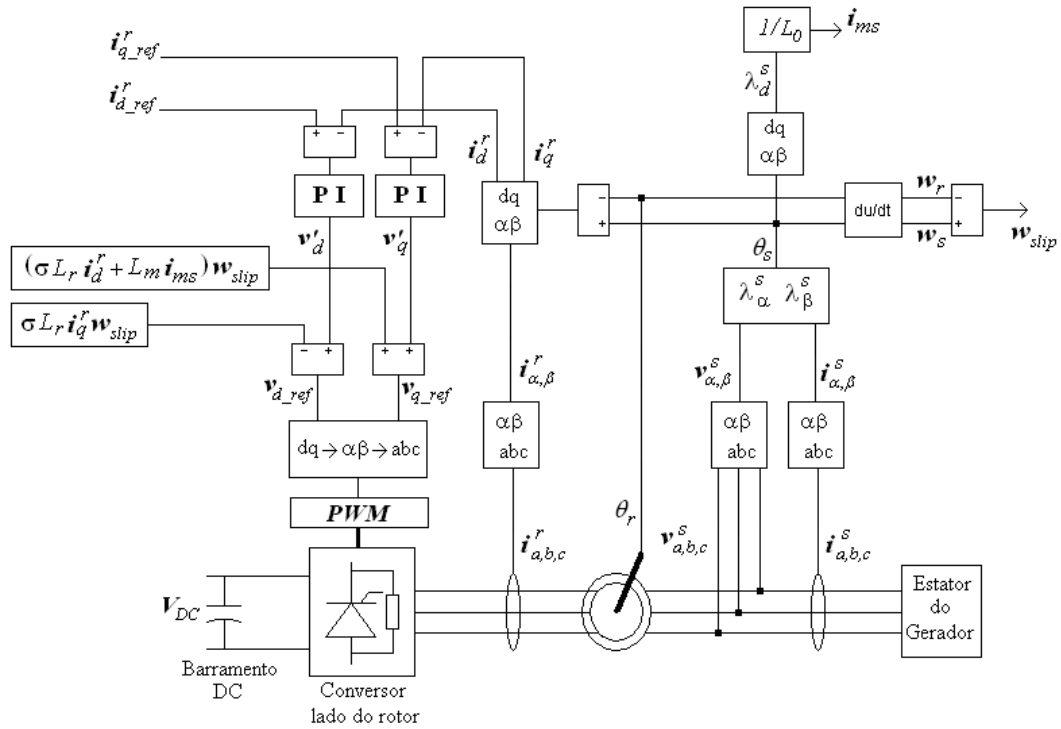


Figura 4.7: Estrutura do controlo vectorial do conversor do lado do rotor.

O controlo do conversor do lado do rotor pode ser feito de forma análoga ao que foi considerado para controlo do conversor do lado da rede apresentado no ponto anterior. Assim, as tensões do rotor no referencial dq podem ser obtidas a partir da equação 4.24:

$$\begin{cases} v_d^r = R_r i_d^r + \sigma L_r \frac{di_d^r}{dt} \\ v_q^r = R_r i_q^r + \sigma L_r \frac{di_q^r}{dt} \end{cases} \quad (4.30)$$

Aplica-se um controlador PI aos sinais de erro i_{dr} e i_{qr} para se obter as tensões v_{dr} e v_{qr} , respectivamente. Para compensar o controlo são adicionados os termos de desacoplamento às equações anteriores de modo a obter as tensões de referência v_{dr_ref} e v_{qr_ref} , [68] de acordo com:

$$\begin{cases} v_{d_ref}^r = v_d^r - \sigma L_r i_q^r \omega_{slip} \\ v_{q_ref}^r = v_q^r + (L_m i_{ms} + \sigma L_r i_d^r) \omega_{slip} \end{cases} \quad (4.31)$$

que são análogas às equações 4.20.

4.2.4. Implementação - Diagramas de Blocos

A seguir são apresentados os blocos e diagramas dos sistemas de controlo vectorial dos conversores do lado da rede seguido pelo do lado do rotor, implementados em *Simulink* como foram descritos atrás. Tal como já foi referido, estes sistemas utilizam os convencionais controladores PI, cuja sintonização foi preciso efectuar.



Figura 4.8: Bloco do sistema de controlo vectorial do conversor do lado da rede.

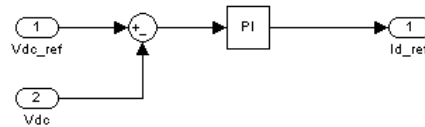


Figura 4.9: Diagrama de blocos do regulador da tensão DC.

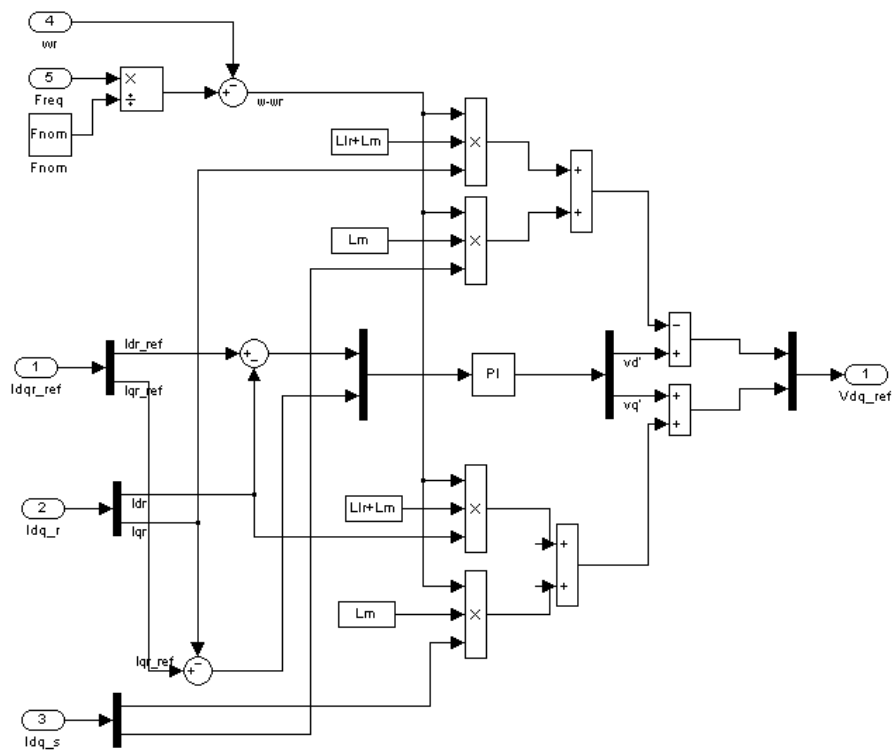


Figura 4.13: Diagrama de blocos do regulador de corrente do conversor do lado do rotor.

4.2.5. Resultados

Este ponto tem como objectivo apresentar e descrever os resultados obtidos a partir de simulações dinâmicas de uma rede interligada a um parque eólico utilizando a ferramenta *Matlab/Simulink*. Dos resultados, são feitas avaliações da simulação, sob o ponto de vista do comportamento dinâmico e da estabilidade transitória do sistema.

Assim, pretende-se testar a resposta do aerogerador a diversas solicitações relativas ao funcionamento em regime normal e algumas falhas típicas neste tipo de sistemas. Algumas dessas solicitações foram realizadas por actuação e variação dos parâmetros de referência para as tensões de controlo dos conversores; e outras devido a solicitações externas ao sistema.

Para testar o sistema ligou-se ao barramento de saída um circuito equivalente de uma rede eléctrica, usando a *Toolbox SimPowerSystems* do

Matlab/Simulink. Na saída do barramento ao qual está conectado o estator do gerador e o conversor (B_0) foi ligado um filtro capacitivo de modo a reduzir o efeito dos harmónicos na rede causados pelas comutações de alta frequência dos conversores, seguida do barramento de saída do parque eólico (B_1), um transformador elevador de tensão em série com uma linha de transmissão de energia seguido de um outro barramento (B_4) e o equivalente de Thevenin para a restante rede eléctrica como mostra a figura seguinte.

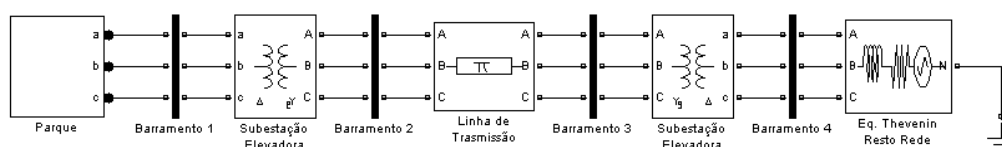


Figura 4.14: Diagrama de blocos da rede eléctrica.

O barramento B_1 permitirá avaliar as perturbações no ponto de interligação do parque à rede eléctrica e o barramento B_4 permitirá analisar as mesmas perturbações num ponto afastado desse ponto de interligação.

O caso simulado neste estudo consiste na ligação de um aerogerador de 2 MW, equipado com gerador de indução duplamente alimentado, ligado a uma rede de 690 V/50 Hz. É incluída uma linha de transporte de energia de comprimento 30 km para alimentação de cargas a 120 kV. Para a rede de transporte são utilizadas duas subestações elevadoras 690/25 kV e 25/120 kV. Os principais parâmetros da rede são apresentados no Anexo B.

A seguir são apresentadas algumas simulações típicas que foram realizadas. Nestas são mostradas as diversas respostas do sistema às diferentes solicitações.

Na entrada da turbina é aplicado um degrau no instante inicial igual a 10 m/s correspondente à velocidade nominal do vento e foram registados os sinais a seguir apresentados para as diversas situações apresentadas de operacionalidade e de avaria/falha com o intuito de mostrar como os controladores se comportam e garantem a robustez do parque.

Controlo da Potência Reactiva

No primeiro teste pretende-se verificar qual a resposta dinâmica do gerador/conversor a uma variação da potência reactiva de referência. Esta variação, juntamente com a respectiva potência reactiva medida no barramento de saída, são apresentadas na figura e traduz dois degraus, um primeiro ascendente de 0.2 pu, e o segundo descendente -0.4 pu.

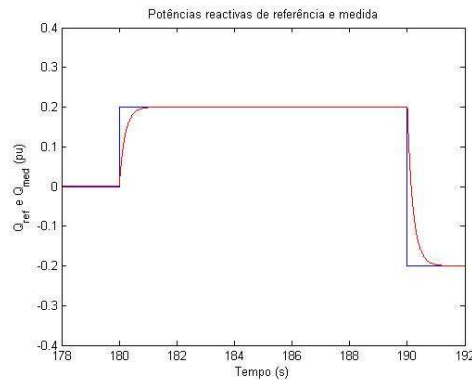


Figura 4.15: Potências reactivas de referência, a azul, e medida, a vermelho, no barramento de saída.

A variação da potência reactiva e do factor de potência a que está a trabalhar o gerador pode ser controlado, como já foi referido anteriormente, por variação da componente directa da corrente do rotor i_d e como se pode verificar pela figura a seguir.

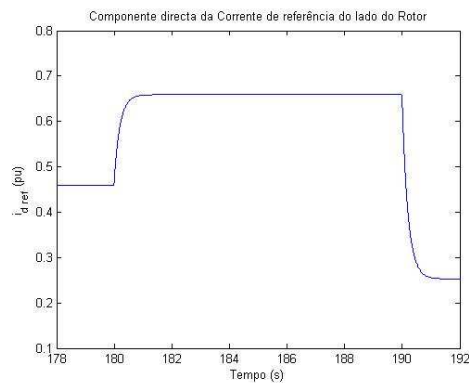


Figura 4.16: Componente directa da corrente de referência do Rotor.

A componente directa da corrente i_d do rotor durante o funcionamento normal do gerador é igualada à corrente de magnetização o que significa que a corrente de excitação é inteiramente fornecida ao rotor da máquina. Isto resulta num factor de potência unitário e na potência reactiva nula. Podemos verificar que qualquer variação na componente directa da corrente do rotor permite controlar o factor de potência e a energia reactiva caso isso seja necessário.

Relativamente à qualidade da tensão da rede pode-se verificar que quando se provoca uma variação na energia reactiva isso provoca um oco no sinal de tensão. Como seria de esperar o desequilíbrio da potência reactiva provoca uma variação no nível da tensão. Isto mostra a importância de o parque estar a trabalhar com um factor de potência próximo da unidade.

Relativamente à frequência não apresenta variações significativas em relação ao valor nominal de 50 Hz. Tal como a posição angular da tensão, o valor da frequência angular da tensão é feita através de um bloco PLL do *Matlab/Simulink*.

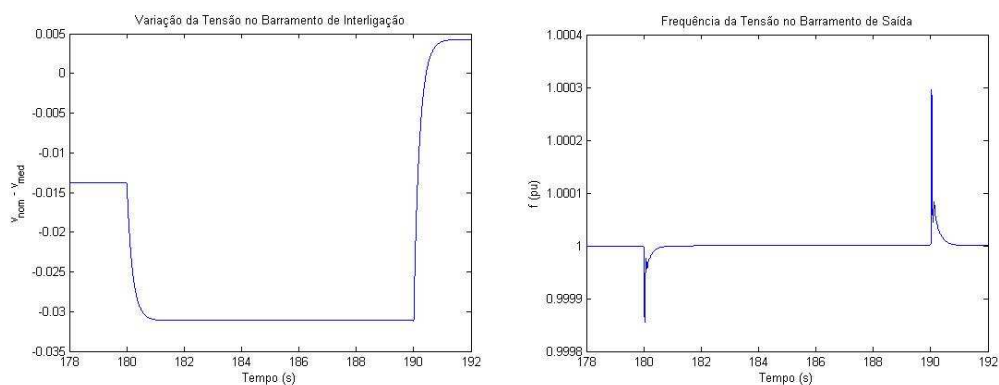


Figura 4.17: Variação do nível do sinal de Tensão no barramento de saída do aerogerador.

Pelo gráfico da potência activa, verifica-se que apenas houve uma variação pouco significativa de cerca de 0,23%, permitindo concluir que se pode controlar de forma independente as potências reactiva e activa por variação das duas componentes da corrente do rotor, a directa e a em quadratura, respectivamente.

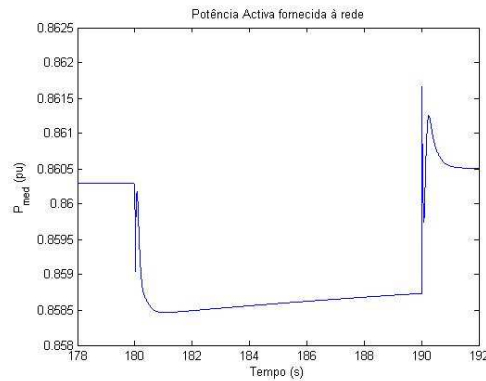


Figura 4.18: Potência activa medida produzida pelo gerador.

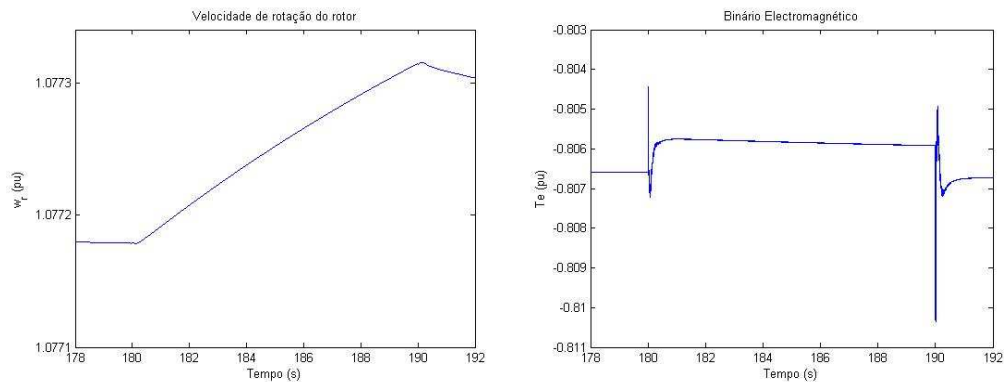


Figura 4.19: Velocidade de rotação do rotor e Binário Electromagnético.

Uma vez que o gerador está a ser accionado por um binário mecânico constante verifica-se pelos gráficos anteriores que é possível variar a velocidade de rotação e o binário electromagnético do gerador por variação da corrente do rotor.

Controlo da Velocidade de Rotação do Gerador e da Potência Activa

No segundo teste pretende-se verificar qual a resposta do gerador/conversor a uma variação da potência activa, que é mostrada pela variação na componente em quadratura da corrente do rotor i_q . Esta variação consiste em impor um pulso negativo de amplitude 0.2 pu, conforme é mostrado na Figura 4.21. Pode-se verificar pela figura da potência activa que a variação na

componente em quadratura da corrente do rotor permite variar directamente a potência activa permitindo ao mesmo tempo que o gerador continue a operar com um factor de potência unitário.

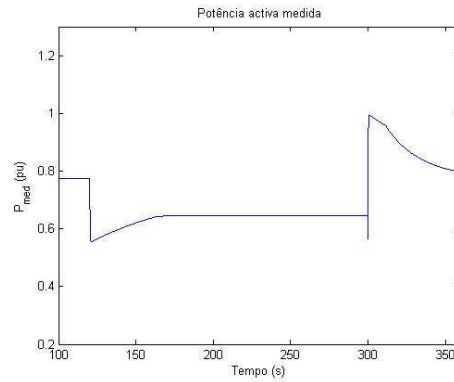


Figura 4.20: Valor medido da potência activa do gerador.

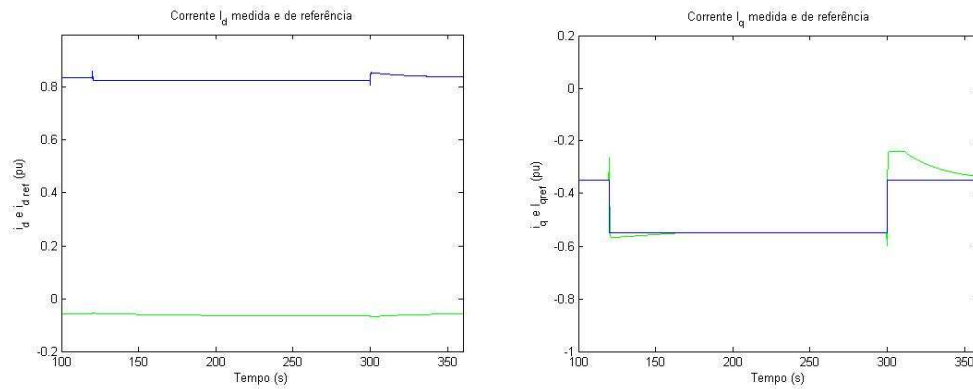


Figura 4.21: Componentes da corrente i_{dq} do rotor: valores de referência (verde) e medido (azul).

O *overshoot* verificado na componente em quadratura da corrente e consequentemente na potência activa é devido à resposta dos controladores PI no regulador de corrente.

A variação na componente em quadratura i_q do rotor vai provocar a aceleração do rotor, durante o período em que a corrente é negativa, aumentando o binário electromagnético do gerador uma vez que o gerador está a ser accionado por um binário mecânico constante.

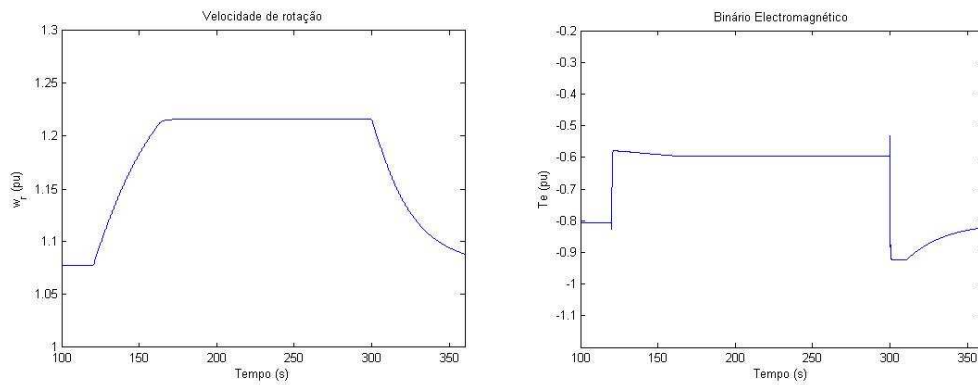


Figura 4.22: Velocidade de rotação do rotor e Binário Electromagnético.

Sendo a componente em quadratura do controlador do conversor do lado do rotor a variável que mais influência tem no controlo da potência activa de saída pode-se verificar pela figura seguinte que esta não tem quase influência na potência reactiva que se manteve inalterada.

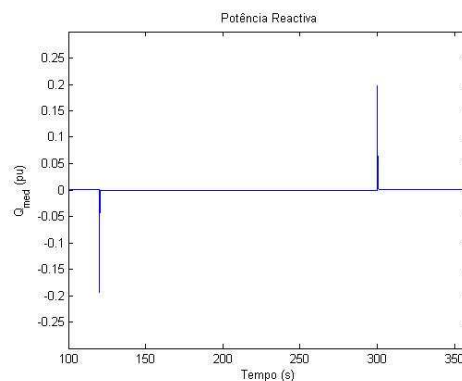


Figura 4.23: Valores medidos das Potências activa e Reactiva do gerador.

Relativamente à qualidade da tensão da rede pode-se verificar que uma variação na energia activa não provocou grandes alterações no nível do sinal de tensão nem na sua frequência, esta última porque a variação no valor da potência activa também não foi suficientemente elevada e a rede de interligação é forte.

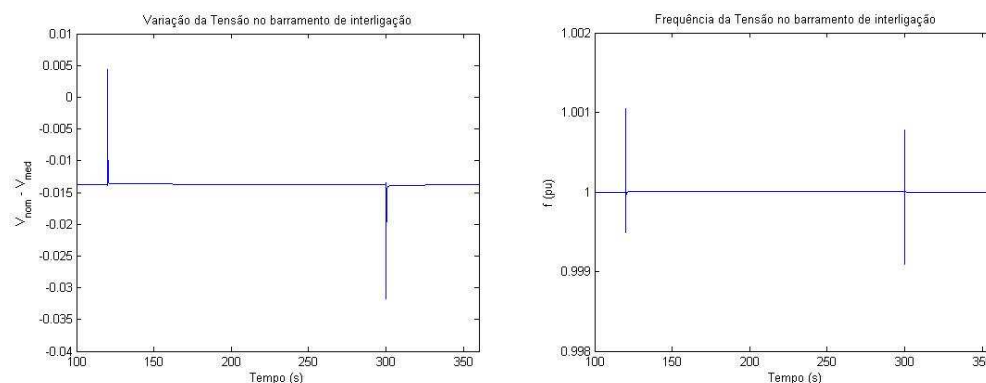


Figura 4.24: Variação do nível do sinal de Tensão no barramento de saída do aerogerador.

Simulação de um Curto-Circuito Assimétrico no Barramento de Interligação à Rede (B₁)

A necessidade de simular o comportamento da rede, quando submetida a este tipo de falha, deve-se ao facto desta ser uma das maiores contingências que uma rede pode sofrer e que pode provocar instabilidade no sistema.

Provocou-se um curto-circuito assimétrico próximo do Barramento de interligação do parque à rede eléctrica – Barramento B₁ da Figura 4.14. Trata-se de um curto-circuito Fase-Terra, ocorrido no instante 180 segundos e de duração de 180 ms, com impedância de defeito igual a 6×10^{-3} pu.

Para esta situação, são apresentados os sinais trifásicos da tensão e da corrente, e também da frequência registados no barramento de interligação e no barramento mais afastado do ponto de interligação – Barramento B₄ da Figura 4.14.

No barramento de interligação à rede (B₁) verifica-se que a tensão em duas fases pode atingir cerca de 1,7 pu podendo fazer actuar as protecções do parque e desligar as máquinas caso o defeito persista durante um intervalo longo.

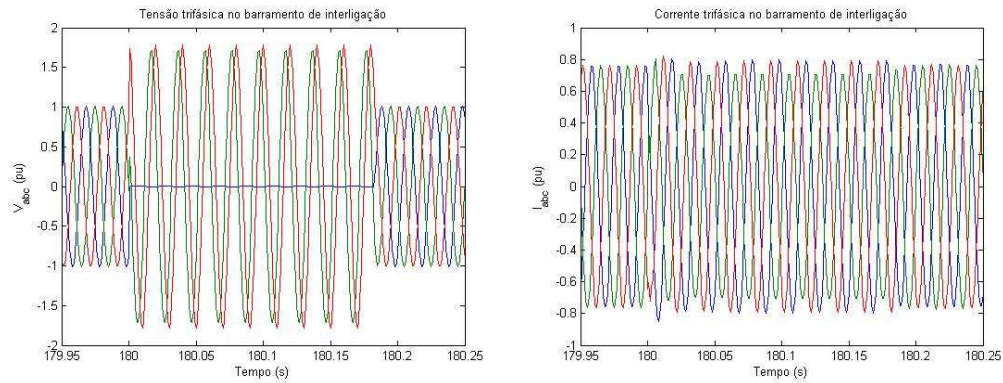


Figura 4.25: Tensões e Correntes trifásicas no barramento de interligação à rede eléctrica.

Enquanto o defeito persiste ocorre uma variação na frequência podendo obter-se uma variação máxima de 0,4% mas que normaliza após o defeito.

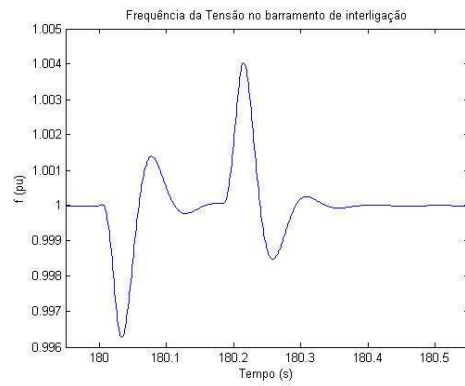


Figura 4.26: Frequências da tensão no barramento de interligação à rede à rede eléctrica.

Num barramento mais afastado do ponto de interligação (B_4) verifica-se os seguintes sinais das tensões e correntes trifásicas.

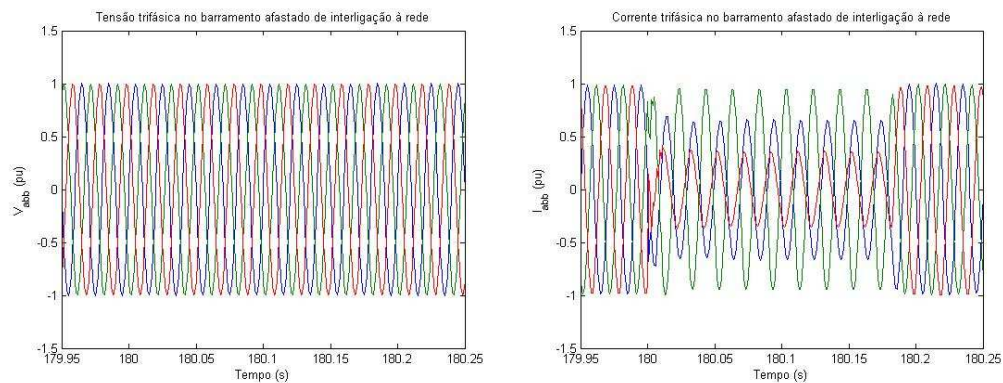


Figura 4.27: Tensões e Correntes trifásicas no barramento afastado do ponto de interligação à rede.

Pode-se verificar pelas figuras seguintes que este defeito provocou uma variação controlada nas potências que cessou após ter terminado o defeito sem provocar a instabilidade do sistema.

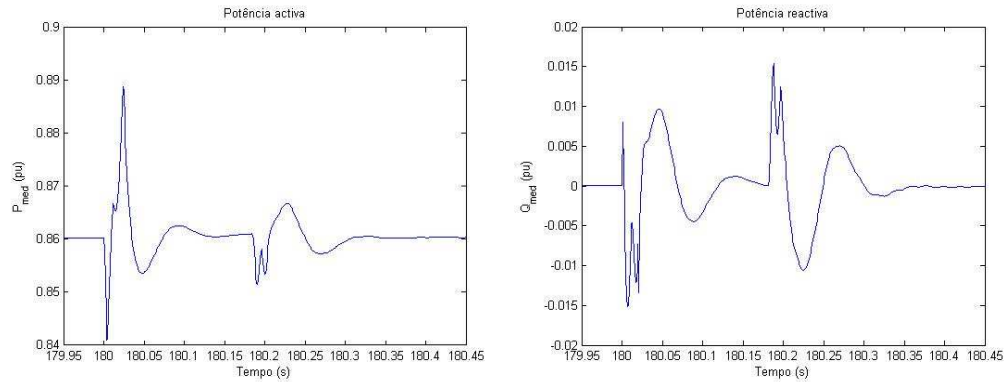


Figura 4.28: Potência Activa e Potência Reactiva.

Este defeito provoca um transitório no binário e na velocidade de rotação, mas não suficiente para provocar a aceleração do rotor.

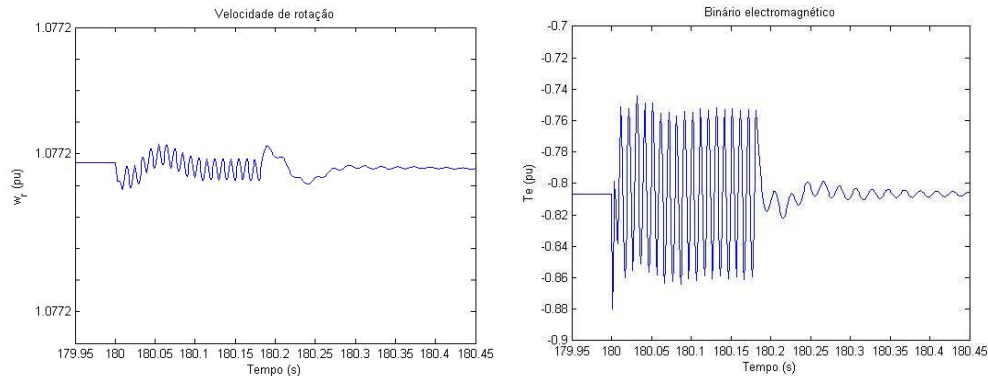


Figura 4.29: Velocidade de rotação e Binário Electromagnético.

Simulação de um Curto-Circuito Assimétrico no Barramento afastado da Interligação à Rede (B₄)

Desta vez provocou-se um curto-circuito assimétrico idêntico ao anterior, mas agora no barramento mais afastado do ponto de interligação do parque à rede eléctrica – Barramento B₄ da Figura 4.14. Também se trata de um curto-circuito

Fase-Terra de duração de 180 ms, com impedância de curto-circuito igual a 3×10^{-6} pu.

Para esta situação, são apresentados os sinais trifásicos da tensão e da corrente, e também da frequência registados no barramento de interligação (B₁).

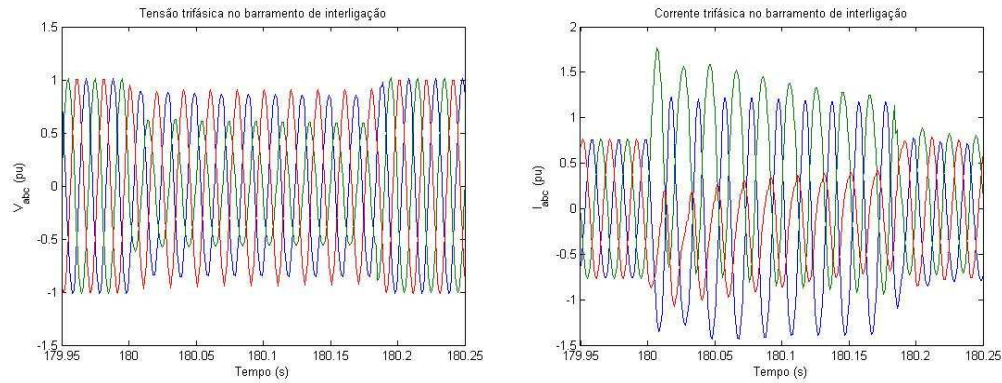


Figura 4.30: Tensões e Correntes trifásicas no barramento de interligação à rede eléctrica.

Enquanto o defeito persiste ocorre uma variação na frequência podendo obter-se uma variação máxima de 0,5%, que também normalizou após a passagem do defeito.

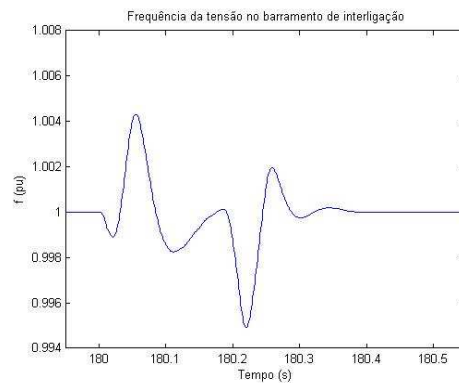


Figura 4.31: Frequências da tensão no barramento de interligação à rede à rede eléctrica.

Da mesma forma, este defeito provocou uma variação controlada nas potências em torno dos valores nominais que cessou após ter terminado o defeito sem provocar a instabilidade do sistema.

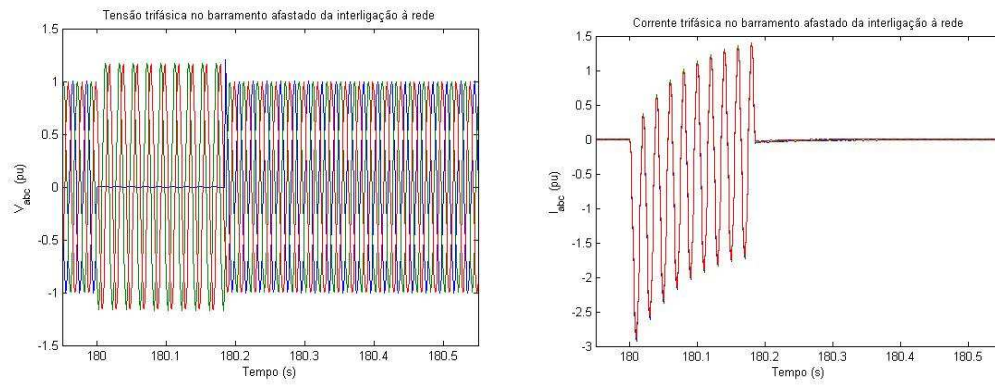


Figura 4.32: Tensões e Correntes trifásicas no barramento afastado do ponto de interligação à rede.

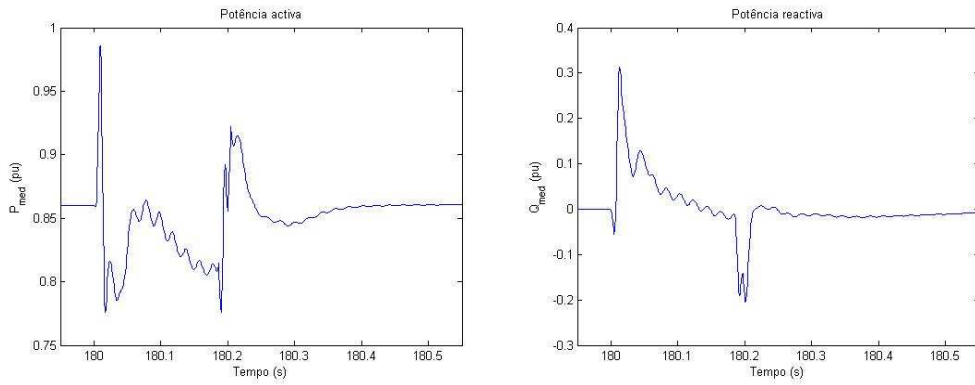


Figura 4.33: Potência activa e Potência Reactiva.

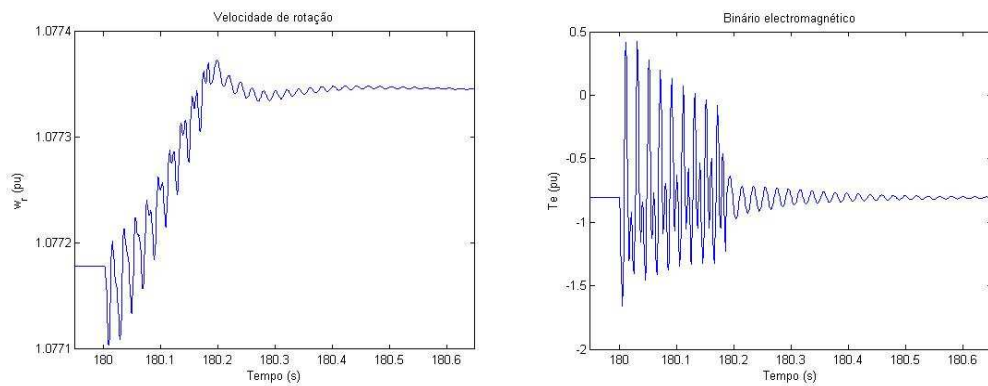


Figura 4.34: Velocidade de rotação e Binário electromagnético.

Este defeito provoca um transitório no binário e a aceleração do veio do gerador, mas também esta variação não é suficiente para provocar a instabilidade

do sistema após a passagem do defeito.

Os resultados das duas simulações anteriores mostram uma grande perturbação no nível das tensões nos barramentos durante a aplicação da falha. No entanto, verificou-se uma rápida recuperação dessas tensões após a eliminação do curto-circuito, com rápido amortecimento no período pós-falha. Em ambas as simulações, as perturbações no barramento no ponto de interligação são menores do que no ponto mais afastado, o que indica a acção de controlo da tensão nos terminais do estator feito pelo conversor PWM ligado ao rotor.

Os comportamentos em termos de potência activa e reactiva em ambos os curto-circuitos são similares, ou seja, a potência activa deixa de alimentar as cargas para alimentar o curto-circuito e o parque deixa de consumir energia reactiva e passa a fornecer a partir da bateria de condensadores no barramento DC do conversor AC/AC. Após a eliminação do defeito, a rede e o parque ficam na mesma configuração que se encontravam antes da perturbação, após um período transitório de 0,15 segundos.

Além dos parâmetros eléctricos, é importante, sob o ponto de vista da estabilidade, observar o comportamento de parâmetros mecânicos, nomeadamente a velocidade do rotor. Pode observar-se que o impacto do curto-circuito nesses parâmetros não foi significativo. Isso deve-se em parte ao controlo de velocidade do rotor feito pelo conversor AC/AC no lado do rotor. Além disso, sendo o tempo do curto-circuito pequeno, e dada a constante de inércia H adoptada para o sistema dinâmico, reduz possíveis transitórios mecânicos, conduzindo o rotor a ter respostas relativamente lentas face a este tipo de falha. A pouca variação na velocidade do rotor não leva o sistema à instabilidade e mostra que a rede tem boa margem de estabilidade transitória.

Simulação de Cava de Tensão

Provocou-se uma cava de tensão simétrica, no barramento afastado do ponto de interligação à rede, de amplitude igual a 0.5 pu e de duração de 0,5 s, registando-se alguns sinais a seguir apresentados.

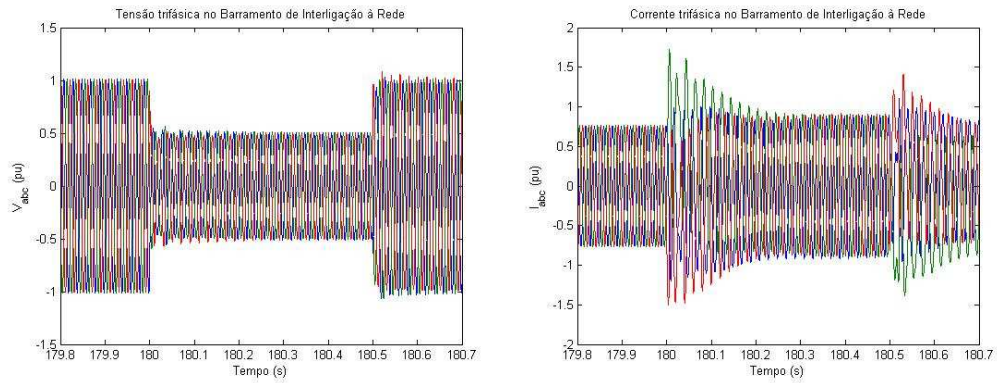


Figura 4.35: Tensões e Correntes trifásicas no barramento de interligação à rede eléctrica.

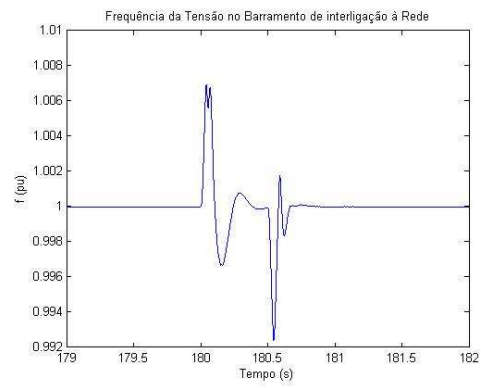


Figura 4.36: Frequência da tensão no barramento de interligação à rede eléctrica.

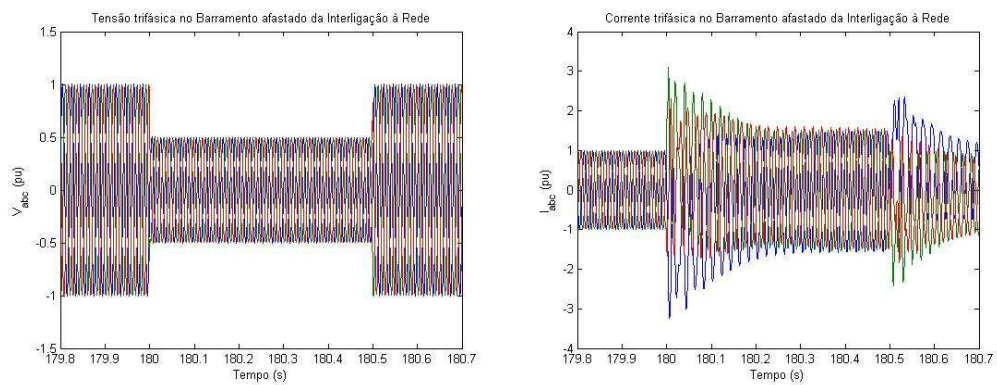


Figura 4.37: Tensões e Correntes trifásicas no barramento afastado do ponto de interligação à rede.

Este defeito provoca uma diminuição na potência activa fornecida pelo gerador mas o factor de potência mantém-se próximo da unidade.

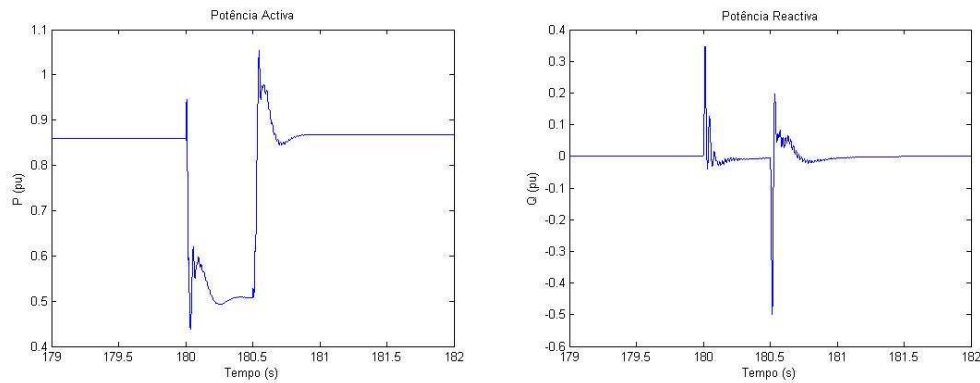


Figura 4.38: Potência activa e Potência Reactiva.

A diminuição da potência activa fornecida pelo gerador provoca a aceleração do mesmo e o aumento do binário electromagnético. Também após a passagem do defeito mantém-se a estabilidade do sistema.

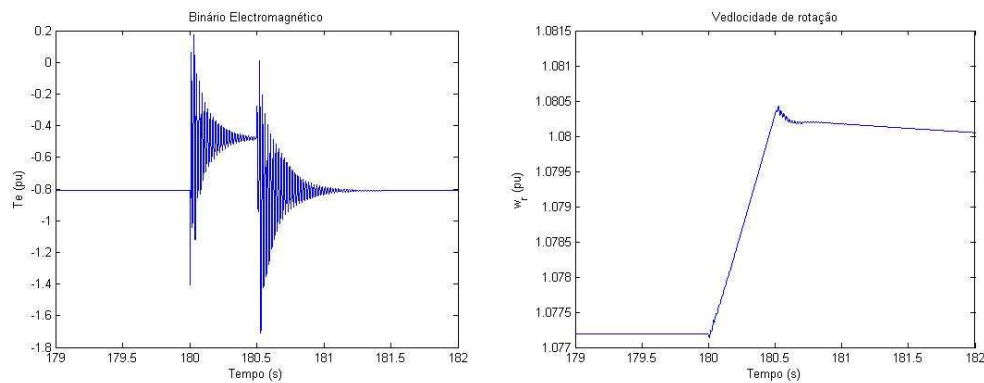


Figura 4.39: Binário Electromagnético e Velocidade de rotação.

O facto de o sistema se manter estável após a passagem dos defeitos simulados deve-se essencialmente a duas razões: a duração dos defeitos não é suficiente para acelerar a máquina e provocar a instabilidade do sistema, levando à actuação das protecções do parque; a rede é relativamente forte para a penetração da potência que se está a simular. Este último cenário poderá ser diferente se a potência injectada for aumentada, como será o caso se se considerar um parque com várias máquinas iguais à simulada, sendo a potência injectada notoriamente superior.

4.3. Conclusões

Neste capítulo implementou-se em ambiente *Matlab/Simulink* todo o sistema, com a integração dos diversos subsistemas mediante as equações matemáticas dos modelos apresentados no capítulo anterior e efectuaram-se algumas simulações que contemplaram diferentes condições de funcionamento e de falhas relevantes para perceber as características e comportamentos dos controladores.

Assim, foi feito o estudo do comportamento do gerador de indução duplamente alimentado quando é alimentado pelo rotor por meio de sistemas electrónicos de potência e com o estator directamente ligado à rede. Para o controlo da máquina foi apresentado um sistema de controlo vectorial tradicional baseado em controladores PI.

No capítulo seguinte irá ser apresentada uma alternativa aos controladores PI, baseada em Redes Neurais Artificiais, na expectativa de investigar o seu desempenho comparando com os controladores PI.

Capítulo 5

Controlo do Sistema usando Redes Neuronais Artificiais

5.1. Introdução

Neste capítulo apresenta-se um resumo histórico sobre as Redes Neuronais Artificiais (RNAs) e os seus fundamentos. É um assunto bastante desenvolvido nas referências bibliográficas apresentadas, pelo que apenas será feita aqui uma breve descrição dos aspectos básicos.

Pretende-se com esta tese apresentar uma aplicação de RNAs nos sistemas de controlo vectorial para um gerador de indução duplamente alimentado. Esta tecnologia, relativamente nova neste tipo de aplicação, devido às suas características de flexibilidade e adaptabilidade na resolução de problemas não lineares, será utilizada para poder substituir eficientemente os equipamentos existentes por novas tecnologias digitais disponíveis, como é o caso dos microprocessadores que cada vez são mais rápidos e baratos [70].

Para o sistema de controlo serão utilizadas RNAs para substituir alguns blocos do sistema de controlo vectorial tradicional com controladores PI, sendo desenhadas, treinadas e comprovadas como uma parte do conjunto do sistema de controlo. Estas RNAs são desenvolvidas em ambiente *Matlab/Simulink* e permitirão apresentar comparações entre os sistemas tradicionais com controladores PI e os sistemas com uso de RNAs.

Pretende-se, assim, apresentar um sistema de controlo baseado em redes neuronais alternativo ao sistema de controlo baseado em controladores PI convencionais com o intuito de se pode extrair eficientemente a energia do vento,

ou seja, poder extrair a potência máxima da turbina durante as várias situações de funcionamento através da estimação dos parâmetros de controlo dos conversores do lado da rede e do lado do rotor.

A vantagem das RNAs apresentadas é que durante a operação normal de funcionamento só usam operações matemáticas, a soma e a multiplicação, e funções sigmoidais e lineares o que permite que sejam facilmente implementadas em suporte físico, tais como:

- (1) mediante um chip de rede neuronal analógica treinada electronicamente – ETANN (*Electronically Trainable Analog Neural Network*), [71] e [72];
- (2) mediante um DSP (*Digital Signal Processor*) [73] gravando a função sigmoidal numa EPROM;
- (3) usando placas de redes neuronais que usam neuroprocessadores como os chips SAND (*Simple Applicable Neural Device*) [74] e a SIOP (*Serial Input-Operating Parallel*) [75]. Na placa SAND uma camada oculta pode ter até 512 neurónios e a função de activação será a mesma em toda a rede e gravada também numa EPROM. A placa SIOP tem a sua capacidade limitada e a função sigmoidal está implementada na própria placa e também a mesma em toda a rede;
- (4) usando matrizes de microprocessadores de 16 bits. Neste caso, o tempo de processamento pode ser diminuído se for colocado um microprocessador por cada neurónio; ou ainda
- (5) usando uma placa dSPACE [76] que tem a vantagem de dispor de um DSP de funcionamento mais rápido. Além disso, pode funcionar com o *Simulink* e com a Toolbox de redes neuronais do *Matlab*.

5.2. As Redes Neuronais Artificiais – RNAs

A técnica das Redes Neuronais Artificiais consiste na simulação de sistemas nervosos biológicos em programas ou circuitos digitais. Estas redes são capazes de estabelecer relações complexas entre dados, de forma relativamente precisa, sem que seja necessário informá-las qual a função que relaciona esses

dados. Combinando diversos neurónios pode-se formar o que é chamado de Rede de Neurónios ou Rede Neuronal Artificial (RNA).

As principais características das RNAs são, [77] a [79]:

- Procura paralela e endereçamento pelo conteúdo, imitando o cérebro humano que não possui endereço de memória nem procura uma informação sequencialmente;
- Aprendizagem, dotando a rede da capacidade de aprender certo conhecimento por sucessivas apresentações de padrões (experiência), sem a necessidade de explicitar os algoritmos para executar uma tarefa;
- Associação, permitindo que a rede possa associar diferentes padrões;
- Generalização, habilitando a rede a lidar com ruído e distorções, e a responder correctamente a uma entrada nunca vista, por similaridade com outros padrões já apresentados;
- Robustez, devido ao paralelismo permite que, mesmo com a perda de elementos processadores, não haja mau funcionamento da rede.

Através de algoritmos específicos as RNAs "aprendem" certo conhecimento (fase de aprendizagem) pela apresentação sucessiva de exemplos (padrões), armazenando-os nas inúmeras conexões existentes entre os elementos processadores. O conhecimento fica distribuído por toda rede, disponível e pronto para ser usado (fase de execução) nas mais diferentes áreas de aplicação.

As RNAs tendem a trabalhar com os dados de forma inteiramente diferente dos sistemas baseados em algoritmos ou conjuntos de regras. Enquanto que as RNAs processam dados com base em transformações, a computação programada faz uso de algoritmos e regras. A experiência tem mostrado que essas duas abordagens de processamento da informação são complementares do ponto de vista operacional, mas incompatíveis em termos conceptuais.

De facto, as RNAs não prescindem totalmente da computação programada. Em qualquer aplicação, a aquisição de dados, a sua formatação e a saída dos resultados ainda utiliza esse recurso. As RNAs são geralmente tratadas como

"*procedures software-callable*", ou seja, subrotinas que podem ser combinadas com programas onde a sua capacidade se faz necessária [80].

De modo geral, o uso de RNAs apresenta as seguintes vantagens, [77] a [79]:

- Há menor necessidade de se determinar *a priori* quais são os factores determinantes sobre o modelo que está a ser desenvolvido;
- É permitida a interferência de múltiplos factores de entrada (ou seja, múltiplas variáveis), permitindo um inter-relacionamento muito mais complexo entre elas;
- Alta tolerância às falhas, incertezas ou dados ruidosos, uma vez que é permitida a entrada de um elevado número de parâmetros.

De facto, certas características das RNAs, como a tolerância a falhas, a robustez e a capacidade de implementar uma classe particular de transformações, são garantidas por teoremas matemáticos. Ou seja, eles asseguram que as RNAs possam ser utilizadas de forma útil e fiável [81].

5.2.1. *Histórico das RNAs*

As primeiras informações mencionadas sobre a neuro-computação datam de 1943, em artigos do neurofisiologista McCulloch e do matemático Pitts, em que sugeriam a construção de uma máquina baseada ou inspirada no cérebro humano, simulando o comportamento do neurónio natural, onde o neurónio possuía apenas uma saída, que era em função da entrada (*threshold*) e da soma do valor das suas diversas entradas. Muitos outros artigos e livros surgiram desde então, porém, por um longo período de tempo, pouco resultado foi obtido.

Em 1949, o psicólogo Donald Hebb escreveu um livro intitulado "*The Organization of Behavior*" (A Organização do Comportamento) que perseguia a ideia de que o condicionamento psicológico clássico está presente em qualquer parte dos animais pelo facto de ser uma propriedade de neurónios individuais. Estas ideias não eram completamente novas, mas Hebb foi o primeiro a propor

uma lei de aprendizagem específica para as sinapses dos neurónios em que a capacidade da aprendizagem em RNAs vem da alteração da eficiência sináptica, isto é, a conexão somente é reforçada se tanto as células pré-sinápticas quanto as pós-sinápticas estiverem excitadas. Este primeiro e corajoso passo serviu de inspiração para que muitos outros investigadores perseguissem a mesma ideia. E embora tenha sido muito estudado e publicado nos anos que seguiram (1940-1950), estes serviram mais como base para desenvolvimento que posteriormente se veio a verificar do que para o seu próprio desenvolvimento.

Também proveniente deste período de tempo foi a construção do primeiro neuro-computador, denominado *Snark*, por Marvin Minsky, em 1951. O *Snark* operava com sucesso a partir de um ponto de partida técnico, ajustando os seus pesos automaticamente. No entanto, ele nunca chegou a executar qualquer função de processamento de informação interessante, mas serviu de inspiração para as ideias de estruturas que o sucederam.

Em 1956, no "*Dartmouth College*" nasceram os dois paradigmas da Inteligência Artificial, a Simbólica e o Conexionista. A Inteligência Artificial Simbólica tenta simular o comportamento inteligente humano não considerando os mecanismos responsáveis por tal. Já a Inteligência Artificial Conexionista acredita que construindo-se um sistema que simule a estrutura do cérebro, este sistema apresentará inteligência, ou seja, será capaz de aprender, assimilar, errar e aprender com seus erros.

O primeiro neuro-computador a obter sucesso (*Mark I Perceptron*) surgiu em 1957 e 1958, criado por Frank Rosenblatt, Charles Wightman e outros. Devido a profundidade dos seus estudos, das suas contribuições técnicas e da sua maneira moderna de pensar, muitos vêem-no como o fundador da neuro-computação na forma em que a temos hoje. O seu interesse inicial para a criação do *Perceptron* era o reconhecimento de padrões. Rosenblatt mostrou no seu livro (*Principles of Neurodynamics*) o modelo dos *Perceptrons*. Nele, os neurónios são organizados em camadas de entrada e saída, onde os pesos das conexões são adaptados a fim de se atingir a eficiência sináptica.

Em 1960, Rosenblatt e Bernard Widrow, com a ajuda de alguns

estudantes, desenvolveram um novo tipo de elemento de processamento de redes neuronais chamado de *ADALINE* (*ADaptative LInear Network*), equipado com uma poderosa lei de aprendizagem, e o *MADALINE* (*Many ADALINE*) *perceptron*, proposto por Widrow e Hoff. O *ADALINE/MADALINE* utiliza saídas analógicas numa arquitectura de três camadas. Widrow também fundou a primeira companhia de hardware de neuro-computadores e componentes.

Infelizmente, os anos seguintes foram marcados por um entusiasmo exagerado de muitos investigadores, que passaram a publicar muitos artigos e livros que faziam uma previsão pouco confiável para a época, sobre máquinas tão poderosas quanto o cérebro humano e que surgiriam num curto espaço de tempo. Isto tirou quase toda a credibilidade dos estudos desta área e causou algum desinteresse dos técnicos de outras áreas.

Um período de investigação silenciosa seguiu-se durante 1967 a 1982, quando poucas investigações foram publicadas devido ao facto do que ocorreu anteriormente. Entretanto, aqueles que investigavam nesta época, e todos os que se seguiram no decorrer de treze anos conseguiram novamente estabelecer um campo concreto para o renascimento da área.

Nos anos 80, muitos dos investigadores foram bastante corajosos e passaram a publicar diversas propostas para a exploração de desenvolvimento de Redes Neuronais, bem como das suas aplicações. Porém, talvez o facto mais importante deste período tenha ocorrido quando Ira Skurnick, um administrador de programas da *DARPA* (*Defense Advanced Research Projects Agency*) decidiu ouvir os argumentos da neuro-computação e seus projectistas, e divergindo dos caminhos tradicionais dos conhecimentos convencionais, financiou em 1983 investigações em neuro-computação. Este acto não só abriu as portas para a neuro-computação, como também deu à *DARPA* o estatuto de uma das líderes mundiais de desenvolvimento tecnológico.

Outro nome que emergiu neste período foi John Hopfield, renomado físico de reputação mundial, que se interessou pela neuro-computação, e escreveu artigos que percorreram o mundo todo influenciando centenas de cientistas, matemáticos e investigadores altamente qualificados.

Apesar de um terço dos investigadores da área terem aderido pela influência de Hopfield, foi em 1986 que este campo da investigação "explodiu" com a publicação do livro "*Parallel Distributed Processing*" (Processamento Distribuído Paralelo) editado por David Rumelhart e James McClelland.

Em 1987 ocorreu em São Francisco a primeira conferência de Redes Neurais nos tempos modernos, a *IEEE International Conference on Neural Networks*, sendo também formada a *International Neural Networks Society* (INNS). A partir destes acontecimentos deu-se a fundação da Revista oficial das *International Neural Network Society (INNS)*, *European Neural Network Society (ENNS)* and *Japanese Neural Network Society (JNNS) – Neural Networks*, em 1988, seguido do *Neural Computation* e do *IEEE Transactions on Neural Networks* em 1990.

Desde 1987, muitas universidades anunciaram a formação de institutos de investigação e programas de educação em neuro-computação.

Muitos históricos não consideram a existência de investigação nesta área nos anos 60 e 70 e apontam uma retoma das investigações com a publicação dos trabalhos do físico e biólogo Hopfield (1982) relatando a utilização de redes simétricas para optimização, através de um algoritmo de aprendizagem que estabilizava uma rede binária simétrica com realimentação.

Rumelhart, Hinton e Williams introduziram o poderoso método *Backpropagation*.

Cooper, Cowan, Fukushima, Von Der Malsburg e muitos outros foram alguns dos muitos investigadores dos anos 60 e 70, cujos estudos não devem ser menosprezados.

5.2.2. Aplicações de RNAs

As RNAs têm sido utilizadas na modelação de memória associativa, reconhecimento de padrões, representação de funções booleanas, representação de funções contínuas, previsão de séries temporais, optimização, etc. Refiram-se algumas áreas em que são aplicadas, [77] a [79]:

- Processos industriais, robótica, indústria de defesa, indústria aeroespacial, indústria de telecomunicações, indústria electrónica, indústria automóvel, indústria de transportes, indústria de prospecção petrolífera, etc.;
- Física e matemática;
- Medicina e Biomedicina;
- Reconhecimento de texto, imagem e voz;
- Aplicações climáticas e meteorológicas;
- Economia de gestão, análise financeira, banca e seguros;
- Entretenimento, etc.

5.2.3. *Neuro-computação*

Os modelos neuronais procuram aproximar o processamento dos computadores ao cérebro. As RNAs possuem um grau de interconexão similar à estrutura do cérebro [82]. Num computador convencional moderno a informação é transferida em tempos específicos, dentro de um relacionamento com um sinal de sincronização. A Tabela 5.1 apresenta uma comparação dos parâmetros de processamento entre um computador e o cérebro humano.

Tabela 5.1: Comparação entre o cérebro e o computador.

Parâmetro	Cérebro	Computador
<i>Material</i>	Orgânico	Metal e plástico
<i>Velocidade</i>	Milisegundos	Nanosegundos
<i>Tipo de Processamento</i>	Paralelo	Sequencial
<i>Armazenamento</i>	Adaptativo	Estático
<i>Controlo do Processo</i>	Distribuído	Centralizado

O mesmo paralelo pode ser traçado comparando o computador com as redes neuronais, como é apresentado na Tabela 5.2. Para isso, a comparação não é

feita com um computador específico encontrado no mercado, mas sim com o paradigma predominante nos computadores actuais [83].

Tabela 5.2: Comparação entre os computadores e os neuro-computadores.

Computadores	Neuro-computadores
Executa programas	Aprende
Executa operações lógicas	Executa operações não-lógicas, transformações e comparações
Depende do modelo ou do programador	Descobre as relações dos dados ou exemplos
Testa uma hipótese de cada vez	Testa todas as possibilidades em paralelo

5.2.4. *Inspiração Biológica das RNAs*

As Redes Neurais são técnicas computacionais que tentam imitar o processo de aprendizagem do cérebro humano. O cérebro humano é formado por biliões de neurónios conectados entre si. As RNAs são técnicas computacionais que apresentam um modelo matemático inspirado na estrutura neuronal de organismos inteligentes e que adquirem conhecimento através da experiência. Uma grande RNA pode conter centenas ou milhares de unidades de processamento enquanto que o cérebro de um mamífero pode ter muitos biliões de neurónios.

O sistema nervoso é formado por um conjunto extremamente complexo de células, os neurónios. Eles têm um papel essencial na determinação do funcionamento e comportamento do corpo humano e do raciocínio. Os neurónios são formados pelas Dendrites, que são um conjunto de terminais de entrada, pelo Corpo da célula, e pelos Axónios que são longos terminais de saída, Figura 5.1 [82].

A maioria dos terminais do Axónio estão conectados às Dendrites de outros neurónios (Sinapses). O comportamento de um neurónio é o seguinte: recebe um sinal de entrada com uma determinada força, dependendo desta, o neurónio emite um sinal de resposta, as Sinapses podem variar de força, algumas

podem dar um sinal débil e outras um sinal forte. A um neurónio podem chegar milhares de sinais de entrada, cada um com uma força e peso diferente. Matematicamente o comportamento do neurónio pode representar-se por uma lista de sinais de entrada que são multiplicados pelos respectivos pesos e posteriormente adicionados, sendo o resultado designado de nível de activação do neurónio do qual depende o sinal de saída que é enviado a cada um dos neurónios seguintes que estão conectados a ele [82].

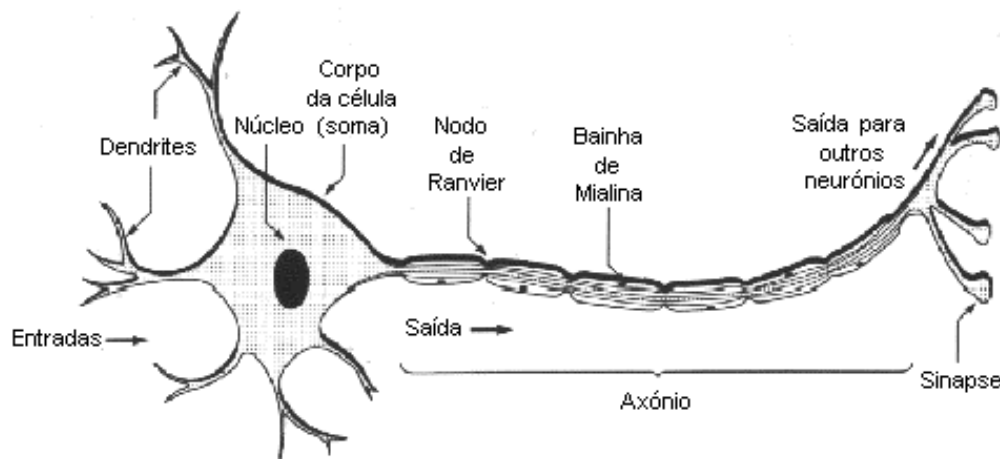


Figura 5.1: Modelo do neurónio biológico.

Uma RNA é um sistema composto de muitos elementos processadores simples conectados em paralelo, cuja função é determinada pela estrutura da rede, da força nas conexões e do processamento realizado pelos elementos nos nós. As RNAs, tal como os humanos, aprendem a partir da experiência.

O primeiro modelo lógico-matemático de um neurónio foi desenvolvido por McCulloch and Pitts em 1943 [84], tendo sido designado por TLU (*Threshold Logic Unit*). Consiste numa unidade computacional que opera com sinais binários (0/1) de acordo com as seguintes regras:

1. Recebe as entradas $x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$ em n sinapses de excitação e as entradas $y_1, y_2, y_3, \dots, y_m$ em m sinapses inibidoras;
2. Se pelo menos uma das entradas inibidoras $y_1, y_2, y_3, \dots, y_m$ é 1 (um) então a unidade computacional é inibida apresentando na saída o valor 0 (zero);

3. Se todas as entradas $y_1, y_2, y_3, \dots, y_m$ são 0 (zero) então a unidade computacional apresenta o sinal de saída $\varphi(x_1 + x_2 + x_3 + \dots + x_n - b)$ em que φ é a função Degrau unitário e a constante b representa um desvio (*bias*).

Na Figura 5.2, apresenta-se o modelo de um neurónio artificial em que Σ representa um campo vectorial de $\bullet^n$ em $\bullet^p$ e φ um campo escalar de $\bullet^p$ em $\bullet^p$. No entanto a pretensão de modelar uma unidade computacional verdadeiramente elementar aconselha a escolha de uma função Σ simples, normalmente a função soma, razão do símbolo utilizado para representar esta função.

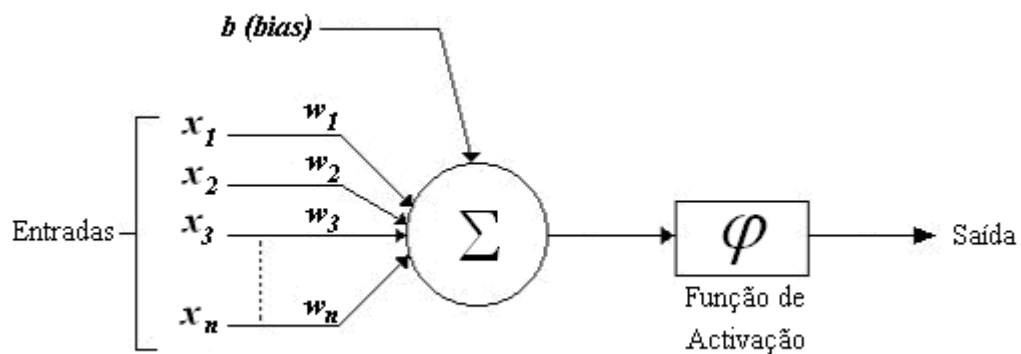


Figura 5.2: Modelo genérico de um neurónio artificial.

Mais formalmente as RNAs podem ser modeladas por um grafo orientado que possui as seguintes propriedades:

1. Uma variável de estado n_i associada a cada nó i ;
2. Um valor real w_{ik} designado por peso (*weight*) e associado a uma aresta (ik) entre os nós i e k ;
3. Um valor real b_i designado por desvio (*bias* ou *threshold-shift*) associado a cada nó i ;
4. Uma função de activação $\varphi(n_k, w_{ik}, b_i)$ $k \bullet i$, associada a cada nó i que determina o estado desse nó em função do seu desvio, dos pesos das arestas a ele ligado e dos estados dos nós associados às arestas anteriores. Na terminologia habitual diz-se que φ é função do potencial de activação verificado no nó.

Os nós e as arestas designam-se, respectivamente, neurónios (ou unidades computacionais) e sinapses. Neurónios de entrada são aqueles que não têm sinapses dirigidas para os mesmos. Neurónios de saída são aqueles que não possuem sinapses de saída.

De referir que uma ligeira modificação da rede original (adição de um número apropriado de neurónios com a entrada constante do valor 1) permite tratar os desvios acima referidos como se de pesos adicionais se tratassem.

As funções de activação ou transferência φ utilizadas na construção de RNAs são apresentadas no ponto seguinte.

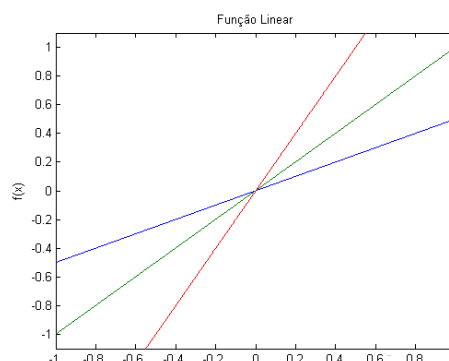
5.2.5. Funções de Activação

As funções de activação, também chamadas de funções de transferência, são as funções responsáveis por determinar a forma e a intensidade de alteração dos valores transmitidos de um neurónio a outro, elas realizam uma operação matemática ao sinal de saída.

As funções de activação mais utilizadas são basicamente cinco, e são apresentadas a seguir: linear, degrau, sigmoidal, tangente hiperbólica e gaussiana. Para além destas existem funções de activação mais sofisticadas que podem ser utilizadas dependendo do tipo de problema a ser resolvido pela rede.

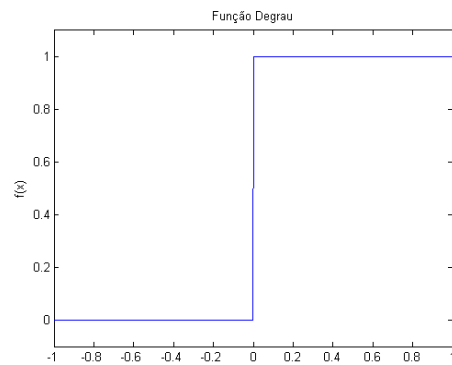
Função Linear

$$\varphi(x) = kx, \text{ } k \text{ é um escalar}$$



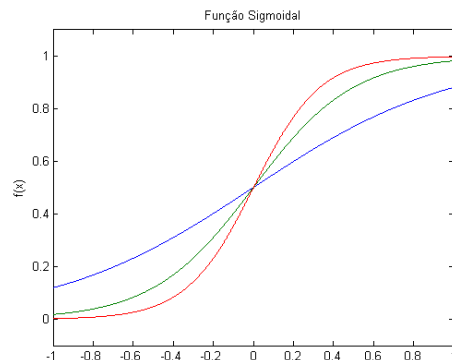
Função Degrau

$$\varphi(x) = \begin{cases} 1 & \text{se } x \geq 0 \\ 0 & \text{se } x < 0 \end{cases}$$



Função Sigmoidal Assimétrica

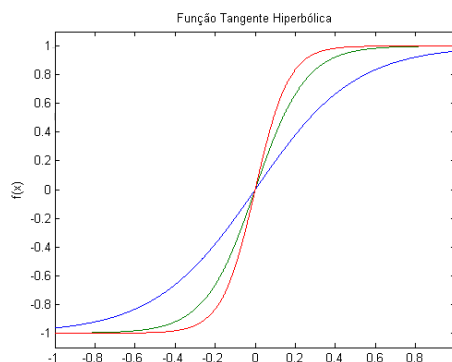
$$\varphi(x) = \frac{1}{1 + e^{-\gamma \cdot x}}, \text{ } \gamma \text{ é um escalar}$$



Função Tangente Hiperbólica

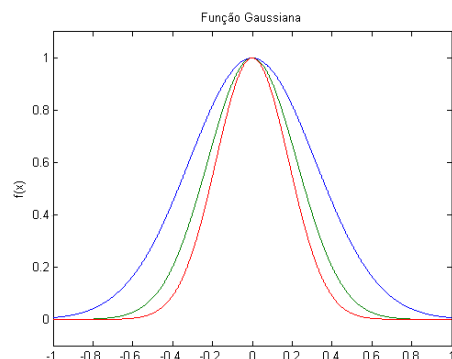
$$\varphi(x) = \frac{e^{\gamma \cdot x} - e^{-\gamma \cdot x}}{e^{\gamma \cdot x} + e^{-\gamma \cdot x}}, \text{ } \gamma \text{ é um escalar}$$

positivo



Função Gaussiana

$$\varphi(x) = e^{-\gamma \cdot x^2}, \text{ } \gamma \text{ é um escalar positivo}$$



5.2.6. *Arquitecturas das RNA e suas aplicações*

As RNAs, quanto à sua arquitectura, podem ser classificadas de Redes planares ou ainda de Redes constituídas por camadas.

As RNAs planares são constituídas por neurónios escondidos (*hidden neurons*) e por neurónios periféricos (*peripheral neurons*), todos dispostos numa superfície bidimensional. Estes últimos podem subdividir-se em neurónios de entrada (*input neurons*) e neurónios de saída (*output neurons*). A disposição dos diferentes neurónios pode ou não estar organizada por camadas. Sempre que a resposta dos neurónios de uma rede é binária (0/+1 ou -1/ +1, por exemplo) esta pode designar-se binária. As RNAs constituídas por neurónios binários e arestas binárias (isto é por onde circulam apenas sinais binários) são conhecidas por redes McCulloch-Pitts [84].

As RNAs planares também podem ser constituídas por diferentes camadas (*layers*) dispostas paralelamente. A primeira é designada por camada de entrada (*input layer*) e a última por camada de saída (*output layer*). As camadas intermédias (*hidden layers*) são designadas por camadas escondidas (ou ocultas). As redes constituídas por camadas constituem assim casos particulares das redes planares, [80].

Quando a informação de cada camada não constitui informação de entrada de nenhuma camada anterior a rede designa-se por rede de alimentação directa (*feed-forward network*). Caso contrário designa-se por rede recorrente (*recurrent network*). De referir dois importantes tipos de redes recorrentes: redes de Elman [85] e de Hopfield [86].

As redes de camadas com alimentação directa e em que a informação de saída é constituída por padrões binários são designadas por alguns autores por redes de *perceptrons*. Mais rigorosamente, uma rede *perceptron* é considerada uma unidade computacional que calcula o sinal duma combinação linear das variáveis de entrada.

Em algumas situações, certas camadas possuem neurónios cujas funções de activação são lineares. Neste caso estas camadas designam-se de lineares. Uma

rede apenas com camadas lineares designa-se rede linear. As camadas não lineares designam-se normalmente pelo nome da função de activação comum aos diferentes neurónios utilizados nessas camadas.

As redes com uma ou mais camadas não lineares podem designar-se redes não lineares. Redes com camadas Sigmoidais ou Gaussianas constituem exemplos de redes não lineares. Este tipo de redes podem designar-se por redes de base radial.

As redes de arquitectura planar, com idêntico número de neurónios de entrada e de saída e cuja aprendizagem é realizada sem supervisão são normalmente utilizadas em sistemas de memória associativa e de reconhecimento de padrões. A quantidade de padrões armazenados na rede está associada directamente ao número de neurónios utilizados. Podem encontrar-se redes deste tipo com neurónios escondidos. Estas redes são normalmente de dinâmica síncrona.

Na classificação de padrões podem ser utilizadas redes binárias de alimentação directa com uma ou duas camadas (redes de *perceptrons*, [87]). As chamadas redes competitivas podem ser igualmente utilizadas com o anterior propósito.

Na representação de qualquer função Booleana (ou função lógica) podem utilizar-se redes binárias de camadas com alimentação directa e com uma única camada escondida [88].

Na representação de qualquer função contínua, [89] e [90] podem utilizar-se redes de camadas com alimentação directa e com uma camada escondida, [91] e [92] (em geral a camada escondida pode ser sigmoideal e a camada de saída linear). Este tipo de rede pode igualmente ser utilizada na associação e classificação de padrões. Redes com funções gaussianas na camada escondida e funções lineares na camada de saída têm sido utilizadas com os anteriores propósitos [93].

Redes neuronais com uma única camada (linear) são utilizadas na aproximação linear de funções. Este tipo de redes são utilizadas também no processamento de sinal [94], controlo e previsão e identificação de sistemas

lineares. De referir que estas redes podem igualmente ser utilizadas na associação de padrões.

Na previsão de séries temporais e séries espaciais associadas a fenómenos não lineares têm sido utilizadas redes não lineares de camadas com alimentação directa.

5.2.7. Processo de Aprendizagem

O processo de aprendizagem (isto é, de escolha dos pesos e desvios associados a cada aresta/neurónio) de uma RNA pode ser realizado com ou sem supervisão.

No processo de aprendizagem com supervisão são conhecidas *a priori* as respostas correctas correspondentes a um certo conjunto de dados de entrada. De referir entre outros os seguintes algoritmos de aprendizagem com supervisão, [80], [90] e [95]:

- a) Regra de aprendizagem de Widrow-Hoff (ou método do gradiente aplicado em redes neuronais lineares);
- b) Aprendizagem por retropropagação do erro (*error backpropagation*) que constitui uma generalização da anterior regra a redes lineares ou não lineares e com três ou mais camadas;
- c) Método do gradiente e seus aperfeiçoamentos. De referir a existência de técnicas destinadas a melhorar a convergência destes métodos tais como a técnica do momento (*momentum*) e da taxa adaptativa de aprendizagem;
- d) A aprendizagem recorrendo ao método de Levenberg-Marquardt aplicável a redes não lineares;
- e) A aprendizagem recorrendo a técnicas heurísticas, como por exemplo, os algoritmos evolutivos (*evolutionary algorithms*) ou a aprendizagem recorrendo ao processo de arrefecimento simulado (*simulated annealing*).

O algoritmo utilizado pode classificar a rede em que se aplica. De referir que as redes não lineares com camadas escondidas e de alimentação directa podem ser conhecidas por redes de retropropagação e de alimentação directa (*standard feedforward backpropagation networks*).

A aprendizagem sem supervisão é aplicada essencialmente em sistemas de memória associativa e de reconhecimento de padrões. Nestas redes a aprendizagem é realizada sem se conhecer antecipadamente as respostas consideradas correctas. Podem ser utilizados diferentes algoritmos de aprendizagem sem supervisão, entre outros:

- a) Algoritmos de estimulação pela entrada (*reinforcement algorithms*) também designados (no contexto da aprendizagem sem supervisão) por algoritmos de aprendizagem associativa (*associative learning algorithm*). A regra de Hebb [96], as regra de Instar e de Outstar [82], constituem alguns exemplos deste tipo de algoritmos;
- b) Algoritmos de aprendizagem competitiva tais como a regra de Kohonen [97].

Como já foi dito anteriormente, algumas redes podem ser classificadas com base no algoritmo de aprendizagem utilizado. De referir, por exemplo, as redes de Kohonen e as redes competitivas.

Observe-se que a classificação anterior não é completamente estanque na medida em que, por exemplo, a regra de Kohonen pode ser considerado um algoritmo de aprendizagem associativa.

5.2.8. Dinâmica das RNA

A transferência de informação através das sinapses e entre os diferentes neurónios de uma rede neuronal pode processar-se sequencialmente (ou de uma forma não-síncrona ou assíncrona), isto é, em cada iteração só parte dos neurónios da rede transferem informação aos neurónios seguintes que por sua vez e apenas na iteração seguinte processam e transmitem a informação recebida.

Noutras situações a transferência de informação é realizada

simultaneamente (ou de um modo síncrono) por todos os neurónios da rede.

Noutras situações o mecanismo de activação de cada neurónio não tem uma natureza determinista sendo regido por uma lei de natureza estocástica (*spin-glass nets*) [87].

5.3. Modelos de RNAs e Algoritmos de Aprendizagem

Nos modelos de RNAs apenas será feita uma breve referência às topologias e aos algoritmos de aprendizagem mais utilizados, [95] a [99].

5.3.1. Redes Lineares

A rede linear é talvez a rede mais simples das RNAs. Nesta, os elementos de processamento, ou neurónios artificiais, apresentam semelhanças com aqueles de McCulloch-Pitts [84]. As diferenças básicas dizem respeito à não existência do elemento de atraso (*delay*), bem como a função de saída ser linear.

Os valores de activação são proporcionais à soma das activações. Assim, um neurónio i com n entradas do tipo $w_{ij}x_j$, tem como saída y_i dada por [98]:

$$y_i = \varphi \left(\sum_j w_{ij} x_j \right) \quad (5.1)$$

onde φ é uma constante de proporcionalidade, ou seja, é uma função, neste caso, linear, y é a saída e x é a entrada do neurónio.

No caso de várias camadas a partir da segunda, x_j é igual a y_i da camada anterior.

Se por um lado estas redes são simples, elas são pouco úteis. Toda a rede com camadas lineares é equivalente a outra rede linear com apenas uma camada e, portanto, não é capaz de resolver problemas que não sejam linearmente separáveis [98].

5.3.2. *Perceptrons – Regra de Aprendizagem do Perceptron*

O *Perceptron* foi proposto por Frank Rosenblatt, em 1957, sendo, inicialmente usado para reconhecimento de caracteres. Ele é constituído por três tipos de unidades: unidades sensoriais, unidades associativas e unidades de resposta. Um *Perceptron* pode conter diversas camadas escondidas associadas. Tipicamente, diversos elementos (neurónios) excitatórios e inibitórios da camada anterior são conectados a cada elemento da camada posterior [98].

No entanto, apenas uma camada é adaptativa, ou seja, pode ter os seus pesos modificados através de um algoritmo de aprendizagem, o qual é conhecido actualmente como algoritmo de aprendizagem do *Perceptron*.

Assim, um neurónio i com n entradas do tipo $w_{ij}x_j$, apresenta uma função v_i dada por:

$$v_i = \sum_j w_{ij}x_j + b \quad (5.2)$$

onde w_{ij} é o peso da conexão do neurónio j para o neurónio i , x_j são as entradas para o neurónio j , v_i é a função de entrada para o neurónio i e b é o desvio ou *bias*, que apresenta sempre a entrada +1 e um peso adaptativo w_0 .

$$y = \phi(v) \quad (5.3)$$

A saída y do neurónio i é dada pela seguinte equação, sendo ϕ é a função de activação deste neurónio é

$$y_i = \begin{cases} 1 & \text{se } v_i > 0, \\ 0 & \text{se } v_i \leq 0 \end{cases} \quad (5.4)$$

Neste caso a função de activação ϕ é uma função não-linear que será considerada a função de *Heaviside*, ou Degrau, ou a sigmoideal. A saída do neurónio (ou rede) será +1 ou 0, dependendo das entradas. Esta rede realiza uma tarefa de classificação.

A regra de aprendizagem do *Perceptron* baseia-se na Lei de Hebb, [96], que pode ser sintetizada pelo algoritmo a seguir apresentado. Supõe-se que para

uma entrada x se deseja uma saída d . Para uma tabela de classificação, o d representa usualmente +1 ou -1. A regra de aprendizagem do *Perceptron* é muito simples e pode ser determinada como se segue:

1. Atribuir pesos aleatórios às conexões;
2. Seleccionar um vector de entrada x do conjunto de aprendizagem;
3. Se $y \neq d$, modificar todas as conexões w_i de acordo com:

$$\Delta w_i = \eta e x_i \quad (5.5)$$

onde η representa o coeficiente de aprendizagem e $e = (d - y)$;

4. Parar se $e = 0$ para todos os vectores do conjunto de aprendizagem, senão voltar ao ponto 2.

É de salientar que Rosenblatt provou que este algoritmo de aprendizagem permite encontrar um conjunto de pesos que classifique correctamente os vectores de entrada, caso esse conjunto exista. No entanto, os *Perceptrons* não são capazes de aprender a classificar funções não linearmente separáveis, conforme foi mostrado por Minsky e Papert [100].

5.3.3. ADALINE E MADALINE – Regra Delta

O ADALINE, proposto por Widrow, consiste num estudo independente e paralelo ao do *Perceptron*, sendo o elemento de processamento do ADALINE muito parecido com o do *Perceptron*. Ele possui um peso de conexão w_0 , conhecido como *bias*, ou polarização. Este termo é um peso da conexão que apresenta um valor de entrada x_0 sempre igual a 1 [98].

O valor de saída do ADALINE é limitado a +1, se o resultado do somatório de entrada do elemento de processamento for positivo, e a -1, se for negativo.

Assim, um neurónio i com n entradas do tipo $w_{ij}x_j$, apresenta uma função v_i dada por:

$$v_i = \sum_j w_{ij} x_j + b \quad (5.6)$$

onde w_{ij} é o peso da conexão do neurónio j para o neurónio i , x_j são as entradas para o neurónio j , v_j é a função de entrada para o neurónio i e b é *bias*, que apresenta sempre a entrada +1 e um peso adaptativo w_0 .

$$y = \phi(v) \quad (5.7)$$

A saída y do neurónio i é dada pela seguinte equação, sendo ϕ a função de activação deste neurónio, que no caso do *Perceptron*, é uma função não-linear. Neste caso a função de activação ϕ que será considerada é a função de *Heaviside*, ou Degrau, ou sigmoidal.

$$y_i = \begin{cases} 1 & \text{se } v_i \geq 0, \\ -1 & \text{se } v_i < 0 \end{cases} \quad (5.8)$$

A saída do neurónio (ou rede) será +1 ou -1, dependendo das entradas. Esta rede realiza também uma tarefa de classificação.

A principal diferença entre o algoritmo de aprendizagem de Widrow-Hoff e o do *Perceptron* é a maneira como a saída do sistema é usada na regra de aprendizagem. A regra de Widrow-Hoff usa a função de entrada (função v_i) antes da saída ser mapeada pela função de activação. Esta regra é também conhecida por LMS (*Least Means Square*), ou regra Delta [101].

Para uma RNA com uma camada simples com um elemento de processamento de saída com uma função linear, a saída é simplesmente dada por:

$$y_i = \sum_j w_{ij} x_j + b \quad (5.9)$$

Supondo que se pretende treinar a rede de modo a determinar um hiperplano para um conjunto de aprendizagem, o qual consiste de valores de entrada x^p e valores de saída desejados d^p . Para cada entrada, a saída da rede difere do valor desejado d^p em $d^p - y^p$, onde y^p é a saída real para este padrão. A regra Delta utiliza uma função de erro baseada nesta diferença para ajuste dos pesos.

A função de erro é a soma do erro quadrático. Isto é, o erro total E é definido como:

$$E = \sum_p E^p = \frac{1}{2} \sum_p (d^p - y^p)^2 \quad (5.10)$$

onde o índice p indica a faixa do conjunto de padrões de entrada e E^p representa o erro no padrão p . O processamento LMS determina todos os valores de pesos que minimizam a função erro por um método chamado de gradiente descendente. O objectivo é fazer uma mudança no peso proporcional ao simétrico da derivada do erro relativamente a cada peso para o padrão actual, ou seja:

$$\Delta_p w_{ij} = -\eta \frac{\partial E^p}{\partial w_{ij}}, \quad (5.11)$$

onde η é uma constante de proporcionalidade. A derivada vem:

$$\frac{\partial E^p}{\partial w_{ij}} = \frac{\partial E^p}{\partial y_i^p} \cdot \frac{\partial y_i^p}{\partial w_{ij}} \quad (5.12)$$

Devido às unidades lineares a equação 5.9, vem

$$\frac{\partial y_i^p}{\partial w_{ij}} = x_j \quad (5.13)$$

e

$$\frac{\partial E^p}{\partial y_i^p} = -(d^p - y^p) \quad (5.14)$$

tal que:

$$\Delta_p w_{ij} = -\eta \delta^p x_i \quad (5.15)$$

onde $\delta^p = d^p - y^p$ é a diferença entre a saída desejada e a saída real para cada padrão p .

A regra Delta modifica o peso apropriado para a saída desejada e real de cada polaridade e para ambas as unidades de entrada e saída contínuas e binárias.

O ADALINE, da mesma forma que os *Perceptrons*, não é capaz de

aprender a classificar funções não linearmente separáveis.

Para formar uma RNA, Widrow criou o MADALINE, que é um sistema que apresenta uma camada de unidades ADALINE que são conectadas a uma única unidade ADALINE de saída, que usa a regra do voto de maioria. Não existem pesos associados às interconexões entre as unidades da camada ADALINE para a unidade de saída ADALINE. Se mais do que metade dos ADALINE apresentam saída +1 então a saída do MADALINE será +1, e da mesma forma para -1.

5.3.4. *Perceptrons de Múltiplas Camadas – Algoritmo de Retropropagação*

Até agora foram apresentadas redes constituídas por uma única camada adaptativa, ou seja, redes que mesmo possuindo mais de uma camada de neurónios, como é o caso dos *Perceptrons*, possuem algoritmos de aprendizagem para adaptar apenas uma das camadas de pesos. No entanto, conforme foi mostrado por Minsky e Papert no seu livro “*Perceptrons*” [100], tais redes não são capazes de representar funções não linearmente separáveis.

A maneira de resolver este problema é através da utilização de mais uma camada de pesos adaptativos que equivale a um aumento da dimensionalidade do problema. Para isso é necessário um algoritmo de aprendizagem que trate de todas as camadas de pesos adaptativos. Muitas redes usam algumas variações da forma de treino da regra Delta. Uma delas é a regra Delta Generalizada, também conhecida por algoritmo de retropropagação.

Este algoritmo foi desenvolvido por Werbos, em 1974 [102], e reutilizado mais tarde por David E. Rumelhart, Geoffrey E. Hinton e Ronald J. Williams [103]. Este algoritmo tem sido amplamente utilizado como um algoritmo de aprendizagem de RNA, com topologia directa com múltiplas camadas.

Este algoritmo pode ser considerado uma generalização da regra Delta apresentada no ponto anterior mas aplicado a uma rede multicamadas, apresentando neurónios com funções de activação não-lineares.

A Figura 5.3 representa um exemplo típico de uma rede multicamada. Nesta figura, x , u e y são os vectores que representam, respectivamente, os níveis dos valores de saída dos neurónios da camada de entrada, da intermédia e da de saída. Os pesos sobre as conexões, entre as camadas de entrada e intermédia são designadas de w_{1ij} , enquanto que os pesos das conexões entre as camadas intermédia e de saída são designados por w_{2ij} . Essa rede tem três camadas podendo ter mais de acordo com a sua aplicação. Cada neurónio de uma camada é conectado a cada neurónio da camada seguinte. As activaões fluem da camada de entrada para a intermédia e depois para a de saída.

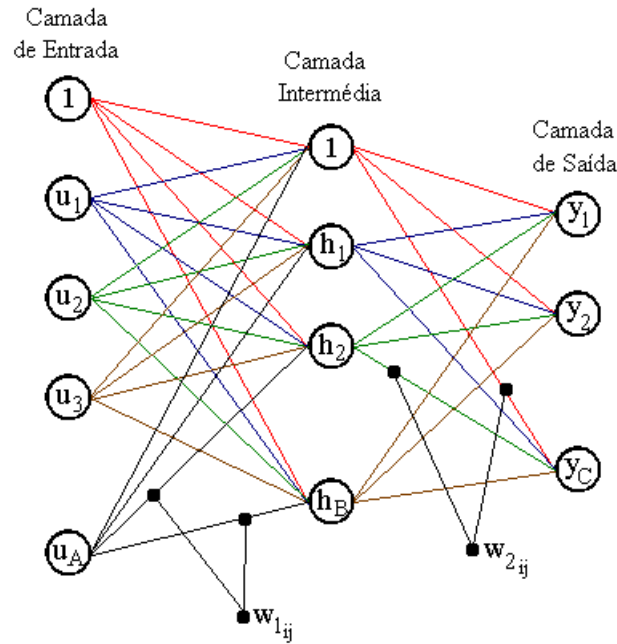


Figura 5.3: Rede multicamada.

Uma vez que se usam funções não-lineares, pode-se generalizar a regra Delta para estas funções. Então a activação é uma função diferenciável da entrada total dada por [98]:

$$y_i^p = \phi(v_i^p) \quad (5.16)$$

e

$$v_i^p = \sum_j w_{ij} x_j^p + b_i \quad (5.17)$$

Para obter a generalização correcta da regra Delta, como foi apresentado no ponto anterior, tem-se que:

$$\Delta_p w_{ij} = -\eta \frac{\partial E^p}{\partial w_{ij}} \quad (5.18)$$

onde η é uma constante de proporcionalidade.

A medida do erro E^p é definida como o erro quadrático total para o padrão p nas unidades de saídas:

$$E^p = \frac{1}{2} \sum_i (d_i^p - y_i^p)^2 \quad (5.19)$$

onde d_i^p é a saída desejada para a unidade i quando o padrão p é fixado e o somatório do erro quadrático é dado por $E = \sum_p E^p$. Então, pode-se escrever:

$$\frac{\partial E^p}{\partial w_{ij}} = \frac{\partial E^p}{\partial v_i^p} \cdot \frac{\partial v_i^p}{\partial w_{ij}} \quad (5.20)$$

Da equação 5.17, nota-se que o segundo factor é:

$$\frac{\partial v_i^p}{\partial w_{ij}} = x_j^p \quad (5.21)$$

Quando se define

$$\delta_i^p = -\frac{\partial E^p}{\partial v_i^p} \quad (5.22)$$

obtém-se uma regra actualizada, a qual é equivalente à descrita no ponto anterior, resultando num gradiente descendente na superfície de erro de forma que o peso mude de acordo com:

$$\Delta_p w_{ij} = \eta \delta_i^p x_j^p \quad (5.23)$$

Para calcular o valor de δ_i^p aplica-se a regra da cadeia para escrever esta derivada parcial como o produto de dois factores, onde um deles reflecte a

mudança no erro como uma função de activação da unidade e o outro reflecte a mudança na saída como uma função de mudança na entrada. Então, tem-se que:

$$\delta_i^p = -\frac{\partial E^p}{\partial v_i^p} = -\frac{\partial E^p}{\partial y_i^p} \cdot \frac{\partial y_i^p}{\partial v_i^p} \quad (5.24)$$

Para o segundo factor, e pela equação 5.16, tem-se que:

$$\frac{\partial y_i^p}{\partial v_i^p} = \phi'(v_i^p), \quad (5.25)$$

a qual é simplesmente a derivada da função ϕ para a unidade $i^{ésima}$, avaliada na entrada da rede v_i^p para aquela unidade.

Para calcular o primeiro factor da equação 5.24, considera-se dois casos. Primeiro supõe-se que a unidade i é uma unidade de saída $i=o$ da rede. Neste caso e da definição de E^p tem-se:

$$\frac{\partial E^p}{\partial y_o^p} = -(d_o^p - y_o^p) \quad (5.26)$$

que é o mesmo resultado obtido com o da regra Delta padrão. Substituindo esta equação e a equação 5.25 na equação 5.24, obtém-se:

$$\delta_o^p = (d_o^p - y_o^p) \phi'(v_o^p) \quad (5.27)$$

para alguma unidade de saída o :

No caso de i não ser uma unidade de saída mas sim uma unidade intermédia $k=u$, não se conhece a contribuição da unidade para o erro de saída da rede. No entanto, a medida do erro pode ser escrita como uma função das entradas da rede da camada intermédia para a saída. Então, $E^p = E^p(v_1^p, v_2^p, \dots, v_j^p, \dots)$ e usa-se a regra da cadeia para escrever:

$$\frac{\partial E^p}{\partial y_i^p} = \sum_u \frac{\partial E^p}{\partial v_u^p} \cdot \frac{\partial v_u^p}{\partial y_i^p} \quad (5.28)$$

$$\frac{\partial E^p}{\partial y_i^p} = \sum_u \frac{\partial E^p}{\partial v_u^p} \cdot \frac{\partial}{\partial y_i^p} \sum_k w_{uk} y_k^p \quad (5.29)$$

$$\frac{\partial E^p}{\partial y_i^p} = \sum_u \frac{\partial E^p}{\partial v_u^p} w_{ui} \quad (5.30)$$

$$\frac{\partial E^p}{\partial y_i^p} = - \sum_u \delta_u^p w_{ui} \quad (5.31)$$

Substituindo as equações 5.25 e 5.31 na equação 5.24, tem-se:

$$\delta_i^p = \phi'(v_i^p) \sum_u \delta_u^p w_{ui} \quad (5.32)$$

As equações 5.27 e 5.32 fornecem um procedimento recursivo para calcular os δ 's para todos os elementos na rede, os quais são usados para calcular as mudanças de pesos de acordo com a equação 5.18. Este processo constitui a Regra Delta Generalizada para uma rede directa de elementos não-lineares.

Dos resultados acima expostos, pode-se obter os ajustes dos pesos para qualquer função de activação, desde que seja diferenciável.

Baseado em [73], pode-se descrever sucintamente um algoritmo de retropropagação típico:

1. Seja A , o número de neurónios da camada de entrada, conforme determinado pelo comprimento dos vectores de entrada de aprendizagem, C , o número de neurónios da camada de saída. Escolher B , o número de neurónios da camada intermédia.
2. Inicializar os pesos da rede. Cada peso deve ser inicializado aleatoriamente.
3. Inicializar as activaões dos neurónios com *bias*, ou seja, $x_0=1$ e $u_0=1$.
4. Escolher um par entrada-saída. Supondo que o vector de entrada seja x_i , e que o vector de saída seja y_i . Atribui-se níveis de activação aos neurónios da camada de entrada.

5. Propagar a activação dos neurónios da camada de entrada para a camada intermédia, usando, por exemplo a função sigmoidal assimétrica,

$$u_k = \frac{1}{1 + e^{-a}} \quad (5.33)$$

onde:

$$a = \sum_{l=0}^A w_{1lk} x_l, \forall_{k=1, \dots, B} \quad (5.34)$$

6. Propagar a activação dos neurónios da camada intermédia para os da camada de saída,

$$y_j = \frac{1}{1 + e^{-a}} \quad (5.35)$$

onde:

$$a = \sum_{l=0}^B w_{2lk} x_l, \forall_{k=1, \dots, C} \quad (5.36)$$

7. Calcular os erros dos neurónios da camada de saída, denominada por δ_{2k} , sendo t_k as saídas que se pretende obter,

$$\delta_{2k} = y_k(1 - y_k)(t_k - y_k), \forall_{k=1, \dots, C} \quad (5.37)$$

8. Calcular os erros dos neurónios da camada intermédia, denominada por δ_{1k} ,

$$\delta_{1k} = u_k(1 - u_k) \sum_{l=1}^C \delta_{2l} w_{2lk}, \forall_{k=1, \dots, B} \quad (5.38)$$

9. Ajustar os pesos, entre a camada intermédia e a de saída.

$$\Delta w_{2lk} = \eta \delta_{2kj} u_l, \forall_{l=0, \dots, B}; \forall_{k=0, \dots, C} \quad (5.39)$$

10. Ajustar os pesos, entre a camada de entrada e a intermédia.

$$\Delta w_{1lk} = \eta \delta_{1k} u_l, \forall_{l=0, \dots, A}; \forall_{k=1, \dots, B} \quad (5.40)$$

11. Voltar ao ponto 4 e repete-se. Uma iteração fica concluída quando todos os pares entrada-saída tiverem sido calculados. Os passos 4 a 10 devem ser repetidos tantas iterações as quantas forem necessárias.

5.3.5. Implementação

Nos últimos anos têm surgido muitas aplicações de RNAs no controlo industrial [73], [98] e [104]. No capítulo anterior foi apresentado um sistema de controlo vectorial de um gerador de indução duplamente alimentado para produção de energia de origem eólica. Neste serão apresentados novos desenvolvimentos para o controlo vectorial destas máquinas baseados em redes neuronais. Para esse efeito, modificaram-se algumas partes do sistema de controlo vectorial para redes neuronais.

As RNAs utilizadas de retropropagação usam somente operações matemáticas de soma e multiplicação, e função de activação sigmoidais, tangenciais e/ou lineares. Estas são implementadas usando o *Simulink/Matlab*. A primeira fase consiste em treinar, generalizar, e comprovar os neurónios artificiais em linguagem de *Matlab* [105]. Depois de treinada a rede neuronal, os pesos e desvios (*bias*) são carregados em blocos implementados em *Simulink* para testar a rede implementada como parte integrante do conjunto do sistema de controlo.

Processo de Aprendizagem

As redes de propagação são basicamente constituídas por camadas de neurónios conectados em cascata. Com a rede inicialmente por treinar, são atribuídos pesos seleccionados aleatoriamente, sendo depois decidido se a saída será totalmente diferente daquela que é esperada para um determinado padrão conhecido. A saída determinada é comparada com a saída desejada e os pesos são ajustados mediante o algoritmo de aprendizagem supervisionada de retropropagação até que a saída seja ajustada, ou seja, até que o erro atinja um valor baixo aceitável.

O processo de aprendizagem resume-se aos seguintes passos [81]:

1. Gerar os pares de dados entradas e respectivas saídas, numa tabela, para diferentes condições de funcionamento do sistema;
2. Com a rede inicialmente sem treinar, decide-se, com pesos seleccionados aleatoriamente, se o sinal de saída é totalmente diferente da saída esperada para uma entrada conhecida;
3. Inicia-se o processo de propagação à frente, esquematizado na Figura 5.4: selecciona-se da tabela um par de dados de entrada e saída $[x(n), d(n)]$. Para um padrão de entrada, calcula-se a saída da rede e compara-se esse valor com a saída desejada para obter o valor do erro. Calculam-se as funções de activação através dos processos de propagação à frente camada atrás de camada. O nível de actividade da rede, v , pode escrever-se como:

$$v_j^{(l)}(n) = \sum_{i=1}^p w_{ij}^{(l)} y_i^{(l-1)}(n) \quad (5.41)$$

onde $v_j^{(l)}(n)$ é a actividade interna da rede do neurónio j , na camada l , na iteração n , e $y_i(n)$ a saída da $i^{\text{ésimo}}$ neurónio da camada $(l-1)$ que conecta o neurónio j com a camada seguinte através do peso sináptico w_{ij} , sendo i o neurónio fonte e j o neurónio de chegada.

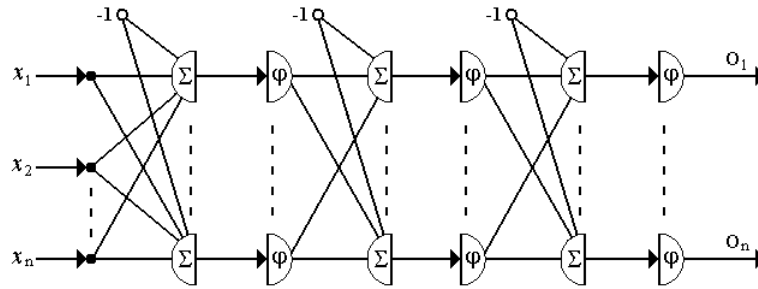


Figura 5.4: Diagrama esquemático do processo de propagação.

A saída do neurónio é:

$$y_j^{(l)}(n) = \phi(v_j^{(l)}(n)) \quad (5.42)$$

onde φ é uma função de activação, que poderá ser umas das apresentadas no ponto 5.3.5 deste capítulo.

Se a função de activação for a função sigmoidal simétrica ou assimétrica, o sinal de saída do neurónio j da camada l é dada por:

$$y_j^{(l)}(n) = \frac{a}{1 + e^{-\gamma \cdot v_j^{(l)}(n)}} + c \quad (5.43)$$

sendo a , c e γ os parâmetros da função. Estes parâmetros afectam directamente o problema que se pretende resolver. Fazendo $c=-1$ e $a=2$, obtém-se a função sigmoidal simétrica, ao mesmo tempo que se $c=0$ e $a=1$ se obtém a função sigmoidal assimétrica. Estes parâmetros devem seleccionar-se antes de iniciar o processo de aprendizagem [81], mas, em geral, a escolha dos parâmetros é empírica, e baseia-se em observações práticas através de testes preliminares.

Se o neurónio j está na primeira camada oculta ($l=1$), faz-se:

$$y_j^{(0)}(n) = x_j(n) \quad (5.44)$$

No entanto, se o neurónio j está na camada de saída ($l=L$), faz-se:

$$y_j^{(L)}(n) = o_j(n) \quad (5.45)$$

O erro na saída do $j^{\text{ésimo}}$ neurónio obtém-se por $d^j - y^j$.

4. Inicia-se o processo de retropropagação: usam-se os erros da saída e nas camadas ocultas da rede para calcular o gradiente local na camada de saída l . Este gradiente é retropropagado até aos nós de entrada camada a camada como se mostra a Figura 5.5, e aplicando as seguintes equações:

Para o neurónio j na camada de saída L

$$\delta_j^{(L)}(n) = e_j^{(L)}(n) o_j(n) (1 - o_j(n)) \quad (5.46)$$

e para o neurónio j da camada oculta l

$$\delta_j^{(l)}(n) = y_j^{(l)}(n)(1 - y_j^{(l)}(n)) \sum_k \delta_k^{(l+1)}(n) w_{kj}^{(l+1)}(n) \quad (5.47)$$

onde w_{ij} é o peso sináptico que conecta o neurónio j da camada l ao neurónio k da camada $l+1$.

Usando o gradiente local calculado para cada camada, o incremento de um peso sináptico pode calcular-se por

$$\Delta w_{ji}^{(l)}(n) = \eta \delta_j^{(l)}(n) y_i^{(l-1)}(n) \quad (5.48)$$

onde η é o coeficiente de aprendizagem, sendo um valor positivo inferior à unidade. Somando cada variação do peso ao seu valor correspondente usado na iteração de propagação anterior, obtém-se um novo valor para o peso

$$w_{ji}^{(l)}(n+1) = w_{ji}^{(l)}(n) + \Delta w_{ji}^{(l)}(n) \quad (5.49)$$

5. Repete-se o passo anterior para cada conjunto de dados de pares entrada-saída até que o erro para todo o conjunto de pares de aprendizagem convirja para um valor igual ou inferior ao desejado.

Depois do processo de aprendizagem ter terminado, testa-se o comportamento da rede neuronal fora do controlo para um grupo arbitrário de entradas de forma a assegurar-se que a aprendizagem foi bem sucedida.

A figura seguinte mostra um diagrama estrutural da aprendizagem durante o processo de propagação e retropropagação.

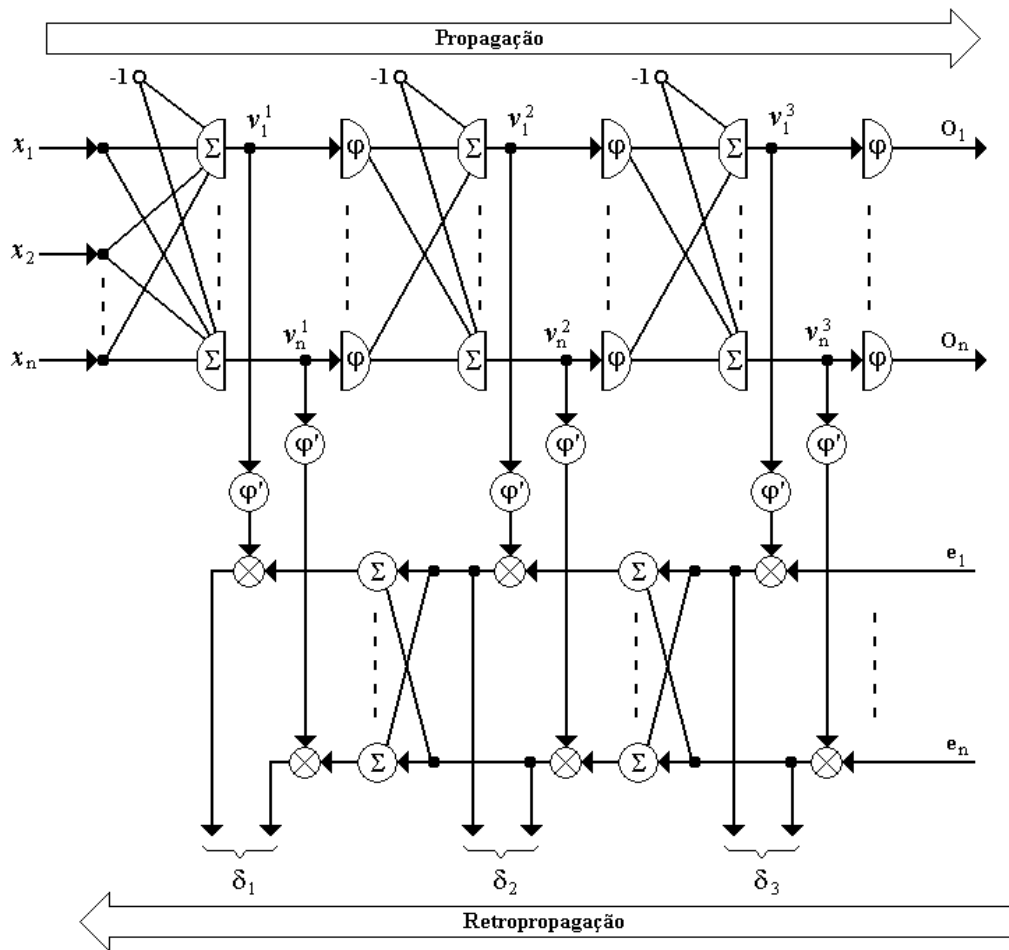


Figura 5.5: Diagrama esquemático do processo de propagação e retropropagação.

O algoritmo de Retropropagação é apresentado a seguir:

Algoritmo de Retropropagação

```

Function [w]=backprop(max_in, min_err, α, X, D)
  For m from 1 to M do,
    Inicializar  $w^m$ 
    Inicializar  $b^m$ 
  End for
  t=1

```

```

While t<Max_in & MSN>min_err do,
    For i from 1 to N do,
         $y^0 = x_1$ 
         $y_i^{m+1} = f^{m+1}(w^{m+1}y_i^m + b^{m+1})$ ,  $m=0,1, \dots, M-1$ 
         $\delta_i^m = -2F'(u_i^m)(d_i - y_i)$ 
         $\delta_i^m = F'(u_i^m)(w^{m+1})^T \delta_i^{m+1}$ ,  $m=M-1, \dots, 2, 1$ 
         $w^m = w^m - \alpha \delta_i^m (y_i^{m-1})^T$ ,  $m=1, \dots, M$ 
         $e_i = d_i - y_i$ 
         $E_i = e_i^T e_i$ 
    End for
    MSE = 1/N.Sum( $E_i$ )
    t=t+1;
End while
End Function

```

Factores que afectam a aprendizagem das redes neuronais

A aprendizagem é um processo que determina os pesos sinápticos óptimos que fazem com que a evolução do erro diminua até um valor mínimo, ou seja, a aprendizagem de uma rede neuronal termina quando o erro se torna constante e não consegue reduzir-se mais, o que significa que o processo de aprendizagem atingiu um mínimo local ou global.

A aprendizagem da rede também pode parar quando for atingido um determinado valor do erro imposto como parâmetro inicial.

É difícil saber se o erro está num mínimo local ou no mínimo global, o que só se poderá saber mediante a prova (ou verificação) de generalização da rede neuronal pela verificação da aprendizagem da rede neuronal com diferentes grupos de condições iniciais e factores de aprendizagem até obter um erro mínimo.

A seguir são apresentados alguns factores/parâmetros que influenciam a aprendizagem da rede.

Parâmetros da função de activação sigmoidal

De acordo com a equação 5.43, a função sigmoidal resulta evidentemente da definição dos parâmetros a e c utilizados (sigmoidal simétrica ou assimétrica) e do parâmetro γ que se utiliza para mudar a variação da função, como se mostra nas figuras seguintes

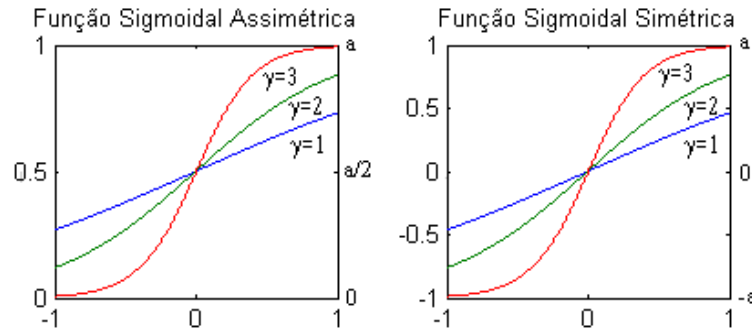


Figura 5.6: Variação dos parâmetros da função sigmoidal assimétrica e simétrica.

Factor de aprendizagem

A equação 5.48 mostra que o factor de aprendizagem utiliza-se para reduzir o erro de aprendizagem e, além disso, depende directamente do problema a resolver. Se utilizar um factor de aprendizagem constante o processo de aprendizagem pode saltar um mínimo global e cair num mínimo local. Há algoritmos para resolver este tipo de problemas, tais como aquele que reduz o factor de aprendizagem depois de cada iteração, multiplicando-o por um valor, adaptando o factor de aprendizagem e a base da Regra Delta, já descrita anteriormente e que se usa neste trabalho.

Factor *momentum*

Para tornar o processo de aprendizagem mais rápido e assegurar que se evitam os mínimos locais sem incrementar o erro depois de este ter sido reduzido, põe-se o factor *momentum* na equação 5.49, que se pode escrever como

$$w_{ji}^{(l)}(n+1) = w_{ji}^{(l)}(n) + \Delta w_{ji}^{(l)}(n) + \alpha(w_{ji}^{(l)}(n) - w_{ji}^{(l)}(n-1)) \quad (5.50)$$

onde α é o factor *momentum*, que tem um valor positivo e inferior à unidade. Este factor também pode ser actualizado usando a mesma regra mencionada no mesmo algoritmo de actualização do factor de aprendizagem da Regra Delta.

Atrasos de Tempo (*Time Delays*)

Os atrasos de tempo numa rede neural artificial com arquitectura *feedforward* a resposta da rede no tempo t é baseada nas entradas no tempo $(t-1)$, $(t-2)$, ..., $(t-n)$. Com isso, considera-se um histórico da sequência temporal dos dados.

Como descrito em [106], a arquitectura do sistema de reconhecimento de padrões necessita receber curvas completas durante a aquisição dos dados. Tais curvas precisam ser obtidas em intervalos ininterruptos de tempo, assim, apenas os valores obtidos em cada uma das repetições podem ser utilizados no conjunto do treino, validação e teste, ou seja, os padrões não podem ser retirados da ordem de aquisição ou agrupados em conjuntos maiores.

Assim, a escolha dos atrasos de tempo consiste num sistema de reconhecimento de padrões capaz de analisar as características temporais dos sinais gerados levando em consideração a variação destes valores ao longo de um intervalo de tempo em que foram adquiridos os dados. A quantidade de atrasos no tempo para cada uma das curvas de entrada foi escolhida por ser a menor configuração possível utilizando características temporais.

5.4. Aplicação das Redes Neurais

5.4.1. Controlador do lado do Rotor

A configuração da rede é 7-15-10-2 como é explicada na tabela 5.3, onde as entradas são as correntes do estator e do rotor, as correntes de referência do conversor do lado do rotor (componentes dq) e a velocidade angular do rotor, e as saídas são as tensões de referência de controlo do controlador do conversor do lado do rotor (componentes dq).

O algoritmo de aprendizagem actualiza os valores dos pesos e os desvios de acordo com o gradiente descendente com factor *momentum* e com taxa de aprendizagem adaptativa, indicados na tabela. A frequência de amostragem é de 20 kHz. Os números de atrasos de tempos utilizados em cada camada da rede neuronal foram afinados como resultado de várias simulações.

Os padrões de aprendizagem utilizados são constituídos por pares entrada-saída que foram gerados pelas diversas simulações efectuadas sobre o sistema com a máquina a ser controlada pelo sistema de controlo vectorial validado e apresentado no Capítulo anterior. Os padrões de aprendizagem contemplam os regimes de falhas apresentados anteriormente e os regimes de funcionamento com a máquina a funcionar numa zona abaixo da velocidade de sincronismo, em que é fornecida potência activa ao rotor da máquina; uma zona próximo da velocidade de sincronismo, em que o trânsito de potência activa no rotor da máquina é praticamente nulo; e uma zona, a acima da velocidade de sincronismo, em que a máquina fornece potência activa à rede pelo estator e pelo rotor.

Tabela 5.3: Parâmetros da RNA das tensões de referência do controlador do lado do rotor.

	<i>1ª Camada oculta</i>	<i>2ª Camada oculta</i>	<i>Camada de Saída</i>
<i>Nº de entradas</i>	7 entradas		
<i>Nº de neurónios</i>	15	10	2
<i>Função de activação ϕ</i>	Sigmoidal simétrica	Sigmoidal simétrica	Linear
<i>Nº de atrasos de tempo</i>	7	3	2
<i>Parâmetro γ</i>	2,0	2,0	-
<i>Parâmetro a</i>	2,0	2,0	-
<i>Parâmetro c</i>	-1,0	-1,0	-
<i>Padrões de aprendizagem</i>	80.000		
<i>Nº de iterações</i>	1633		
<i>Erro</i>	< 9,98E-6		
<i>Coefficiente de aprendizagem η</i>	0,05		
<i>Momentum α</i>	0,9		

A função de erro utilizada é a soma do erro quadrático médio sendo os critérios de paragem de aprendizagem da rede 3000 iterações ou um erro mínimo de 10^{-5} . O primeiro critério a ser alcançado foi o do erro mínimo em 1633 iterações, cuja evolução é mostrada na figura seguinte.

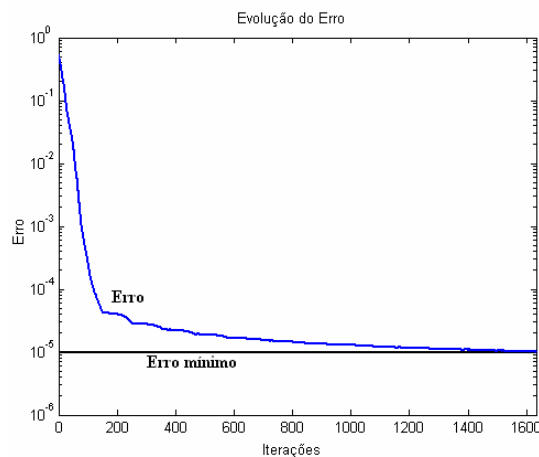


Figura 5.7: Evolução do erro durante o processo de aprendizagem.

Uma vez que é difícil saber se o erro está num mínimo local ou no mínimo global é preciso provar a generalização da rede neuronal pela verificação da aprendizagem da rede neuronal com diferentes grupos de condições iniciais e factores de aprendizagem.

Assim, depois de terminado o processo de aprendizagem torna-se necessário testar o comportamento da rede neuronal fora do controlo para um grupo arbitrário de entradas de forma a assegurar-se que a aprendizagem foi bem sucedida.

As figuras seguintes mostram os sinais pretendidos e as saídas antes de iniciar, Figura 5.8, e depois de terminar, Figura 5.9, o processo de aprendizagem para os padrões de aprendizagem introduzidos, para conjuntos de pares entrada-saída aleatórios dentro de uma gama de valores esperados para as saídas da RNA, neste caso para as tensões de controlo dos conversor do lado do rotor.

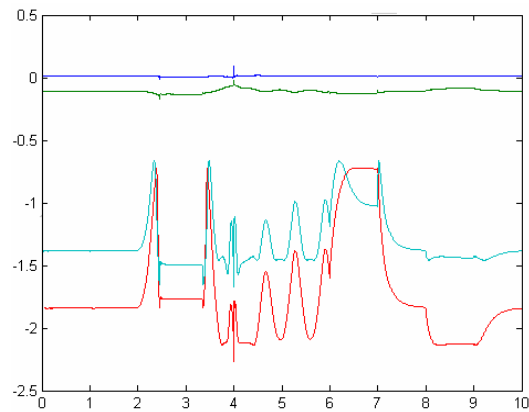


Figura 5.8: Sinais pretendidos e as saídas antes da aprendizagem.

Pode-se verificar que antes da aprendizagem as saídas são totalmente díspares dos sinais que se pretendem (a azul e verde, respectivamente para v_{qr} e v_{dr}). Nas figuras apresentadas os traços a vermelho e a ciano representam as saídas obtidas e os traços a azul e verde as saídas desejadas, respectivamente.

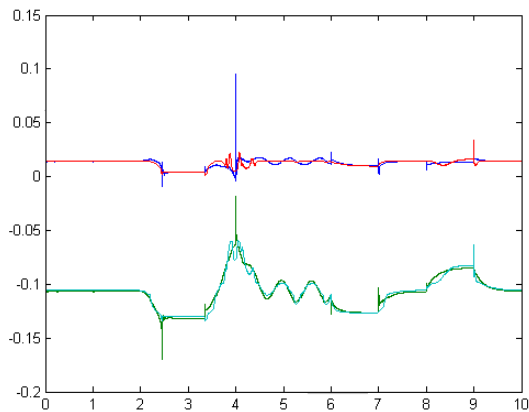


Figura 5.9: Sinais pretendidos e as saídas após a aprendizagem.

Uma vez que os pares usados para a verificação e validação da RNA contemplam as zonas de funcionamento esperadas para o sistema, quer em situação funcionamento normal, quer em situação de falhas, pelo que se pode aceitar o modelo da RNA como válido.

5.4.2. Controlador do lado do Estator

A configuração da rede é 7-18-8-2 como explica a Tabela 5.4, onde as entradas são as correntes e tensões do estator, as correntes de referência do conversor do lado do estator (componentes dq), e a frequência angular ω_s , e as saídas são as tensões de referência de controlo do controlador do conversor do lado do estator (componentes dq).

Também aqui, o algoritmo de aprendizagem actualiza os valores dos pesos e os desvios de acordo com o gradiente descendente com factor *momentum* e com taxa de aprendizagem adaptativa, cujos valores são indicados na Tabela 5.4.

Tabela 5.4: Parâmetros da rede neuronal das tensões de referência do controlador do lado do estator.

	<i>1ª Camada oculta</i>	<i>2ª Camada oculta</i>	<i>Camada de Saída</i>
<i>Nº de entradas</i>		7 entradas	
<i>Nº de neurónios</i>	18	8	2
<i>Função de activação ϕ</i>	Sigmoidal simétrica	Sigmoidal simétrica	Linear
<i>Nº de atrasos de tempo</i>	7	3	2
<i>Parâmetro γ</i>	2,0	2,0	-
<i>Parâmetro a</i>	2,0	2,0	-
<i>Parâmetro c</i>	-1,0	-1,0	-
<i>Padrões de aprendizagem</i>		80.000	
<i>Nº de iterações</i>		1313	
<i>Erro</i>		< 9,99E-6	
<i>Coefficiente de aprendizagem η</i>		0,05	
<i>Momentum α</i>		0,9	

A função de erro utilizada é também a soma do erro quadrático médio sendo igualmente os critérios de paragem de aprendizagem da rede 3000 iterações ou um erro mínimo de 10^{-5} . O primeiro critério a ser alcançado foi também o do erro mínimo em 1313 iterações, cuja evolução é mostrada na Figura 5.10.

Mais uma vez é necessário averiguar se o erro está num mínimo local ou

no mínimo global e é preciso provar a generalização da rede para um grupo arbitrário de entradas de forma a assegurar-se que a aprendizagem foi bem sucedida.

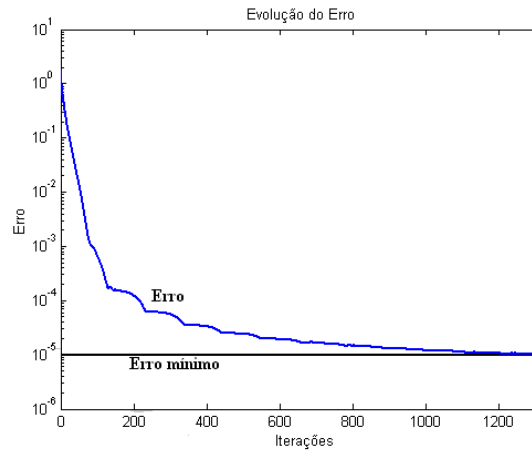


Figura 5.10: Evolução do erro durante o processo de aprendizagem.

Também para esta rede foi efectuado o teste para verificar se o processo de aprendizagem foi realizado com sucesso. Tal como na rede anterior as figuras seguintes mostram que antes da aprendizagem, Figura 5.11, as saídas são totalmente díspares dos sinais pretendidos, o que já não se verifica na Figura 5.12. Os traços a vermelho e a ciano representam as saídas obtidas e os traços a azul e verde as saídas desejadas, respectivamente, (azul para v_{qs} e verde para v_{ds}) para conjuntos de pares entrada-saída aleatórios dentro de uma gama de valores esperados para as saídas da RNA, neste caso para as tensões de controlo dos conversor do lado do estator/rede.

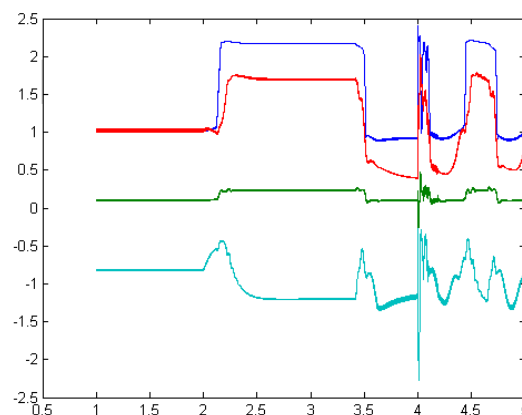


Figura 5.11: Sinais pretendidos e as saídas antes da aprendizagem.

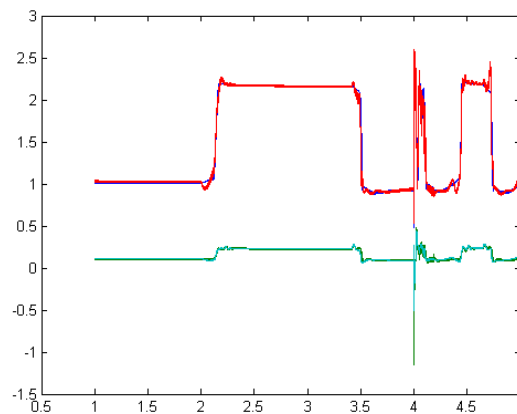


Figura 5.12: Sinais pretendidos e as saídas após a aprendizagem.

Também neste caso os pares usados para a verificação e validação da RNA contemplam as zonas de funcionamento esperadas para o sistema, quer em situação funcionamento normal, quer em situação de falhas, pelo que se pode aceitar o modelo da RNA como válido.

5.4.3. Diagramas de Blocos

Neste ponto é apresentado como as redes neuronais são integradas nos blocos do controlo vectorial apresentados no Capítulo anterior.

O bloco apresentado na Figura 5.13 substitui o bloco do “Regulador de corrente” do diagrama da Figura 4.13, que fornece a tensão de referência (v_{dq}) para o controlador do conversor do lado do rotor.



Figura 5.13: Rede neuronal do controlador do lado do rotor.

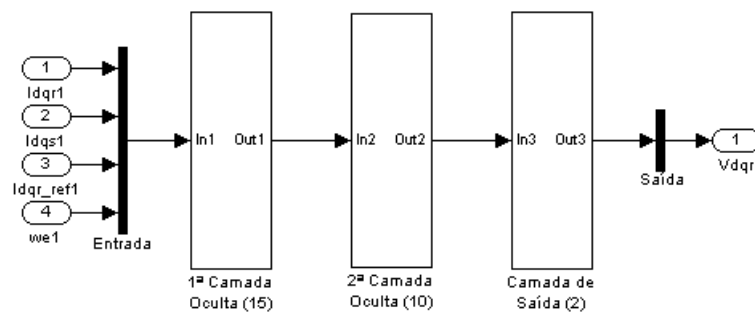


Figura 5.14: Esquema da rede neuronal do controlador do lado do rotor.

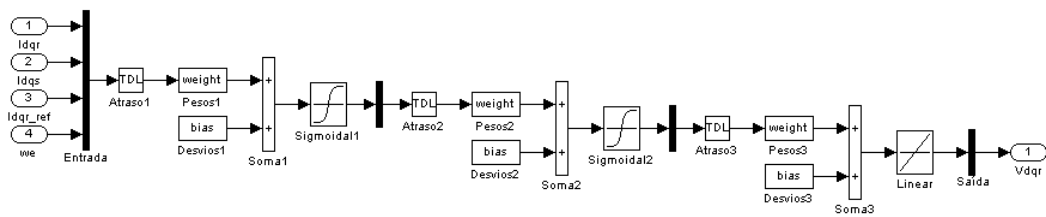


Figura 5.15: Diagrama da rede neuronal do controlador do lado do rotor.

Para o controlo do lado do estator, o bloco apresentado na Figura 5.16 substitui o bloco das “Tensões de Referência” apresentado no diagrama da Figura 4.9, que fornece a tensão de referência (v_{dq}) para o controlador do conversor do lado do estator.



Figura 5.16: Rede neuronal do controlador do lado do estator.

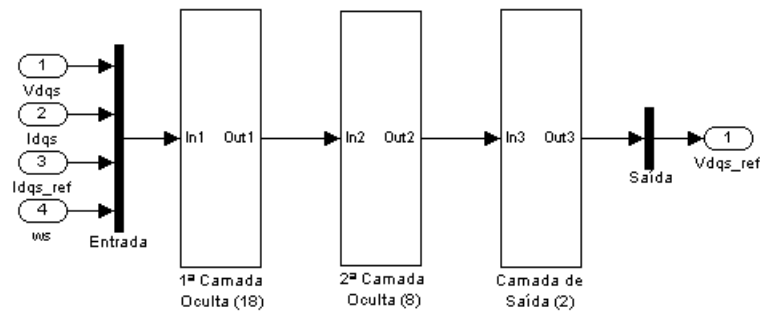


Figura 5.17: Esquema da rede neuronal do controlador do lado do estator.

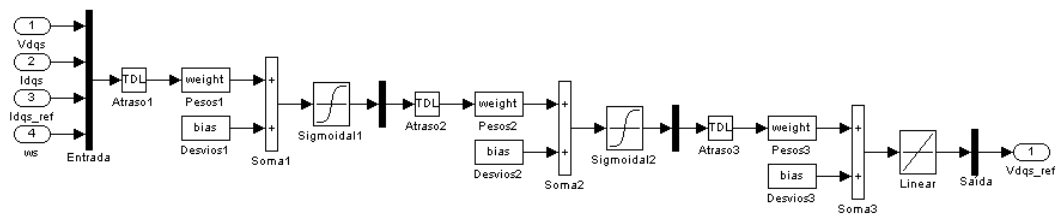


Figura 5.18: Diagrama da rede neuronal do controlador do lado do estator.

5.4.4. Resultados

Para testar a resposta das redes neuronais a várias condições de operação do sistema foram simuladas as mesmas situações de funcionamento normal e de falhas utilizadas no capítulo anterior para o controlo vectorial com controladores PI.

Para cada situação, foram registados os sinais das tensões de referência gerados pelos reguladores de corrente, em pu, para os controladores dos conversores do lado do rotor e do estator com a RNA (a azul) e com o controlador PI (a verde) para obtenção dos sinais PWM. À semelhança do que foi apresentado no capítulo anterior, também serão apresentados a seguir os sinais das principais grandezas eléctricas e mecânicas do sistema no intuito de mostrar o comportamento das RNAs face ao uso dos controladores PIs.

Controlo da Potência Reactiva

Tal como no Capítulo anterior, pretende-se variar o valor da potência reactiva de referência em dois degraus, um primeiro ascendente de 0.2 pu, e o segundo descendente -0.4 pu, tal como foi indicado na Figura 4.15. Assim, as Figuras 5.19 e 5.20 mostram os sinais das tensões de referência gerados pelos reguladores de corrente para os controladores dos conversores do lado do estator e do rotor, respectivamente, com RNAs (a azul) e PIs (a verde).

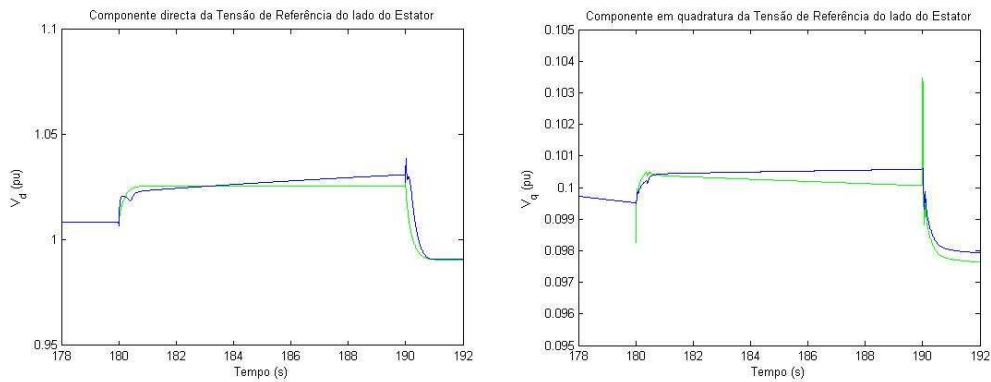


Figura 5.19: Tensão v_{dq} de referência do estator, na situação de variação da potência reactiva.

Pode-se verificar que o comportamento do sistema com as RNAs é idêntico ao sistema com os controladores PI. A resposta das RNAs, face à resposta dos controladores PIs, apresenta, geralmente, transitórios de menor amplitude, resposta mais rápida e uma diferença em regime permanente pouco significativa de apenas 0,5% na componente em quadratura.

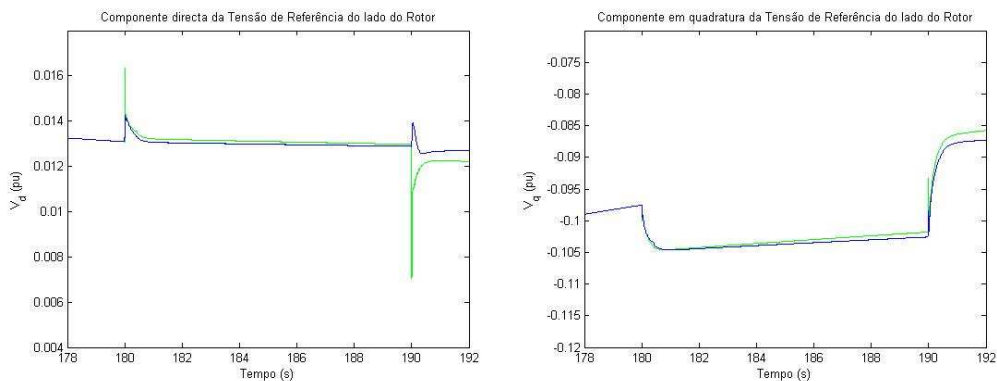


Figura 5.20: Tensão v_{dq} de referência do rotor, na situação de variação da potência reactiva.

Igualmente ao que foi apresentado no capítulo anterior, verifica-se que apenas tem nível significativo para o controlo da potência reactiva a componente directa da tensão de referência do controlador do lado do estator, tendo as restantes níveis muito baixos, da ordem das centésimas de pu.

As figuras seguintes representam as potências activa e reactiva entregues à rede.

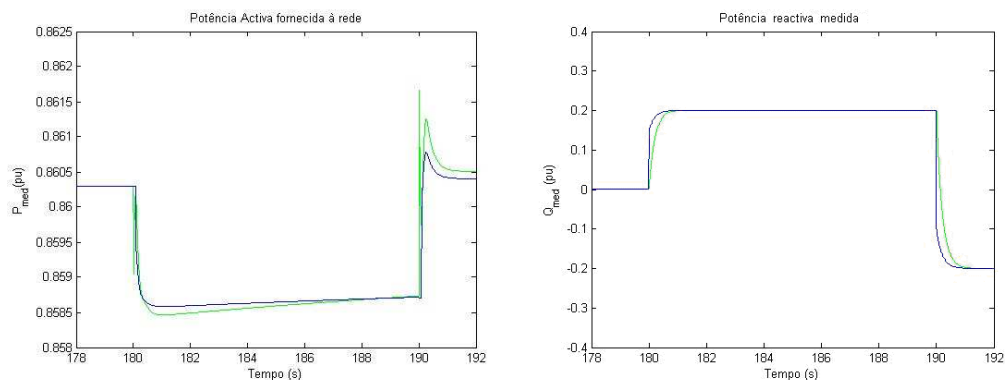


Figura 5.21: Potência Activa e Potência Reactiva.

Pode-se verificar que a resposta com as RNAs é melhor não só por apresentar, na transição, um pico no sinal mais baixo na potência activa e ausência de pico na potência reactiva, mas também por ter uma resposta mais rápida a atingir o regime estacionário, nomeadamente o valor da potência activa após os 190 s.

Devido à inércia das massas do sistema, pode-se verificar que relativamente à velocidade de rotação, esta é idêntica nas duas situações.

Tal como foi referido atrás, quer o sinal do binário electromagnético, quer a variação do valor eficaz da tensão no barramento de interligação à rede, não apresentam picos nos sinais durante a transição dos pulsos, cuja amplitude é relativamente reduzida, como se pode verificar nas figuras seguintes. O impacto na frequência do sinal de tensão é insignificante, da ordem dos 0,01% no máximo.

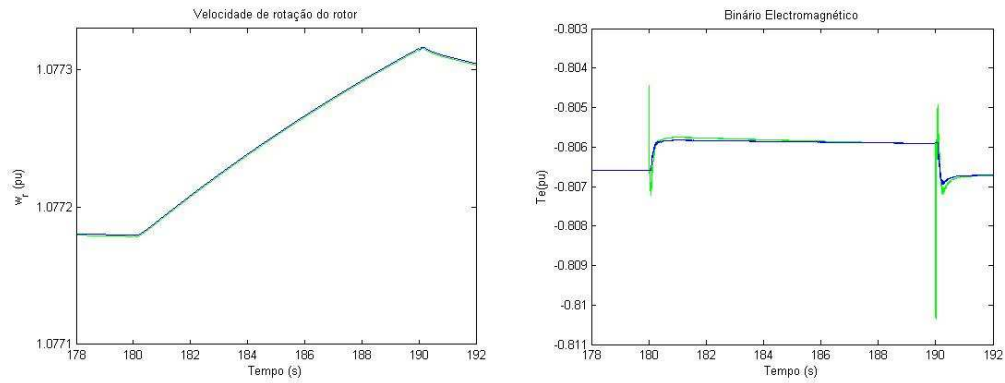


Figura 5.22: Velocidade de rotação e Binário Electromagnético.

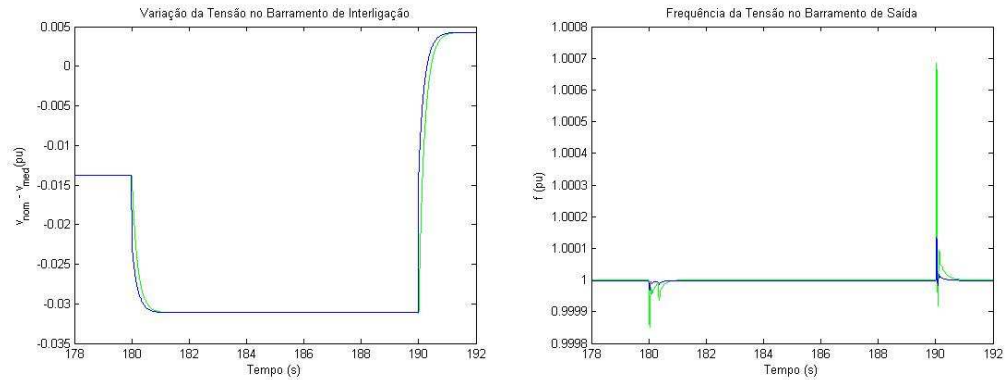


Figura 5.23: Variação e frequência da tensão no barramento de interligação à rede eléctrica.

Controlo da Velocidade de Rotação do Gerador e da Potência Activa

No segundo teste pretende-se verificar qual a resposta do gerador/conversor por variação da potência activa que é conseguida pela variação da componente em quadratura da corrente do rotor, essa variação consistiu em aplicar um pulso negativo de amplitude 0.2 pu, tal como foi apresentado na Figura 4.21. Foram registados nas Figuras 5.24 e 5.25 os seguintes sinais das tensões de referência para os controladores do lado do estator e do rotor, respectivamente.

Também nesta situação o erro máximo verificado entre os dois tipos de controlo é inferior a 0,5% e, tal como no caso anterior, a resposta das RNAs apresenta, geralmente, transitórios de menor amplitude e maior rapidez a atingir o regime permanente. Este comportamento também se verifica nas principais

grandezas eléctricas e mecânicas, como mostram as figuras seguintes (5.26 e 5.27), onde se verificam respostas mais rápidas e efeitos transitórios menores. Na velocidade de rotação do eixo mais uma vez se verifica que a resposta é idêntica nos dois cenários.

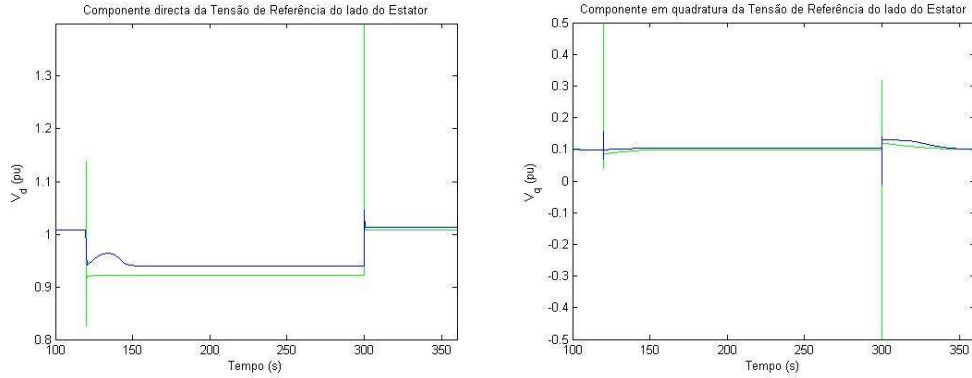


Figura 5.24: Tensão v_{dq} de referência do estator, na situação de variação da velocidade de rotação.

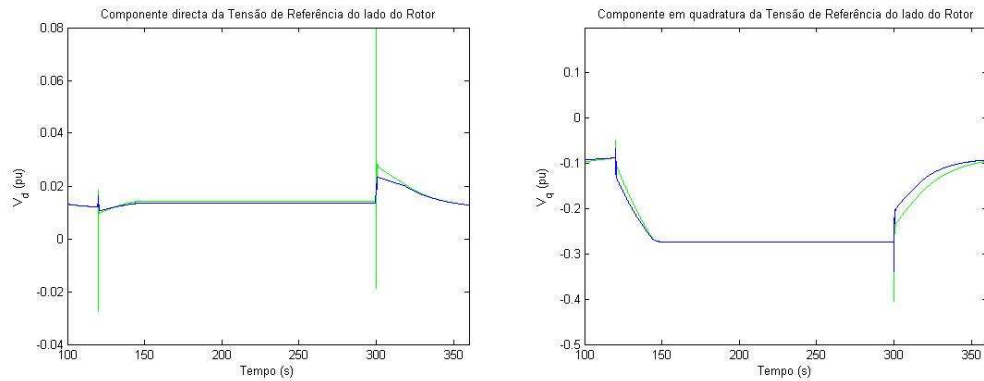


Figura 5.25: Tensão v_{dq} de referência do rotor, na situação de variação da velocidade de rotação.

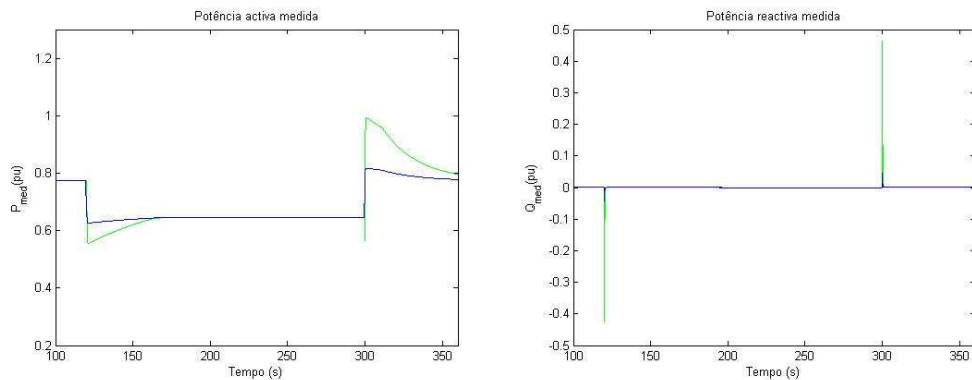


Figura 5.26: Potência Activa e Potência Reactiva.

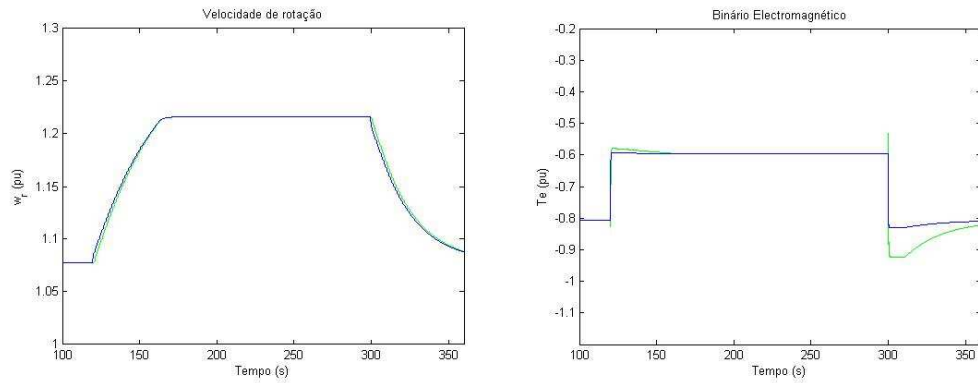


Figura 5.27: Velocidade de rotação e Binário Electromagnético.

O impacto no valor eficaz e na frequência da tensão no barramento de interligação é insignificante utilizando o sistema com os controladores PIs e ainda mais insignificante com as RNAs, como se pode verificar na Figura 2.28.

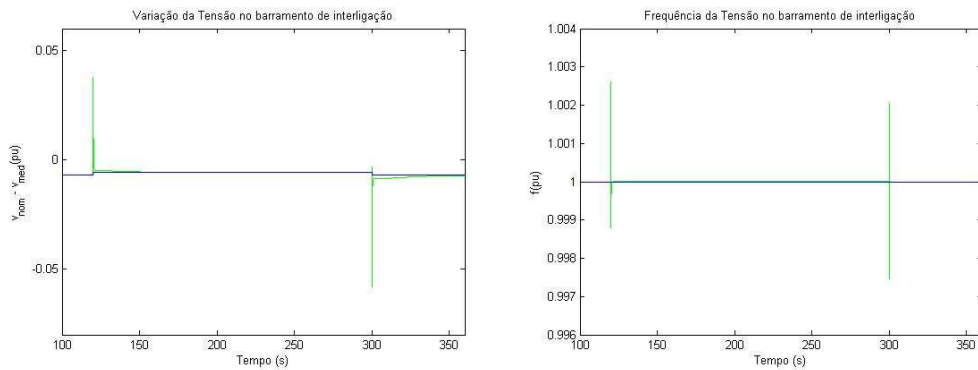


Figura 5.28: Variação e frequência da tensão no barramento de interligação à rede eléctrica.

Simulação de um Curto-Circuito Assimétrico no Barramento de Interligação à Rede (B₁)

Provocou-se um curto-circuito Assimétrico próximo do Barramento de interligação do parque à rede eléctrica apresentada na figura seguinte.

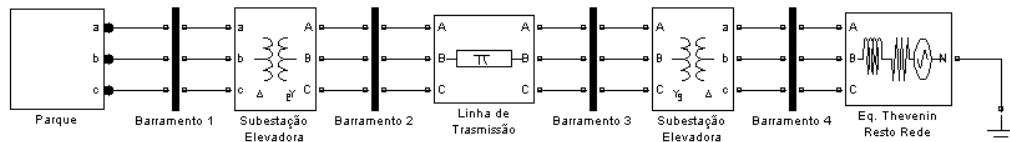


Figura 5.29: Diagrama de blocos da rede eléctrica.

Trata-se de um curto-circuito Fase-Terra, ocorrido no instante $t=180$ s e de duração de 180 ms, com impedância de defeito igual a $1 \text{ m}\Omega$, tal como na simulação apresentada no Capítulo anterior. Assim, as Figuras 5.30 e 5.31 mostram novamente os sinais das tensões de referência para os controladores dos conversores do lado do estator e do rotor, respectivamente, com RNAs (a azul) e PIs (a verde).

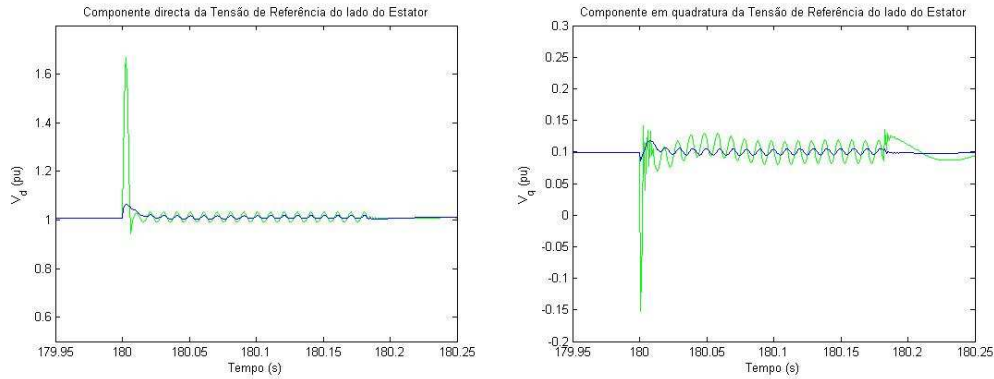


Figura 5.30: Tensão v_{dq} de referência do estator, na situação de um curto-circuito assimétrico no barramento de interligação à rede.

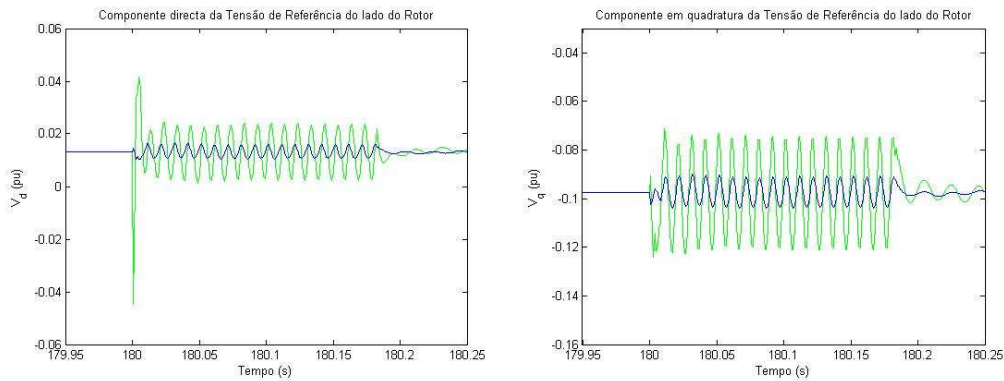


Figura 5.31: Tensão v_{dq} de referência do rotor, na situação de um curto-circuito assimétrico no barramento de interligação à rede.

Durante o período da perturbação, verifica-se que a resposta da RNA apresenta melhores resultados do que os controladores PI uma vez que, além dos picos nas transições já referidos anteriormente, apresentam um *ripple* do sinal bastante inferior. De referir que na componente directa da tensão do estator com

os controladores PI os picos podem atingir cerca de 1,7 pu o que pode causar algum desgaste nos dispositivos electrónicos usados nos conversores.

Nas Figuras 5.31 e 5.32 pode-se verificar que as perturbações causadas nas potências activas e reactivas na rede são bastante mais suaves com o uso das RNAs. No que se refere às diferenças na velocidade de rotação verifica-se que são praticamente inexistentes e as perturbações no binário electromagnético são significativamente inferiores.

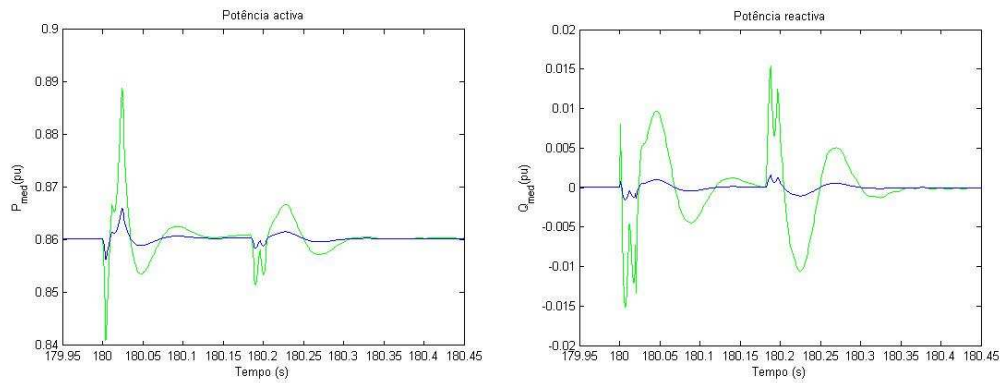


Figura 5.32: Potência Activa e Potência Reactiva na rede.

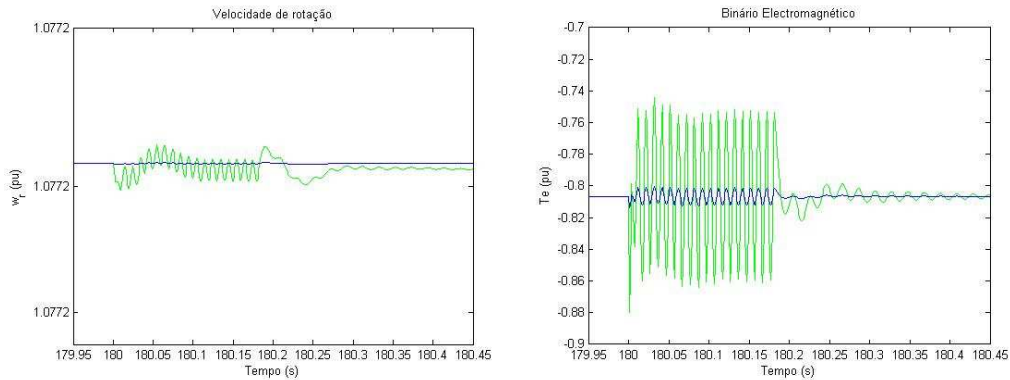


Figura 5.33: Velocidade de rotação e Binário Electromagnético.

No que se refere aos sinais trifásicos das tensões e correntes no barramento de interligação e no barramento afastado do ponto de interligação não existe diferenças a salientar entre os dois cenários dada a força da rede onde se encontra ligada o aerogerador face ao nível de potência a ser injectada nessa rede.

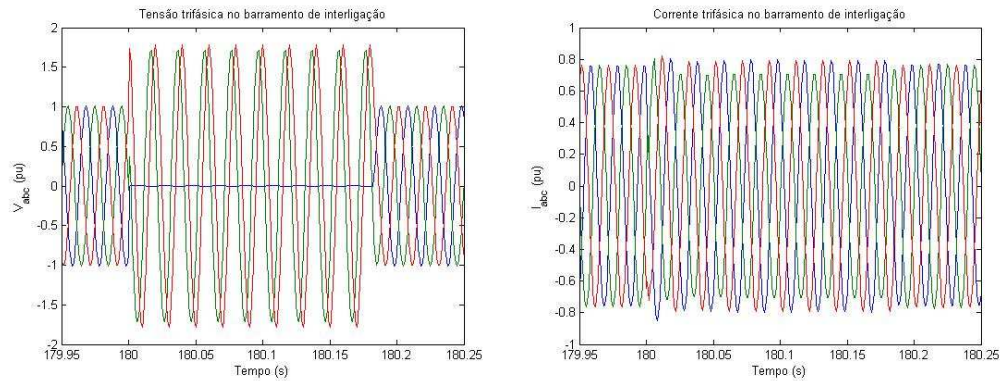


Figura 5.34: Tensões e Correntes trifásicas no barramento de interligação à rede eléctrica.

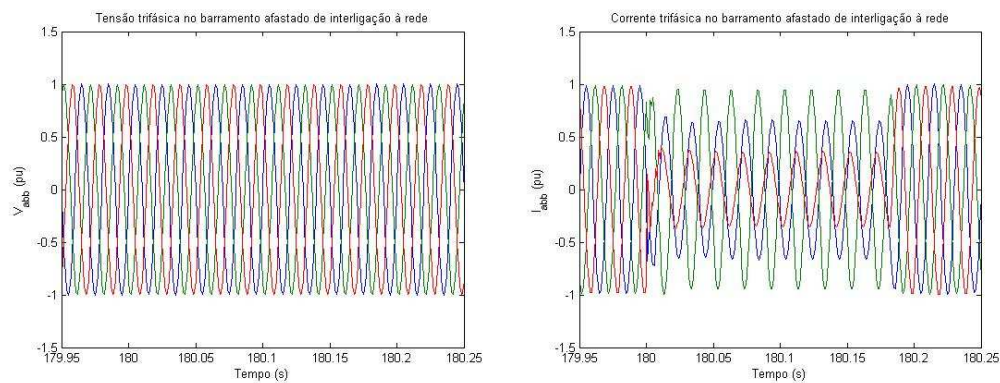


Figura 5.35: Tensões e Correntes trifásicas no barramento afastado do ponto de interligação à rede.

Simulação de um Curto-Circuito Assimétrico no Barramento afastado da Interligação à Rede (B₄)

Provocou-se um curto-circuito assimétrico no barramento afastado do Barramento de interligação do parque à rede eléctrica com impedância de defeito de $1 \text{ m}\Omega$ e de duração igual a 180 ms. Foram registados nas Figuras 5.36 e 5.37 os seguintes sinais das tensões de referência para os controladores do lado do estator e do rotor, respectivamente.

Nesta perturbação, o comportamento das RNAs é aproximada à dos controladores PI, mas com melhor resposta, que, tal como na situação anterior, o *ripple* é menor durante o período da perturbação. O tempo de resposta após a falha é mais pequeno com as RNAs. Tal como na situação anterior, pode-se verificar que as perturbações causadas nas potências activas e reactivas são identicamente mais suaves com o uso das RNAs.

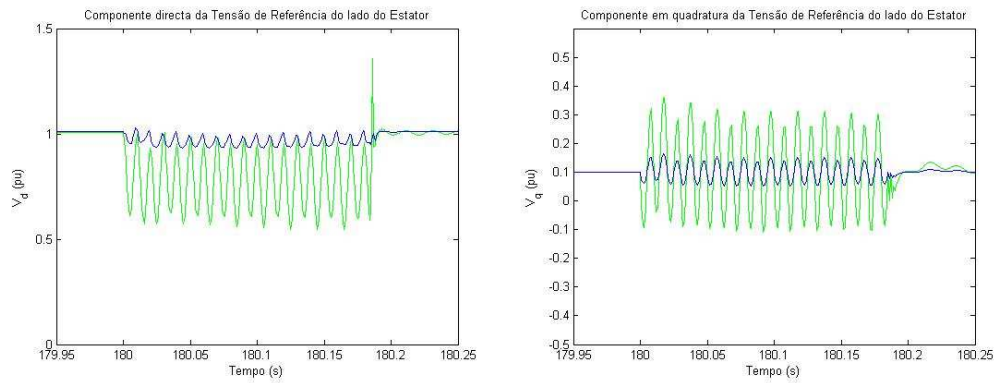


Figura 5.36: Tensão v_{dq} de referência do estator, na situação de um curto-circuito assimétrico no barramento afastado da interligação à rede.

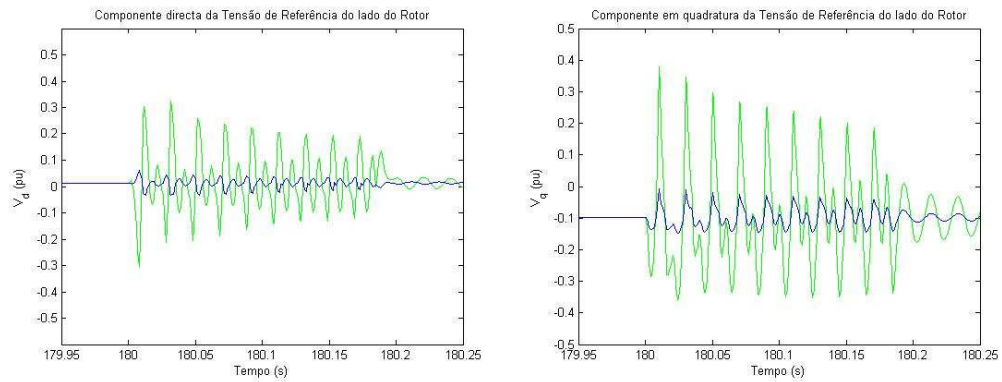


Figura 5.37: Tensão v_{dq} de referência do rotor, na situação de um curto-circuito assimétrico no barramento afastado da interligação à rede.

No que se refere à variação na velocidade de rotação verifica-se que a tendência é a mesma mas com perturbações menores. Este facto também se verifica no binário electromagnético com perturbações que são significativamente inferiores.

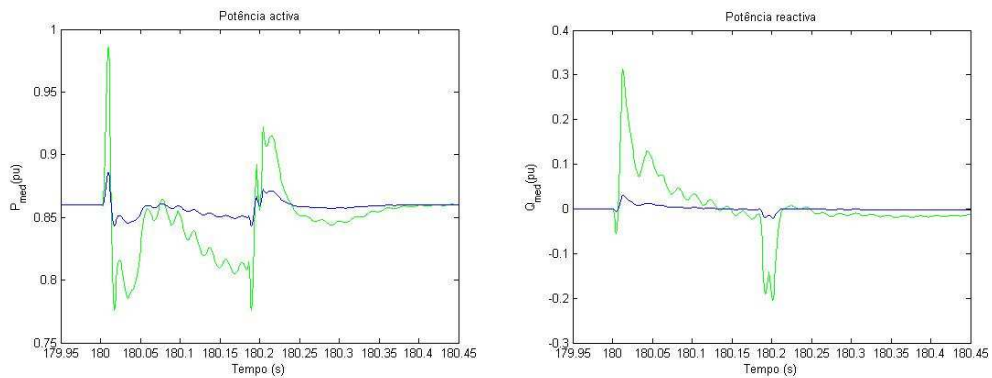


Figura 5.38: Potência Activa e Potência Reactiva na rede.

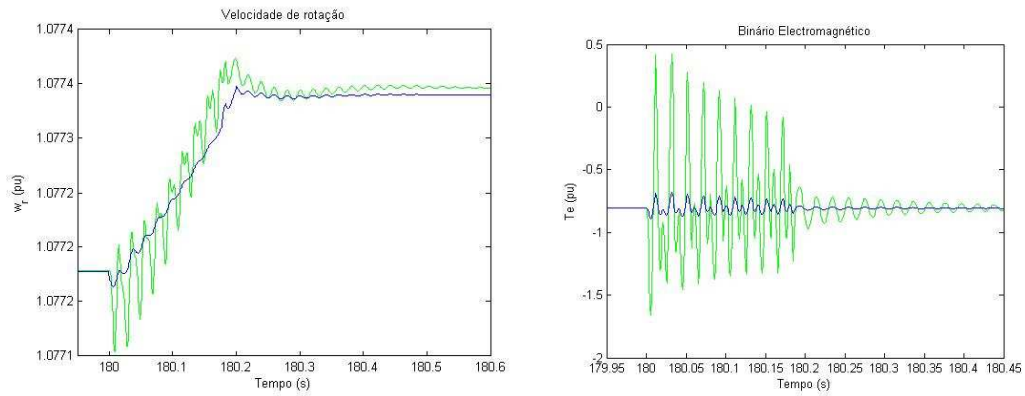


Figura 5.39: Velocidade de rotação e Binário Electromagnético.

No que se refere aos sinais trifásicos das tensões e correntes no barramento de interligação e no barramento afastado do ponto de interligação não existem diferenças a salientar entre os dois cenários

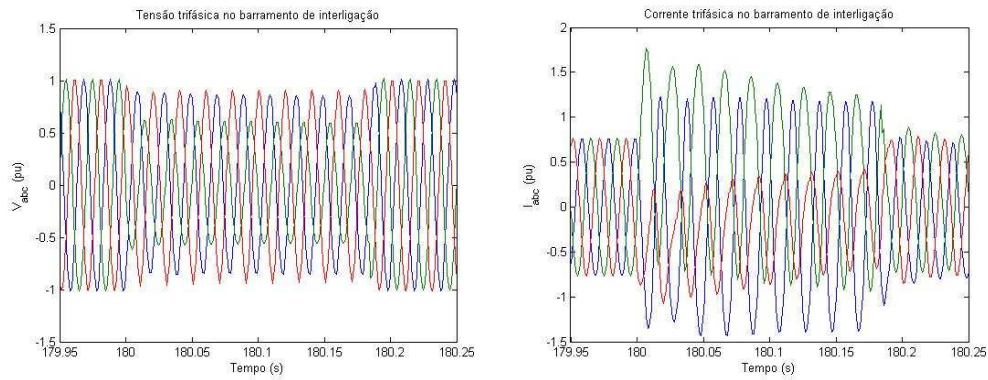


Figura 5.40: Tensões e Correntes trifásicas no barramento de interligação à rede eléctrica.

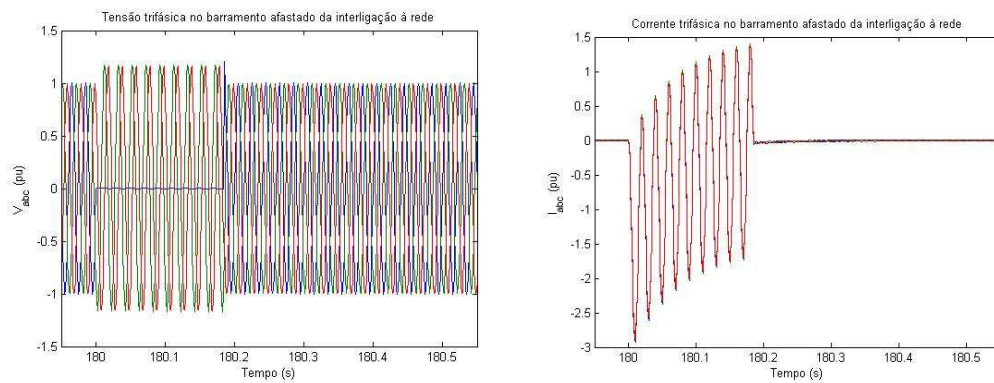


Figura 5.41: Tensões e Correntes trifásicas no barramento afastado do ponto de interligação à rede.

Simulação de Cava de Tensão

Provocou-se uma cava de tensão de 0.5 pu de duração igual a 0,5 segundos, registrando-se os seguintes sinais para as tensões de controlo, representados nas Figuras 5.42 e 5.43.

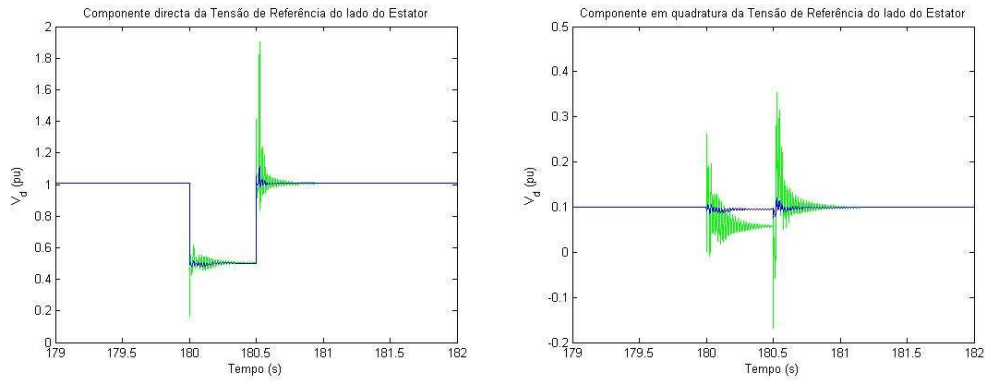


Figura 5.42: Tensão v_{dq} de referência do estator, na situação de surgir uma cava de tensão.

Também durante esta perturbação verifica-se que o comportamento das RNAs é melhor visto que os sinais apresentam um *ripple* no sinal bastante inferior e, além disso, pode-se verificar que o sistema retoma o regime permanente mais rapidamente, como se poderá verificar nas figuras seguinte.

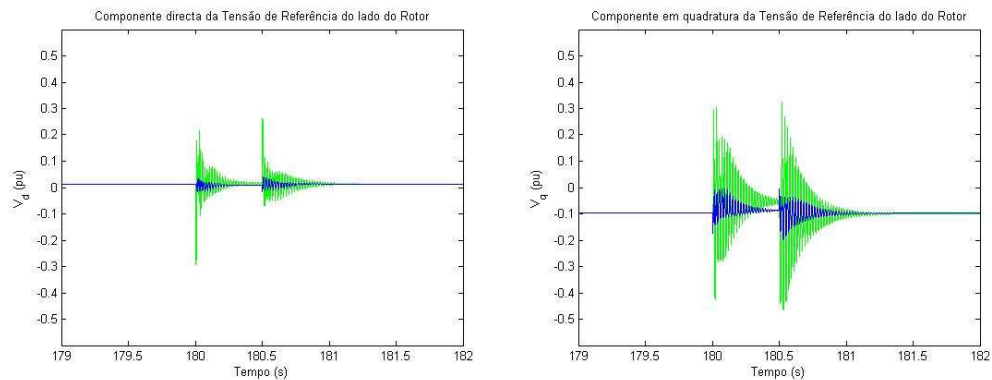


Figura 5.43: Tensão v_{dq} de referência do rotor, na situação de surgir uma cava de tensão.

De uma forma geral o sistema com as RNAs apresenta uma resposta melhor, em relação aos controladores PI tradicionais, uma vez que apresenta

sinais com perturbações inferiores e respostas mais rápidas e que apresentam menos oscilações e picos nas transições.

Em termos de resposta às solicitações, quer por comando, quer devido a perturbações, o *ripple* apresentado pelas RNAs é bastante inferior e o tempo de resposta após a perturbação é menor, como se pode verificar nas figuras a seguir (5.44 e 5.45), nomeadamente no sinal do binário electromagnético.

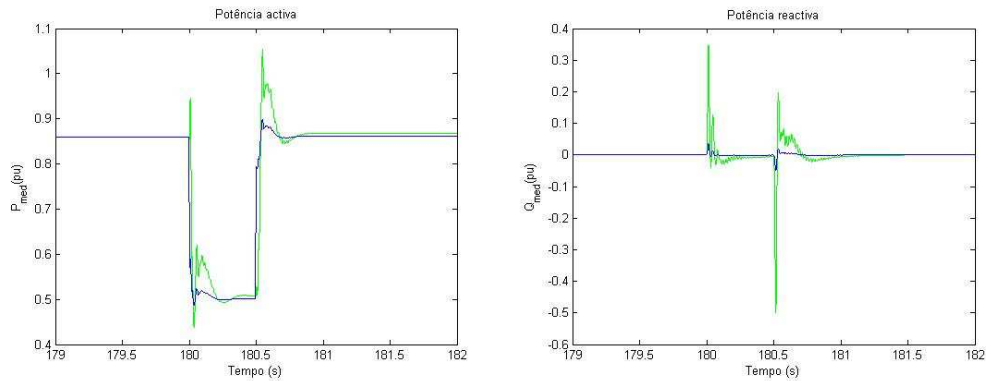


Figura 5.44: Potência Activa e Potência Reactiva na rede.

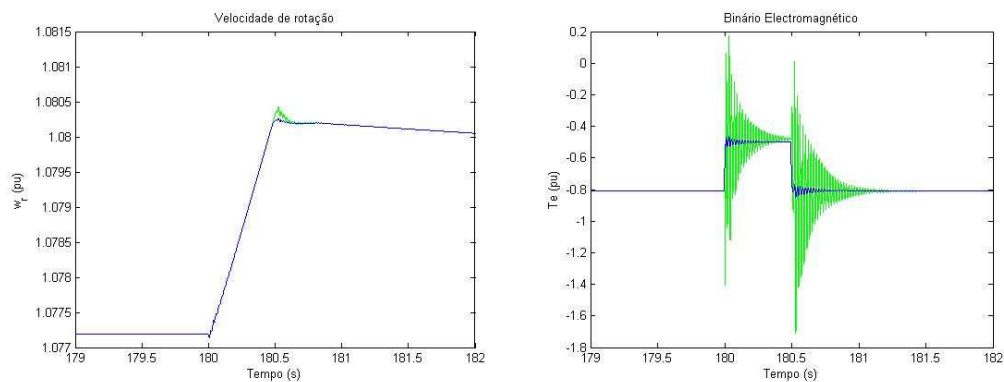


Figura 5.45: Velocidade de rotação e Binário Electromagnético.

No entanto, e apesar das RNAs apresentarem melhor resposta nas transições uma vez que os picos de tensão entre transições de níveis são bastante inferiores e em alguns casos inexistentes, estas respostas não são suficientes para diferenciar os valores trifásicos das tensões e correntes nos barramentos estudados, como é ilustrado nas Figuras 5.46 e 5.47.

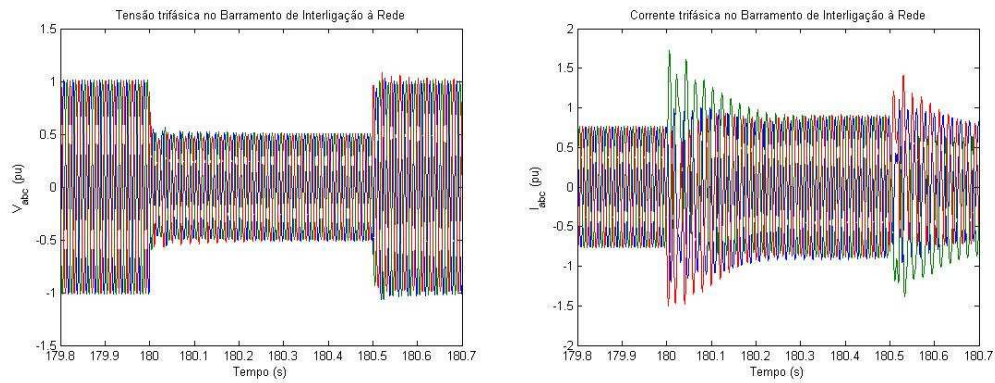


Figura 5.46: Tensões e Correntes trifásicas no barramento de interligação à rede eléctrica.

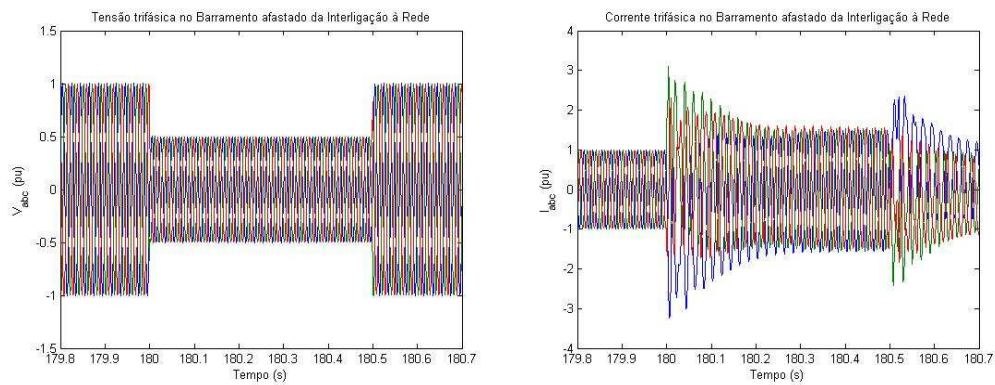


Figura 5.47: Tensões e Correntes trifásicas no barramento afastado do ponto de interligação à rede.

5.5. Controlo do Parque Eólico

A “qualidade da potência” produzida refere-se essencialmente à estabilidade dos valores da tensão e da frequência, e nos harmónicos injectados como já foi amplamente referido no ponto 2.4 desta Tese. Assim, se o parque eólico está ligado a uma rede eléctrica, pode através da variação das potências activa e reactiva, provocar problemas na estabilidade da frequência e tensão, o que é tanto mais preocupante quanto mais fraca for a rede eléctrica no ponto de interligação.

O controlo da potência, ou seja, o controlo efectivo do trânsito desacoplado das potências activa e reactiva, assume neste contexto um aspecto importante a ter em consideração na gestão do parque eólico. Qualquer sistema que possua esta capacidade de actuar nas duas potências de modo independente

passa a ter um papel activo no sistema eléctrico, e de acordo com as potências em jogo, na qualidade da energia da rede eléctrica.

Num sistema com uma ou várias máquinas de indução duplamente alimentadas com o estator ligado directamente à rede, qualquer variação na tensão e frequência da rede vai afectar directamente o trânsito das potências activa e reactiva dos circuitos do estator e do rotor. No entanto, uma vez que existe um desacoplamento na frequência e na tensão devido à existência do barramento contínuo intermédio no circuito do rotor, apenas se torna necessário analisar os efeitos dessas variações no circuito do estator.

A Figura 5.48 mostra que durante um curto-circuito assimétrico no barramento de interligação à rede, as potências mantêm-se dentro de certos limites, durante e após o termo da perturbação introduzida, quer com os controladores PIs (a verde), quer com as RNAs (a azul).

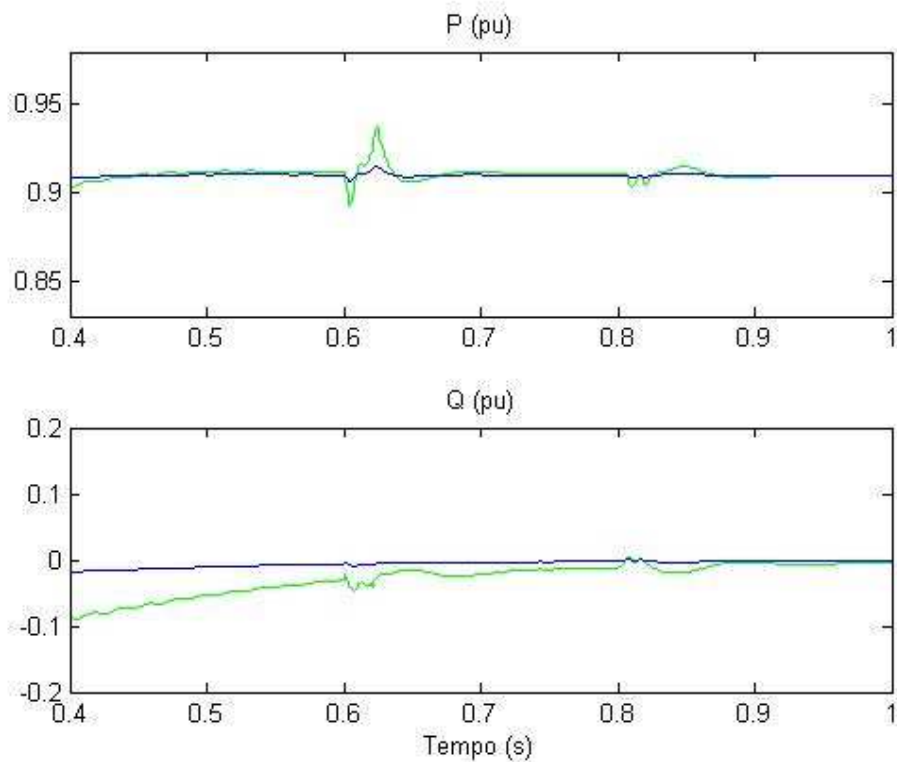


Figura 5.48: Potências Activa e Reactiva durante uma perturbação da tensão na rede.

Sendo os parques eólicos sistemas constituídos por diversos aerogeradores

autónomos e controláveis, torna-se necessário estabelecer uma metodologia de controlo global para o controlador do parque, como foi referido anteriormente no Ponto 4.1, que coordene todas as unidades, procurando desta forma, ultrapassar as especificidades de cada uma delas e ter em conta a uniformidade global do desempenho, a minimização da flutuação de potência e consequentemente a melhoria da qualidade da produção total.

O controlador do parque deve determinar as referências a impor a cada um dos aerogeradores para as potências activa e reactiva. Estas referências são definidas tendo como objectivo a maximização da energia extraída, a qualidade e os requisitos impostos pelo ponto de ligação à rede eléctrica, tendo sempre presente as estratégias referidas no Ponto 4.2. O controlo de todo o grupo irá reflectir-se numa optimização de funcionamento e da produção total do parque.

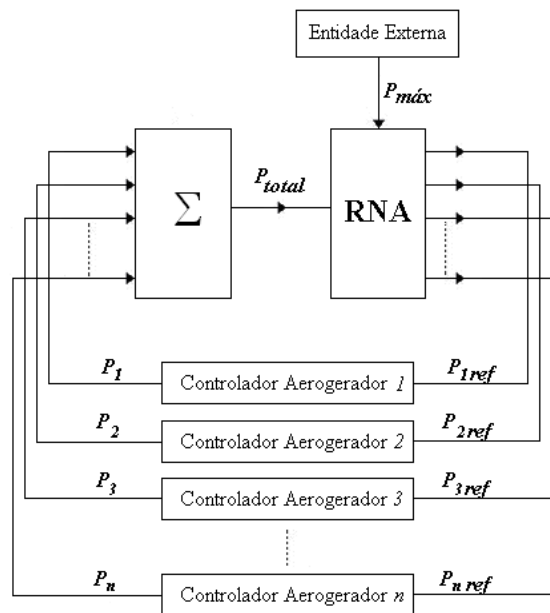


Figura 5.49: Estrutura simplificada do sistema de controlo do parque eólico.

Neste contexto, o controlo do parque eólico utilizando as RNAs com a arquitectura *feedforward backpropagation* tem vantagens uma vez que consegue ultrapassar, de uma forma simples, a forte complexidade e não-linearidade destes sistemas e a resposta a diversas situações imprevisíveis e de falhas a que podem

estar sujeitos, pela capacidade de aprendizagem e adaptação que possuem.

O processo de controlo do parque consiste na optimização da globalidade das produções das potências activas de todos os aerogeradores que constituem o parque eólico e no controlo do factor de potência do parque. A diferença entre a potência produzida e a potência de referência imposta pela rede eléctrica onde está interligado o parque são as variáveis de entrada do controlador.

A saída do controlador do parque é utilizada para determinar as referências para cada aerogerador do parque. O controlador individual de cada unidade determinará as condições de funcionamento adequado de acordo com as potências de referência fornecidas pelo controlador do parque, cujos critérios são o despacho de potência e as características do local, tal como a rede eléctrica interna do parque e a disponibilidade de vento, ou mesmo de acordos com planos de operação/exploração e manutenção do parque.

A metodologia de controlo do parque assenta no princípio que deverá existir um controlador de alto nível que procure permanentemente o melhor ponto de funcionamento de cada um dos aerogeradores. Isto é conseguido mediante as condições de operação de cada unidade, não sendo necessário desligar obrigatoriamente alguma máquina para que o limite de potência não seja ultrapassado, mas sim, deslocar o ponto de funcionamento individual de cada unidade, o que permite armazenar mais energia sob a forma de movimento rotacional.

5.6. Conclusões

Neste capítulo mostrou-se a principal contribuição desta tese com a apresentação de um modelo de Rede Neuronal Artificial do tipo *feedforward backpropagation* usando a ferramenta *Matlab* com implementação em *Simulink*. Esta rede foi usada para substituir algumas partes do sistema de controlo, nomeadamente, os blocos com controladores PI, evitando-se assim a necessidade de sintonia destes e possibilitar uma melhor adaptação às situações.

As estruturas das redes neuronais propostas foram treinadas como parte

integrante de todo o sistema de controlo para estimar as correntes (tensões) de referência do estator e do rotor no sistema de controlo vectorial. Também foram apresentadas comparações entre os sistemas tradicionais com controladores PI e os sistemas com uso de redes neuronais.

O modelo do sistema de controlo com RNAs apresentado para estimar os parâmetros de controlo do gerador apresentou características satisfatórias, como se verificou nos resultados apresentados. No entanto, pode-se notar algumas diferenças nas respostas das tensões dos controladores nos sistemas com redes neuronais, e que se vieram a reflectir nas restantes grandezas eléctricas e mecânicas, nomeadamente três aspectos positivos e vantajosos: os regimes transitórios apresentam picos pequenos, ou mesmo ausência deles, durante as transições, o que corresponde a transições menos severas; uma maior rapidez na resposta do sistema, ou seja, o sistema retoma o regime permanente em menor tempo, especialmente na situação de uma perturbação devido a falhas na rede; e durante uma perturbação as grandezas apresentam uma distorção mais suave, ou seja, com um *ripple* menor.

Assim, foi demonstrado que as tensões e correntes de controlo dos conversores do lado da rede e do rotor do gerador de indução duplamente alimentado podem ser obtidas usando controladores baseados em RNAs tipo *feedforward backpropagation*, sem incluir controladores PI, mostrando que as RNAs podem substituir a maior parte dos blocos do sistema de controlo e com as vantagens assinaladas.

No entanto, é de salientar que para o bom desempenho da RNA é necessário dispor de pares de dados padrão entrada-saída adequados para realizar o processo de treino da rede. Verificou-se que o treino e subsequente desempenho da rede é fortemente dependente dos padrões utilizados no treino, que deverão contemplar tantas condições de funcionamento quanto possível.

Capítulo 6

Conclusões Gerais

6.1. Conclusões

Numa primeira parte, esta tese descreve e caracteriza os modelos que representam um sistema de conversão de energia eólica, nomeadamente os modelos da turbina, das engrenagens, do gerador de indução duplamente alimentado, dos conversores e dos controladores, com especial atenção para os últimos de modo a ser analisada a estabilidade do aerogerador na ligação à rede e com o objectivo de controlar o fluxo de potências com o menor impacto possível no nível de tensão e frequência da rede, quer durante o funcionamento normal, quer quando sujeito a perturbações.

Este estudo foi suportado na ferramenta de simulação *Matlab/Simulink*. Esta ferramenta é bastante eficiente no desenvolvimento dos modelos e dos algoritmos de controlo.

Como o sistema do aerogerador contém sub-sistemas com diferentes constantes de tempo: turbina, engrenagens, gerador, conversores e controladores, são os dois últimos que necessitam de tempos de simulação mais curtos, e sendo assim, são estes blocos que controlam os tempos de simulação.

A adopção de um conversor de potência apresenta algumas características interessantes em sistemas de produção de energia, sendo que a primeira é a de permitir a produção de energia eléctrica com o factor de potência desejado, dentro de determinados limites, e inclusive capacitivo. Esta característica torna o conversor, visto pelo sistema eléctrico, como um gerador síncrono podendo

fornecer potência activa e reactiva (indutiva ou capacitiva) de acordo com a necessidade momentânea do sistema eléctrico ao qual ele está acoplado.

Além disso, trabalhando com rotação variável, é possível obter:

- Um óptimo aproveitamento energético na faixa de potência em que esta é proporcional ao cubo da velocidade do vento, procurando assim trabalhar sempre com um valor de λ que permita que o parâmetro C_p ser o maior possível para cada velocidade do vento;
- O aproveitamento das rajadas de vento, através do aumento da rotação do eixo da turbina que, ou produz mais potência na faixa de potência proporcional ao cubo da velocidade do vento, ou proporciona mais energia cinética rotacional que pode ser transformada em energia eléctrica, na faixa de potência nominal do sistema, mantendo o sistema à potência nominal por um tempo extra, mesmo que a velocidade do vento desça abaixo da nominal;
- O aumento da vida útil das partes mecânicas da turbina como sendo o eixo, as engrenagens, as pás e a torre, uma vez que as constantes variações de binário (ou variações da velocidade do vento) são canalizadas para acelerações e desacelerações do eixo, sem causar esforços mecânicos.

O gerador de indução é controlado num referencial dq , com o eixo-d alinhado com a posição do vector do fluxo do estator. Assim, é possível desacoplar o controlo entre o binário electromagnético e a corrente de excitação do rotor. Este controlo é realizado pelo conversor do lado do rotor (entre o barramento DC e o rotor do gerador), através da medição das correntes e tensões do estator, da tensão e da posição do rotor.

Assim, foi utilizado um conversor PWM *back-to-back* com controlo vectorial, conectado entre o rotor do gerador e a rede que permite:

- funcionamento abaixo, acima ou à velocidade de sincronismo;
- funcionamento à velocidade síncrona, com correntes DC injectadas no rotor e o inversor a funcionar como *chopper*;
- baixa distorção das correntes do estator, rotor e da rede;

- controlo independente do binário do gerador e da excitação do rotor;
- controlo do desfasamento entre a tensão e a corrente do conversor ligado á rede, permitindo o controlo do factor de potência;
- desacoplamento e controlo das energias activa e reactiva;
- maximizar a potência extraída do vento e otimizar a potência entregue à rede.

Para avaliar o comportamento dinâmico do sistema em situações de falhas na rede, optou-se por analisar a sua resposta face a um curto-circuito assimétrico e a uma variação da tensão (cava de tensão).

A realização destes testes revelou-se importante porque permitiu avaliar se o parque mantém a ligação à rede mesmo no caso de desvios consideráveis da tensão, ou seja:

- O parque não se desligou imediatamente da rede no caso de curto-circuito suportando a tensão da rede através da alimentação de uma corrente de curto-circuito regulável, sem que isso provocasse a instabilidade ou isolamento da rede.
- No caso de cavas de tensão causados por falhas na rede, o parque permaneceu ligado à rede durante o período de tempo definido. O gerador teve a capacidade (*Ride Through Default Capability*) de resistir à perturbação na sequência do abaixamento de tensão na rede e continuar ligado a essa mesma rede.

Após a reparação da falha, o parque eólico retomou a alimentação de potência tão rapidamente quanto possível e dentro dos períodos de tempo máximos estabelecidos, contribuindo para a estabilidade da tensão através do débito ou consumo da potência reactiva. Depois de reparada a falha e restabelecida a tensão de rede, deu imediatamente continuidade ao trânsito de potência.

Na segunda parte desta tese abordou-se as RNAs e a sua aplicação nos sistemas de controlo vectorial para um gerador de indução duplamente alimentado em sistemas de produção de energia eólica. Estas, entre outras tecnologias

emergentes de inteligência artificial e as suas aplicações, têm vindo a receber muita atenção na literatura.

No projecto da RNA é fundamental a escolha das funções de transferência entre camadas. As funções de transferência utilizadas foram a sigmoideal e a linear, por serem as mais apropriadas a otimizar a RNA.

A rede neuronal multi-camada do tipo *feedforward* utilizada consiste numa camada de entrada, numa camada de saída e uma ou mais camadas ocultas. A rede tem memória associativa e é treinada para gerar múltiplos pares padrão de entrada-saída, isto é, quando um sinal padrão é colocado na entrada é devolvido na saída o sinal padrão correspondente, sendo adoptado o método de aprendizagem *backpropagation*, mais apropriado no treino deste tipo de redes neuronais.

Assim, nesta tese as RNAs utilizadas foram do tipo *feedforward backpropagation* para estimar as correntes e tensões de controlo dos conversores do lado da rede e do rotor do gerador de indução duplamente alimentado. Mostrou-se, assim, que as redes neuronais podem substituir algumas partes do sistema de controlo vectorial com controladores PI tradicionais, devendo no estado da arte actual ser efectuada investigação sobre o desempenho comparado dos dois métodos de controlo.

As redes neuronais utilizadas foram treinadas, em ambiente *Matlab*, utilizando pares de dados entrada-saída obtidos por técnicas lineares de controlo vectorial implementadas. A partir desses resultados foram obtidos padrões de aprendizagem e prova para as redes neuronais. Uma vez treinadas as redes, estas foram integradas como parte do conjunto do sistema de controlo, utilizando, para isso, a ferramenta *Simulink*, permitindo comparar as respostas de ambos os sistemas e verificar se os modelos e estruturas das redes neuronais eram apropriados.

Assim, foi apresentado um sistema de controlo alternativo ao sistema de controlo baseado em controladores PI convencionais baseado em redes neuronais. Com um sistema baseado em redes neuronais, verifica-se que se pode extrair eficientemente a energia do vento, ou seja, pode ser extraída a potência máxima

da turbina durante as várias situações de funcionamento.

O modelo do sistema de controlo apresentado para estimar os parâmetros de controlo do gerador apresentou boas características, como se verificou nos resultados apresentados.

Foi demonstrado que as tensões e correntes de controlo dos conversores do lado da rede e do rotor do gerador de indução duplamente alimentado podem ser estimadas usando controladores baseados em redes neuronais artificiais tipo *feedforward backpropagation*. No entanto, é necessário dispor de padrões de pares entrada-saída para realizar o processo de treino da rede. Verificou-se que o treino e subsequente desempenho da rede são fortemente dependentes dos padrões utilizados no treino. Com as alterações necessárias, a aproximação pode ser aplicada nos mais diversos cenários.

As simulações realizadas permitiram verificar que a implementação deste tipo de arquitectura é capaz de controlar eficazmente um aerogerador com um gerador de indução duplamente alimentado em diferentes zonas de funcionamento.

A aplicação do gerador assíncrono duplamente alimentado, conectado a um conversor estático duplo em ligação *back-to-back* com circuito DC intermédio, utilizando a técnica de modulação em largura de pulsos, PWM, e controlo vectorial permite um sistema de produção de energia eólica com boas características de desempenho. Os requisitos de controlo para além do que é interno ao sistema implicam conseguir bom comportamento do controlador em condições em que o sistema de produção está dependente de alterações das condições da rede eléctrica.

Da análise comparativa entre controladores convencionais do tipo PI e controladores baseados em RNAs conclui-se que redes neuronais artificiais para o controlo do sistema são uma solução alternativa eficiente.

6.2. Desenvolvimentos Futuros

Na linha deste trabalho e no sentido de otimizar não só a produção em potência eléctrica, mas também a energia produzida, a tecnologia das RNAs pode ser estendida, pela adopção de novas redes para todo o sistema eólico e para o parque eólico, de modo a estimar-se os pontos de funcionamento óptimo, incluindo funções não analisadas neste trabalho, como de previsão de muito curto prazo para o regime de vento, o que permitiria incluir no comportamento da rede neuronal de controlo comportamento diferencial, característica que melhoraria o seu desempenho. Numa análise comparativa entre os dois métodos, as RNAs ganhavam vantagem competitiva.

Referências

- [1] P. Dunn, “Renewable Energies”, London, Peter Peregrinus Ltd., 1986, ISBN: 0863410391 9780863410390
- [2] “Energia Eólica Princípios e Aplicações” – Tutorial CRESESB http://www.cresesb.cepel.br/tutorial/tutorial_eolica.pdf (11/10/02)
- [3] J. C. Cádiz, “La Energía eólica. Tecnología e historia”, ed. Hermann Blume, Madrid, 1984
- [4] A. P. Hernandez, F. O. Oviedo, “Energias renovables, aproximación a su estudio”, 2ª Edición, Salamanca : Ediciones Amarú, Espanha, 2005, ISBN: 84-86368-72-3
- [5] L. B. Reis, S. Silveira, “Energia Elétrica para o Desenvolvimento Sustentável”, 2ª Edição, São Paulo, 2001, ISBN: 8531405440
- [6] R. Knox, “New Renewable Energy Sources – Technical Realities and Commercial Opportunities”, Chichester, West Sussex: MDIS House, 1993
- [7] <http://www.wind-energie.de/englischer-teil/english.htm> (11/10/02)
- [8] J. L. Rogríquez-Amenedo, “Automatic Generation Control of a Wind Farm UIT Variable Speed Wind Turbines”, IEEE Transactions on Energy Conversion, vol. 17, No. 2, June 2002, pp. 279-284
- [9] F. Ríncos, “Gerador Eólico. Santa Catarina”, UFSC, 2000. Disponível em: <http://www.ufsc.br/WMADMNI/DAT/DEPTO\FREDEMAR\MATDA\Texto\Trgere1.doc> (11/10/02)
- [10] P. Christiansen, K. K. Jorgensen, A. G. Sorensen, “Grid connection and remote control for the Horns Rev 150 MW offshore wind farm in Denmark”, Aalborg University, 7th.December 2000
- [11] <http://www-tec.open.ac.uk/eeu/natta/renewonline/rol36/11.html> (11/10/02)
- [12] “Renováveis – Estatísticas Rápidas”, Direção Geral de Geologia e Energia, Junho 2005
- [13] J. G. Sloomeng, H. Polinder, W. L. Kling, "Initialization of Wind Turbine Models in Power System Dynamics Simulations", 2001 IEEE Porto Power Tech Conference, 2001

- [14] J. Usaola, P. Ledesma, "Dynamic Incidence of Wind Turbines in Networks with High Wind Penetration", IEEE Power Engineering Society Summer Meeting 2001, vol. 2, pp. 755 - 760, 2001, ISBN: 0-7803-7173-9
- [15] FORUM "Energias Renováveis em Portugal – Relatório Síntese", Edição ADENE/INETI, Lisboa, 2001
- [16] P. S. Dokopoulos, A. X. Patralexis, I. M. Manousaridis, "Improvement of Power Quality Distortion in a Grid Caused by Wind Turbines", IEEE 8th International Conference on Harmonics And Quality of Power Proceedings, vol. 2, pp. 917-92, 1998, ISBN: 0-7803-5105-3
- [17] J. D. Van Vyck, "The Issue of Power Quality", European Conf. Power Electronics and Application, pp. 17-32, 1993
- [18] EN 50160, "Voltage Characteristics of Electricity Supplied by Public Distrib. Systems", European Committee for Electrotechnical Standardization - CENELEC, 1999
- [19] J. O. G. Tande, "Impact of Wind Turbines on Voltage Quality", 8th International Conference on Harmonics and Quality, pp. 1158-1161, 1998
- [20] C. Mirra, "Connection of fluctuating loads", WG Disturbances, UIE, June 1988
- [21] IEC 61000-3-7, "Electromagnetic compatibility (EMC). Part 3. Section 7", IEC 61000-3-7, 1996
- [22] IEC 60868, "Flickermeter - Functional and design specifications", IEC 60868, 1986
- [23] IEC 60868-0, "Evaluation of flicker severity", IEC 60868-0, 1991
- [24] Z. Saad-Saoud, N. Jenkins, "Models for Predicting Flicker Induced by Large Wind Turbines", vol. 14, no 3, pp. 743-748, IEEE Transactions on Energy Conversion, 1999, ISSN: 1558-0059
- [25] P. Rosas, J. O. Tande, "Verification of Procedure for Estimating Flicker From WT During Continuous Operation". Global Wind Energy Conference, Paris, 2002
- [26] M. P. Papadopoulos, S. A. Papathanassiou, S. T. Tentzerakis, N. G. Boulax, "Investigation of the Flicker Emission by Grid Connected Turbines", Proceedings of the 8th International Conference on Harmonics and Quality of Power, Atenas, Grécia, pp. 1152-1157, vol. 2, 1998, ISBN: 1152-1157
- [27] H. Camblong, J. Arana, M. Rodriguez, J.R. Puiggali, O. Patrouix, "Wind Variation Effects of on the Power Quality for Different Controls of a Variable-speed WindTurbine", 2002 Global Windpower, 2-5 April, Paris, França, 2002
- [28] P. Sorensen, "Methods for calculations of the flicker contribution from wind turbines", RISO-I-939 (EN), 1995

- [29] C. S. Demoulias, P. Dokopoulos, "Electrical Transients of Wind Turbines in a Small Power Grid", vol. 11, no 3, pp. 636-642 , IEEE Transactions on Energy Conversion, 1996, ISSN: 1558-0059
- [30] P. Sorensen, A. D. Hansen, H. Bindner, P. Christensen, M. Mieritz, J. Bech, "Models for Simulation of Transient Events in a Wind Farm", Proceedings of Global Windpower Conference and Exhibition, Paris, 2-5 April, 2002
- [31] A. Larsson e T. Thiringer, "Measurements on and Modelling of Capacitor-Connecting Transients on Low-Voltage Grid Equipped with Two Wind Turbines", Proceedings of the International Conference on Power Systems Transients - IPST' 95, pp. 184-188, 1995
- [32] A. Larson, "The Power Quality of Wind Turbines", 2000 (não publicado)
- [33] IEC 61800-3, "Adjustable Speed Electrical Drive Systems. Part. 3.", IEC 61800-3, 1996
- [34] A. Tapia, G. Tapia, X. Ostolaza , E. Fernández, J. R. Saenz, "Modeling and Dynamic Regulation of a Wind Farm", VII IEEE International Power Electronics Congress CIEP 2000, pp. 293-297, Acapulco, Mexico, 2000, ISBN: 0-7803-6489-9
- [35] A. Tapia, G. Tapia, J. X. Ostolaza, J. R. Saenz, R. Criado, J. L. Berasategui, "Reactive Power Control of a Wind Farm made up with Doubly Fed Induction Generators (I)", 2001 IEEE Porto Power Tech Conference, 2001
- [36] A. Tapia, G. Tapia, J. X. Ostolaza, J. R. Saenz, R. Criado, J. L. Berasategui, "Reactive Power Control of a Wind Farm made up with Doubly Fed Induction Generators (II)", 2001 IEEE Porto Power Tech Conference, 2001
- [37] J. Wiik, J. O. Gjerde, T. Gjengedal, M. Gustafsson, "Steady state power system issues when planning large wind farms", IEEE Power Engineering Society Winter Meeting 2002, pp. 199 – 204, vol. 1, 2002
- [38] R. Jones, G. A. Smith, "High Quality mains Power from Variable-speed Wind Turbines", Renewable Energy IEE Conference, pp. 202-206, 1993
- [39] H. Sharma, T. Pryor, S. Islam, "Effect of Pitch Control and Power Conditioning on Power Quality of Variable Speed Wind Turbine Generators", Australasian Universities Power Engineering Conference 2001, 23-26 September, pp. 95-100, Perth, Australia, 2001
- [40] H. de Battista, R. J. Mantz, C. F. Christiansen, "Dynamical Sliding Mode Power Control of Wind Driven Induction Generators", IEEE Transaction on Energy Conversion, vol. 15, no 4, pp. 451 – 457, 2000
- [41] L. Zhang, C. Watthanasarn, W. Shepherd, "Application of a Matrix Converter for the Power Control of a Variable-Speed Wind", vol. 2, pp. 906-911, 23rd International Conference on Industrial Electronics, Control and Instrumentation - IECON 97, 1997, 0-7803-3932-0

- [42] A. Mullane, G. Lighthbody, R. Yacamini, S. Grimes, "Adaptive Control of Variable Speed Wind Turbines", Proceedings of the 36th Universities Power Engineering Conference, 12-14 September, Swansea, UK, 2001
- [43] R. Chedid, F. Mrad, M. Basma, "Intelligent Control of a Class of Wind Turbine Conversion Systems", IEEE Transaction on Energy Conversion, pp. 1597-1604, vol. 4, 1999
- [44] J. L. Rodríguez-Amenedo, S. Arnalte, J. C. Burgos, " Automatic generation control of a wind farm with variable speedwind turbines", IEEE Transactions on Energy Conversion, vol. 17, no 2, pp. 279-284, 2002, ISSN: 1558-0059
- [45] O. Carlson, J. Hylander, K. Thorborg, "Servey of Variable Speed Operation of Wind Turbines", Proc. 1996 European Union Wind Energy Conference, pp. 406-409, 1996
- [46] M. Idan, D. Lior, G. Shaviv, "A Robust Controller for a Novel Variable Speed Wind Turbine Transmission", Journal of Solar Energy Engineering, vol. 120, no 4, pp. 247-252, American Society of Mechanical Engineers, New York , 1998, ISSN 0199-6231
- [47] D. S. Zinger, E. Muljadi, "Annualized Wind Energy Improvement Using Variable Speeds", IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 33, no 6, pp. 1444-1447, 1997
- [48] R. Hoffmann, P. Mutschler, "The Influence of Control Strategies on the Energy Capture of Wind Turbines", IEEE Conference Record of the Industry Applications Conference 2000, pp. 886-893, vol. 2, 2000
- [49] Institute of Energy and Sustainable Development, De Montfort University, <http://www.iesd.dmu.ac.uk/> (04/02/03)
- [50] Ana I.L. Estanqueiro, "Modelação Dinâmica de Parques Eólicos", Tese de Doutoramento, IST, Lisboa, Abril 1997 (não publicado)
- [51] ILSE – The Interactive Learning System for Renewable Energy, Institute of Electrical Power engineering, Renewable Energy Section, Technical University of Berlin (TU-Berlin), <http://emsolar.ee.tu-berlin.de/~ilse/> (04/02/03)
- [52] S. Heier, "Grid Integration of Wind Energy Conversion System", John Wiley & Sons, Ltd, 1998, ISBN: 0 471 97143
- [53] J. F. Walker, N. Jenkins, "Wind Energy Technology", John Wiley & Sons, Ltd, 1997
- [54] J. G. Slootweg, H. Polinder, W.L. Kling, "Dynamic Modeling of a Wind Turbine with Direct Drive Synchronous Generator and Back to Back Voltage Source Converter and its Controls", 2001 European Wind Energy Conference and Exhibition, Copenhagen, Denmark, July , 2001.

- [55] J. G. Slootweg, H. Polinder, W. L. Kling, "Dynamic Modeling of a Wind Turbine with Doubly Fed Induction Generator", IEEE Power Engineering Society Summer Meeting 2001, vol. 1, pp. 644 – 649, 2001.
- [56] J. G. Slootweg, H. Polinder, W. L. Kling, "Representing wind turbine electrical generating systems in fundamental frequency simulations", IEEE Transactions on Energy Conversion, vol.18, no 4, December 2003.
- [57] P. Sørensen, A. Hansen, L. Janosi, J. Bech, B. Bak-Jensen, "Simulation of Interaction between Wind Farm and Power Systems", Risø National Laboratory, Roskilde, Risø-R-1281, 2001
- [58] R. Q. Machado, E. G. Marra, J. A. Pomilio, "Electronic Controlled Bi-Directional Controller of Induction Generator Connected to a Single-Phase Grid", Congresso Brasileiro de Eletrônica de Potência, COPEP 2001, 2001. V. 2, pp.717-722, 2001
- [59] R. S. Pena, R. Cárdenas, R. Blasco, G. M. Asher, J. C. Clare, "A cage induction generator using back-to-back PWM converters for variable speed grid connected wind energy system", IECON'01: The 27th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, pp. 1376-1381, 2001
- [60] F. Runcos, "Gerador Eólico. Santa Catarina", UFSC, 2000. Disponível em: <http://www.ufsc.br/WMADMNI/DAT/DEPTO\FREDEMARMATDA\Texto\Trgere1.doc> (11/10/02)
- [61] A. E. Fitzgerald, JR. C. Kingsley, "Electric Machinery", McGraw-Hill Book Company Inc, 2nd Edition, 1961
- [62] C. Ong, "Dynamic Simulation of Electrical Machinery", Prentice Hall, 1998, ISBN: 0-13-723-785-5
- [63] S. R. Chellapilla, B. H. Chowdhury, "A Dynamic model of Induction Generators for Wind Power Studies", IEEE Power Engineering Society General Meeting 2003, vol. 4, pp. – 2344, 2003, ISBN: 0-7803-7989-6
- [64] T. Senjyu, N. Sueyoshi, K. Uezato, "Stability Analysis of Wind Power Generating System", IEEE Proceedings of the Power Conversion Conference - PCC Osaka 2002, vol. 3, pp. 1441 – 1446, 2002, ISBN: 0-7803-7156-9
- [65] P. T. Krein, J. Bentsman, R. M. Bass, B. L. Lesieutre, "On the use of averaging for the analysis of power electronic systems." IEEE Transactions on Power Electronics, 5(2), pp. 182-190, 1990
- [66] C.-T. Pan, T.-C. Chen, "Modelling and analysis of a three phase PWM AC-DC convertor without current sensor." IEE Proceedings B - Electric Power Applications, 140(3), pp. 201-208, 1993
- [67] Z. Ye, D. Boroyevich, J.-Y. Choi, F. C. Lee, "Control of circulating current in two parallel three-phase boost rectifiers." IEEE Transactions on Power Electronics, 17(5), pp. 609-615, 2002

- [68] R. Pena, J. C. Clare, G. M. Asher, "Doubly fed induction generator using back-to-back PWM converters and its application to variable-speed wind-energy generation", IEE Proc.-Elect. Power Appl., vol. 143, No 3, May 1996
- [69] W. Leonhard, "Control of electrical drives", Springer Verlag, 2nd Edition, 1996
- [70] J. A. K. Suykens, J. P. L. Joos, B. L. R. de Moor, "Artificial neuronal networks modeling and control of non-linear systems", Kluwer Academic Publishers, 1996
- [71] Intel Corporation: 80170NX Electronically Trainable Analog Neural Network, 1991
- [72] Intel Corporation: Neural Networks Solutions, 1991
- [73] M. G. Simões, B. K. Bose, "Neural Network Based Estimation of Feedback Signals for Vector Controlled Induction Motor Drives", IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 31, no 3, pp. 620-629, May-June 1995
- [74] Forschungszentrum Karlsruhe, FZK, "SAND Powerful Neuroprocessor for Intelligent System", Institut für Mikroelektronik Stuttgart IMS, Notes 8/1997
- [75] Forschungszentrum Karlsruhe, FZK, "SIOP High Performance Digital Neurochip for Signal Processing", Institut für Mikroelektronik Stuttgart IMS, Notes 9/1997
- [76] Headquarters sSPACE GmbH, EUA e Canadá, dSPACE Inc., "sSPACE Solutions for Control DS1103 PPC Controller Board New Product", 1998
- [77] L. Fausett, "Fundamentals of Neural Networks", Prentice-Hall, 1994. ISBN 0 13 042250 9
- [78] K. Gurney, "An Introduction to Neural Networks", UCL Press, 1997, ISBN 1 85728 503 4
- [79] S. Haykin, "Neural Networks", 2nd Edition, Prentice Hall, 1999, ISBN 0 13 273350
- [80] M. T. Hagan, H. B. Demuth, M. Beale, "Neural network design", PWS Publishing Company, 1996
- [81] S. Haykin, "Neural Networks. A comprehensive Foundation", Macmillan College Publishing Company Inc., 1994
- [82] S. Grossberg, "Studies of the Mind and Brain", Dordrecht, Holland: Reidel Press, 1982
- [83] R. Hecht-Nielsen, "Neurocomputing", Addison-Wesley Publishing Company Inc., 1991
- [84] W. W. McCulloch, W. Pitts, "A logical calculus of the ideas imminent in nervous activity", Bull. Math. Biophys., no 5, pp. 115-133, 1943

- [85] J. L. Elman, "Finding structure in time", *Cognitive Science*, vol. 12, pp. 179-211, 1990
- [86] J. Li, A. N. Michel, W. Porod, "Analysis and synthesis of a class of neural networks: linear systems operating in a closed hypercube", *IEEE Transactions on Circuits and Systems*, vol. 36, no 11, pp. 1405-1422, 1989
- [87] F. Rosenblatt, "Principles of Neurodynamics", Washington D. C.: Spartan Press, 1961
- [88] J. S. Denker, D. Schwartz, B. Wittner, S. Solla, R. Howard, L. Jackel, J. Hopfield, "Complex Systems 1", 1987
- [89] A. S. Lapedes, R. M. Farber, "Nonlinear Signal Processing using Neural Networks: Prediction and System Modelling", Los Alamos technical report LA-UR-87-2662, 1987
- [90] A. S. Lapedes, R. M. Farber, "How Neural Networks Work: Evolution, Learning and Cognition", World Scientific, Singapore, 1988
- [91] G. Cybenko, "Approximation by superpositions of sigmoidal functions", *Math. of Control, Signals, and Systems*, vol. 2, no 4 / December, Springer London, 1989, ISSN 0932-4194
- [92] K. Hornik, M. Stinchcomb, H. White, "Multilayer FeedForward Networks are Universal Approximators", *Neural Networks* 2, 1989
- [93] S. Chen, C. F. N. Cowan, P. M. Grant, "Orthogonal Least Squares Learning Algorithm for Radial Basis Function Networks", *IEEE Transactions on Neural Networks*, vol. 2, no 2, pp. 302-309, March, 1991
- [94] B. Widrow, S. D. Sterns, "Adaptive Signal Processing", New York: Prentice-Hall, 1985
- [95] M. A. Tafner, "Redes Neurais Artificiais, aprendizado e plasticidade", *Revista Cérebro e Mente*, Março, 1998 (não publicado)
- [96] D. Hebb, "The Organization of Behaviour", New York: John Wiley, 1949
- [97] T. Kohonen, "Self-Organization and Associative Memory", 2nd Edition, Springer, 1987
- [98] F. M. de Azevedo, L. M. Brasil, R. C. L. de Oliveira, "Redes Neurais, com Aplicações em Controle e em Sistemas Especialistas", Florianópolis: Bookstore, ISBN 85-7502-005-6, 2000
- [99] <http://www.dca.fee.unicamp.br/~vonzuben/courses/ia353.html> (23/06/05)
- [100] M. L. Minsky, S. A. Papert, "Perceptrons, na introduction to computational geometry", 3rd Edition, The MIT Press, Massachusetts, 1988
- [101] S. Haykin, B. Widrow, "Least-Mean-Square Adaptive Filters (Adaptive and Learning Systems for Signal Processing, Communications and Control Series)", Wiley-Interscience, 2003, ISBN-10: 0471215708

- [102] P. J. Werbos, “Beyond Regression: New Tools for Prediction and Analysis in Behavioural Sciences”, PhD Thesis, Harvard University, 1974
- [103] D. E. Rumelhart, G. E. Hinton, R. J. Williams, “Learning internal representations by error propagation”, *Parallel Distributed Processing: Explorations in the Microstructure of Cognition*, vol. 1, MIT Press, Cambridge, 1986
- [104] L. C. Jain, V. R. Vemuri, “Industrial Applications of Neural Networks”, 1st Edition, CRC Press, Inc., 1998, ISBN: 0849398029
- [105] H. Demuth, M. Beale, “Neural Network toolbox for use with MATLAB”, User’s Guide, MathWorks, Inc., 1992
- [106] A. Waibel, T. Hanazawa, G. Hinton, K. Shikano e K. Lang,, “Phonemic recognition using time delay neural networks”, *IEEE Transactions on Acoustics, Speech and Signal Processing*, vol. 37, no 3, pp. 328–339, 1989, ISSN: 0096-3518

Anexo A

Lista de Acrónimos e Símbolos

Acrónimos

DFIG	<i>Double Fed Induction Generator</i>
EMTP	<i>Electro Magnetic Transient Program</i>
PWM	<i>Pulse Width Modulation</i>
RNA	Rede Neuronal Artificial
SCADA	<i>Supervisory Control And Data Acquisition</i>
THD	<i>Total Harmonic Distortion</i>
TLU	<i>Threshold Logic Unit</i>
TSR	<i>Tip Speed Ratio</i>
WASP	<i>Wind Atlas Analysis and Application Programme</i>

Simbologia

A	Secção plana transversal do rotor da turbina
b	Desvio (<i>bias</i>) da RNA
c	Parâmetro de escala da função de Weibull
C_D	Coefficiente de arrasto
C_C	Coefficiente de <i>flickers</i>
C_L	Coefficiente de sustentação
C_p	Coefficiente de potência
c_v	Coefficiente de amortecimento do veio
d	Valor desejado da saída (padrão) da RNA
d_x	<i>Duty-cycle</i>
$\vec{D}$	Força de arrasto
E	Erro
F	Coefficiente de atrito do lado da máquina eléctrica
$f(u)$	Densidade de probabilidade de Weibull
f_s	Frequência do estator
H	Constante de inércia do gerador

H_T	Constante de inércia da turbina
i^{dq0}	Componente directa, em quadratura e homopolar da corrente instantânea
$ i_m^s $	Módulo da corrente de magnetização
i_{md}^s	Componente directa da corrente instantânea de magnetização
i_{mq}^s	Componente em quadratura da corrente instantânea de magnetização
i_s	Corrente instantânea do estator
i_r	Corrente instantânea do rotor
i_r'	Corrente do rotor referida ao circuito do estator
i_r^{abc}	Correntes do rotor das fases a, b e c
i_r^{dq0}	Componentes d, q e homopolar das correntes do rotor
$i_r'^{dq0}$	Componente directa, em quadratura e homopolar da corrente do rotor referida ao circuito do estator
i_s^{abc}	Correntes do estator das fases a, b e c
i_s^{dq0}	Componentes d, q e homopolar das correntes do estator
J	Inércia
J_G	Representa as inércias do lado da máquina eléctrica
J_T	Representa as inércias do lado da turbina
k	Parâmetro de forma da função de Weibull
K_C	Parâmetro de controlo
k_V	Coefficiente de rigidez
$\vec{L}$	Força de sustentação
L_m	Indutância de magnetização
L_{rr}	Indutância do rotor
L_{ss}	Indutância do estator
L_r'	Indutância do rotor referida ao circuito do estator
n	Frequência
$\vec{N}$	Força axial
N_r	Número de espiras do enrolamento do rotor
N_s	Número de espiras do enrolamento do estator
P	Potência activa
p	Número de pares de pólos
P_{ae}	Potência aerodinâmica disponível no veio da turbina
P_g	Permeância electromagnética
p_{in}	Potência instantânea de entrada
$P_{m(ec)}$	Potência mecânica
P_r	Potência activa do rotor
P_{ref}	Potência activa de referência
P_s	Potência activa do estator
P_{st}	<i>Short-term Flicker Severity</i>
Q_s	Potência reactiva do estator
Q_{ref}	Potência reactiva de referência
R	Raio da turbina

$\vec{R}$	Força resultante
r_r	Resistência do rotor
r_s	Resistência do estator
r'_r	Resistência do rotor referida ao circuito do estator
s	Deslizamento
S_b	Potência aparente de base
S_n	Potência nominal da turbina
S_{kCC}	Potência aparente de curto-circuito aos terminais da turbina
S_{ref}	Potência aparente de referência da turbina eólica
T	Período
$\vec{T}$	Força tangencial
$T_{e(m)}$	Binário electromagnético produzido pela máquina eléctrica
$T_{m(ec)}$	Binário mecânico no veio de transmissão
T_{ae}	Binário aerodinâmico capturado pela turbina
T_{avv}	Binário aerodinâmico capturado pela turbina referida ao lado de rotação mais elevada
T_{bvv}	Binário aerodinâmico capturado pela turbina referida ao lado de rotação mais baixa
u, v	Velocidade do vento
$\bar{u}$	Velocidade média do vento
v^{dq0}	Componente directa, em quadratura e homopolar da tensão instantânea
V_m	Tensão de magnetização
v_r	Tensão do rotor
v'_r	Tensão do rotor referida ao circuito do estator
v_r^{abc}	Tensões do rotor das fases a, b e c
v_r^{dq0}	Componentes d, q e homopolar das tensões do rotor
$v_r'^{dq0}$	Componente directa, em quadratura e homopolar da tensão do rotor referida ao circuito do estator
v_s^{abc}	Tensões do estator das fases a, b e c
v_s^{dq0}	Componentes d, q e homopolar das tensões do estator
x	Entrada da sinapse de excitação da RNA
x_r	Reactância do rotor
x'_r	Reactância do rotor referida ao circuito do estator
x_s	Reactância do estator
v	Função de entrada do neurónio na RNA
w_{ij}	Pesos das ligações da RNA
y	Entrada da sinapse inibidora da RNA
α	Ângulo de ataque
α	Factor <i>Momentum</i> (RNA)
β	Ângulo de passo (<i>pitch</i>)
δ	Diferença entre a saída desejada e a saída real na RNA
λ	Tip Speed Ratio (TSR)
ρ	Densidade do ar

η	Relação de multiplicação da caixa, factor de aprendizagem da RNA
ϕ	Ângulo de escoamento das pás
$\varphi(x)$	Função de activação da RNA
λ_s	Fluxo do estator
λ_r	Fluxo do rotor
λ'_r	Fluxo do rotor referido ao circuito do estator
λ_r^{abc}	Fluxo do rotor das fases a, b e c
λ_r^{dq0}	Componentes d, q e homopolar do fluxo do rotor
λ_r^{dq0}	Componente directa, em quadratura e homopolar do fluxo do rotor referida ao circuito do estator
λ_s^{abc}	Fluxo do estator das fases a, b e c
λ_s^{dq0}	Componentes d, q e homopolar do fluxo do estator
ω_r	Velocidade angular eléctrica do rotor
ω_b	Velocidade angular de base
ω_n	Velocidade angular eléctrica nominal de rotação da máquina eléctrica
ω_s	Velocidade angular eléctrica de sincronismo
ω_{sl}	Frequência angular eléctrica das correntes do rotor
ω_m	Velocidade angular mecânica
ω_G	Velocidade de rotação da máquina eléctrica
ω_T	Velocidade de rotação da turbina referida ao eixo de menor velocidade
ω_{ae}	Velocidade de rotação da turbina
ϕ_{th}	Ângulo de fase da impedância da rede eléctrica
θ	Posição angular
ξ	Taxa de amortecimento do veio da turbina
ψ_s	Fluxo do estator, por unidade de tempo
ψ_r	Fluxo do rotor, por unidade de tempo
ψ'_r	Fluxo do rotor referido ao circuito do estator, por unidade de tempo
ψ_r^{abc}	Fluxo do rotor das fases a, b e c, por unidade de tempo
ψ_r^{dq0}	Componentes d, q e homopolar do fluxo do rotor, por unidade de tempo
ψ_r^{dq0}	Componente directa, em quadratura e homopolar do fluxo do rotor referido ao circuito do estator, por unidade de tempo
ψ_s^{abc}	Fluxo do estator das fases a, b e c, por unidade de tempo
ψ_s^{dq0}	Componentes d, q e homopolar do fluxo do estator, por unidade de tempo

Anexo B

Características da Turbina Eólica

Características Mecânicas

Rotor:

Diâmetro	80 m
Pás	3 (39 m, 6.5 t)
Regulação	Pitch
Peso	37,2 t
Peso nacelle	61,2 t

Torre:

Altura	60 – 67 – 78 – 100 m
Peso	120 – 135 – 190 – 231 t

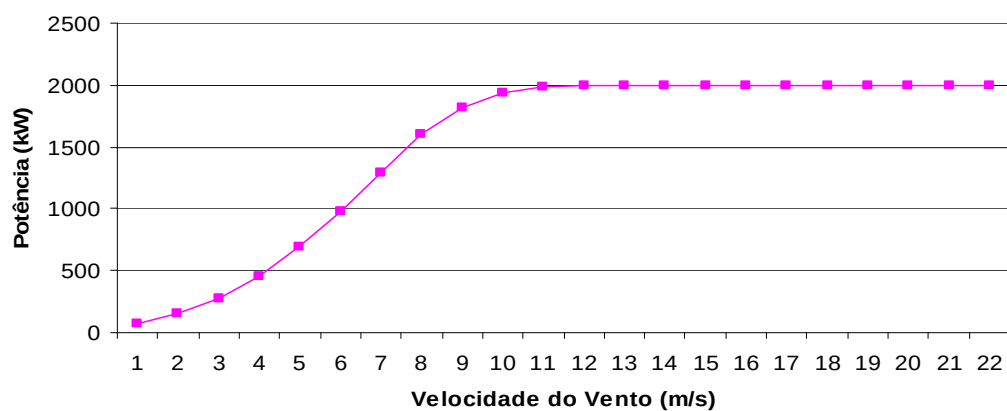
Dados operacionais:

Velocidade de arranque	4 m/s
Velocidade nominal	16 m/s
Velocidade de bloqueio	25 m/s

Caixa de velocidades

Factor multiplicativo	1:100.5
-----------------------	---------

Característica Aerodinâmica



Características do Gerador

Tipo	Indução Duplamente Alimentado
Potência nominal	$P_n=2 \text{ MW}$
Tensão nominal	$V_n=690 \text{ V}$
Frequência da rede	$f_n=50 \text{ Hz}$
Nº de pares de pólos	$p=2$
Resistência do estator	$R_s=0.0297 \Omega$
Reactância do estator	$X_s=0.0407 \Omega$
Resistência do rotor	$R_r=0.0210 \Omega$
Reactância do rotor	$X_r=0.03714 \Omega$
Reactância de magnetização	$X_m=0,6903 \Omega$
Coefficiente de Atrito	$D=0,0024$
Momento de inércia	$J_G=1000 \text{ Kg.m}^2$