



# CONTROLO E SUPERVISÃO EM SISTEMAS DE CONVERSÃO DE ENERGIA EÓLICA

---

*Carla Solange Pires Correia Viveiros*

Tese apresentada à Universidade de Évora  
para obtenção do Grau de Doutor em Engenharia Mecatrónica e Energia  
Especialidade: Mecatrónica

ORIENTADORES: *Doutor Mário Rui Melício da Conceição*  
*Doutor José Manuel Prista do Valle Cardoso Igreja*  
*Doutor Victor Manuel Fernandes Mendes*

ÉVORA, JULHO 2015



# **CONTROLO E SUPERVISÃO EM SISTEMAS DE CONVERSÃO DE ENERGIA EÓLICA**

Tese realizada em regime de coorientação sob orientação do

**Doutor Mário Rui Melício da Conceição**

e sob orientação dos

**Doutor José Manuel Prista do Valle Cardoso Igreja**

**Doutor Victor Manuel Fernandes Mendes**

Respetivamente, Professor Auxiliar com Agregação

Departamento de Física, Escola de Ciências e Tecnologia

**UNIVERSIDADE DE ÉVORA**

Professor Coordenador

Área Departamental de Engenharia Eletrotécnica e Automação

**INSTITUTO SUPERIOR DE ENGENHARIA DE LISBOA**

Professor Catedrático Convidado

Departamento de Física, Escola de Ciências e Tecnologia

**UNIVERSIDADE DE ÉVORA**

*A elaboração desta tese beneficiou do regime de isenção de propinas de doutoramento, no âmbito do Protocolo de Cooperação entre a UÉvora e o ISEL*

*“... A perfeição é impossível. No entanto, a busca da perfeição não é. Faça o melhor que puder dentro das condições que existem. Isso é que conta...”*

*John Wooden*

# Resumo

*A tese inclui o estudo e a análise do desempenho de um sistema de conversão de energia eólica onshore. Numa primeira fase são estudados os modelos matemáticos de uma turbina eólica de velocidade variável com controlo de potência por ajuste do ângulo do passo da pá. Seguidamente, são estudados diferentes tipos de controladores tais como controladores de ordem inteira, controladores de ordem fracionária, controladores de lógica difusa, controladores adaptativos e controladores preditivos e é efetuado o estudo de um supervisor baseado em máquinas de estados finitos. Os controladores estão incluídos numa estrutura hierárquica com dois níveis, situados no nível inferior, e têm como função controlar a potência elétrica de saída tendo como referência a potência nominal. No nível superior está incluído o supervisor, baseado em máquinas de estados finitos que tem como função determinar os estados operacionais de acordo com a velocidade de vento. Os modelos matemáticos estudados são integrados nas simulações computacionais para o sistema de conversão de energia eólica e os resultados numéricos obtidos permitem concluir sobre o desempenho do sistema ligado à rede elétrica. O sistema de conversão de energia eólica é constituído por uma turbina eólica de velocidade variável, um sistema de transmissão mecânico descrito por um veio de duas massas, uma caixa de velocidades, um gerador de indução com o rotor duplamente alimentado e um conversor eletrónico de energia de dois níveis.*

# Palavras-chave

*Modelação e Simulação*

*Energia Eólica*

*Controladores*

*Supervisão*

*Análise de Desempenho*

# CONTROL AND SUPERVISION OF WIND ENERGY CONVERSION SYSTEMS

## Abstract

*The thesis includes the study and analysis of the performance of an onshore wind energy conversion system. First, mathematical models of a variable speed wind turbine with pitch control are studied, followed by the study of different controller types such as integer order controllers, fractional order controllers, fuzzy logic controllers, adaptive controllers and predictive controllers and the study of a supervisor based on finite state machines is also studied. The controllers are included in the lower level of a hierarchical structure composed by two levels whose objective is to control the electrical output power around the rated power. The supervisor included at the higher level is based on finite state machines whose objective is to analyze the operational states according to the wind speed. The studied mathematical models are integrated into computer simulations for the wind energy conversion system and the obtained numerical results allow for the performance assessment of the system connected to the electric grid. The wind energy conversion system is composed by a variable speed wind turbine, a mechanical transmission system described by a two mass drive train, a gearbox, a doubly fed induction generator rotor and by a two level converter.*

# Keywords

*Modelling and Simulation*

*Wind Energy*

*Controllers*

*Supervision*

*Performance Assessment*

# Agradecimentos

*Ao Professor Doutor Mário Rui Melício da Conceição, Professor Auxiliar com Agregação do Departamento de Física da Escola de Ciências e Tecnologia da Universidade de Évora, orientador em regime de coorientação científica, desejo expressar o meu profundo agradecimento pela oportunidade que me deu em fazer parte de uma excelente equipa de trabalho e por acreditar em mim. Agradeço também a sua disponibilidade incondicional, por todas as horas que despendeu a orientar esta tese de doutoramento, pelos bons conselhos, pelas linhas de orientação, pela exigência e rigor que impôs e fundamentalmente pela capacidade de compreensão das dificuldades que surgiram durante os trabalhos de doutoramento.*

*Ao Professor José Manuel Prista do Valle Cardoso Igreja, Professor Coordenador da Área Departamental de Engenharia Eletrotécnica e Automação do Instituto Superior de Engenharia de Lisboa, em regime de coorientação científica, desejo expressar o meu profundo agradecimento por toda a confiança que depositou em mim, por me ter feito acreditar que seria possível apesar de todos os contratemplos que existiram, pela assistência dada em regime de coorientação científica, pelos seus conselhos sábios, pela disponibilidade, pelas linhas de orientação e pela exigência e rigor que impôs.*

*Ao Professor Doutor Victor Manuel Fernandes Mendes, Professor Catedrático Convidado do Departamento de Física da Escola de Ciências e Tecnologia da Universidade de Évora e Professor Coordenador com Agregação da Área Departamental de Engenharia Eletrotécnica e Automação do Instituto Superior de Engenharia de Lisboa, desejo expressar o meu profundo agradecimento pela assistência dada em regime de coorientação científica, pela disponibilidade e por todas as horas que despendeu a orientar esta tese de doutoramento, pelos bons conselhos, pelas linhas de orientação, pela exigência e rigor que impôs e*

*fundamentalmente pela simplicidade e humildade na resposta dada a todas as questões e dúvidas colocadas.*

*Aos meus colegas de doutoramento e amigos, Eng.<sup>a</sup> Mafalda Seixas por ter sido fundamental neste meu percurso científico, por toda a ajuda, conselhos e apoio, Eng.º Filipe Barata por ter estado sempre presente, pelo apoio incondicional e simplesmente pela amizade, Eng.º Luis Encarnação pela sua disponibilidade e apoio, Eng.<sup>a</sup> Rita Pereira pela troca de conselhos e pelas palavras de incentivo, Eng.º Sérgio Perinhas pelo encorajamento, pela força e pela amizade.*

*Ao ISEL e à Área departamental de engenharia eletrotécnica e automação pelo apoio através de dispensa de serviço.*

*À Universidade de Évora por me ter recebido no seu programa doutoral.*

*Aos meus pais, Mira e Elvido e aos homens fundamentais da minha vida, Ricardo, Paulinho e Pipe, pelo apoio e amor incondicional, pela motivação, pela força, pela compreensão nas muitas horas, dias e fins-de-semana dedicados à realização da tese, obrigada por estarem presente.*

*Aos membros da família, Cláudia, João, Carina, Nicole, Iris, Tia Mimi, Solange, Mariana e Beatriz, pela privação da minha companhia, por aturarem o meu mau feitio e mesmo assim continuarem do meu lado, pretendo compensar todos os momentos em que não pude estar presente.*

*Ao grupo do Uno, à Sónia Correia, à tia Sofia, à tia Dulce pela disponibilidade, pelos conselhos e pela motivação.*

*À minha avó Maria Filipa, in memoriam, pelo amor e compreensão, pelas palavras de incentivo e por ter estado sempre ao meu lado.*

*A todos aqueles que contribuíram direta ou indiretamente para a elaboração deste trabalho de doutoramento desejo expressar o meu agradecimento.*

# Índice

Resumo .....	i
Abstract .....	iii
Keywords .....	iv
Agradecimentos .....	v
Lista de Figuras .....	xi
Lista de Tabelas .....	xv
Lista de Siglas.....	xvi
Lista de Símbolos .....	xviii
1. Introdução .....	1
1.1 Evolução da Energia Eólica.....	2
1.2 Conjuntura Atual da Potência Instalada.....	5
1.3 Motivação .....	10
1.4 Estado da Arte.....	15
1.5 Organização do Texto.....	23
1.6 Notação .....	24
2. Sistemas de Conversão de Energia Eólica .....	26
2.1 Introdução .....	27
2.2 Enquadramento Legal .....	29

2.3	Tecnologia das Turbinas Eólicas .....	31
2.3.1	Limitações da Potência Máxima .....	33
2.3.2	Tecnologia dos Geradores .....	35
2.4	Conclusões .....	40
3.	Modelação do Sistema de Conversão de Energia Eólica.....	42
3.1	Introdução .....	43
3.2	Componentes do SCEE.....	47
3.3	Estrutura do Modelo do SCEE.....	50
3.4	Ângulo de Passo da Pá.....	52
3.5	Sistema de Transmissão.....	58
3.6	Gerador e Conversor .....	61
3.7	Regiões de Operação .....	63
3.8	Conclusões .....	65
4.	Controlo e Supervisão.....	66
4.1	Introdução .....	67
4.1.1	Estratégia de Controlo do Modelo Padrão .....	68
4.2	Controladores de Ordem Inteira .....	71
4.3	Controladores de Ordem Fracionária.....	73
4.4	Controladores de Lógica Difusa .....	77
4.4.1	Configuração do Controlador Lógico Difuso .....	78
4.4.1.1	Módulo de Fuzificação .....	79
4.4.1.2	Módulo do Conhecimento .....	81
4.4.1.3	Mecanismo de Inferência .....	84

4.4.1.4	Módulo de Desfuzificação.....	85
4.4.2	Controlador Fuzzy PI .....	86
4.5	Controladores Adaptativos .....	89
4.6	Controladores Preditivos.....	97
4.6.1	Conceção Computacional do MPC .....	99
4.6.2	Algoritmo do Controlo Preditivo .....	102
4.6.3	Solução Ótima .....	105
4.7	Supervisão do SCEE.....	107
4.7.1	Estrutura do Modelo do SCEE com Supervisor.....	108
4.7.1.1	Máquinas de Estados Finitos.....	109
4.7.1.2	Estrutura do Supervisor.....	109
4.8	Conclusões .....	111
5.	Simulação Computacional .....	113
5.1	Introdução .....	114
5.2	Controlador PI.....	116
5.3	Controlador FOPI .....	121
5.4	Controlador Fuzzy PI.....	126
5.5	Controlador LQG.....	131
5.6	Controlador MPC.....	136
5.7	Desempenho dos Controladores .....	141
5.8	Conclusões .....	143
6.	Conclusão .....	145
6.1	Contribuições .....	146

6.2	Publicações .....	147
6.3	Direções de Investigação .....	149
	Referências Bibliográficas.....	151

# Lista de Figuras

Figura 1.1 – Evolução da dimensão das turbinas eólicas.....	3
Figura 1.2 – Turbina eólica: a) com maior potência nominal b) com 160 m de altura.....	4
Figura 1.3 – Potência total instalada.....	5
Figura 1.4 – Potência instalada acumulada (azul), adicionada (verde) e em construção (vermelha) em Portugal.....	8
Figura 1.5 – Produção de eletricidade por fonte de energia em Portugal Continental.....	8
Figura 1.6 – Peso das diferentes fontes de produção de eletricidade em Portugal Continental.....	9
Figura 1.7 – Evolução da potência instalada em renováveis.....	10
Figura 2.1 – A configuração mais comum dos SCEE.....	32
Figura 2.2 – Fabricantes de turbinas eólicas instaladas em Portugal, ligada à rede (azul), em construção (verde) e adicionada (vermelha)..	35
Figura 2.3 – Configuração do sistema diretamente ligado à rede. ....	37
Figura 2.4 – Configuração do sistema constituído por um GIDA. ....	38
Figura 2.5 – Modo de funcionamento super-síncrono. ....	39
Figura 2.6 – Modo de funcionamento sub-síncrono.....	39
Figura 2.7 – Configuração do sistema constituído por um GSVV.....	40

Figura 3.1 – Perfil de velocidades na camada limite atmosférica e escoamento no tubo de corrente do ar anterior e posterior ao rotor da turbina.....	44
Figura 3.2 – Influência de um obstáculo no percurso do vento. [ <a href="http://microeolica.weebly.com/vento.html">http://microeolica.weebly.com/vento.html</a> ] .....	44
Figura 3.3 – Perfil de velocidades com e sem relevo. [ <a href="http://microeolica.weebly.com/vento.html">http://microeolica.weebly.com/vento.html</a> ] .....	45
Figura 3.4 – Configuração da turbina eólica mais comum.....	47
Figura 3.5 – Componentes principais de um SCEE. ....	48
Figura 3.6 – Relação entre os subsistemas do SCEE. ....	50
Figura 3.7 – Interferência da turbina no escoamento. ....	53
Figura 3.8 – Coeficiente de potência em função de $\lambda$ e $\beta$ . ....	56
Figura 3.9 – O veio com uma configuração de duas massas.....	59
Figura 3.10 – Configuração do conjunto gerador e conversor de dois níveis. ....	62
Figura 3.11 – Regiões de operação do SCEE.....	64
Figura 4.1 – Modos de controlo do modelo padrão. ....	69
Figura 4.2 – Controlador PI discreto com saturação. ....	72
Figura 4.3 – Controlador $PI^\mu$ de ordem fracionária com saturação. ....	76
Figura 4.4 – Configuração do controlador lógico difuso. ....	78
Figura 4.5 – Funções de pertença de um conjunto difuso. ....	80
Figura 4.6 – Representações de funções de pertença. ....	82

Figura 4.7 – Método de inferência de Mamdani. ....	84
Figura 4.8 – Estrutura do controlador PI difuso.....	86
Figura 4.9 – Funções de pertinência de $\tilde{e}(k)$ e de $\Delta\tilde{e}(k)$ .....	87
Figura 4.10 – Função de pertinência de $\Delta\tilde{u}(k)$ .....	88
Figura 4.11 – Superfície da base de regras do controlador PI difuso.....	89
Figura 4.12 – Estrutura do controlador polinomial quadrático. ....	93
Figura 4.13 – Diagrama de blocos do controlador LQG.....	96
Figura 4.14 – Interpretação gráfica do controlo preditivo com horizonte de predição. ....	101
Figura 4.15 – Estrutura básica em malha fechada do controlador MPC.....	102
Figura 4.16 – Estrutura do modelo do sistema eólico com supervisor. ....	108
Figura 4.17 – Modos de operação do supervisor.....	110
Figura 5.1 – Velocidade do vento com perturbações. ....	116
Figura 5.2 – Potência elétrica do GIDA e de referência da turbina. ....	117
Figura 5.3 – Variação do ângulo do passo da pá.....	118
Figura 5.4 – Velocidade de rotação do GIDA e velocidade nominal.....	119
Figura 5.5 – Comutação entre as regiões II e III. ....	120
Figura 5.6 – Potência elétrica do GIDA e de referência da turbina. ....	122
Figura 5.7 – Variação do ângulo do passo da pá.....	123

Figura 5.8 – Velocidade de rotação do GIDA e velocidade nominal.....	124
Figura 5.9 – Comutação entre as regiões II e III. ....	125
Figura 5.10 – Potência elétrica do GIDA e de referência da turbina. ....	127
Figura 5.11 – Variação do ângulo do passo da pá.....	128
Figura 5.12 – Velocidade de rotação do GIDA e velocidade nominal. ....	129
Figura 5.13 – Comutação entre as regiões II e III. ....	130
Figura 5.14 – Potência elétrica do GIDA e de referência da turbina. ....	132
Figura 5.15 – Variação do ângulo do passo da pá.....	133
Figura 5.16 – Velocidade de rotação do GIDA e velocidade nominal. ....	134
Figura 5.17 – Comutação entre as regiões II e III. ....	135
Figura 5.18 – Potência elétrica do GIDA e de referência da turbina. ....	137
Figura 5.19 – Variação do ângulo do passo da pá.....	138
Figura 5.20 – Velocidade de rotação do GIDA e velocidade nominal. ....	139
Figura 5.21 – Comutação entre as regiões II e III. ....	140

# Lista de Tabelas

Tabela 1.1 – Potência eólica total instalada a nível mundial.....	7
Tabela 4.1 – Base de regras para o controlador PI difuso.....	88
Tabela 5.1 – Parâmetros do SCEE. ....	115
Tabela 5.2 – Desempenho dos controladores.....	141
Tabela 5.3 – Desempenho dos controladores em valores por unidade .....	142

# Lista de Siglas

ARX	<i>Autoregressive exogenous</i>
DFIG	<i>Doubly Fed Induction Generator</i>
FIR	<i>Finite Impulse Response</i>
FOPI	<i>Fractional Order Proportional Integral</i>
GIDA	Gerador de Indução com Rotor Duplamente Alimentado
GIRG	Gerador de Indução com Rotor em Gaiola
GSVV	Gerador Síncrono de Velocidade Variável
IOF	Integral de Ordem Fracionária
ISV	<i>Integral Square Value</i>
ITAE	<i>Integral Time of Absolute Error</i>
LQG	<i>Linear Quadratic Gaussian</i>
MEE	Modelo de espaço de estados
MIMO	<i>Multi-input multi-output</i>
MPC	<i>Model Predictive Control</i>
PCH	Pequenas Centrais Hídricas
PI	<i>Proportional Integral</i> ou Controlador Proporcional Integral Clássico

$PI^\mu$	Controlador Proporcional Integral de Ordem Fracionária
SISO	<i>Single-input single-output</i>
SCEE	Sistema de Conversão de Energia Eólica
TEH	Turbina de Eixo Horizontal
TSR	<i>Tip Speed Ratio</i>

# Lista de Símbolos

## *Índices*

- $i$  Índice que identifica o interruptor do conversor de dois níveis
- $k$  Índice que identifica o braço do conversor de dois níveis

## *Constantes e variáveis*

- $A$  Área varrida pelas pás da turbina
- $B_{dt}$  Coeficiente de amortecimento entre os eixos de rotação
- $B_g$  Coeficiente de atrito viscoso do rotor do gerador
- $B_r$  Coeficiente de atrito viscoso do rotor da turbina
- $C_p$  Coeficiente de potência
- $C_{ft}$  Capacidade do banco de condensadores do filtro de segunda ordem
- $i_{ftk}$  Corrente de saída do filtro e entrada da rede elétrica
- $i_k$  Correntes nos braços do conversor
- $J_g$  Momento de inércia concentrado do rotor do gerador
- $J_r$  Momento de inércia concentrada do rotor da turbina

$K_{dt}$	Constante de rigidez torsional
$K_i$	Ganho integral do controlador PI
$K_p$	Ganho proporcional do controlador PI
$L_{ft}$	Indutância da bobina do filtro de segunda ordem
$L_n$	Indutância de rede elétrica
$N_g$	Relação entre dentes na caixa de velocidades
$N_p$	Horizonte de predição
$p_i$	Penalização sobre a saída
$P_g$	Potência elétrica à saída do gerador
$P_m$	Potência mecânica da turbina
$P_r$	Potência de referência da turbina
$P_w$	Potência total disponível do vento que passa através de toda a área varrida do rotor
$Q$	Matriz que penaliza as variáveis de estado
$Q_f$	Conjunto de estados finitos
$q_i$	Penalização sobre a referência
$Q_m$	Estados marcados ou finais

$r_i$	Penalização sobre a ação de controlo
$R_p$	Raio da pá
$R$	Matriz que penaliza o esforço de controlo
$R_{ft}$	Resistência do filtro de segunda ordem
$R_n$	Resistência da rede elétrica
$T_{dg}$	Binário de torção devido ao comportamento elástico do veio do lado do gerador
$T_{dr}$	Binário de torção devido ao comportamento elástico do veio do lado da turbina
$T_s$	Tempo de amostragem
$T_{tg}$	Binário resistente originado devido ao atrito viscoso do rotor do gerador
$T_{tr}$	Binário resistente originado devido ao atrito viscoso do rotor da turbina
$u_{fik}$	Tensão no enrolamento do rotor do gerador
$u_k$	Tensão na rede elétrica
$v_w$	Velocidade de vento que incide nas pás da turbina
$z_R$	Altura de referência relacionada com a velocidade média do vento, $u(z_R)$

$z_0$	Comprimento característico da rugosidade do solo
$\rho$	Densidade do ar
$\lambda$	Coefficiente de velocidade periférica do rotor, TSR
$\lambda_{opt}$	Coefficiente de velocidade periférica ótimo
$\omega_g$	Velocidade de rotação do gerador
$\omega_n$	Frequência natural do sistema
$\omega_r$	Velocidade de rotação do rotor da turbina
$\omega_{r,m}$	Velocidade de rotação medida do rotor da turbina
$\omega_{g,m}$	Velocidade de rotação medida do gerador
$\omega_{nom}$	Velocidade de rotação nominal do gerador
$\omega_{park}$	Velocidade de rotação inferior à velocidade de rotação mínima do gerador
$\omega_\Delta$	Desvio que introduz uma histerese na comutação evitando uma comutação elevada entre os modos de controlo 1 e 2.
$\beta$	Ângulo de passo da pá
$\beta_m$	Valor medido do ângulo de passo da pá
$\beta_r$	Valor da referência do ângulo de passo da pá
$\mu$	Ordem da derivada ou do integral fracionário

$\mu_{TX}(X)$	Função de pertença de uma variável linguística
$\theta$	Desvio angular da rotação do elemento elástico no veio com uma configuração de duas massas
$\theta_g$	Posição angular do veio do lado do gerador
$\theta_r$	Posição angular do veio do lado da turbina
$\theta_\Delta$	Desvio angular da rotação do elemento elástico do veio
$\tau_g$	Binário elétrico do gerador
$\tau_r$	Binário mecânico da turbina
$\tau_{g,m}$	Valor medido do binário do gerador
$\tau_{g,r}$	Valor de referência do binário do gerador
$\xi$	Coefficiente de amortecimento
$\alpha_{gc}$	Parâmetro do modelo gerador e conversor
$\eta_g$	Eficiência do gerador
$\Phi$	Matriz de transição dinâmica para o instante de tempo atual
$\Gamma$	Matriz de transição das entradas futuras
$\Lambda$	Matriz de informação
$\Sigma$	Conjunto de eventos finitos
$\eta_{dt}$	Eficiência do sistema de transmissão

*Funções*

$\Gamma(x)$           Função Gamma

$J(\cdot)$           Funcional de custo

*Vetores e matrizes*

$A^T$           Transposta da matriz  $A$

---

# CAPÍTULO

# 1

---

## Introdução

*Neste capítulo é apresentada uma visão histórica da evolução da energia eólica assim como os últimos desenvolvimentos que contribuíram para a conjuntura atual da potência instalada. É apresentada a motivação para abordar o tema e o estado da arte. Adicionalmente é descrita a forma como o texto está organizado e a notação utilizada nesta tese.*

## 1.1 Evolução da Energia Eólica

A crise energética de 1973 em que foi sextuplicado o preço do barril de petróleo e o embargo dos países produtores de petróleo à Dinamarca, Holanda, Portugal, África do Sul e Estados Unidos, proporcionou condições para o ressurgimento das energias renováveis [Toffler82]. Desta crise são de destacar consequências políticas que se concretizaram em ações cujo objetivo é o de assegurar a diversidade e segurança no fornecimento de energia. Adicionalmente, são de destacar consequências políticas no que respeita à obrigação de proteger o ambiente, cuja degradação é imputada ao uso de combustíveis baseados em recursos fósseis.

Assim, surgiu a motivação e o interesse pelas renováveis, e as atividades de investigação e desenvolvimento no aproveitamento da energia eólica, como fonte alternativa de energia elétrica, foram intensificadas de forma significativa, nomeadamente na Europa e nos EUA.

Com a crescente necessidade de produção de energia elétrica proveniente de fontes de energia renovável, as turbinas eólicas são uma resposta eficaz. As turbinas eólicas ou aerogeradores são as formas mais comuns de designar os sistemas de conversão de energia eólica (SCEE) para a forma de energia elétrica [Resende11].

O princípio de funcionamento é baseado na conversão da energia cinética associada ao deslocamento de massas de ar, i.e., vento, em energia mecânica de rotação, pela incidência do vento nas pás do rotor, seguida da conversão da energia mecânica em energia elétrica pelo gerador elétrico [Resende11].

Após a crise energética de 1973, surgiram as turbinas eólicas nos anos 80 com diâmetros entre 10 m a 20 m e potências instaladas na gama de 25 kW a 100 kW. A investigação proporcionou o desenvolvimento tecnológico que permitiu

condições favoráveis para o crescimento da produção em massa, tornando possível o desenvolvimento de técnicas de construção de turbinas eólicas mais robustas e permitindo o aumento da sua potência instalada [Castro11].

A Figura 1.1 permite observar a evolução temporal das grandezas do diâmetro do rotor e da altura da torre [EWEA11]. Nesta figura, é possível constatar que nos últimos 20 anos o diâmetro do rotor de uma turbina eólica de eixo horizontal tem vindo a aumentar significativamente. Pelo que, é possível aproveitar melhor a disponibilidade de energia eólica aumentando a energia extraída ao vento pela turbina. Esta evolução da dimensão das turbinas é muito vantajosa em termos económicos, visto que, uma altura maior da torre proporciona maior regularidade no que respeita à velocidade do vento no tubo de fluxo incidente nas pás do rotor. Como tal, existe um melhor aproveitamento das infraestruturas bem como uma maior produção de energia eléctrica o que torna possível reduzir o número de turbinas eólicas em parques eólicos, aproveitando melhor o espaço e diminuindo também o impacte visual [Castro11].

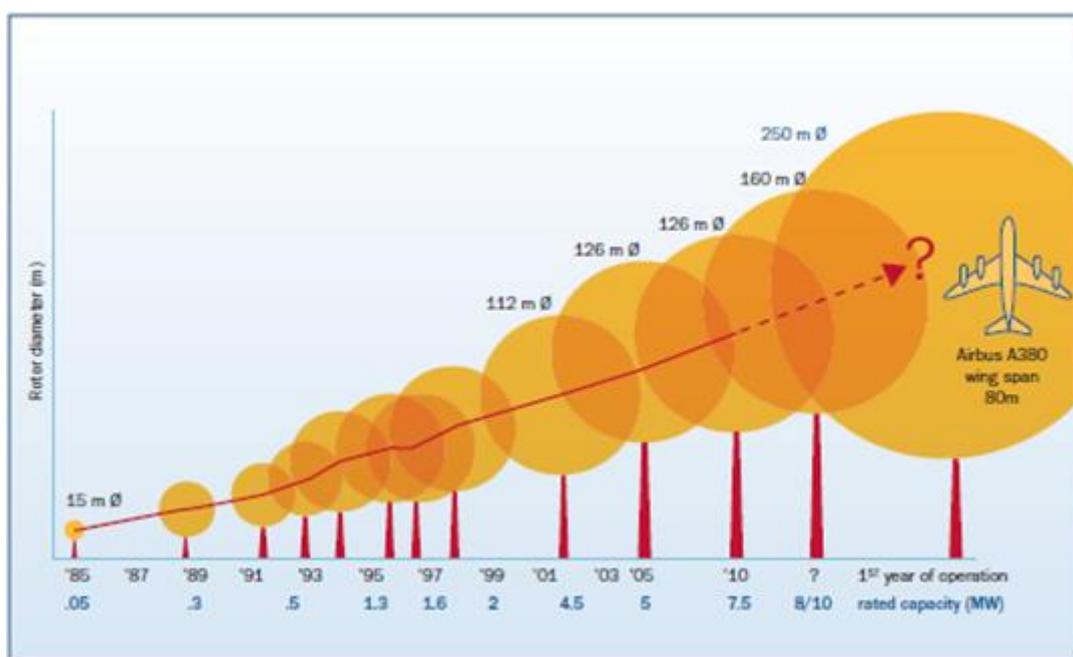


Figura 1.1 – Evolução da dimensão das turbinas eólicas [EWEA11].

Em 2007, é instalada em Emden, Alemanha a turbina eólica denominada modelo E-126, em solo terrestre, *onshore*, com a maior potência instalada e ainda em 2015, é a de maior potência. O modelo é desenvolvido pela Enercon com uma potência nominal de 7,5 MW, é constituída por uma torre com 135 m de altura e com um rotor de 127 m de diâmetro [Enercon14].

Em 2006, é instalada em Laasow, Alemanha uma das turbinas eólicas *onshore* mais altas do Mundo, denominada modelo FL2500. O modelo com uma potência nominal de 2,5 MW é desenvolvido pela Fuhrländer e é constituído por uma torre com 160 m de altura e com um rotor de 90 m de diâmetro [H2Now07].

Em 2012, o modelo FL2500 perdeu o estatuto de turbina eólica *onshore* mais alta do Mundo, visto que, foram instaladas duas turbinas ligeiramente mais altas, em New Tomyśl, Polónia. Os modelos E-126 e FL2500 estão representados respetivamente na Figura 1.2 a) e Figura 1.2 b).



a) Enercon E-126 [Enercon14].



b) Fuhrländer FL2500 [H2Now07].

Figura 1.2 – Turbina eólica: a) com maior potência nominal b) com 160 m de altura.

## 1.2 Conjuntura Atual da Potência Instalada

No triénio 2011-2014, houve em média um crescimento anual na potência eólica instalada a nível mundial de 13 %, atingindo um valor aproximado de 336 GW em meados de 2014 [WWEA14]. Esta taxa de crescimento é inferior ao verificado no triénio 2008-2011, aproximadamente de 25 % [WWEA10]. Não obstante, esta tecnologia de produção é considerada uma das tecnologias com maior e mais rápido crescimento em todo o Mundo devido ao nível de penetração e maturidade atingido. A potência eólica total instalada [WWEA14] no triénio 2011-2014 está representada na Figura 1.3.

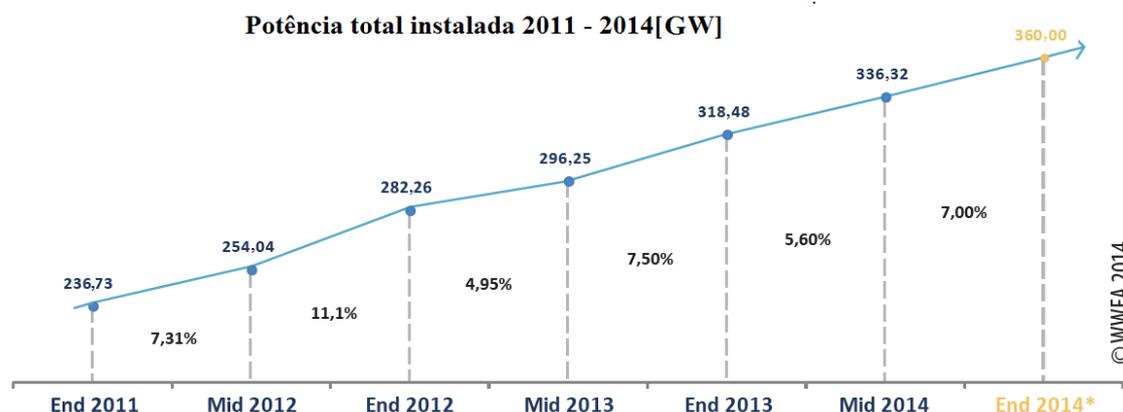


Figura 1.3 – Potência total instalada [WWEA14].

O crescimento significativo da potência eólica instalada é impulsionado por vários fatores dos quais se mencionam alguns:

- O aumento da preocupação mundial relativamente ao aquecimento global, i.e., às mudanças climáticas e poluição do ar, permite que a energia eólica seja considerada como uma parte da solução para estas preocupações, visto que a energia eólica é considerada uma fonte de energia limpa;
- A característica renovável, ao contrário dos combustíveis fósseis, da fonte de energia eólica é inexaurível. Um indicador de alerta demonstrado por

avaliações recentes permite concluir que com as taxas de utilização atuais, a reserva de carvão existente apenas é suficiente para os próximos 120 anos [Mathew06];

- A volatilidade dos preços do petróleo justifica políticas energéticas que requerem a utilização de fontes alternativas de energia para fazer face ao aumento do consumo de eletricidade e à volatilidade dos preços do petróleo.

A potência eólica instalada a nível mundial atingiu 336,32 GW em finais de Junho de 2014. Da potência total instalada, 17,83 GW foram adicionados no primeiro semestre de 2014, sendo substancialmente mais elevado do que no primeiro semestre de 2013 e 2012, quando foram adicionados 13,9 GW e 16,4 GW, respetivamente [WWEA14]. A potência total instalada teve um crescimento de 5,60 % no primeiro semestre de 2014, ligeiramente acima do crescimento verificado no primeiro semestre de 2013 que foi de 4,95 % e abaixo do crescimento verificado no primeiro semestre de 2012 que foi de 7,31 % [WWEA14].

Na Figura 1.3, é possível constatar que existe uma forte aposta na produção de energia elétrica através da energia eólica. A evolução positiva dos mercados eólicos em todo o mundo é consequência das vantagens económicas do uso da energia eólica, do aumento da sua competitividade relativamente a outras fontes de energia elétrica, i.e., aumento da paridade bem como da necessidade urgente de implementar tecnologias livres de emissões, a fim de atenuar as mudanças climáticas e poluição do ar. Em 2014, a China, os Estados Unidos, a Alemanha, a Espanha, e a Índia, são por esta ordem os países com maior potência instalada em aproveitamento de energia eólica e representam uma quota global de 72 % do total de potência eólica instalada. No que diz respeito à capacidade da potência recém-instalada houve um aumento de 57 % para 62 %. O mercado eólico chinês continua a ser líder de mercado com um crescimento substancial, tendo

adicionado 7175 MW no primeiro semestre de 2014. A potência eólica total instalada, por países, no triénio 2011-2014 está representada [WWEA14] na Tabela 1.1.

Tabela 1.1 – Potência eólica total instalada a nível mundial.

Posição	País	Potência total instalada em Junho de 2014 [MW]	Potência adicionada em Junho de 2014 [MW]	Potência total instalada em 2013 [MW]	Potência adicionada em 2013 [MW]	Potência total instalada em 2012 [MW]	Potência adicionada em 2012 [MW]	Potência total instalada em 2011 [MW]
1	China	98588	7175	91413	5503	75324	5410	62364
2	Estados Unidos	61946	835	61108	1,6	59882	2883	46919
3	Alemanha	36488	1830	34658	1143	31315	941	29075
4	Espanha	22970	0,1	22959	122	22796	414	21673
5	Índia	21262	1112	20150	1243	18321	1471	15880
6	Inglaterra	11180	649	10531	1331	8445	822	6018
7	França	8592	338	8254	198	7499	320	6877
8	Itália	8586	30	8551	273	8144	650	6640
9	Canadá	8526	723	7698	377	6201	246	5265
10	Dinamarca	4855	83	4772	416	4162	56	3927
11	Suécia	4829	105	4724	22	4525	19	4379
12	Portugal	4824	354	4470	526	3745		2798
13	Brasil	4700	1301	3399	281	2507	118	1429
14	Austrália	3748	699	3049	475	2584		2226
15	Polónia	3727	337	3390	310	2497		1616
	Resto do Mundo	31506	2042	29451	1761	24660	3026	16493
		<b>336327</b>	<b>17613</b>	<b>318488</b>	<b>13983</b>	<b>282607</b>	<b>16376</b>	<b>233579</b>

A Alemanha é o primeiro país europeu a constar da tabela e está posicionado no terceiro lugar, tendo adicionado 1830 MW no primeiro semestre de 2014. Portugal está posicionado no décimo primeiro lugar, tendo sido ultrapassado pela Dinamarca no final do ano de 2013. A potência eólica instalada em Portugal atingiu o valor de 4829 MW no primeiro semestre de 2014, sendo considerada a segunda maior fonte de produção de energia elétrica em Portugal Continental, atingindo os 11,8 TWh [da Costa15]. A potência instalada acumulada, azul, adicionada, verde, e em construção, vermelha, em Portugal [E2P14] está representada na Figura 1.4.

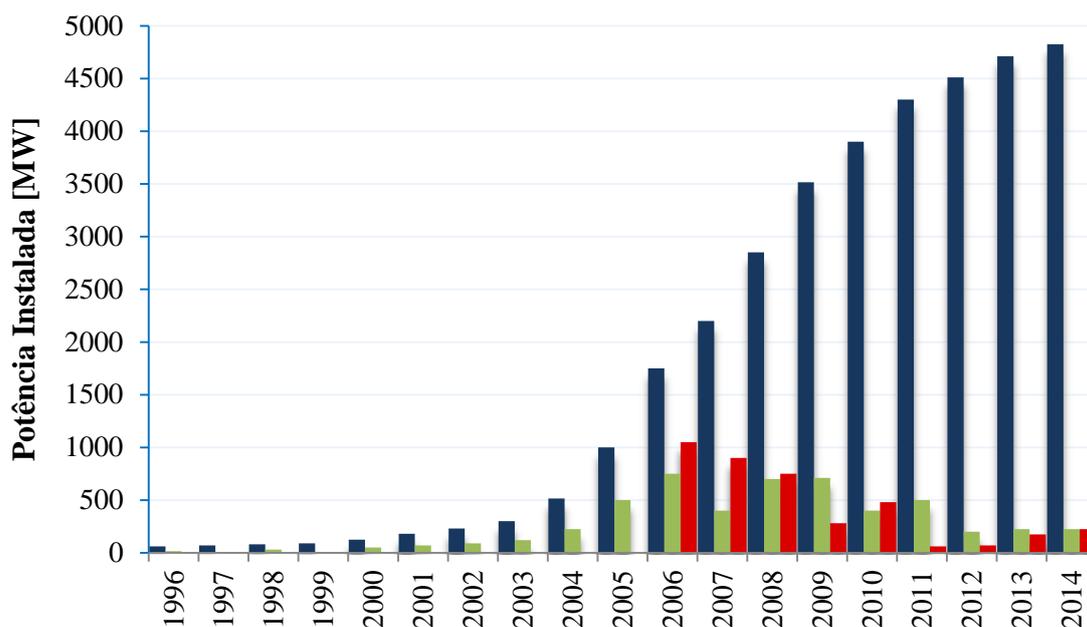


Figura 1.4 – Potência instalada acumulada (azul), adicionada (verde) e em construção (vermelha) em Portugal [E2P14].

A produção de eletricidade por fonte de energia em Portugal Continental está representada [da Costa15] na Figura 1.5.

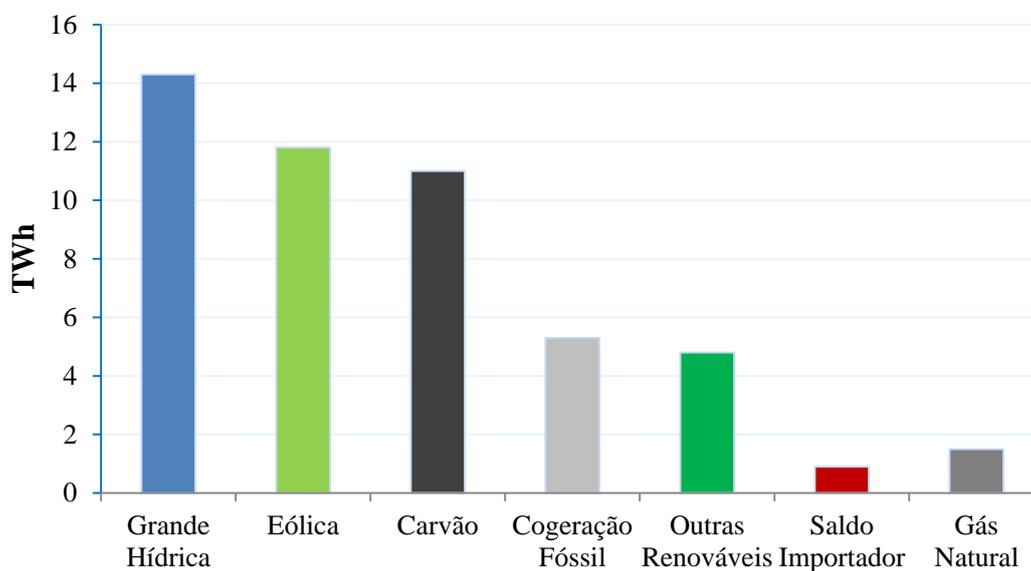


Figura 1.5 – Produção de eletricidade por fonte de energia em Portugal Continental [da Costa15].

Cada fonte de produção de eletricidade contribui com uma determinada percentagem na produção da eletricidade total. Em 2014, os SCEE contribuíram com 24 % da produção de energia elétrica, a segunda maior penetração de SCEE para o consumo de eletricidade no mundo, apenas atrás da Dinamarca [da Costa15].

Desde 2010 que se verifica essa tendência, com a Dinamarca a reforçar a liderança e Portugal irredutível em segundo lugar [Ieawind13]. O peso das diferentes fontes de produção de eletricidade em Portugal Continental está representado [da Costa15] na Figura 1.6.

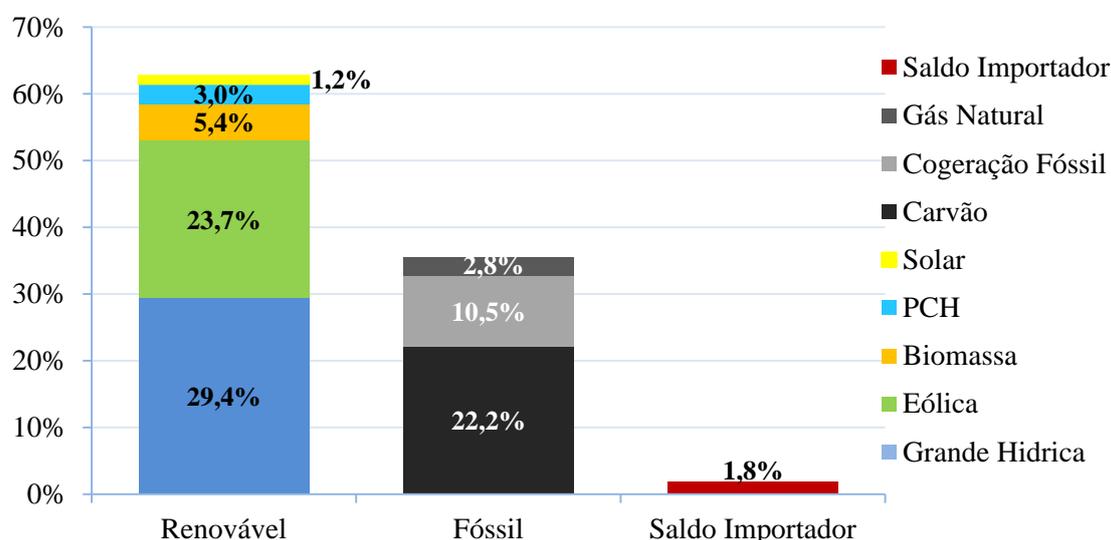


Figura 1.6 – Peso das diferentes fontes de produção de eletricidade em Portugal Continental [da Costa15].

Na Figura 1.6, a produção de energia elétrica por fontes renováveis permite constatar que os sistemas hídricos, compostos pela grande hídrica e pelas pequenas centrais hidroelétricas (PCH), é responsável por 51 % da energia elétrica produzida, a produção eólica contribuiu com 38 %, a biomassa com 9 % e a fotovoltaica com 2 %.

A evolução da potência instalada em renováveis por tecnologia está representada [da Costa15] na Figura 1.7.

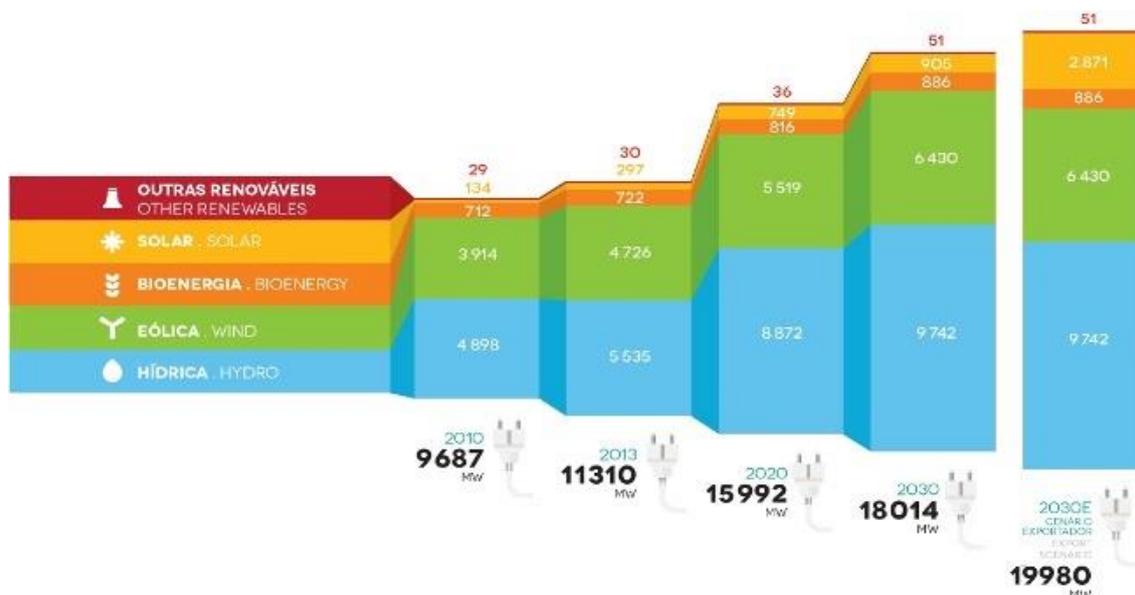


Figura 1.7 – Evolução da potência instalada em renováveis [da Costa15].

Na Figura 1.7, a evolução anual da potência eólica instalada em Portugal permite concluir que é expectável o cumprimento da meta estabelecida de 5300 MW até 2020, sendo dividida em 5273 MW, *onshore*, e 27 MW no mar, *offshore*, [Ieawind13].

### 1.3 Motivação

A União Europeia (UE) definiu através da Diretiva 2009/28/CE do Parlamento Europeu e do Conselho, de 23 de abril, relativa à promoção de utilização de energia proveniente de fontes de energia renováveis (Diretiva FER), o objetivo de alcançar, até 2020, uma quota de 20 % de energia proveniente de fontes renováveis no consumo final bruto de energia e uma quota de 10 % no sector dos transportes.

Em outubro de 2014, no âmbito do quadro de ação da UE relativo ao clima e à energia para 2030 foi definida a meta vinculativa de pelo menos 27 % de energias renováveis no consumo total de energia na UE em 2030. Esta meta

deverá ser atingida coletivamente, com base no contributo dos diferentes Estados-Membros, os quais podem fixar metas nacionais mais ambiciosas [Fernandes14].

Em Portugal, o Decreto-Lei n.º141/2010, de 31 de dezembro, (alterado pelo Decreto-Lei n.º 39/2013, de 18 de março) que transpôs parcialmente a Diretiva FER e o Plano Nacional de Ação para as Energias Renováveis (PNAER) para o período 2013-2020 (PNAER 2020) prevê o estabelecimento da meta de 31 % para a utilização de energia renovável no consumo final bruto de energia e 10 % para o consumo energético nos transportes no ano 2020. A Diretiva FER e o PNAER 2020 preveem também a incorporação de 59,6 % de energia renovável na eletricidade até 2020 [Fernandes14].

O PNAER 2020 indica um conjunto de metas intercalares para a utilização de energia renovável no consumo final bruto de energia: 22,6 % para os anos 2011 e 2012; 23,7 % para 2013 e 2014; 25,2 % em 2015 e 2016; e 27,3 % para os anos 2017 e 2018 [Fernandes14].

O contributo das energias renováveis no consumo de energia primária foi de 20,4 % em 2012. No entanto, considerando o consumo final bruto de energia (CFBE), o peso das FER foi de 24,6 % em 2012, um valor 2 % acima da meta estabelecida no PNAER para o período 2013-2020. No final de 2013, a potência instalada para a produção de energia elétrica a partir de FER, atingiu os 11310 MW em Portugal, o que traduz um aumento de 2,3 % relativamente a 2012 [Fernandes14].

A promoção das energias renováveis, designadamente a eólica, assume particular importância neste contexto internacional e comunitário tendo em conta os objetivos e metas a cuja materialização o País está comprometido com vista à progressiva diminuição da dependência energética externa bem como a redução da intensidade carbónica da sua economia [DecretoLei10].

Nas últimas três décadas houve um aumento significativo no uso da tecnologia para aproveitamento da energia eólica. Até ao final dos anos 90, as turbinas eólicas eram de valores médios de potência e com sistemas de auto-regulação. Estas turbinas eólicas funcionavam para uma velocidade fixa ditada pela frequência da rede, impedindo assim o ajuste da velocidade do gerador à velocidade do vento, e o controlo de potência elétrica era conseguido mediante a utilização de pás projetadas de forma a entrarem em perda aerodinâmica, i.e., perda de sustentação durante ventos fortes [Melício10]. Os SCEE de velocidade fixa são geralmente equipados com um gerador de indução com rotor em gaiola de esquilo diretamente ligado à rede, pelo que a velocidade de rotação do gerador é imposta pela frequência fixa da rede permitindo pequenas variações, na ordem de 1 %, devido ao escorregamento do gerador. Sendo a frequência do rotor quase constante, existe um único ponto de operação em torno do qual o rendimento de conversão de energia não é necessariamente o máximo global [Resende11].

Nas últimas duas décadas, com os recentes avanços tecnológicos e a redução de custos dos conversores eletrónicos de energia e atuadores de posição, a maioria das turbinas eólicas ligadas à rede está equipada com conversores eletrónicos de energia e servomecanismos que controlam o ângulo de passo da pá.

As turbinas eólicas de velocidade variável com controlo de potência por ajuste do ângulo de passo da pá, utilizam conversores eletrónicos de energia que permitem o desacoplamento entre a frequência da rede e a frequência imposta pelo vento ao gerador, tornando possível a operação do sistema numa gama alargada de velocidades. Neste tipo de turbinas, é possível alterar a velocidade do rotor da turbina para as diferentes velocidades de vento o que permite uma operação em torno do qual o rendimento de conversão de energia é otimizado. A velocidade de rotação do rotor da turbina é alterada utilizando servomecanismos que permitem o controlo do ângulo de passo da pá [Resende11].

O uso generalizado de conversores eletrônicos de energia e servomecanismos de posição permite flexibilidade e controlabilidade no comportamento do SCEE em termos de captação de energia, controlo da energia ativa e controlo da energia reativa injetada na rede elétrica, contudo, aumenta o nível de complicação que descreve o sistema de controlo.

Como tal, o SCEE deve ser cuidadosamente projetado de modo a cumprir as especificações internacionais da qualidade de energia injetada na rede elétrica, entre as quais:

- Maximizar a eficiência do gerador do SCEE o que permite um aproveitamento da capacidade de produção;
- Aumentar a vida útil da turbina eólica instalada por redução do número de componentes mecânicos que ocasionam falhas;
- Garantir a qualidade da energia elétrica a ser injetada na rede elétrica.

O controlo do SCEE, que envolve subsistemas elétricos e mecânicos é considerado complicado e portanto um desafio.

A motivação para abordar o tema do controlo e supervisão dos SCEE, advém da necessidade de dar resposta ao desafio relacionada com o controlo dos vários subsistemas que constituem o SCEE. Assim, esta tese trata um tema de investigação com interesse e importância, visando o estudo de modelos matemáticos apropriados para os SCEE ligados à rede elétrica, o estudo de diferentes tipos de controladores e o estudo de um supervisor baseado em máquinas de estados finitos. Os estudos são integrados na simulação dos SCEE de velocidade variável com gerador de indução com o rotor duplamente alimentado e com um sistema de transmissão mecânico descrito por duas massas girantes.

A elaboração deste trabalho envolve as seguintes tarefas:

- T1 Estudo dos modelos que integram o SCEE tais como o modelo da pá da turbina e ângulo de passo, o modelo do sistema de transmissão mecânico, o modelo do sistema gerador e conversor e o modelo do sistema de controlo;
- T2 Desenvolvimento de uma arquitetura de controlo com dois níveis, nível de supervisão e nível de execução;
- T3 Estudo de diferentes tipos de controladores tais como controladores de ordem inteira, controladores de ordem fracionária, controladores de lógica difusa, controladores adaptativos e controladores preditivos;
- T4 Estudo de um supervisor cuja função é determinar qual o estado operacional mais adequado entre os estados possíveis;
- T5 Simulação dos diferentes tipos de controladores;
- T6 Simulação da integração do supervisor com os diferentes tipos de controladores;
- T7 Avaliação do desempenho dessa mesma integração e realização de análise crítica dos resultados obtidos com a ação de cada controlador.

## 1.4 Estado da Arte

### *Controladores*

Em [Odgaard13] é apresentado um sistema que descreve de uma forma realista uma turbina de eixo horizontal de velocidade variável com controlo de potência por ajuste do ângulo de passo da pá. O controlo do ângulo de passo da pá é realizado utilizando o controlador proporcional integral (PI) cujo objetivo é manter a velocidade de rotação do gerador na velocidade de rotação nominal.

Em [Wang11] é utilizada uma abordagem gráfica para determinar os limites dos valores de controlador PI, i.e., localizar uma região estável para os parâmetros do controlador PI no controlo do ângulo de passo da pá aplicado ao sistema de conversão de energia eólica.

Em [Macedo12] as flutuações na potência elétrica do gerador são reduzidas. É utilizado o controlador de lógica difusa PI como alternativa ao controlador de ordem inteira PI. As simulações são realizadas através da variação da velocidade de vento de incidência nas pás da turbina num parque eólico equipado com geradores de indução com o rotor em gaiola de esquilo.

Em [Salomão12] é utilizado o controlador de lógica difusa PI numa turbina eólica de velocidade variável com uma potência nominal de 1,5 MW. É efetuada uma comparação com o controlador de ordem inteira PI sendo o resultado favorável ao controlador de lógica difusa.

Em [Scherillo12] é utilizado o controlador de lógica difusa PI numa mini turbina eólica de velocidade variável com uma potência nominal de 60 kW. O controlador utiliza funções de pertença com a forma triangular e 25 regras. As simulações são realizadas utilizando os controladores de lógica difusa e controladores de ordem inteira e os resultados numéricos da velocidade de rotação do rotor da turbina e potência elétrica são comparados.

Em [Aissaoui13] é desenvolvido um modelo do sistema de conversão de energia eólica com um gerador síncrono com excitação assegurada por meio de ímanes permanentes. O estudo inclui o desenvolvimento sobre a parte elétrica do gerador síncrono e o controlo da tensão e da corrente do estator do gerador é conseguido através do controlador de lógica difusa com ação proporcional e integral.

Em [Jazaeri14] é proposto um esquema de controlo baseado na lógica difusa para controlar o conversor eletrónico de energia de um gerador de indução com o rotor duplamente alimentado. Os modos de operação super-síncrono, síncrono e sub-síncrono são analisados.

Em [Mateescu12] é utilizado um controlador linear quadrático gaussiano (LQG) numa turbina eólica de velocidade variável. São apresentados resultados satisfatórios na rejeição de perturbações, especialmente na componente representada pela velocidade de vento. É verificada uma redução na fadiga em componentes do sistema.

Em [Nourdine10] é utilizado o controlador LQG numa turbina de velocidade variável. São usados quatro controladores LQG diferentes, o primeiro tem em consideração o comportamento rígido, o segundo tem em consideração a flexibilidade do sistema de transmissão mecânico, o terceiro tem em consideração a flexibilidade do sistema de transmissão e da torre e o último tem em consideração as pás. O objetivo é reduzir o esforço mecânico no sistema de transmissão, na torre e nas pás.

Em [Boukhezzar07] é proposto um controlo multivariável para condições de vento superiores à velocidade de vento que permite obter a potência nominal. O controlo multivariável é composto pelo controlador LQG e pelo controlador PI.

Em [Cutululis06] é considerada a operação de uma turbina eólica de velocidade variável para velocidades de vento abaixo da velocidade nominal, i.e., abaixo da velocidade de vento que permite obter a potência nominal. É utilizado o

controlador linear quadrático que permite por um lado otimizar a maximização da conversão de energia e por outro lado a minimização do binário do gerador assíncrono responsável pelas flutuações na frequência da rede elétrica.

Em [Soliman11] é utilizada uma estratégia de controlo multivariável, baseada em técnicas de controlo preditivo, para uma turbina eólica de velocidade variável considerando todas as gamas de variação de velocidade de vento. O controlador utiliza o ângulo de passo da pá e o binário do gerador para controlar a velocidade de rotação do gerador e a potência elétrica.

Em [Kaneko12] é aplicado o modelo de controlo preditivo numa turbina eólica equipada com o gerador de indução com o rotor duplamente alimentado. O controlo preditivo é aplicado à velocidade das pás para permitir a máxima extração de energia do vento. A utilização deste controlador melhora o desempenho da conversão de energia.

Em [Schlipf12] é usada uma tecnologia de previsão de vento. Esta tecnologia impulsiona o uso de novos conceitos de controlo tais como o controlo antecipativo, *feedforward*, e o modelo de controlo preditivo. São encontradas vantagens na utilização da previsão do vento no que respeita à redução da fadiga e dos esforços mecânicos na torre e nas pás.

Em [Feng13] é proposta uma estratégia de controlo tolerante a falhas numa turbina eólica. As falhas ocorrem nos sensores da velocidade de vento sendo necessário a estimação da velocidade efetiva do vento. O erro de estimação é formulado como a incerteza limitada e, portanto, um controlador MPC robusto é proposto.

Em [Chen09] é apresentado um tutorial sobre cálculo fracionário em controlo. Começa pela definição básica do cálculo fracionário, sistemas dinâmicos de ordem fracionária e controladores proporcionais, integrais e derivativos de ordem fracionária. Seguidamente são apresentados os métodos numéricos necessários

para a simulação de sistemas de ordem fracionária, são abordadas técnicas de discretização para os operadores fracionários e são apresentados os métodos de realização digitais e analógicos dos operadores de ordem fracionários.

Em [Monje08] é apresentado um método de sintonização dos parâmetros proporcional, integral, derivativo de ordem inteira e dos parâmetros integral e derivativo de ordem fracionária. A introdução dos parâmetros fracionários introduziu uma melhoria no que respeita à robustez do sistema.

Em [Petráš12] são apresentados métodos de sintonização e implementação de controladores de ordem fracionária. As técnicas de implementação são descritas por filtros de resposta ao impulso finita (FIR) e por filtros de resposta ao impulso de duração infinita (IIR) que podem ser de fácil implementação, por exemplo em microprocessadores.

Em [Silva03, Cafagna07] a evolução histórica da teoria do controlo fracionário está ligada à generalização do conceito de derivada de ordem fracionária (DF), i.e., para valores não inteiros de  $\mu$ , remonta ao início do desenvolvimento do cálculo diferencial. Na correspondência de Leibnitz com Bernoulli e, posteriormente, com L'Hôpital em 1695 e Wallis em 1697, estão alguns apontamentos relativos à derivada de ordem  $\mu = 1/2$ . No entanto, é devido a Euler em 1738 o primeiro passo, quando analisou o cálculo de DF para a função potência. Neste seguimento, Laplace em 1812, Lacroix em 1820 e Fourier em 1822 sugeriram também algumas ideias relativas ao cálculo de ordem fracionário (CF).

Em [Cafagna07] o verdadeiro início da teoria relativa ao cálculo da DF, é devido aos trabalhos de Abel e Liouville. Abel em 1823 investigou expressões fora do contexto do cálculo da DF, sendo os resultados de importância considerável para o desenvolvimento da teoria. Por seu lado Liouville entre 1822 e 1837 estudou explicitamente várias questões, nomeadamente a definição e o cálculo da DF

para valores complexos de  $\mu$ , a sua aplicação a equações diferenciais lineares ordinárias, o efeito de uma mudança de variável no cálculo da DF e a definição de uma DF como o limite do quociente  $D^\mu h f / h^\mu$  onde  $D^\mu h f$  é uma diferença de ordem fracionária.

Em [Barbosa06] os operadores de ordem fracionária têm uma memória associada, i.e., capturam uma infinidade de pontos de amostragem ou empregam séries infinitas. Em contraste, os operadores de ordem inteira não têm uma memória associada, apresentam um carácter puramente local, i.e., não capturam uma infinidade de pontos de amostragem ou empregam séries finitas.

Em [Valério05] o cálculo fracionário é uma ferramenta útil para o controlo. É possível modelar muitos sistemas com exatidão por meio de modelos fracionários, e, embora em tais casos se possam igualmente empregar modelos inteiros, a sua complexidade teria então de ser significativa, ou o seu desempenho insatisfatório. Os controladores fracionários alcançam bons desempenhos, tanto para sistemas inteiros como fracionários. Conseguem um grau significativo de robustez.

Em [Podlubny99] os controladores de ordem fracionária são baseados na teoria do CF, i.e., não inteiro. Sendo uma generalização da diferenciação e integração de ordem inteira para uma ordem arbitrária.

Em [Suárez03] é utilizado um controlador de ordem fracionária para controlar a direcção de um veículo eléctrico autónomo. São comparados os resultados do comportamento do controlador fracionário com os do comportamento de um controlador de ordem inteira. O controlador fracionário apresenta melhor desempenho que o controlador de ordem inteira.

Em [Petráš02] a utilização dos controladores fracionários na indústria melhora o controlo dos sistemas reais em comparação com os controladores de ordem inteira que estabilizam mais lentamente e têm oscilações maiores.

Em [Silva06] são aplicados controladores proporcional integral e derivativo de ordem fracionário num robô cuja locomoção é feita através de seis pernas. Tendo os controladores de ordem fracionária um desempenho aceitável para as diversas condições do solo.

Em [Melício10] é utilizado pela primeira vez o controlo fracionário no estudo de SCEE. São simuladas falhas no SCEE nomeadamente no controlo das pás da turbina e dos conversores e é analisado o comportamento harmónico da energia injetada na rede considerando a tensão da rede sem e com distorção harmónica.

#### *Conversores eletrónicos de energia*

Em [Pires00] a utilização de conversores eletrónicos de energia teve um incremento acentuado nas últimas décadas. Este incremento é devido à influência destes conversores no desenvolvimento de aplicações industriais de custo reduzido, compactas e de rendimento superior, quando comparadas com os equipamentos tradicionais.

Em [Melício05, Baroudi07] os conversores eletrónicos de energia permitem integrar os sistemas eólicos na rede elétrica. A utilização destes conversores permite a operação com turbinas de velocidade variável e incrementar a captação de energia do vento.

#### *Sistema de transmissão mecânico*

Em [Li07] o sistema eólico de grande valor de potência e tamanho impõe desafios como é o caso do comportamento flexível das pás, devido à sua grande envergadura. A envergadura e a flexibilidade das pás têm um impacte importante no estudo da estabilidade transitória do sistema eólico durante uma falha.

Em [Salman03, Li07, Ramtharan07] o rotor dos sistemas eólicos, embora possa ser estudado utilizando o método dos elementos finitos, tem como desvantagem o facto de que este método não é facilmente implementado nos programas informáticos utilizados no estudo dos sistemas de energia elétrica.

Em [Baroudi07, Melício10] a tecnologia dominante nos sistemas eólicos instalados no mundo utiliza uma caixa de velocidades no sistema de transmissão mecânico. O sistema de transmissão é o órgão mecânico que liga o rotor da turbina com o rotor do gerador.

### *Supervisor*

Em [Ramadge87] o supervisor avalia o desempenho do sistema em cada instante de tempo, visto que, é fundamental para o sucesso do sistema de controlo e para o objetivo final que é controlar a potência elétrica de saída em torno da referência.

Em [Qi11] é desenvolvido um supervisor preditivo para otimizar dois sistemas de conversão de energia, o sistema de conversão de energia eólica e o sistema de conversão de energia solar. É discutida a forma de como incorporar considerações de ordem prática, por exemplo, como reduzir os valores de pico de correntes de energia na formulação do problema de otimização no modelo preditivo.

Em [Sarrias11] é apresentado a modelação e controlo de um gerador de indução com o rotor duplamente alimentado acoplado a uma bateria para armazenar energia. O supervisor é desenvolvido para uma adequada gestão da energia, i.e., a bateria fornece ou armazena energia dependendo das condições da rede elétrica.

*Turbina eólica*

Em [Akmatov00, Xing05] a variação da velocidade e direção do vento com a turbulência atmosférica é significativa ao nível dos esforços mecânicos que o sistema eólico fica submetido nomeadamente, sobre as pás, a *nacelle*, o veio e a torre. Estes esforços atuando sobre os elementos mecânicos do sistema eólico são traduzidos em esforços: centrífugos, gravíticos e giroscópicos sobre a torre, produzindo oscilações mecânicas nomeadamente nas pás e na torre.

Em [Badrzadeh06, Muyeen06] o modelo com concentração de massas com aproximações mais complexas, permite caracterizar o comportamento flexível das pás, nomeadamente o veio numa configuração de duas massas permite estudar o sistema com precisão.

Em [Dolan06] a variação da velocidade e direção do vento com a turbulência atmosférica é significativa ao nível dos esforços mecânicos aos quais o sistema eólico fica submetido. Os ditos esforços mecânicos atuam nomeadamente, sobre as pás e a torre.

Em [Baroudi07] são descritas as configurações de conversores eletrónicos de energia aplicadas no passado e no presente aos sistemas de conversão de energia eólica, podendo utilizar o gerador síncrono de rotor bobinado, o gerador de indução de rotor em gaiola ou o gerador de indução com o rotor duplamente alimentado.

Em [Hansen08] a modelação e o controlo dos sistemas eólicos, são temas prioritários nas atividades de investigação em todo o mundo.

## 1.5 Organização do Texto

Ao escrever este trabalho houve o propósito de conseguir uma linguagem fácil, agradável e harmoniosa, para que o tema seja entendido pelo leitor com precisão, ordem e propriedade. Este propósito determinou a organização do texto seguido, estando dividido em seis capítulos.

O Capítulo 2 é destinado aos sistemas de conversão de energia eólica. O Capítulo 3 é destinado à modelação do sistema de conversão de energia eólica. O Capítulo 4 é destinado ao controlo e supervisão do sistema de conversão de energia eólica. O Capítulo 5 é destinado à simulação computacional. O Capítulo 6 conclui este trabalho. Seguidamente, é apresentada uma descrição mais detalhada do conteúdo de cada capítulo.

No Capítulo 2 é apresentada uma visão sobre o ressurgimento das energias renováveis, nomeadamente a energia eólica e respetivo enquadramento legal. São elencadas as tecnologias das turbinas eólicas no que respeita à classificação e limitação da potência e as tecnologias dos geradores dos sistemas eólicos, desde as simples e robustas turbinas eólicas de velocidade de rotação constante até aos sistemas de velocidade de rotação variável.

No Capítulo 3 é apresentada a modelação, os componentes e estrutura do sistema de conversão de energia eólica ligado a uma rede elétrica, estando sujeito a uma velocidade do vento com perturbações. O sistema de conversão de energia eólica é constituído por uma turbina eólica de velocidade variável, um sistema de transmissão mecânico descrito por um veio de duas massas, uma caixa de velocidades, um gerador de indução com o rotor duplamente alimentado e um conversor eletrónico de energia de dois níveis. São também definidas as regiões de operação de acordo com a velocidade do vento.

No Capítulo 4 é apresentado o controlo e a supervisão do sistema de conversão de energia eólica ligado a uma rede elétrica. O controlo do sistema de conversão de energia eólica é realizado utilizando vários tipos de controlo tais como: controladores de ordem inteira, i.e., clássico do tipo proporcional integral (PI), controladores de ordem fracionária (*fractional order proportional integral*, FOPI), controladores de lógica difusa (Fuzzy PI), controladores adaptativos, (*linear quadratic gaussian*, LQG) ou preditivos (*model predictive control*, MPC). A supervisão do sistema é baseada na máquina de estados finitos.

No Capítulo 5 são apresentados os resultados numéricos obtidos e as conclusões sobre o desempenho do sistema de conversão de energia eólica ligado a uma rede elétrica, recorrendo a simulações computacionais. O desempenho do sistema de conversão de energia eólica é estudado utilizando controladores do tipo PI, FOPI, Fuzzy PI, LQG ou MPC sem ou com a ação proveniente do nível superior da estrutura hierárquica de controlo, i.e., a ação do supervisor.

No Capítulo 6 são apresentadas as contribuições originais desta tese sobre o tema do controlo e supervisão de sistemas de conversão de energia eólica ligados à rede elétrica. São indicadas as publicações científicas que resultaram no contexto de divulgação à comunidade científica do trabalho de investigação que decorreu durante os trabalhos realizados para esta tese. No final do capítulo são indicadas linhas de investigação para futuros desenvolvimentos.

## 1.6 Notação

Em cada um dos capítulos desta tese é utilizada a notação mais usual na literatura especializada, harmonizando, sempre que possível, aspetos comuns a todos os capítulos. Contudo, quando necessário, em cada um dos capítulos é utilizada uma notação apropriada. As expressões matemáticas, figuras e tabelas são

identificadas com referência ao capítulo em que são apresentadas e são numeradas de forma sequencial no capítulo respectivo, sendo a numeração reiniciada quando se transita para o capítulo seguinte. A identificação de expressões matemáticas é efetuada através de parênteses curvos ( ) e a identificação de referências bibliográficas é efetuada através de parênteses retos [ ].

Esta tese está escrita em conformidade com o acordo ortográfico da língua portuguesa de 1990.

Os termos em inglês estão representados em itálico. Ao longo do texto são usados termos em inglês, por exemplo, *fuzzy*, *pitch* e *stall*, que apesar de terem tradução em português, é considerado que facilita a leitura da tese.

---

# CAPÍTULO

# 2

---

## Sistemas de Conversão de Energia Eólica

*Neste capítulo é apresentada uma visão sobre o ressurgimento das energias renováveis, nomeadamente a energia eólica e respetivo enquadramento legal. São elencadas as tecnologias das turbinas eólicas no que respeita à classificação e limitação da potência e as tecnologias dos geradores dos sistemas eólicos, desde as simples e robustas turbinas eólicas de velocidade de rotação constante até aos sistemas de velocidade de rotação variável.*

## 2.1 Introdução

A crise energética de 1973 teve como consequência o ressurgimento das energias renováveis. Este ressurgimento não só resultou da necessidade de assegurar a diversidade e segurança no fornecimento de energia mas também da obrigação de proteger o ambiente cuja degradação é acentuada pelo uso de combustíveis fósseis. A incorporação de fontes de energia renováveis contribuiu para a diminuição do recurso às centrais térmicas no sistema produtor elétrico, sendo uma medida importante na prossecução do objetivo de limitar as emissões dos gases de efeito de estufa para a atmosfera, visando o cumprimento do estabelecido no Protocolo de Quioto.

O ressurgimento das energias renováveis motivou muitos países para iniciar programas de investigação e desenvolvimento no âmbito do aproveitamento da energia do vento para a produção de energia elétrica. Particularmente significativo foi o programa de energia eólica iniciado nos EUA depois da crise energética de 1973, cujo primeiro resultado visível foi a instalação do primeiro conversor de energia eólica em 1975, i.e., o primeiro SCEE da era moderna, denominado de Mod 0 [Spera77], com uma potência nominal de 100 kW e com um rotor da turbina com duas pás, tendo cada pá uma envergadura de 19 m [Melício10]. A experiência de operação acumulada com este SCEE, e com mais quatro do mesmo tipo entretanto instaladas entre 1977 e 1980 permitiu concluir acerca da viabilidade da exploração dos SCEE.

Até 1980 foram construídos SCEE de pequenos valores de potência, utilizando geradores síncronos de rotor bobinado e geradores de indução com rotor em gaiola (GIRG), diretamente ligados à rede. Estes sistemas têm o inconveniente de não poderem funcionar com ventos de baixa velocidade, na medida em que a sua velocidade de rotação é quase constante. Nestes sistemas o controlo de potência era conseguido mediante a utilização de pás que entram em perda de sustentação, i.e., em *stall* a partir de determinado valor de velocidade do vento. A partir de

1980, a tecnologia dos SCEE começou a estar mais madura e também com o desenvolvimento dos interruptores de potência de corte comandado, começou a construção de sistemas de grande potência e de velocidade variável, equipados com controlo de potência por ajuste do ângulo do passo da pá, i.e., *pitch*. Estes sistemas de grande potência e de velocidade variável foram ligados à rede através de conversores eletrónicos de energia [Melício10].

Nos últimos 30 anos, a investigação sobre a forma de usar a energia eólica foca três vertentes: a dos sistemas de energia eólica autónomos, a dos sistemas de energia eólica ligados à rede elétrica e a dos sistemas de grande tamanho e grandes valores de potência.

No caso do sistema autónomo o fornecimento da energia elétrica diretamente aos consumidores é especialmente interessante em áreas remotas ou com fracas condições de acessibilidade para linhas de energia elétrica. Neste caso, a geração eólica deve ser complementada com outras formas de geração ou de armazenamento de energia, visto que, o vento é uma fonte de energia imprevisível, i.e., não controlável, não assegurando condições para um fornecimento contínuo de energia elétrica [Melício04].

Em Portugal, os SCEE predominantes são os ligados à rede elétrica. As estatísticas mostram que em Dezembro de 2008, a configuração mais usada, quer para os SCEE instalados, quer em fase de construção, é a do gerador síncrono de velocidade variável (GSVV) e a segunda configuração mais usada é a do GIDA [Rodrigues08]. O GIDA, é uma tecnologia conhecida na literatura anglo-saxónica por *doubly fed induction generator* (DFIG).

## 2.2 Enquadramento Legal

A elevada dependência de Portugal em relação a recursos energéticos fósseis e o fraco aproveitamento das energias renováveis para a produção de energia elétrica motivou a necessidade de criação de legislação sobre as energias renováveis. A legislação focalizada sobre a energia eólica é apresentada de seguida [Web1]:

Em 1988, é criada a primeira legislação, através do Decreto de Lei n.º189/88 de 27 de Maio. Nesta legislação são estabelecidas normas relativas à produção de energia elétrica por produtores independentes ou coletivos de direito público ou privado. Neste Decreto de Lei consta a imposição de utilização de recursos de energias renováveis e recursos fósseis mais abundantes, i.e., carvão e resíduos, existindo um limite de potência máximo de 10 MVA para geração ligada a redes de alta tensão, e de 5 MVA e 100 kVA, respetivamente, para produtores de média e baixa tensão.

Em 1999, surge o Decreto de Lei n.º 168/99 a 18 de Maio, que revê as normas aplicadas à produção de energia elétrica no âmbito dos produtores independentes que exploram os recursos renováveis ou resíduos industriais, agrícolas ou urbanos. Neste documento para além das inúmeras reestruturações ao Decreto de Lei de 1988, é aprovada a alteração das tarifas de eletricidade produzida nos recursos de energias renováveis e recursos fósseis, surgindo deste modo as chamadas tarifas verde que servem de incentivo a este modo de produção.

Em 2001 e 2002 houve a necessidade de recorrer novamente a alterações na regulação dos pequenos produtores de energia elétrica através de fontes de energia renováveis. As alterações podem ser consultadas no Decreto de Lei n.º 339-C/2001 de 29 de Dezembro e na portaria n.º 295/2002 DR 66 Série I-B.

Em 2004, no Despacho conjunto n.º 51/2004 é considerado o reconhecimento da prioridade atribuída pela União Europeia e pelos Estados membros à promoção do aumento da contribuição de fontes de energia renováveis para a produção de energia elétrica.

No ano de 2005, foram revistos os fatores para o cálculo do valor da remuneração pelo fornecimento da energia produzida em centrais renováveis entregue à rede do Sistema Elétrico Português através do Decreto-Lei n.º 33-A/2005 de 16 de Fevereiro. A 15 de Abril de 2005, o Decreto-Lei n.º 33-A/2005 sofreu uma retificação, definindo procedimentos para atribuição de potência disponível na mesma rede e prazos para obtenção da licença de estabelecimento para centrais renováveis, tendo em vista a dificuldade de implementação de algumas instalações devido a problemas como o sobreequipamento no caso das centrais eólicas. O sobreequipamento é entendido como a instalação de novos aerogeradores destinados a conseguir um aumento da potência instalada em centros produtores eólicos. Este aumento está limitado a 20 % da potência de ligação às redes [DecretoLei10].

Em 2007, no Decreto-Lei n.º 225/2007 de 31 de Maio, é efetuada nova redação das medidas tomadas em 2005, havendo sempre o intuito de incentivar a implementação de infraestruturas e equipamentos baseados no aproveitamento de energias renováveis. Neste mesmo decreto, houve também algumas alterações referentes à portaria n.º 295/2002 e ao despacho n.º 51/2004. A 24 de julho de 2007, à semelhança do que ocorreu em 2005, houve uma retificação ao Decreto-Lei n.º 225/2007.

Em 2010, saiu o Decreto-Lei n.º 51/2010 de 20 de Maio, que diz respeito à matéria referente a energias renováveis com maior incidência na energia eólica. Este decreto apresenta um novo enquadramento jurídico para o sobreequipamento em centrais eólicas. Este decreto tem como objetivo a simplificação do procedimento para a instalação de sobreequipamento em

centrais eólicas, de modo a que o Governo cumpra os objetivos que pretende em 2020, i.e., assegurar a duplicação da capacidade de produção de energia elétrica, eliminando importações, reduzindo a utilização das centrais mais poluentes e contribuindo para que, em 2020, 60 % da produção de energia elétrica seja feita a partir de fontes renováveis;

Em 2010, no Decreto-Lei n.º 141/2010 de 31 de dezembro, entretanto alterado pelo Decreto-Lei n.º 39/2013 de 18 de março, que transpôs parcialmente a Diretiva FER e o Plano Nacional de Ação para as Energias Renováveis para o período 2013-2020 (PNAER 2020), é estabelecida a meta de 31 % para a utilização de energia renovável no consumo final bruto de energia e 10% para o consumo energético nos transportes, em 2020. Está prevista também a incorporação de 59,6 % de energia renovável na eletricidade até 2020 [Fernandes14].

Um dos motivos base que está por detrás de tanta reestruturação legislativa é a necessidade de baixar a emissão de poluentes, proveniente da utilização de recursos fósseis para produção de energia elétrica. Esta necessidade tem maior relevância após o protocolo de Quioto.

## **2.3 Tecnologia das Turbinas Eólicas**

A tecnologia das turbinas eólicas é das tecnologias renováveis a mais madura. Nos últimos 20 anos, o desenvolvimento das turbinas eólicas tem tido um crescimento substancial, de tal forma que a energia eólica é considerada como uma tecnologia madura sendo relevante como fonte renovável na conversão de outras formas de energia para a forma de energia elétrica.

Os SCEE são projetados para a máxima potência a uma determinada velocidade do vento. Esta potência é conhecida como potência nominal e a velocidade do vento a que ela é atingida designa-se por velocidade nominal do vento.

Os SCEE podem ser classificados de acordo com a posição do veio em turbinas de eixo vertical ou de eixo horizontal, podem ser distinguidas pelas características elétricas sendo classificadas pela gama de variação da velocidade, velocidade variável e velocidade fixa, e podem ser distinguidas pelas características de controlo sendo classificadas pelo controlo aerodinâmico, *stall* e *pitch* [Mohan03]. A configuração mais comum dos SCEE [Resende11, Entezami13] está representada na Figura 2.1

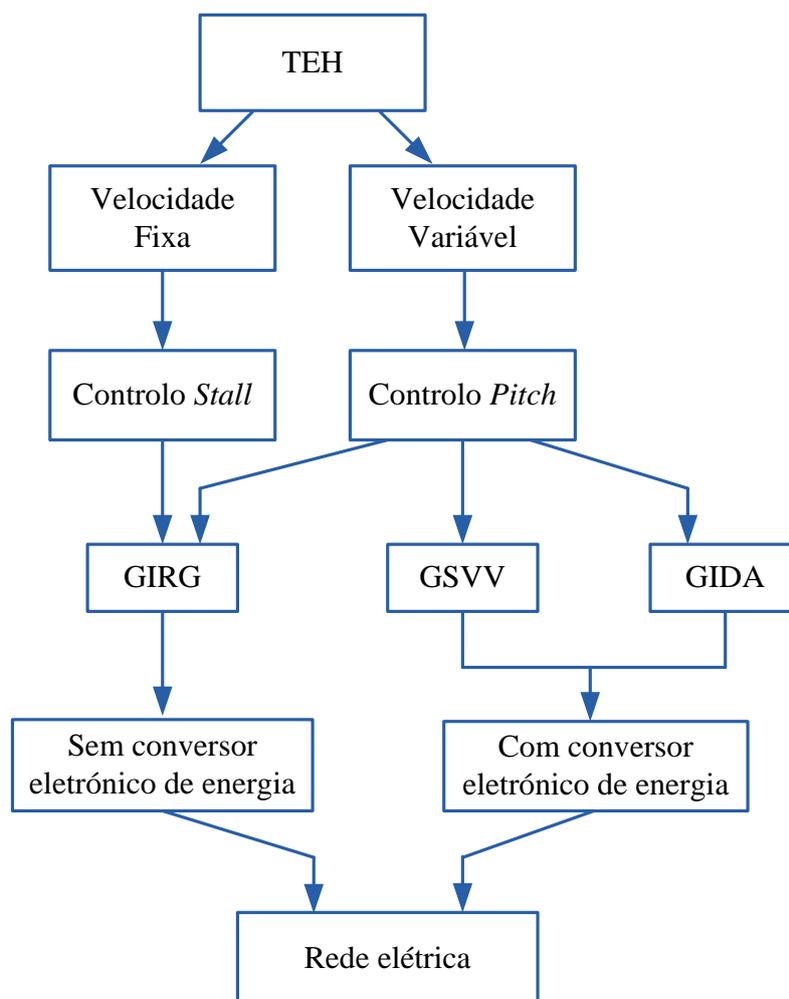


Figura 2.1 – A configuração mais comum dos SCEE.

Os SCEE mais utilizados são os que têm turbinas eólicas de eixo horizontal, que apesar de serem mais caros apresentam uma eficiência de produção de energia mais elevada o que a médio e longo prazo compensa o investimento inicial.

### 2.3.1 Limitações da Potência Máxima

Para velocidades de vento superiores à velocidade nominal do vento é necessário limitar a potência mecânica na turbina, utilizando procedimentos de regulação baseados em perda de sustentação de forma passiva ou ativa.

O controlo de potência nas turbinas que utilizam meios passivos é conseguido mediante a utilização de pás construídas com materiais aeroelásticos e projetadas de forma que entrem em perda de sustentação [Melício04].

A perda de sustentação, ocorre a partir de determinado valor de velocidade do vento sem necessidade de variação do ângulo de passo, i.e., a geometria da pá é projetada de modo a que no momento em que a velocidade do vento se torne muito elevada seja induzida uma turbulência que provoque a sua entrada em perda [Manwell03]. Quando a pá entra em perda a componente de sustentação diminui, ao mesmo tempo que a componente de arrastamento aumenta, chegando esta última a ser a componente dominante. Assim, sem sustentação o rotor deixa de acelerar [Melício10].

A vantagem do controlo de potência por *stall* é a ausência de partes móveis no rotor da turbina e por conseguinte têm uma menor complexidade quando comparada ao sistema de controlo ativo, pois estas pás não rodam em torno do seu eixo longitudinal, i.e., estão encastradas no cubo do rotor com um ângulo de passo fixo. Mas, por outro lado, apresenta uma maior complexidade nos projetos aerodinâmico e estrutural das pás, como é o caso de evitar as vibrações induzidas pela turbulência quando entram em perda, cerca de 2/3 das turbinas instaladas no mundo usam o controlo de potência por *stall* [Lubosny03, Manwell03, Melício10].

O controle de potência nas turbinas que utilizam meios ativos é conseguido variando o ângulo de passo da pá.

Nestas turbinas as pás são projetadas e construídas de forma a não estarem encastradas no cubo do rotor com um ângulo de passo fixo. No controle de potência por *pitch* as pás rodam em torno do seu eixo longitudinal ajustando o ângulo de passo, aumentando ou diminuindo a sustentação ou o arrastamento de forma a variar o coeficiente de potência. O controle de potência por ajuste do ângulo de passo da pá é mais complexo na medida em que utiliza um controlador de velocidade e partes móveis elétricas e mecânicas localizadas no rotor da turbina [Slootweg03b, Conroy07, Melício10].

A vantagem do controle de potência por ajuste do ângulo de passo da pá, é a precisão com que regula a entrega da energia captada ao vento no veio, nas situações em que as rajadas de vento possam provocar a elevação da potência para valores que ultrapassem a potência nominal do gerador. Outra vantagem é que o gerador pode funcionar à potência nominal para todas as velocidades do vento superiores à velocidade para a qual o SCEE atinge a potência nominal, enquanto que o controle de potência por perda de sustentação tem normalmente uma quebra da entrega de potência no veio à medida que a pá entra mais profundamente em perda, i.e., para as velocidades de vento superiores à velocidade para a qual o SCEE atinge a potência nominal [Lubosny03, Conroy07].

A turbina eólica de velocidade variável com controle de potência por ajuste do ângulo de passo da pá é considerada a tecnologia predominante nos SCEE [Gao93, Abrahamsen01, Mohan03]. O controle do ângulo de passo permite um melhor controle da potência e contribui para a redução dos esforços mecânicos e dos efeitos de fadiga na turbina [Mohan03].

## 2.3.2 Tecnologia dos Geradores

O gerador é o elemento central do SCEE, visto que é o componente que tem como função a conversão da energia mecânica captada ao vento em energia elétrica cuja potência é dimensionada para um conveniente aproveitamento da disponibilidade local da energia eólica [Melício10].

As tecnologias dos geradores, instaladas em Portugal, refletem a evolução tecnológica que se tem verificado nos SCEE ao longo dos anos. No triénio 2011-2014, os fabricantes que mais se destacaram em Portugal foram a Enercon, a Vestas, a Gamesa, a Nordex e a Senvion [E2P14]. A potência por fabricante ligada à rede, azul, em construção, verde, e adicionada, vermelha, em Portugal [E2P14] está representada na Figura 2.2.

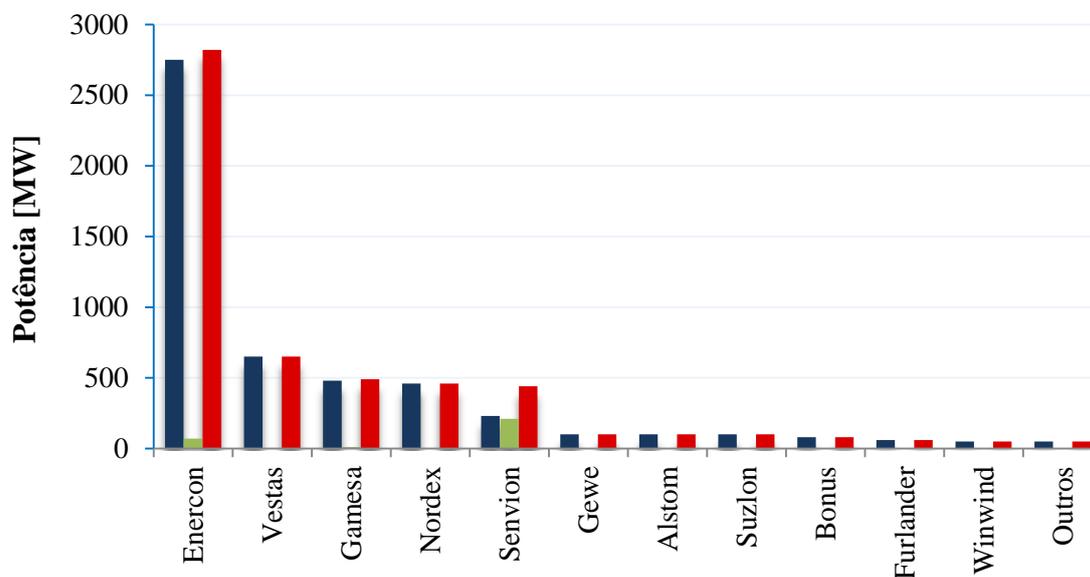


Figura 2.2 – Fabricantes de turbinas eólicas instaladas em Portugal, ligada à rede (azul), em construção (verde) e adicionada (vermelha). [E2P14].

Através da informação disponível por cada fabricante, é possível constatar que nos últimos 3 anos estão em operação dois tipos de geradores, os GIDA, e os GSVV. A Enercon utiliza os GSVV com uma tecnologia recente, dita de gerador anular. A Vestas, a Gamesa, a Nordex e a Senvion utilizam os GIDA. Ao contrário dos geradores assíncronos convencionais, o gerador anular é sujeito a um desgaste mecânico mínimo uma vez que não tem caixa de velocidades.

Os SCEE podem ser divididos em duas classes: os de velocidade de rotação constante, e os de velocidade de rotação variável. Contrariamente ao que a denominação faz supor, ambos conduzem à operação do sistema com velocidade de rotação variável, embora a última o possa fazer numa gama de velocidades bastante mais alargada [Estanqueiro07].

O SCEE de velocidade de rotação constante mais antigo, i.e., construído até os finais dos anos 80 do século vinte, está equipado com uma TEH com controlo de potência por perda de sustentação e um GIRG ligado diretamente à rede elétrica. Em 2003, é reportado em [Slootweg03d] que a configuração para o sistema de velocidade de rotação constante equipado com uma TEH começa a ser implementada com controlo de potência por ajuste do ângulo de passo da pá. Esta configuração do SCEE de velocidade de rotação constante diretamente ligado à rede elétrica está representada [Melício10] na Figura 2.3.

Este sistema tem uma caixa de velocidades no veio entre a turbina e o gerador, como órgão mecânico que liga o rotor da turbina com o rotor do gerador. A caixa de velocidades tem uma relação de transformação constante permitindo que a velocidade de rotação do gerador seja superior à velocidade de rotação da turbina [Baroudi07, Melício10].

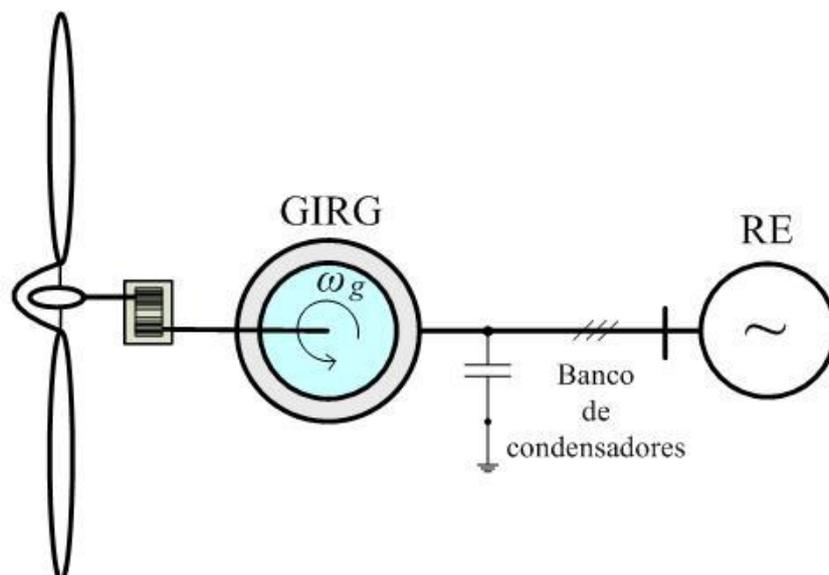


Figura 2.3 – Configuração do sistema diretamente ligado à rede [Melício10].

Na Figura 2.3., está representado o SCEE cuja velocidade de rotação é aproximadamente constante, já que a variação da velocidade de rotação em relação à velocidade de sincronismo do gerador é muito pequena, sendo as variações da velocidade de rotação determinadas pelo escorregamento do gerador [Melício10].

Os GIRG funcionam como geradores nas situações em que a velocidade de rotação do rotor é superior à velocidade de rotação do campo girante, i.e., para escorregamentos negativos. O campo eletromagnético essencial para a conversão de energia mecânica em energia elétrica é estabelecido através do estator do gerador. Tal facto implicaria que o gerador absorvesse sempre potência reativa da rede elétrica. Assim, este tipo de geradores, estão sempre equipados com bancos de condensadores por forma a compensar o seu fator de potência [Amenedo03].

Na década dos 90 do século vinte, começaram a ser instalados em Portugal os primeiros SCEE de velocidade variável, equipados com um GIDA ou com um GSVV [Melício10].

Os sistemas de velocidade variável são constituídos por uma TEH de velocidade variável, com controlo de potência por ajuste do ângulo de passo da pá. O SCEE equipado com um GIDA tem uma caixa de velocidades no veio entre a turbina e o gerador. Dependendo do fabricante, a caixa de velocidades pode ser de relação de transformação constante ou de relação de transformação variável [Amenedo03].

O GIDA é mais complexo que o GIRG e portanto mais dispendioso, requerendo também maior manutenção [Baroudi07]. O estator do gerador está diretamente ligado à rede elétrica, enquanto que o rotor está ligado à rede elétrica através de conversores eletrónicos de energia. O conversor eletrónico de energia é projetado para 30 % da potência nominal do sistema [Melício04, Bianchi07]. A configuração do SCEE de velocidade de rotação variável constituído por um GIDA [Slotweg03d, Melício10] está representada na Figura 2.4.

Para velocidades de rotação do GIDA acima da velocidade de sincronismo, i.e., para escorregamentos negativos, é possível extrair energia pelo rotor, sendo este modo de funcionamento denominado por super-síncrono [Lubosny03, Melício10]. O modo de funcionamento super-síncrono está representado na Figura 2.5.

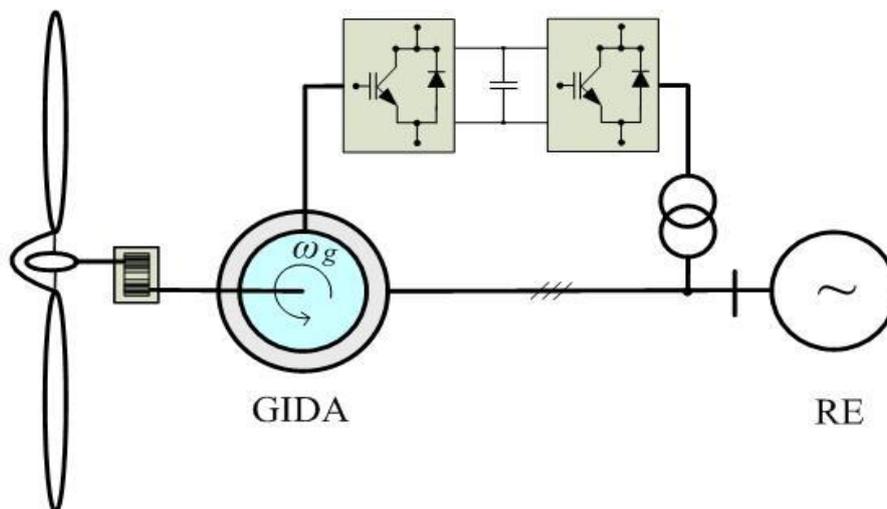


Figura 2.4 – Configuração do sistema constituído por um GIDA [Melício10].

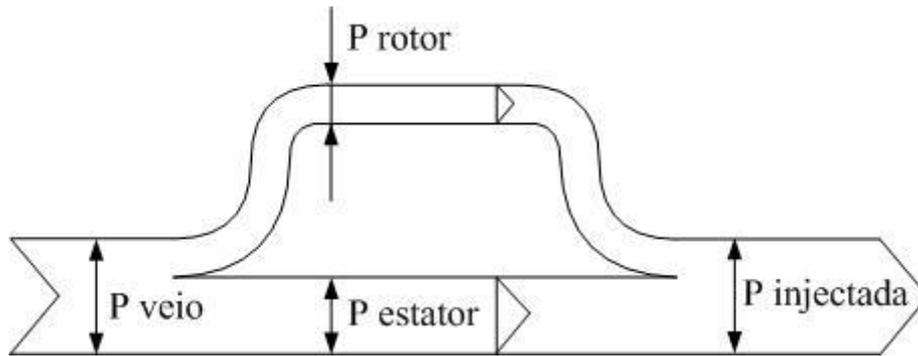


Figura 2.5 – Modo de funcionamento super-síncrono [Melício10].

Para velocidades de rotação do GIDA abaixo da velocidade de sincronismo, i.e., para escorregamentos positivos, o gerador trabalha no modo de funcionamento denominado por sub-síncrono, sendo uma parte da energia fornecida pelo estator desviada para o rotor [Lubosny03, Melício10]. O modo do funcionamento do sub-síncrono é um modo do aproveitamento da energia do escorregamento característica do GIDA. O modo de funcionamento sub-síncrono está representado na Figura 2.6.

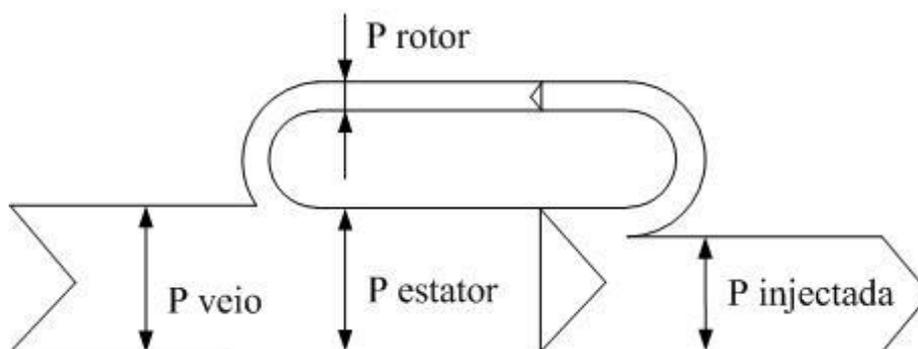


Figura 2.6 – Modo de funcionamento sub-síncrono [Melício10].

O SCEE com um GSVV está equipado com uma TEH diretamente ligada a um GSVV multipolar, estando ligado à rede através de conversores eletrónicos de energia. Nesta configuração do SCEE, não há necessidade de usar uma caixa de velocidades entre o rotor da turbina e o rotor do gerador, i.e., a turbina funciona

numa configuração diretamente ligada ao gerador. A configuração do SCEE de velocidade variável equipada com um GSVV [Slootweg03d, Melício10] está representada na Figura 2.7.

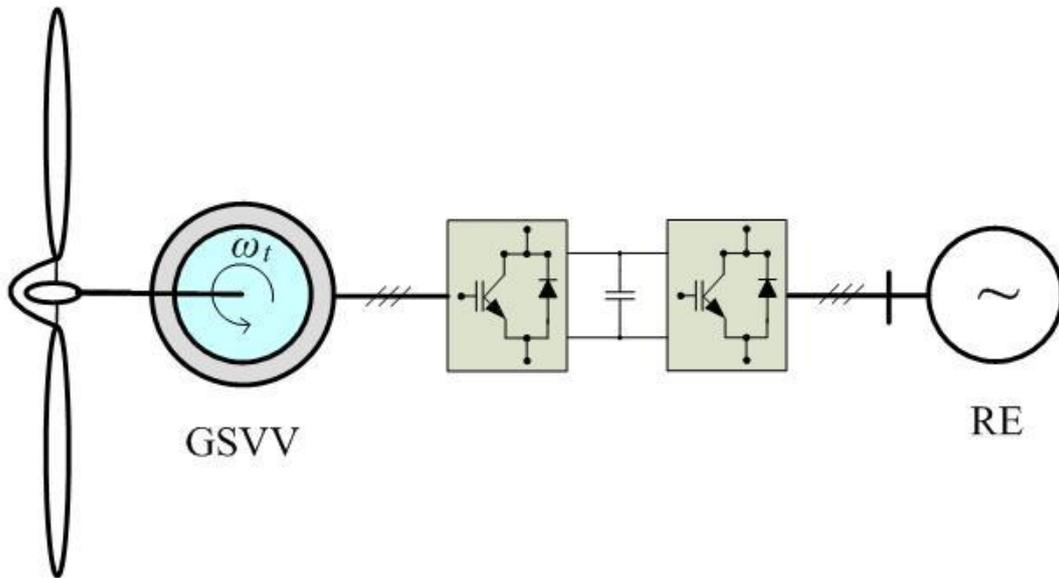


Figura 2.7 – Configuração do sistema constituído por um GSVV [Melício10].

## 2.4 Conclusões

O aproveitamento da fonte de energia eólica em SCEE contribui para a diminuição do recurso às centrais térmicas no sistema produtor elétrico, contribuindo para a prossecução do objetivo de limitar as emissões de gases por efeito de estufa para a atmosfera, visando o cumprimento do estabelecido no Protocolo de Quioto.

Os SCEE com TEH podem ser de velocidade fixa, dita de rotação constante ou de velocidade variável dita de rotação variável. Os de rotação fixa com controlo de potência do tipo *stall* ligados diretamente à rede elétrica são a configuração mais comum, os de rotação variável utilizam o controlo por ajuste do ângulo de passo da pá.

Os SCEE de velocidade de rotação constante têm uma gama de velocidades diminuta o que não permite um conveniente aproveitamento da TEH. Contrariamente, os de velocidade de rotação variável apresentam uma gama de velocidades mais alargada, o que permite um conveniente aproveitamento da captação de energia pelas pás da turbina. Contudo, a robustez e o baixo custo dos sistemas de velocidade ditos de constante têm sido mantidos na oferta comercial de alguns fabricantes.

Nos últimos 3 anos, em Portugal, é possível constatar que estão em operação dois tipos de geradores, os GIDA, e os GSVV.

As turbinas eólicas de velocidade variável com controlo de potência por ajuste do ângulo de passo da pá são consideradas a tecnologia predominante nos SCEE e têm sido progressivamente adotadas pelos fabricantes e atualmente integra a maioria da oferta comercial.

---

# CAPÍTULO

# 3

---

## Modelação do Sistema de Conversão de Energia Eólica

*Neste capítulo é apresentada a modelação, os componentes e estrutura do sistema de conversão de energia eólica ligado a uma rede elétrica, estando sujeito a uma velocidade do vento com perturbações. O sistema de conversão de energia eólica é constituído por uma turbina eólica de velocidade variável, um sistema de transmissão mecânico descrito por um veio de duas massas, uma caixa de velocidades, um gerador de indução com o rotor duplamente alimentado e um conversor eletrónico de energia de dois níveis. São também definidas as regiões de operação de acordo com a velocidade do vento.*

### 3.1 Introdução

Neste capítulo é desenvolvido um modelo matemático que representa de uma forma apropriada a dinâmica do SCEE. O modelo deve ser detalhado o suficiente para ser usado como modelo de simulação. O desenvolvimento do modelo matemático é baseado no modelo padrão desenvolvido em [Odgaard13], cuja potência elétrica de saída é 4,8 MW. Embora as turbinas eólicas sejam constituídas por subsistemas não lineares, [Odgaard13] apresenta uma modelação do modelo padrão apropriada, possível, disponibilizando um modelo de simulação de fácil utilização para a comunidade científica.

Os componentes mecânicos, elétricos e de controlo das turbinas de eixo horizontal (TEH) estão encerrados num invólucro dito de cabine ou *nacelle*. A *nacelle* assenta no cimo da torre por intermédio duma placa rotativa que permite orientar o eixo da turbina segundo a direção do vento *yaw*. A torre é em geral fabricada em betão ou em chapa de aço calandrada o que permite colocar o eixo da turbina a uma altura suficiente. A torre fabricada com chapa de aço calandrada é em geral constituída por vários troços ligados entre si por juntas aparafusadas de modo a obter uma forma cónica de diâmetro decrescente com a altura. A altura da torre é situada dentro da camada limite atmosférica: em geral, dentro desta camada a velocidade do vento aumenta com a altitude [Melicio10].

A velocidade de vento é nula na zona próxima da superfície terrestre e aproximadamente geostrófica na atmosfera livre. Na camada superficial, o perfil vertical é aproximadamente logarítmico do módulo da velocidade de vento. O perfil de velocidade de vento nesta camada é do tipo representado em Figura 3.1 [Martins08]. A torre que suporta a turbina deve ser suficientemente alta para que o escoamento disponível seja uniforme no tubo de corrente de escoamento definido pelas pás. O tubo de corrente de escoamento está representado [Martins08] do lado direito da Figura 3.1. Mas como essa altura pode implicar um elevado preço para a torre, a determinação da altura a adotar para a torre

resulta de um compromisso entre a pretensão de obter um perfil de velocidades do escoamento disponível o mais uniforme possível no tubo de corrente de escoamento e o preço admissível associado com a altura da torre [Melício10].

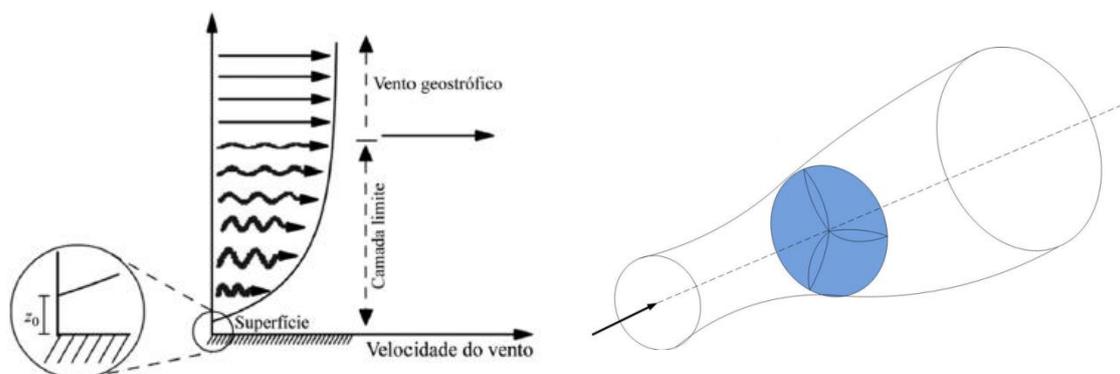


Figura 3.1 – Perfil de velocidades na camada limite atmosférica e escoamento no tubo de corrente do ar anterior e posterior ao rotor da turbina [Melício10].

Uma das principais dificuldades que surge na implementação da energia eólica é a elevada turbulência junto a superfície terrestre, área abaixo da camada limite atmosférica. Esta turbulência ocorre devido à criação de vórtices derivados dos muitos obstáculos presentes na superfície terrestre (ex.: casas, árvores), que podem afetar um perímetro de turbulência bastante mais elevado que a sua altura. A influência de um obstáculo no percurso do vento está representada na Figura 3.2.

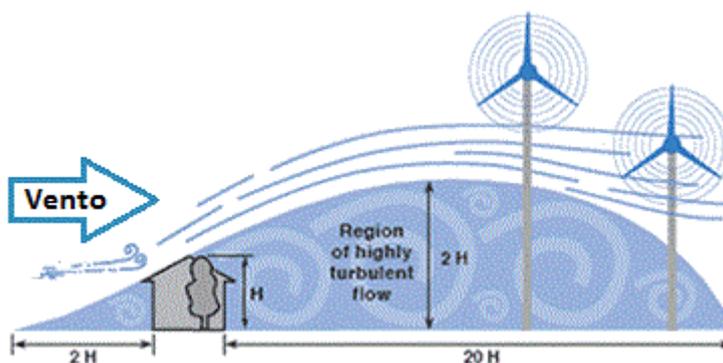


Figura 3.2 – Influência de um obstáculo no percurso do vento.

[<http://microeolica.weebly.com/vento.html>]

Por estes fatores, todos os obstáculos que se encontram a menos de 1 km de altitude devem ser equacionados na instalação de uma turbina eólica.

A temperatura, nos locais com altura e velocidade do vento necessária, normalmente superior a 5 m/s [Castro11], para a instalação de uma turbina eólica, não tem muita importância em comparação com os aspetos mecânicos, já que a variação da temperatura na atmosfera é de aproximadamente  $-1^{\circ}\text{C}$  por cada 100 m de altura [Castro11].

A configuração ideal para aproveitamento eólico é, por exemplo, um vento dominante ao longo de uma planície com pequenas rugosidades ou sobre o mar, enfrentando uma alta e alongada encosta com contornos suaves. Nestas condições a velocidade de vento aumenta e ocorre uma aproximação a um perfil de velocidades mais uniforme, resultando deste modo num maior potencial energético assim como uma redução dos esforços de fadiga. As diferenças entre um perfil vertical de velocidades num local onde não existe relevo e um em que existe estão representadas na Figura 3.3.

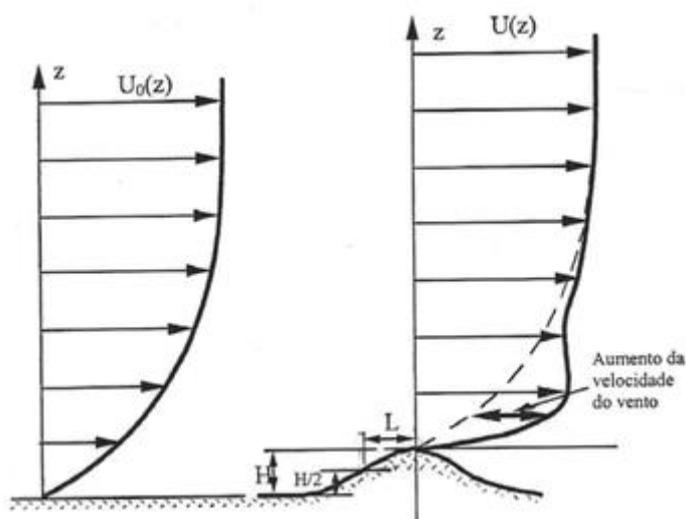


Figura 3.3 – Perfil de velocidades com e sem relevo.

[<http://microeolica.weebly.com/vento.html>]

Observando a Figura 3.3, é possível constatar que a velocidade de vento logo após a passagem por um relevo de contornos suaves é mais elevada e mais estável que no caso em que não existe relevo.

A zona normalmente utilizada para as turbinas eólicas é a que se estende até à altura de 100 m, também denominada de camada superficial. Nesta zona a topografia do terreno e a rugosidade do solo condicionam o perfil de velocidades de vento [Castro11].

Esta velocidade de vento segue o perfil representado pela lei logarítmica de Prandtl [Harrison00, Melicio10] e é dada por:

$$u(z) = u(z_R) \frac{\ln\left(\frac{z}{z_0}\right)}{\ln\left(\frac{z_R}{z_0}\right)} \quad (3.1)$$

sendo  $u(z)$  a velocidade média do vento à altura  $z$ ,  $z_R$  a altura de referência e  $z_0$  o comprimento característico da rugosidade do solo.

Observando a Figura 3.3 e (3.1) é possível constatar que para a instalação de uma turbina eólica, há que ter em consideração a velocidade média do vento medida durante um período de tempo (anos) e o tipo de localização para saber o qual é o campo de turbulências e consequentemente os esforços a que a turbina estará sujeita. No tipo de localização tem de se considerar a viabilidade da instalação, por exemplo, se está ou não próximo de uma rede de energia elétrica [Castro11].

Na literatura a configuração da turbina mais comum é designada por *upwind* [Spooner96, Melicio10]. Nesta configuração, as três pás estão situadas a montante da torre e posicionadas de forma equilibrada num plano perpendicular ao rotor, formando ângulos de 120°, funcionando para velocidades de vento compreendidas entre os valores de arranque *cut-in* da ordem dos 5 m/s e de

paragem *cut-out* da ordem dos 25 m/s. A configuração da turbina eólica mais comum está representada [Melicio10] na Figura 3.4.

Na configuração *upwind*, o vento que atravessa a área do rotor não é perturbado pela torre, o que já não sucede com a opção *downwind*, em que as pás estão situadas a jusante da torre, neste caso, o vento incidente é perturbado pela torre antes de atravessar a área do rotor da turbina [Amenedo03, Melicio10].

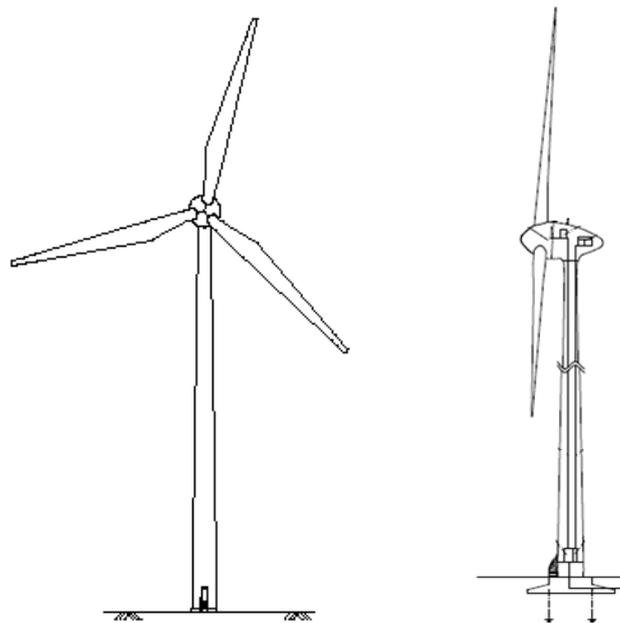


Figura 3.4 – Configuração da turbina eólica mais comum [Melício10].

## 3.2 Componentes do SCEE

O SCEE em estudo é descrito por uma turbina eólica horizontal com três pás e de velocidade variável, tendo como sistema de transmissão mecânica um rotor descrito pela concentração em duas massas, um gerador de indução com o rotor duplamente alimentado e um conversor eletrónico de energia de dois níveis. Neste SCEE, existe a necessidade de usar uma caixa de velocidades entre o rotor

da turbina e o GIDA como órgão mecânico de transmissão. Os componentes principais de um SCEE [Esbensen09] estão representados na Figura 3.5.

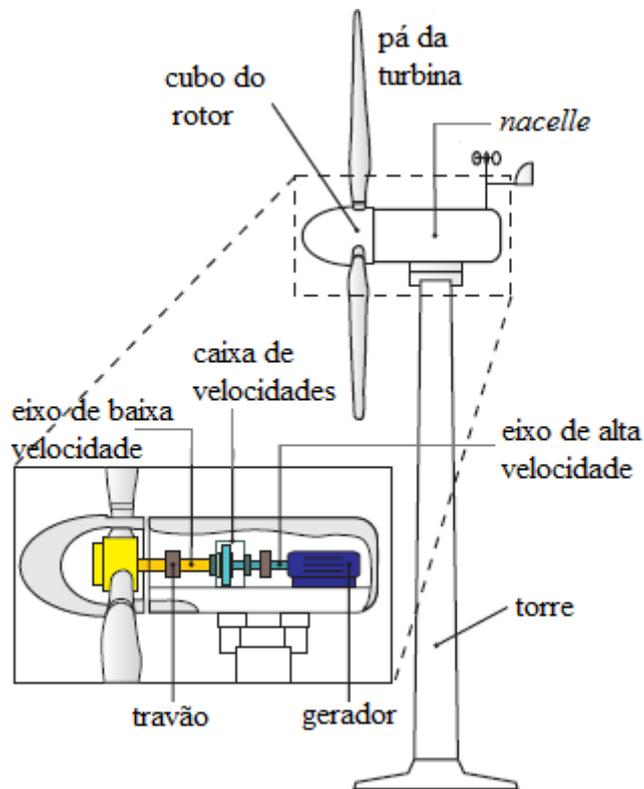


Figura 3.5 – Componentes principais de um SCEE [Esbensen09].

Os componentes principais da turbina eólica são:

- O rotor da turbina é formado pelo cubo do rotor em conjunto com as pás da turbina. O cubo do rotor faz a ligação entre as pás da turbina e o eixo de baixa velocidade de rotação. A variação do ângulo do passo da pá é usada na maximização da eficiência do SCEE;
- O eixo de baixa velocidade de rotação faz a ligação entre o rotor da turbina e a caixa de velocidades;

- A caixa de velocidades faz a ligação entre os eixos de baixa velocidade de rotação e alta velocidade de rotação, aumentando a velocidade de rotação para o nível exigido pelo gerador para produzir energia elétrica;
- O eixo de alta velocidade de rotação está ligado ao gerador;
- O gerador converte energia cinética de rotação em energia elétrica;
- A cabine, i.e., *nacelle* está localizada no topo da torre e contém a caixa de velocidades, os eixos de baixa e alta velocidade de rotação, o gerador, o sistema de controlo e o travão;
- A torre suporta a *nacelle* e o rotor da turbina;
- O travão é o órgão mecânico de segurança da turbina. Pode ser ativado de forma mecânica, elétrica ou hidráulica. O travão é usado em situações de emergência ou durante o estacionamento ou paragem.

A captação de energia começa com o aproveitamento da energia cinética contida na massa de ar, esta energia origina uma ação sobre as pás da turbina, causando o movimento de rotação da turbina, i.e., as pás absorvem a energia cinética contida no vento sendo convertida em energia mecânica através de um eixo de rotação de baixa velocidade.

A energia mecânica é controlada através da variação do ângulo de passo da pá, i.e., através do controlo da velocidade de rotação do rotor da turbina relativamente à velocidade do vento. Entre o rotor da turbina e o gerador, existe uma caixa de velocidades que transforma a energia de rotação do rotor da turbina em energia de rotação do rotor do gerador.

A energia mecânica é convertida em energia elétrica através do gerador. Os enrolamentos do estator do gerador estão diretamente ligados à rede elétrica. Os enrolamentos do rotor do gerador estão ligados à rede elétrica através de um conversor eletrónico de energia [Melício05].

Uma descrição mais detalhada acerca do funcionamento de uma turbina eólica pode ser encontrada em [Bianchi07, Burton11, Munteanu08].

### 3.3 Estrutura do Modelo do SCEE

O modelo do SCEE em estudo nesta tese é constituído por subsistemas denominados: pás e ângulo de passo, sistema de transmissão, gerador e conversor e o controlador [Odgaard13]. O diagrama de blocos do modelo do SCEE e a relação existente entre os subsistemas estão representados [Odgaard13] na Figura 3.6.

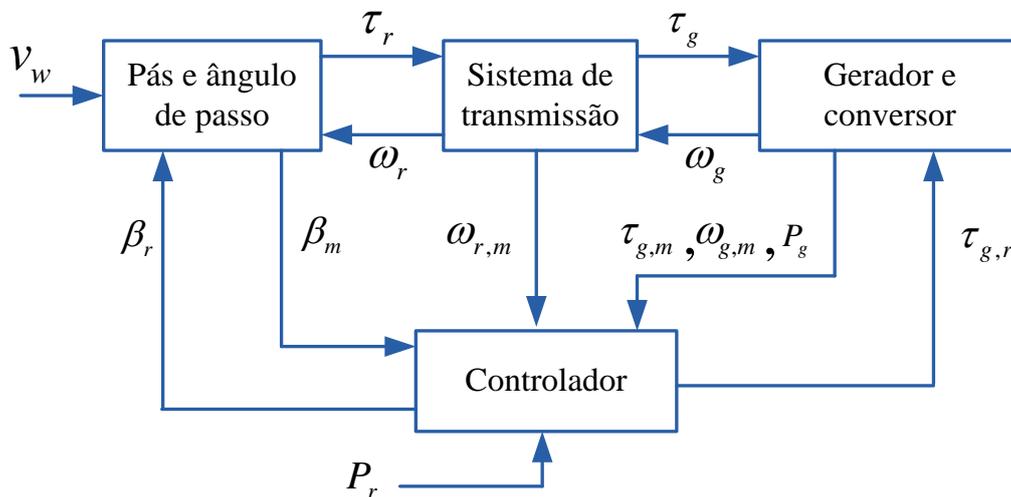


Figura 3.6 – Relação entre os subsistemas do SCEE [Odgaard13].

A Figura 3.6 mostra a relação existente entre os vários subsistemas e as respetivas variáveis. Sendo as variáveis entre os subsistemas definidas como:  $v_w$  a velocidade de vento que incide nas pás da turbina;  $\tau_r$  o binário do rotor da

turbina;  $\omega_r$  a velocidade de rotação do rotor da turbina;  $\tau_g$  o binário do gerador;  $\omega_g$  a velocidade de rotação do gerador;  $\beta_r$  o valor da referência do ângulo de passo da pá;  $\beta_m$  o valor medido do ângulo de passo da pá;  $\omega_{r,m}$  a velocidade de rotação medida do rotor da turbina;  $\omega_{g,m}$  a velocidade de rotação medida do gerador;  $\tau_{g,m}$  o valor medido do binário do gerador;  $\tau_{g,r}$  o valor de referência do binário do gerador;  $P_r$  o valor de referência da potência mecânica da turbina; e  $P_g$  a potência elétrica de saída do gerador.

O subsistema pás e ângulo de passo, denominado de modelo aerodinâmico, é afetado pela variação do ângulo de passo da pá, pela velocidade de rotação do rotor da turbina e pela velocidade de vento. Estas variáveis constituem as variáveis de entrada neste subsistema sendo as variáveis de saída o binário do rotor da turbina e o valor medido do ângulo de passo da pá.

O subsistema relativo ao sistema de transmissão, denominado de modelo mecânico, afeta o binário e a velocidade de rotação do rotor da turbina e do gerador. O binário aerodinâmico é transferido do rotor da turbina para o gerador através de uma caixa de velocidades. As variáveis de entrada neste subsistema são o binário do rotor da turbina e a velocidade de rotação do gerador sendo as variáveis de saída o binário do gerador, a velocidade de rotação do rotor da turbina e a velocidade de rotação medida do rotor da turbina.

O subsistema gerador e conversor, denominado de modelo elétrico, converte energia mecânica em energia elétrica. As variáveis de entrada neste subsistema são o binário do gerador e o valor de referência do binário do gerador sendo as variáveis de saída a potência elétrica, a velocidade de rotação do gerador, a velocidade de rotação medida do gerador e o binário medido do gerador.

O subsistema controlador, é projetado para manter a potência de saída em torno da potência nominal, ou de referência. Para alcançar esse objetivo, o controlador necessita da informação proveniente das variáveis de saída dos outros subsistemas e da potência de referência, de forma que o ângulo de passo da pá e o binário do gerador sejam ajustados para um novo valor de referência. Em situações em que não é possível atingir a potência de referência, o controlador tentará otimizar a produção de potência ao minimizar o erro de referência. Mais detalhes acerca das regiões de operação do controlador do SCEE serão descritos na secção 3.7.

### **3.4 Ângulo de Passo da Pá**

Este subsistema é uma combinação entre o modelo das pás da turbina e o ângulo de passo da pá. A modelação do atuador, cujo objetivo é variar o ângulo de passo da pá, é descrito por um sistema de segunda ordem [Odgaard13]. Por não ser do âmbito deste trabalho não se apresentam as considerações teóricas e as demonstrações das expressões utilizadas para descrever, no âmbito da aerodinâmica, a modelação da pá da turbina.

Na modelação da pá é utilizada a teoria do disco atuante que é um dispositivo genérico que extrai energia do vento. A teoria do disco atuante teve a sua origem no estudo das hélices propulsoras marítimas e aeronáuticas, tendo contribuições associadas com os trabalhos de Rankine em 1865 [Rankine865] e de Froude em 1885. Esta teoria consiste em modelar as pás do rotor por um disco sem espessura, através do qual as variáveis que caracterizam o escoamento (pressão e velocidade) variam de modo descontínuo [Kuik04]. A teoria do disco atuante ignora as variações circunferenciais no escoamento (supondo que o número de pás é muito grande, i.e., teoricamente infinito, cada uma delas produzindo uma contribuição elementar para a força propulsora) [Estanqueiro97, Brederode97].

No estudo da pá, o cubo do rotor da turbina interfere no escoamento introduzindo um atraso, ou efeito de retardamento [Melício10]. A interferência da turbina no escoamento é representada na Figura 3.7.



Figura 3.7 – Interferência da turbina no escoamento.

[<http://www.enercon.de>]

Nesta figura é mostrada a evolução do vento em torno da *nacelle*. A teoria do disco atuante considera a diferença entre as velocidades do vento a montante e a jusante de um rotor, i.e., do disco [Brederode97].

Supondo que o vento é um fluido invíscido, i.e., desprezando o efeito da viscosidade, é considerado um escoamento incompressível aquele em que as variações de pressão sejam suficientemente pequenas para não produzirem variações da massa específica do ar que se justifique contabilizar [Brederode97, Sørensen01, Kuik04].

A potência disponível no vento  $P_w$  que passa através da área varrida pelo rotor [Bianchi07, Melício10] é dada por:

$$P_w(t) = \frac{1}{2} \rho A v_w^3(t) \quad (3.2)$$

sendo  $A$  a área varrida pelas pás da turbina,  $\rho$  a densidade do ar e  $v_w$  a velocidade do vento de aproximação ao rotor, i.e., velocidade de incidências.

O vento após passar pelas pás da turbina perde velocidade, como tal, a velocidade de incidência é maior que a velocidade de saída. Mas esta velocidade de saída não pode ser nula, i.e., não é possível extrair toda a energia cinética contida na massa de ar que flui pelas pás da turbina. Isso significa que a potência mecânica extraída é reduzida, relativamente à potência disponível, por um fator denominado coeficiente de potência  $C_p$ . Assim, a potência mecânica extraída é dada por:

$$P_m(t) = P_w(t)C_p(\lambda(t), \beta(t)) \quad (3.3)$$

Em 1920, Albert Betz prova que a máxima potência mecânica extraída por uma turbina sob condições ideais do vento é dada por 16/27 da potência disponível no vento também conhecido como *limite de Betz* para turbinas eólicas [Betz20].

A interação entre o rotor e o escoamento é feita recorrendo a um parâmetro auxiliar denominado por coeficiente de velocidade periférica do rotor (*Tip Speed Ratio*, TSR) [Brederode97]. O TSR é normalmente indicado por  $\lambda$  e é definido pela razão entre a velocidade periférica na extremidade da pá e a velocidade do vento num ponto de raio  $R_p$  da envergadura da pá e é dado por:

$$\lambda(t) = \frac{\omega_r(t)R_p}{v_w(t)} \quad (3.4)$$

sendo  $\omega_r$  a velocidade de rotação da turbina e  $v_w$  a velocidade do vento no ponto de raio da envergadura da pá.

A potência associada à energia captada pelas turbinas eólicas em condições normais deve ser limitada para valores que não ultrapassem a potência nominal do gerador. Pelo que, é necessário um controlo de potência. O controlo de potência é conseguido mediante a variação do coeficiente de potência. A variação do coeficiente de potência é conseguida utilizando meios passivos ou meios

ativos [Melício09]. Os meios passivos são baseados no desenho do perfil das pás de modo a que entrem em perda de sustentação a partir de determinada velocidade do vento, sem necessidade de variação do passo, e os meios ativos são baseados na variação do ângulo de passo das pás do rotor da turbina [Castro11].

O coeficiente de potência  $C_p = f(\lambda, \beta)$  é determinado por uma função não linear que depende de  $\lambda$  e do ângulo de passo da pá  $\beta$ . Por exemplo, nas referências [Lubosny03, Slootweg03c] é utilizada uma equação de ajuste dada por:

$$C_p = c_1 \left( \frac{c_2}{\lambda_i} - c_3 \beta - c_4 \beta^{c_5} - c_6 \right) e^{-\frac{c_7}{\lambda_i}} \quad (3.5)$$

em que  $\lambda_i$  é dada por:

$$\lambda_i = \frac{1}{\frac{1}{(\lambda + c_8 \beta)} - \frac{c_9}{(\beta^3 + 1)}} \quad (3.6)$$

sendo os valores dos coeficientes  $c_1$  até  $c_9$  ajustados para representar o comportamento aerodinâmico da turbina.

Em outro exemplo [Slootweg03a, Slootweg03b], o coeficiente de potência para uma turbina com controlo de potência por ajuste do ângulo de passo da pá é dado por:

$$C_p(\lambda, \beta) = 0.73 \left( \frac{151}{\lambda_i} - 0.58 \beta - 0.002 \beta^{2.14} - 13.2 \right) e^{-\frac{18.4}{\lambda_i}} \quad (3.7)$$

em que  $\lambda_i$  é dado por:

$$\lambda_i = \frac{1}{\frac{1}{(\lambda - 0.02 \beta)} - \frac{0.003}{(\beta^3 + 1)}} \quad (3.8)$$

As expressões (3.7) e (3.8) foram as escolhidas para modelar o comportamento do coeficiente de potência da turbina eólica com controlo de potência por *pitch* em estudo nesta tese. O máximo do coeficiente de potência  $C_{p\max}$  para uma turbina com controlo de potência por *pitch* considerando (3.7) e (3.8) é determinado pela resolução do problema de programação matemática dado por:

$$c_{p\max}(\lambda_{opt}(0), 0) = \max \quad 110.23 \left( \frac{1}{\lambda} - 0.119749 \right) e^{-18.4(1/\lambda - 0.003)}$$

sujeito a

$$\lambda \geq 0$$
(3.9)

cuja solução é dada por:

$$c_{p\max}(\lambda_{opt}(0), 0) = 0.4554$$
(3.10)

$$\lambda_{opt}(0) = 6.743$$
(3.11)

O coeficiente de potência utilizado no modelo padrão é representado na Figura 3.8.

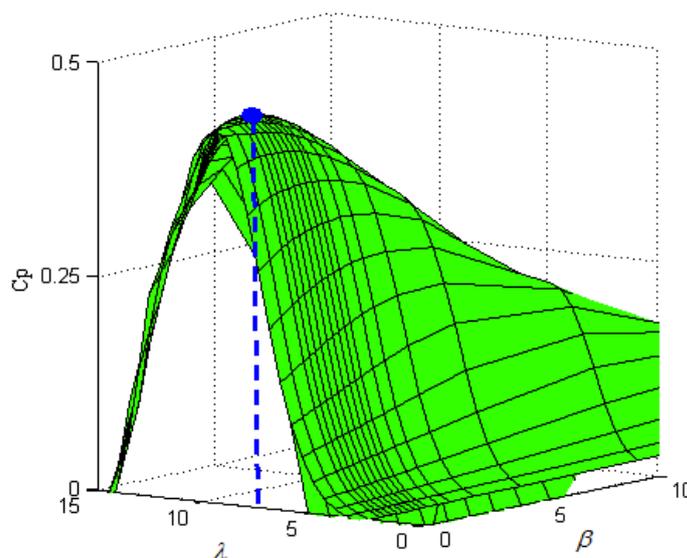


Figura 3.8 – Coeficiente de potência em função de  $\lambda$  e  $\beta$ .

Através da Figura 3.8 é possível destacar dois pontos importantes:

1. Para velocidades de vento baixas, a maximização da potência do vento captada pelas pás é obtida quando o ângulo de passo da pá da turbina é igual a zero graus,  $\beta = 0^\circ$ . Adicionalmente, a velocidade do rotor da turbina deve variar proporcionalmente com a velocidade do vento de forma que o coeficiente de velocidade periférica do rotor,  $\lambda$ , se mantenha nas proximidades do seu valor ótimo,  $\lambda_{opt}$ . Para atingir este objetivo, o binário do gerador é controlado e ajustado.
  
2. Para velocidades de ventos elevados, é possível reduzir uma parte da potência disponível do vento através da variação do ângulo de passo da pá, prevenindo desta forma que a potência elétrica de saída ultrapasse a potência de referência. No entanto, para assegurar um bom desempenho na regulação da potência, é utilizado o controlo do binário do gerador para ultrapassar a limitação física que existe na velocidade do atuador das pás da turbina e conseqüente limitação na variação do ângulo do passo da pá.

O binário aerodinâmico aplicado ao rotor da turbina é dado por:

$$\tau_r(t) = \frac{P_m(t)}{\omega_r(t)} \quad (3.12)$$

Substituindo (3.2), (3.3) e (3.4) em (3.12) a equação do binário mecânico da turbina [Johnson06] é dada por:

$$\tau_r(t) = \frac{\rho \pi R_p^3 C_p(\lambda(t), \beta(t)) v_w^2}{2\lambda(t)} \quad (3.13)$$

O subsistema do ângulo de passo da pá da turbina consiste em três atuadores idênticos que utilizam um mecanismo hidráulico para permitir a rotação das pás de forma a alterar o valor do ângulo de passo [Melício04]. Visto que os três atuadores são idênticos, a modelação do subsistema do ângulo de passo será efetuada apenas para um atuador, sendo descrito por um sistema de segunda ordem [Odgaard13]. O ângulo de passo da pá é dada por:

$$\ddot{\beta}(t) = -2\xi\omega_n(t)\dot{\beta}(t) - \omega_n^2\beta(t) + \omega_n^2\beta_r(t) \quad (3.14)$$

sendo  $\beta_r$  o ângulo de passo da pá de referência,  $\omega_n$  a frequência natural do sistema e  $\xi$  o coeficiente de amortecimento. Os parâmetros utilizados são  $\omega_n = 11.11$  rad/s e  $\xi = 0.6$ . Devido ao esforço suportado pelas pás, a variação do ângulo de passo da pá é limitada. São colocadas restrições no atuador que limitam a ação do ângulo de passo da pá entre  $-2^\circ$  e  $90^\circ$  [Odgaard13].

### 3.5 Sistema de Transmissão

O sistema de transmissão mecânico do SCEE converte o binário mecânico da turbina num binário aplicado ao gerador. O sistema de transmissão é o órgão mecânico que liga o rotor da turbina com o rotor do gerador, i.e., transfere a energia mecânica do vento extraída pelas pás da turbina para o rotor do gerador. Este SCEE tem no sistema de transmissão uma caixa de velocidades como elemento mecânico que permite que a velocidade de rotação do gerador [Baroudi07, Melício10] seja superior à velocidade de rotação da turbina.

O sistema de transmissão mecânico tem um veio descrito pela consideração de modelos com concentração em duas massas [Melício05, Melício10], incluindo um eixo de transmissão de baixa velocidade de rotação do lado do rotor da

turbina e um eixo de alta velocidade de rotação do lado do rotor do gerador, ligados entre si através de uma caixa de velocidades.

Na primeira massa é concentrada a massa do cubo do rotor, das pás e do eixo de baixa velocidade, i.e., a massa da turbina cujo momento de inércia é indicado por  $J_r$ . Na segunda massa é concentrada a massa do rotor do gerador e do eixo de rotação de alta velocidade cujo momento de inércia é indicado por  $J_g$ .

Os veios de baixa velocidade e alta velocidade de rotação estão ligados através de uma caixa de velocidades definida pela relação entre dentes  $N_g$ ; as grandezas  $K_{dt}$  e  $B_{dt}$  são, respetivamente, a constante de rigidez torsional e o coeficiente de amortecimento entre o eixo de rotação de baixa velocidade e a caixa de velocidades. O veio com a configuração de duas massas está representado [Melicio10] na Figura 3.9.

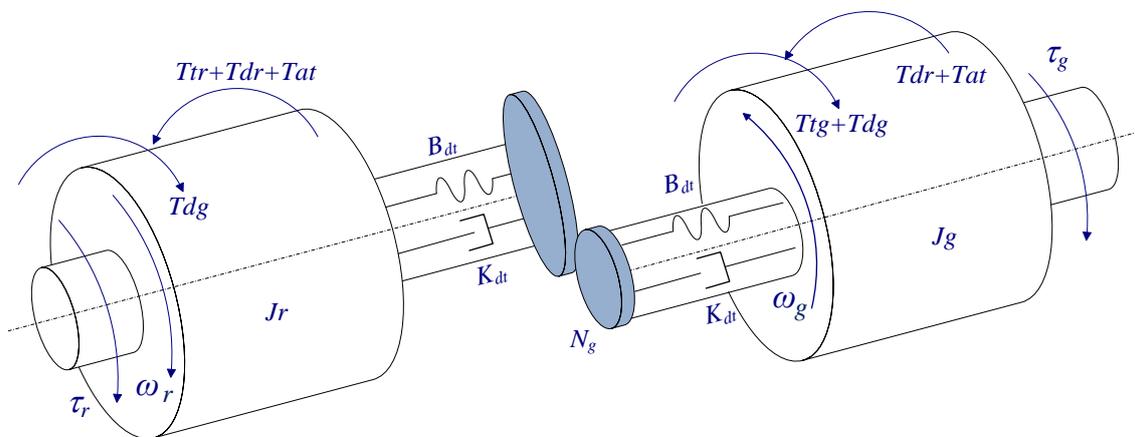


Figura 3.9 – O veio com uma configuração de duas massas.

O binário de torção  $T_{dr}$  devido ao comportamento elástico do veio do lado da turbina é dado por:

$$T_{dr}(t) = B_{dt} \omega_r(t) \quad (3.15)$$

sendo  $\omega_r$  a velocidade de rotação do rotor da turbina.

O binário de torção  $T_{dg}$  devido ao comportamento elástico do veio do lado do gerador é dado por:

$$T_{dg}(t) = B_{dt} \omega_g(t) \quad (3.16)$$

sendo  $\omega_g$  a velocidade de rotação do gerador.

O atrito viscoso do rotor da turbina origina um binário resistente  $T_{tr}$  dado por:

$$T_{tr}(t) = B_r \omega_r(t) \quad (3.17)$$

sendo  $B_r$  o coeficiente de atrito viscoso do rotor da turbina.

De igual forma ao atrito viscoso do rotor da turbina, o atrito viscoso do rotor do gerador origina um binário resistente  $T_{tg}$  dado por:

$$T_{tg}(t) = B_g \omega_g(t) \quad (3.18)$$

sendo  $B_g$  o coeficiente de atrito viscoso do rotor do gerador.

No veio com uma configuração de duas massas o desvio angular da rotação do elemento elástico  $\theta_\Delta$  é dado por:

$$\theta_\Delta(t) = \theta_r(t) - \frac{1}{N_g} \theta_g(t) \quad (3.19)$$

sendo  $\theta_r$  a posição angular do veio da turbina e  $\theta_g$  a posição angular do veio do gerador.

O binário devido ao comportamento rígido do veio é dado por:

$$T_{at}(t) = K_{dt} \theta_\Delta(t) \quad (3.20)$$

O sistema de transmissão mecânico é projetado de forma a suportar as forças que resultam da conversão de velocidade entre eixos e o seu comportamento é descrito por três equações de ordem diferencial.

Usando (3.15) a (3.20) é obtido o modelo dinâmico do sistema de transmissão [Odgaard13] dadas por:

$$\dot{\omega}_r(t) = \frac{1}{J_r} \left[ -(T_{dr}(t) + T_{lr}(t)) + \frac{T_{dg}(t)}{N_g} - T_{at}(t) + \tau_r(t) \right] \quad (3.21)$$

$$\dot{\omega}_g(t) = \frac{1}{J_g} \left[ \frac{T_{dr}(t)}{N_g} - \left( \frac{T_{dg}(t)}{N_g^2} + T_{lg}(t) \right) + \frac{T_{at}(t)}{N_g} - \tau_g(t) \right] \quad (3.22)$$

$$\dot{\theta}_\Delta(t) = \omega_r(t) - \frac{1}{N_g} \omega_g(t) \quad (3.23)$$

Estas equações são consequência da aplicação das equações mecânicas para o movimento angular.

### 3.6 Gerador e Conversor

O subsistema do conjunto gerador e conversor converte energia mecânica em energia elétrica. O gerador tem como função a conversão da energia mecânica disponível no veio em energia elétrica e o conversor eletrónico de energia tem como função assegurar a forma da onda de corrente e que a frequência da energia elétrica que é injetada seja igual à frequência da rede elétrica.

Nos SCEE de velocidade variável, os geradores de indução com rotor duplamente alimentados têm sido bastante utilizados [Chandrasekaran14, Sohn14]. O estator está diretamente ligado à rede elétrica e o rotor está ligado à

rede elétrica através de um conversor eletrónico de energia bidirecional [Melício10]. A configuração do SCEE estudado nesta tese está representada na Figura 3.10.

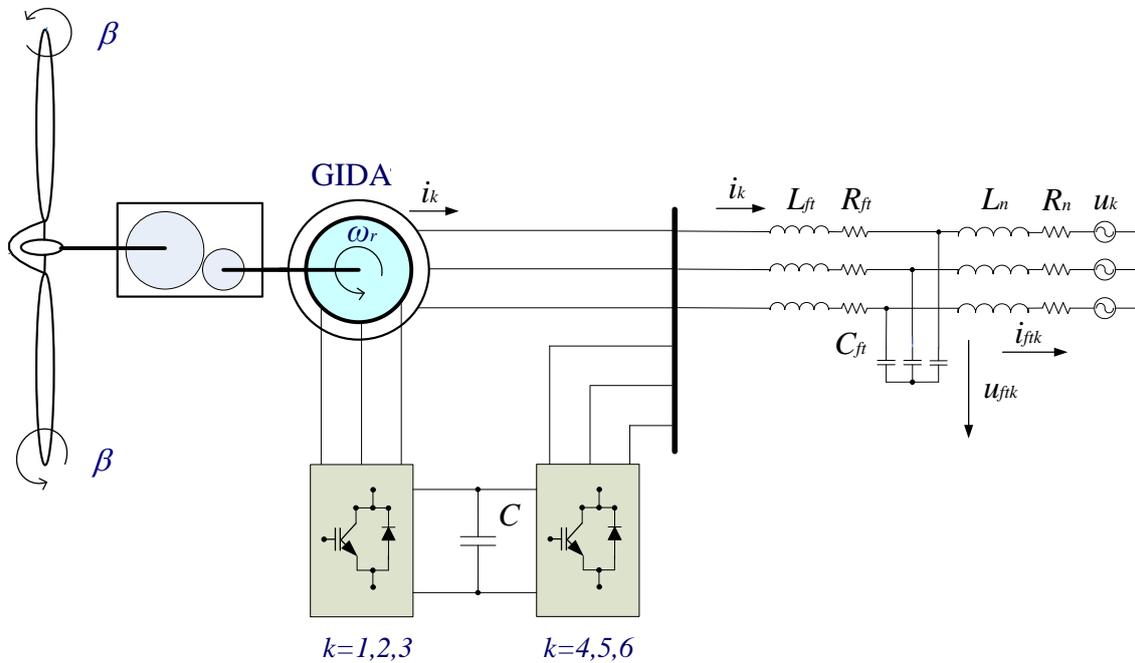


Figura 3.10 – Configuração do conjunto gerador e conversor de dois níveis [Melício10].

No modelo simplificado, i.e., no modelo padrão apresentado em [Odgaard13] apenas são tidas em consideração as variáveis relacionadas com o binário eléctrico e a potência eléctrica na modelação do conjunto gerador e conversor, pelo que não serão tidas em consideração os detalhes referentes às correntes e tensões.

De acordo com [Odgaard13], o modelo dinâmico do subsistema gerador e conversor é representado por um sistema de primeira ordem:

$$\dot{\tau}_g(t) = \alpha_{gc} (\tau_{g,r}(t) - \tau_g(t)) \quad (3.24)$$

sendo  $\tau_g$  o binário eléctrico do gerador,  $\tau_{g,r}$  o valor de referência do binário eléctrico do gerador e  $\alpha_{gc}$  um parâmetro do modelo gerador e conversor.

A potência elétrica é dada por:

$$P_g(t) = \eta_g \omega_g(t) \tau_g(t) \quad (3.25)$$

sendo  $\eta_g$  a eficiência do gerador.

### 3.7 Regiões de Operação

Nesta secção são apresentadas as regiões de operação em que o SCEE será controlado bem como as variáveis envolvidas no controlo. No controlo de um SCEE, o objetivo global é otimizar a energia elétrica fornecida à rede elétrica dentro de uma determinada gama de velocidade do vento, e minimizar os custos de produção de energia e de manutenção [Munteanu08]. Este custo depende das condições em que a turbina eólica está sujeita enquanto converte a energia captada ao vento, para tal são consideradas quatro regiões de operação de acordo com a variação do vento [Johnson06, Bianchi07], descritas na Figura 3.11.

A máxima potência elétrica associada à energia fornecida à rede elétrica é também designada como potência nominal ou de referência  $P_r$  e a velocidade de vento a que essa potência é atingida é designada por velocidade nominal  $v_{nom}$ . Dependendo do tipo de tecnologia, as turbinas eólicas começam a produzir energia elétrica para velocidades de vento superiores a 3 m/s ou 4 m/s, atingem a potência nominal para valores de velocidade de vento entre 12 m/s e 15 m/s e são desligadas quando o vento regista velocidades superiores a 25 m/s [Castro11, Resende11].

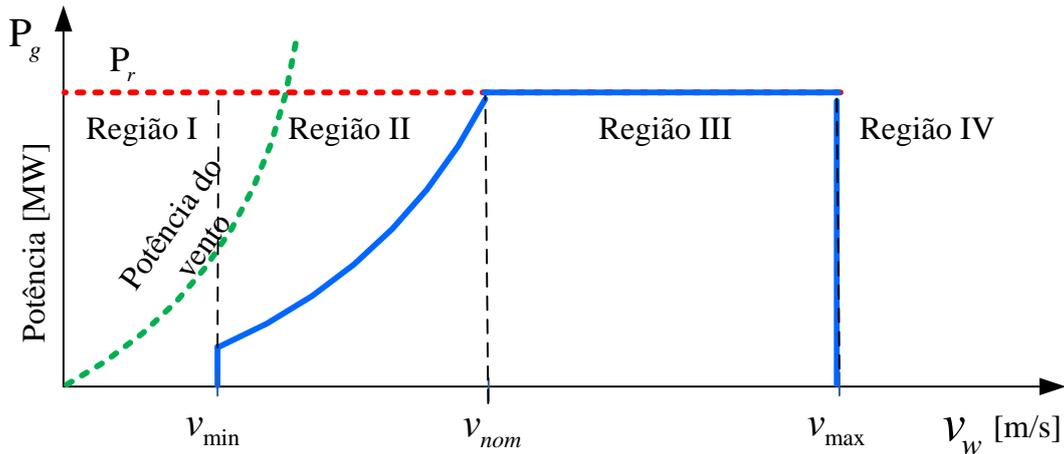


Figura 3.11 – Regiões de operação do SCEE.

Da Figura 3.11 é possível verificar que a turbina eólica apenas produz energia dentro de uma gama limitada de velocidade de vento. De seguida é efetuada a descrição das diferentes regiões:

- Na região I, a velocidade de vento está normalmente abaixo da velocidade mínima  $v_{min}$ , como tal, a velocidade do vento não é suficiente para superar a inércia da turbina eólica, pelo que não é possível gerar potência elétrica;
- Na região II, a velocidade de vento está entre a velocidade mínima  $v_{min}$  e a velocidade de vento  $v_{nom}$  para o qual a potência nominal é atingida, sendo o objetivo da turbina eólica maximizar a eficiência do SCEE, e consequentemente a potência, através da captação da maior quantidade de energia possível obtida através do vento. Este objetivo é alcançado através da variação da velocidade de rotação da turbina e fixando o ângulo de passo da pá no seu valor ótimo;
- Na região III, a velocidade de vento está entre  $v_{nom}$  e a velocidade máxima de vento  $v_{max}$ , sendo o objetivo da turbina eólica controlar a potência elétrica de saída de forma a atingir a potência de referência e controlar a velocidade de rotação do gerador de forma a atingir a velocidade de rotação nominal. Este objetivo é alcançado através da variação do ângulo de passo da pá;

- Na região IV, a velocidade de vento é superior ao limite máximo, normalmente superiores a 25 m/s, sendo o objetivo desligar a turbina eólica de forma a evitar danos e estragos de maior dimensão.

As regiões I e IV não são consideradas para efeitos de controlo no âmbito desta tese. O controlo contemplará as regiões II e III, apresentadas nesta secção, onde a região II é designada como otimização da potência e a região III é designada como seguimento da potência de referência.

### **3.8 Conclusões**

Neste capítulo é apresentado o modelo simplificado do SCEE ligado a uma rede elétrica. O SCEE é constituído por uma turbina eólica de eixo horizontal de velocidade variável, um sistema de transmissão mecânico descrito respetivamente por um veio de duas massas que descrevem o comportamento dinâmico das massas em rotação do eixo de baixa velocidade, a caixa de velocidades e as massas em rotação do eixo de alta velocidade, um gerador de indução com o rotor duplamente alimentado e um conversor eletrónico de energia.

A estrutura do SCEE é constituída por subsistemas que representam os sistemas elétrico, mecânico e o controlador. A modelação matemática dos subsistemas descreve a relação que existe entre as variáveis envolvidas no SCEE.

As regiões de operação em que o SCEE será controlado, são enumeradas por quatro condições: velocidade de vento insuficiente, velocidade de vento entre a mínima e a nominal, velocidade de vento entre a nominal e a máxima e velocidade de vento superior ao limite.

---

# CAPÍTULO

# 4

---

## Controlo e Supervisão

*Neste capítulo é apresentado o controlo e a supervisão do sistema de conversão de energia eólica ligado a uma rede elétrica. O controlo do sistema de conversão de energia eólica é conseguido utilizando diferentes tipos de controlo tais como controladores de ordem inteira, i.e., clássicos, de controladores de ordem fracionária, controladores de lógica difusa, controladores adaptativos ou preditivos. A supervisão do sistema é baseada na máquina de estados finitos.*

## 4.1 Introdução

Para o controlo do SCEE são utilizados controladores de ordem inteira, i.e., clássicos, de ordem fracionária, controladores de lógica difusa, controladores adaptativos e preditivos. De seguida são apresentados os motivos da escolha destes controladores.

Os controladores de ordem inteira ou clássicos são atualmente os mais utilizados no setor industrial por apresentarem uma estrutura simples e um desempenho robusto. Contudo, têm algumas limitações no que respeita ao desempenho em processos não-lineares [Ogata00, Astrom02].

Os controladores de ordem fracionária conseguem alguma vantagem comparativamente aos controladores de ordem inteira devido à introdução de dois parâmetros adicionais, o integral fracionário e o derivativo fracionário. A inclusão desses dois parâmetros permite que o controlador de ordem fracionária seja mais flexível e permita um melhor ajuste das propriedades dinâmicas de um sistema. Contudo, apesar de ter mais graus de liberdade, a limitação no desempenho ainda permanece [Barbosa05, Monje08].

Os controladores de lógica difusa são usados em algumas aplicações práticas tais como eletrodomésticos, na área automóvel e em algumas soluções específicas na indústria, nomeadamente, no controlo de máquinas, sistemas e processos. O controlador de lógica difusa permite obter resultados satisfatórios no controlo de sistemas não-lineares e sistemas cujo modelo analítico não é conhecido ou não é caracterizado de forma adequada. Os resultados satisfatórios são obtidos visto que o controlador consiste em regras heurísticas do tipo se-então, facilitando a incorporação do conhecimento do projetista na construção da base de conhecimentos. Contudo, o ajuste das regras linguísticas, a definição dos conjuntos difusos que irão representar o comportamento do sistema em termos

linguísticos e as correspondentes funções de pertença tornam este controlador difícil e moroso de afinar [Driankov93, Klir95].

Os controladores adaptativos têm a capacidade de se adaptarem a variações ou imprevistos, visto que, são controladores com parâmetros ajustáveis e apresentam um mecanismo para ajuste dos parâmetros. São constituídos por um identificador que estima de forma contínua os parâmetros de um modelo, a partir de valores de entrada e saída, e por um projeto de controlador que recalcula de forma contínua os ganhos do controlador tendo em conta as estimativas do modelo. Contudo, o processo de estimação de parâmetros é computacionalmente pesado [Astrom94, Levine96].

Os controladores preditivos permitem que o comportamento do modelo seja previsto com base em medições passadas. Estas medições são utilizadas para calcular as entradas de controlo futuras como parte da solução de um problema de otimização convexa. Estes controladores também têm a capacidade de incluir restrições no seu modelo. Contudo, a resolução do problema de otimização em tempo real pode ser computacionalmente inviável [Maciejowski02, Rawlings09].

#### **4.1.1 Estratégia de Controlo do Modelo Padrão**

Depois de justificada a escolha dos controladores é apresentada a estratégia de controlo que será utilizada no controlo do SCEE, concretamente no controlo do modelo padrão desenvolvido em [Odgaard13]. A estratégia de controlo abrange duas regiões de operação da turbina, a região II, cuja velocidade de vento se encontra entre a velocidade mínima e a nominal, e a região III, cuja velocidade de vento se encontra entre a velocidade nominal e a velocidade máxima. Para efeitos de leitura ao longo deste capítulo, a região de operação II corresponde ao modo de controlo 1 e a região de operação III corresponde ao modo de controlo 2.

O controlador é implementado em tempo discreto, com uma frequência de amostragem de 100 Hz. Consequentemente, todas as variáveis no domínio do tempo do controlador são designadas como variáveis em tempo discreto. Para a implementação digital do controlador é necessário realizar a discretização da malha de controlo e dos seus parâmetros. Para tal, é utilizado o método de aproximação trapezoidal para o termo integral [Franklin98] dado por:

$$s = \frac{2(z-1)}{T_s(z+1)} \tag{4.1}$$

sendo  $T_s$  o período de amostragem.

Os modos de controlo do subsistema controlador estão representados na Figura 4.1.

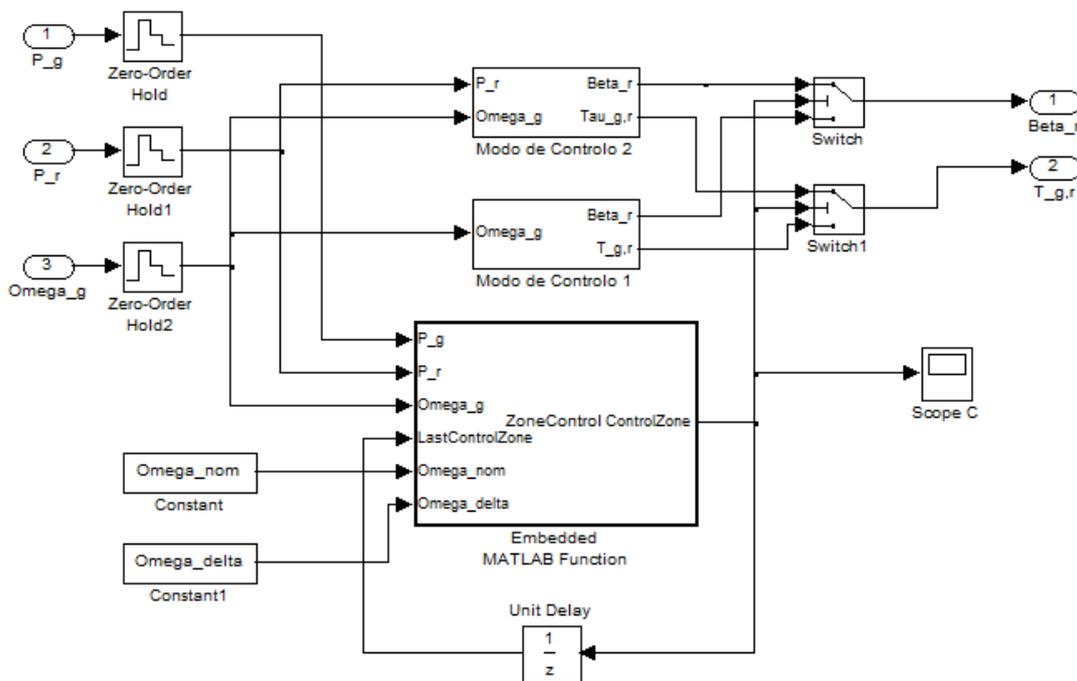


Figura 4.1 – Modos de controlo do modelo padrão.

O controlador inicia a sua ação no modo de controlo 1 e a comutação entre os dois modos de controlo é determinada pela potência elétrica à saída,  $P_g$ , e pela velocidade do gerador,  $\omega_g$ , de acordo com as seguintes condições [Odgaard13]:

$$\text{Modo de controlo 1} \rightarrow \text{modo 2: } P_g \geq P_r \text{ e } \omega_g \geq \omega_{nom}$$

$$\text{Modo de controlo 2} \rightarrow \text{modo 1: } \omega_g < \omega_{nom} - \omega_{\Delta}$$

sendo  $\omega_{\Delta}$  um pequeno desvio que introduz uma histerese na comutação evitando desta forma uma comutação elevada entre os dois modos de controlo.

Em ambos os modos de controlo, o controlador impõe uma referência para o binário do gerador,  $\tau_{g,r}$ , assim como para o ângulo de passo da pá,  $\beta_r$ . No modelo padrão é considerado que os três ângulos de passo das pás recebem a mesma referência.

Os dois modos de controlo são descritos de seguida:

- 1) Modo de controlo 1: como se pode verificar na Figura 3.8, o coeficiente de potência,  $C_p$ , atinge o seu valor máximo quando o ângulo de variação do passo da pá é igual a zero e o coeficiente de velocidade periférica do rotor é igual ao seu valor ótimo, sendo este modo de controlo denominado de velocidade variável com ângulo de passo fixo [Munteanu08]. O objetivo é fixar o valor de referência do ângulo de passo da pá em zero graus ( $\beta_r = 0$ ) e ajustar o valor de referência do binário do gerador através das seguintes equações:

$$\tau_{g,r}(k) = K_{opt} \left( \frac{\omega_g(k)}{N_g} \right)^2 \quad (4.2)$$

$$K_{opt} = \frac{1}{2} \rho A R^3 \frac{C_{p,max}}{\lambda_{opt}^3} \quad (4.3)$$

2) Modo de controlo 2: neste modo de controlo, as variáveis  $\beta_r$  e  $\tau_{g,r}$  devem ser ajustadas em simultâneo, sendo este modo de controlo denominado de velocidade variável com ângulo de passo variável [Munteanu08]. O objetivo é controlar a velocidade de rotação do gerador de modo a atingir a sua velocidade de rotação nominal, através da variação do ângulo de passo da pá e mantendo o binário do gerador no seu valor nominal. Contudo, devido à natureza turbulenta do vento e da resposta lenta da ação dos atuadores, a velocidade do gerador pode, por vezes, variar mais do que 5 % do seu valor nominal. Neste modo de controlo, o ajuste do valor de referência do ângulo de passo é calculado de acordo com as equações obtidas através dos controladores PI, FOPI, Fuzzy PI, LQG e MPC e o ajuste do valor de referência do binário do gerador é dada por:

$$\tau_{g,r}(k) = \frac{P_r(k)}{\omega_g(k)} \quad (4.4)$$

## 4.2 Controladores de Ordem Inteira

O controlador de ordem inteira é uma estrutura de controlo clássica amplamente utilizado, i.e., designada de controlo de três termos: o proporcional, o integral e o derivativo (PID) [Ogata00, Astrom02]. No controlo de processos industriais, mais de 95 % utilizam controladores do tipo PID sendo a maioria das malhas em cadeia fechada do tipo PI [Astrom02]. O controlador utilizado no controlo do SCEE apenas utiliza a ação proporcional e a ação integral [Odgaard13].

O controlador PI de ordem inteira no domínio do tempo é dado por:

$$u(t) = K_p e(t) + \frac{K_p}{T_i} \int_0^t e(t) dt \quad (4.5)$$

O sinal de erro entre a referência e a saída, i.e., o erro de controlo é dado por:

$$e(t) = r(t) - y(t) \quad (4.6)$$

sendo  $r$  o sinal de referência,  $y$  o sinal de saída do sistema,  $u$  o sinal de controlo. Os parâmetros de controlo são definidos como ganho proporcional  $K_p$  e constante de tempo integral  $T_i$ .

A função de transferência do controlador PI de ordem inteira é dada por:

$$U(s) = K_p \left( 1 + \frac{1}{T_i s} \right) E(s) \quad (4.7)$$

O diagrama de blocos do controlador PI discreto é representado na Figura 4.2.

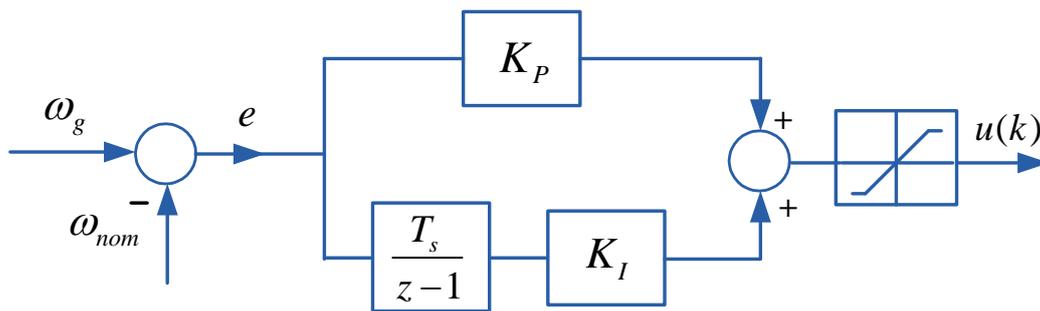


Figura 4.2 – Controlador PI discreto com saturação.

A equação às diferenças que traduz a ação do controlador PI [Odgaard13] é dada por:

$$\begin{cases} u(k) = u(k-1) + K_p e(k) + (K_i T_s - K_p) e(k-1) \\ e(k) = \omega_g(k) - \omega_{nom}(k) \end{cases} \quad (4.8)$$

sendo  $K_i = \frac{K_p}{T_i}$  o ganho integral. Os parâmetros considerados [Odgaard13] são os seguintes:  $K_p = 4$ ,  $K_i = 1$  e  $T_s = 0,01$  s.

### 4.3 Controladores de Ordem Fracionária

O controlador de ordem fracionária está baseado na utilização da teoria do cálculo de ordem fracionário (COF). O COF é uma generalização da diferenciação e integração de ordem inteira para valores não inteiros e valores complexos [Podlubny99, Melício10]. O uso do COF nos modelos matemáticos dos sistemas dinâmicos pode melhorar o seu desempenho, propriedades e incrementa as possibilidades do controlo [Jun06, Arijit09].

No COF a derivação e a integração são operações inversas, sendo o diferenciador de ordem fracionária indicado pelo operador generalista  ${}_a D_t^\mu$  [Ortigueira04, Calderón06] dado por:

$${}_a D_t^\delta = \begin{cases} \frac{d^\delta}{dt^\delta}, & \mathbb{R}(\mu) > 0 \\ 1, & \mathbb{R}(\mu) = 0 \\ \int_a^t (d\tau)^{-\delta}, & \mathbb{R}(\mu) < 0 \end{cases} \quad (4.9)$$

sendo  $\mu$  a ordem da derivada ou do integral e  $\mathbb{R}(\mu)$  a parte real de  $\mu$ , visto que pode tomar um valor arbitrário, real, racional, irracional ou mesmo complexo [Barbosa05].

A evolução histórica da generalização do conceito de derivada e integral de ordem fracionária, i.e., para valores não inteiros de  $\mu$ , remonta ao início do desenvolvimento do cálculo diferencial e integral, tendo sido objeto de várias contribuições. Sendo umas das mais frequentes as contribuições propostas por Reimann-Liouville e Grünwald–Letnikov.

A contribuição de Reimann-Liouville resulta da generalização da fórmula do integral de Cauchy, e a contribuição de Grünwald–Letnikov é considerada como sendo a mais fundamental, dado que é a que impõe menos restrições nas funções em que é aplicada [Barbosa05].

O integral de ordem fracionário proposto por Reimann-Liouville [Calderón06] é dado por:

$${}_a D_t^{-\mu} f(t) = \frac{1}{\Gamma(\mu)} \int_a^t (t - \tau)^{\mu-1} f(\tau) d\tau \quad \mu \in \mathbb{R} \quad (4.10)$$

A derivada de ordem fracionária proposta por Reimann-Liouville [Calderón06, Melício10] é dada por:

$${}_a D_t^\mu f(t) = \frac{1}{\Gamma(n - \mu)} \frac{d^n}{dt^n} \left[ \int_a^t \frac{f(\tau)}{(t - \tau)^{\mu-n+1}} d\tau \right] \quad \mu \in \mathbb{R} \quad (4.11)$$

em que a função  $\Gamma(n - \mu)$  é dada por:

$$\Gamma(x) \equiv \int_0^\infty y^{x-1} e^{-y} dy \quad (4.12)$$

sendo  $\Gamma(x)$  a função Gamma,  $a$  e  $t$  os limites da operação e  $\mu \in \mathbb{R}$  um número real que identifica a ordem fracionária do integral ou da derivada, que satisfaz as restrições  $0 < \mu \leq 1$ .

Assumindo que o limite  $a = 0$ , o operador diferenciador de ordem fracionária passa a ser,  ${}_0 D_t^{-\mu} \equiv D_t^{-\mu}$ .

O integral de ordem fracionário proposto por Grünwald–Letnikov [Cafagna07] é dado por :

$${}_a D_t^{-\mu} f(t) = \lim_{h \rightarrow 0} h^\mu \sum_{r=0}^{\frac{t-a}{h}} \frac{\Gamma(\mu+r)}{r! \Gamma(\mu)} f(t-rh) \quad \mu \in \mathbb{R} \quad (4.13)$$

A derivada de ordem fracionária proposta por Grünwald–Letnikov [Cafagna07] é dada por:

$${}_a D_t^\mu f(t) = \lim_{h \rightarrow 0} h^{-\mu} \sum_{r=0}^{\frac{t-a}{h}} (-1)^r \frac{\Gamma(\mu+1)}{r! \Gamma(\mu-r+1)} f(t-rh) \quad \mu \in \mathbb{R} \quad (4.14)$$

O controlador  $PI^\mu$  de ordem fracionária no domínio do tempo, que satisfaz a restrição  $0 < \mu < 1$  [Petráš02] é dada por:

$$u(t) = K_p e(t) + K_i D_t^{-\mu} e(t) \quad \mu \in \mathbb{R} \quad (4.15)$$

sendo  $K_p$  e  $K_i$  os ganhos proporcional e integral do controlador. Assumindo  $\mu = 1$  em (4.15) representa a equação integral do controlador  $PI$  clássico, no domínio do tempo.

A função de transferência do controlador  $PI^\mu$  de ordem fracionária é dada por:

$$G(s) = K_p + K_i s^{-\mu} \quad \mu \in \mathbb{R} \quad (4.16)$$

O controlador de ordem fracionária em comparação com o controlador clássico melhora a qualidade da energia injetada na rede elétrica pelo sistema, não afetando o desempenho dinâmico do sistema [Jun06, Arijit09], tendo um grau significativo de robustez [Valério05].

O diagrama de blocos do controlador  $PI^\mu$  de ordem fracionária [Melício10] está representado na Figura 4.3.

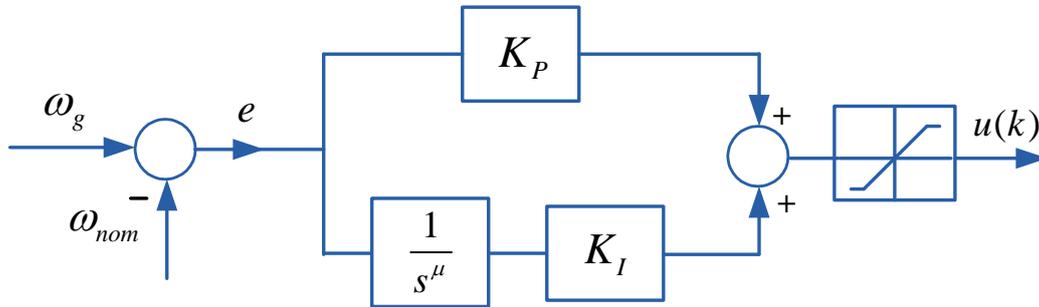


Figura 4.3 – Controlador  $PI^\mu$  de ordem fracionária com saturação.

Para a implementação digital do controlador de ordem fracionária é necessário realizar a discretização da malha de controlo e dos seus parâmetros. O controlador de ordem fracionária digital utiliza o método de aproximação trapezoidal baseado na regra de *Tustin* para o termo integral [Chen09] e os parâmetros discretos são calculados através do método desenvolvido por [Petráš11]. O método de aproximação trapezoidal baseado na regra de *Tustin* para o termo integral é dado por:

$$s^\mu \approx \left[ \frac{2}{T_s} \frac{1-z^{-1}}{1+z^{-1}} \right]^\mu \quad (4.17)$$

Os parâmetros considerados são os seguintes:  $K_p = 4$ ,  $K_i = 1$  [Odgaard13],  $\mu = 0.5$  [Maione07] e ordem de aproximação  $n = 2$ . Colocando os parâmetros na função desenvolvida por [Petráš11] é obtida a ação do controlador fracionário dada por:

$$\frac{U(z)}{E(z)} = \frac{4.071 - 1.965z^{-1} - 0.5088z^{-2}}{1 - 0.5z^{-1} - 0.125z^{-2}} \quad (4.18)$$

## 4.4 Controladores de Lógica Difusa

O controlador de lógica difusa, ou controlador difuso, é baseado nos conjuntos difusos e na teoria da lógica difusa proposta em [Zadeh65]. O conceito de conjunto difuso designa um conjunto em que a cada membro está associado um grau de pertença. O grau de pertença é uma variável contínua, em que valores elevados evidenciam um alto grau de pertença ao conjunto, enquanto valores baixos evidenciam um baixo grau de pertença.

Tradicionalmente, o comportamento dos sistemas através da lógica de *Boole* (0 ou 1) é o equivalente lógico do conceito operativo “tudo ou nada”. No entanto, em muitas situações, os sistemas não revelam esta dicotomia comportamental, apresentando antes múltiplas possibilidades de manifestação.

A capacidade criativa dos seres humanos permite ir além da solução que as máquinas computacionais proporcionam, devido ao facto de que as pessoas raciocinam de forma incerta, imprecisa ou difusa, enquanto as máquinas e computadores utilizam um raciocínio preciso e binário. Esta forma de raciocínio é denominada em inglês por *Fuzzy* que significa difuso ou vago.

A lógica difusa permite captar e representar o conhecimento humano, designadamente, incertezas ou imprecisões subjacentes ao próprio conhecimento, em que qualquer proposição é verdadeira para vários graus de veracidade, desde totalmente verdadeira até totalmente falsa. O facto de utilizar um método de traduzir expressões verbais vagas, imprecisas e qualitativas, comuns na comunicação humana em valores numéricos, permite converter a experiência humana numa forma compreensível para os computadores. Assim, a tecnologia possibilitada pela lógica difusa tem um imenso valor prático, tornando possível a inclusão da experiência de operadores humanos em controladores computadorizados [Mamdani75], possibilitando estratégias de tomadas de decisão em problemas complexos.

A ideia básica por detrás do controlo difuso consiste em incorporar a experiência do operador humano na conceção do controlador. Assim, a partir de um conjunto de regras linguísticas consequentes da experiência do operador e que descrevem a estratégia de controlo, é elaborado um algoritmo de controlo onde as regras linguísticas são substituídas por conjuntos difusos. As maiores vantagens desta abordagem são a possibilidade da implantação de não linearidades resultantes da experiência do operador, da intuição e dos conhecimentos heurísticos no controlador do processo.

#### 4.4.1 Configuração do Controlador Lógico Difuso

A configuração de um controlador lógico difuso é baseada em quatro módulos, nomeadamente, módulo de fuzificação, módulo do conhecimento, mecanismo de inferência e o módulo de desfuzificação [Lee90]. O controlador lógico difuso está representado na Figura 4.4.

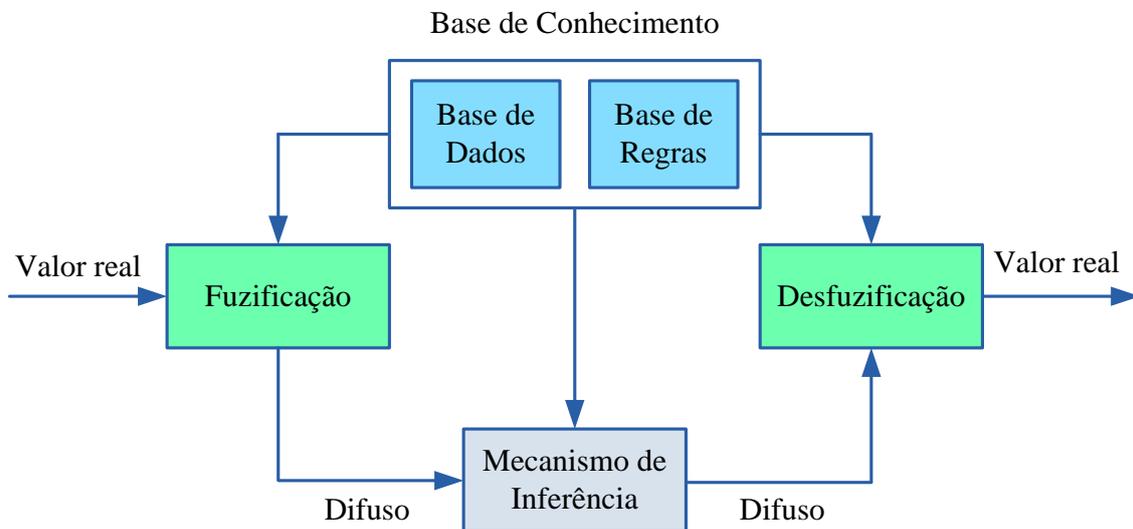


Figura 4.4 – Configuração do controlador lógico difuso.

#### 4.4.1.1 Módulo de Fuzificação

A fuzificação consiste na conversão dos valores crespos ou reais das variáveis de entrada em termos linguísticos ou difusos de modo a serem compatíveis com a estrutura interna do controlador difuso. Se o domínio de discurso não estiver normalizado, o módulo de fuzificação deverá também promover uma transformação de escala, num universo de discurso normalizado. Na teoria dos conjuntos difusos, a gama de possíveis valores quantitativos considerados para os conjuntos difusos é chamado universo de discurso o qual pode ser contínuo ou discreto. O universo de discurso discreto é normalmente limitado e contém um número finito de elementos [Lee90].

As variáveis linguísticas são utilizadas para definir valores sem recorrer a números mas sim a palavras ou frases durante a fase de identificação das entradas e saídas do sistema de controlo [Kovačić06]. As variáveis linguísticas são representadas por um quadripleto  $(X; TX; \mathfrak{S}; MX)$  [Lee90] em que:

- $X$  é o nome simbólico da variável linguística;
- $TX$  é o conjunto dos termos linguísticos que a variável  $X$  pode tomar;
- $\mathfrak{S}$  é o universo de discurso;
- $MX$  é a regra semântica que associa a cada valor  $X$  o seu significado  $M(X)$ , num subconjunto de  $\mathfrak{S}$ .

Podemos considerar, a título de exemplo, a variável linguística Temperatura. A variável é definida pelo quadripleto  $(T; TT; T; MT)$  em que:

- $T$  é a variável linguística temperatura;
- $TT$  é o conjunto dos termos linguísticos que a variável  $T$  pode tomar, neste caso,  $\{Baixa, Média, Alta\}$ ;
- $T$  é o universo de discurso  $[0;40]$ .

- MT é a regra semântica que associa a cada valor T o seu significado M(T), num subconjunto de T, i.e., podemos saber o seu significado através da função de pertinência  $\mu_{TT}(T)$ , a qual mapeia os elementos de T para o intervalo [0,1].

Para cada termo linguístico existe uma função de pertinência. As funções de pertinência estão representadas [Gil10] na Figura 4.5.

Na teoria clássica dos conjuntos, considerando uma temperatura de 30°C, esse valor só pode pertencer ao conjunto Médio ou ao conjunto Alto. De acordo com a Figura 4.5, quando a variável Temperatura é definida através de conjuntos difusos, utilizando os mesmos termos linguísticos e considerando uma temperatura de 30°C, esse valor pertence aos conjuntos difusos Médio e Alto simultaneamente, cada um com um grau de pertinência diferente.

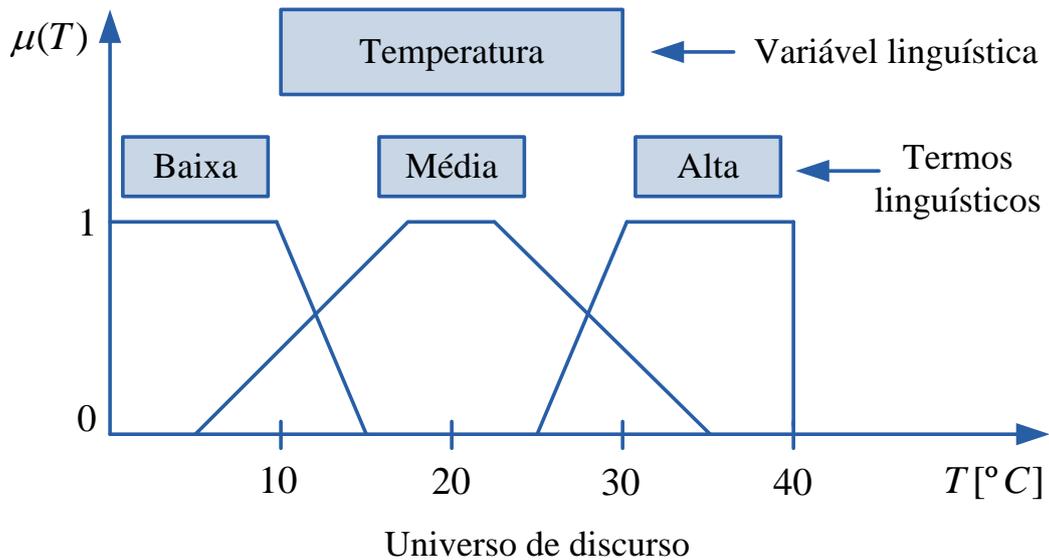


Figura 4.5 – Funções de pertinência de um conjunto difuso.

A fuzificação é o processo no qual um valor crespo ou real  $X \in \mathcal{N}$  é convertido no respetivo termo linguístico  $TX$  por meio da associação do grau de pertinência  $X \rightarrow \mu_{TX}(X)$ . O grau de pertinência representa o valor difuso equivalente ao valor de entrada.

#### 4.4.1.2 Módulo do Conhecimento

O módulo do conhecimento é constituído por dois sub-módulos: a base de dados e a base das regras de controlo [Lee90]. A base de dados fornece as definições necessárias usadas na definição das regras linguísticas de controlo bem como na manipulação dos dados difusos. A base das regras caracteriza os objetivos do controlo definidos pela experiência do operador através das regras linguísticas de controlo.

##### Base de dados

As funções de pertença e os fatores de escala ou ganhos do controlador são parte integrante da base de dados. As definições e propriedades das funções de pertença têm influência no desempenho do controlador [Kovačić06].

A função de pertença é estabelecida relacionando os valores dos conjuntos difusos representativos dos termos linguísticos com o universo de discurso da variável linguística. Esta relação pode ter expressão analítica ou representação gráfica pelas funções de pertença de cada conjunto difuso dependentes da variável linguística [Lee90].

De um modo geral, a função de pertença é simbolizada por  $\mu$  e, para identificar a respetiva variável o seu símbolo é inscrito como argumento da função de pertença:  $\mu(X)$ . Para indicar a função de pertença de um termo linguístico ou de um conjunto difuso é especificado em índice o seu nome ou o símbolo do conjunto. Assim, um termo TX da variável linguística X, tem a função de pertença  $\mu_{TX}(X)$ . Um conjunto difuso TX com universo de discurso  $\aleph$  é definido pela sua função de pertença  $\mu_{TX}(X)$  dada por:

$$TX = \{X \in TX : 0 \leq \mu_{TX}(X) \leq 1\} \quad (4.19)$$

$$\mu_{TX}(X) \rightarrow [0,1] \quad (4.20)$$

A função de pertença  $\mu_{TX}(X)$  expressa o grau que um elemento  $X$  é membro do conjunto difuso  $A$ . Quanto maior é a aproximação do valor de  $\mu_{TX}(X)$  ao valor limite superior, i.e, 1, maior será o grau de pertença do elemento  $X$  ao conjunto difuso.

As funções de pertença podem ter formas distintas tal como representado [Gil10] na Figura 4.6. Interessa porém identificar as peculiaridades mais importantes, sob o ponto de vista da fuzificação e desfuzificação em sistemas de controlo, com a intenção de generalizar os procedimentos.

Geralmente, as formas triangulares e trapezoidais são as primeiras formas a serem utilizadas para os vários termos linguísticos, embora mais tarde a estratégia de controlo possa requerer eventuais modificações. Tomando o eixo das ordenadas dos graus de pertença como referência as propriedades de simetria e de equidistância são observadas ao longo do eixo das abcissas com os valores das variáveis linguísticas.

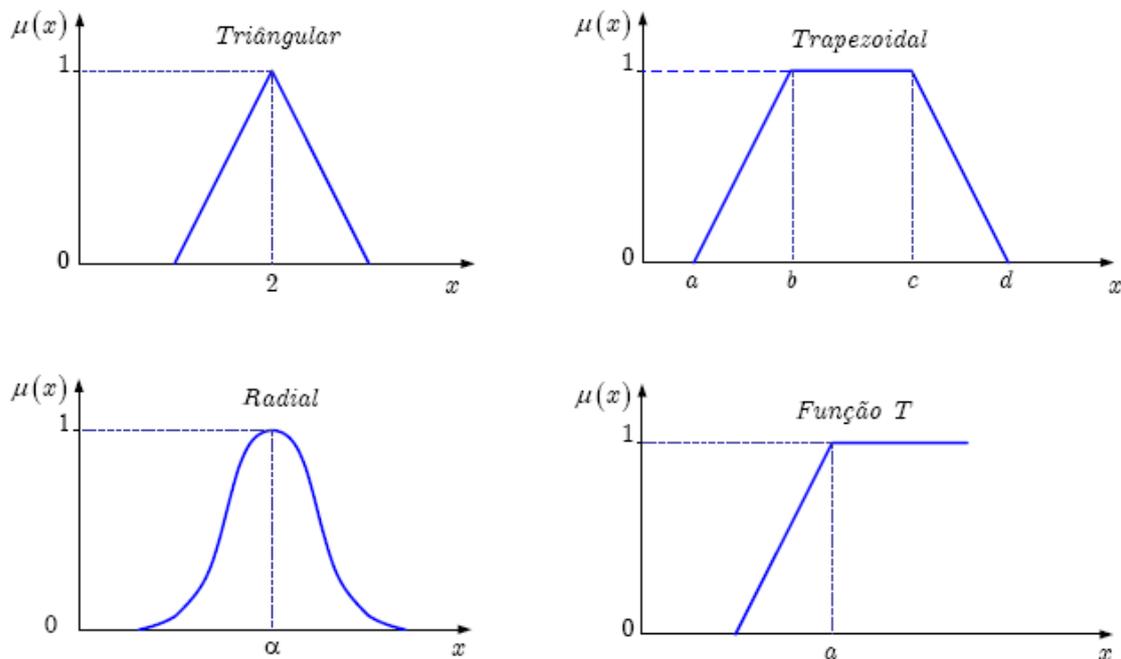


Figura 4.6 – Representações de funções de pertença.

A utilização de universos de discurso normados impõe a afetação das variáveis por fatores de escala. As variáveis de entrada do controlador, previamente ao processo de fuzificação, são convertidas por um fator de escala num universo de discurso normado. As variáveis de saída do controlador difuso, após a desfuzificação, são também convertidas por um fator de escala no domínio físico correspondente, antes de aplicadas ao processo [Gil10].

### **Base de regras**

A base de regras consiste no lugar onde o conhecimento e a experiência do operador humano devem ser corretamente interpretadas e organizadas num conjunto apropriado de regras, concentrando o conhecimento que se pretende ver incorporado no controlador e tendo em conta o processo a controlar [Lee90].

A formulação de uma regra de inferência é fundamentada na implicação do tipo “*if-then*” seguindo a seguinte estrutura:

*If* (antecedente) *then* (consequente)

Onde a condição antecedente se refere a um pressuposto lógico das variáveis linguísticas de entrada e em que a ação consequente exprime o efeito dessa condição sobre a função de pertença da correspondente variável linguística de controlo. Estas proposições determinam os termos linguísticos que as variáveis de saída do controlador tomam, sempre que haja uma correspondência, pelo menos para um certo grau de pertença, do estado do processo. As etapas envolvidas na construção da base de regras de um controlador difuso são as seguintes:

- Escolha das variáveis linguísticas de entrada e saída do controlador;
- Escolha do conjunto de termos para as variáveis linguísticas;
- Síntese do conjunto de regras.

O tamanho da base de regras de inferência depende do número de regras de inferência, enquanto o número de regras de inferência depende do número de variáveis de entrada e de saída e do número de termos linguísticos associados a cada uma das variáveis.

#### 4.4.1.3 Mecanismo de Inferência

O mecanismo de inferência é responsável por processar os valores de entrada a fim de gerar a saída a partir de conjuntos difusos, i.e., é responsável pela combinação dos dados de entrada, já no formato difuso, com as regras existentes, as quais, trabalhando sobre regras de produção, descrevem o processo de tal forma que se obtenha, por meio de inferências particulares, o valor de saída correspondente [Klir95].

O funcionamento da inferência baseada em regras individuais de Mamdani [Lee90] é representado [Gil10] na Figura 4.7.

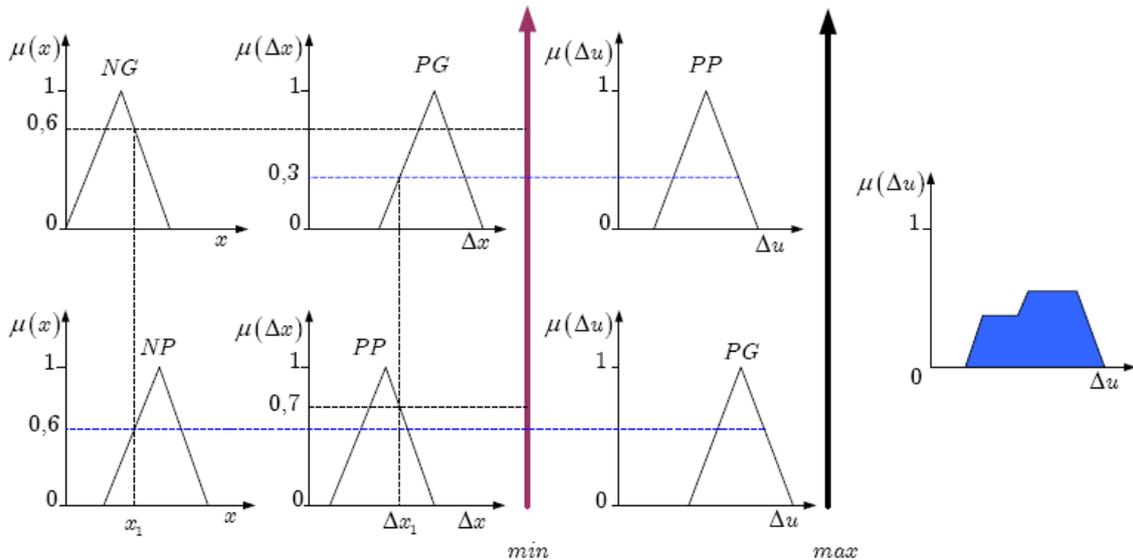


Figura 4.7 – Método de inferência de Mamdani.

O modelo Mamdani é geralmente utilizado para a classificação de saídas discretas, enquanto o modelo de Takagi-Sugeno-Kang é usado para saídas contínuas [Klir95]. O modelo Mamdani é o método de inferência utilizado para representar as regras de inferência e através do processo de classificação disponibiliza os valores contínuos à saída por meio de um processo de desfuzificação.

#### **4.4.1.4 Módulo de Desfuzificação**

O processo de desfuzificação realiza a conversão de conjuntos difusos em valores crespos ou reais. Após a obtenção da função de pertença está criada a formatação necessária para concluir o processamento difuso, através da desfuzificação. Nesta fase derradeira do processamento difuso é efetuada a extração difusa, escolhendo o valor da variável linguística de saída do sistema, pela aplicação de um certo método de cálculo ou desfuzificação, entre os valores do universo de discurso dessa variável na função de pertença resultante, pelo que o problema é resumido à definição de uma metodologia adequada.

Para tal efeito, foram concebidos vários métodos de desfuzificação, baseados na determinação de um valor da variável linguística de controlo, representativo da função de pertença resultante, de entre os mais comuns [Gil10]:

- Método do centro de área ou centroide é um método computacionalmente complexo, originando frequentemente ciclos de inferência lentos;
- Método da altura é um método computacionalmente leve e de implementação extremamente simples;
- Método da média dos máximos é um método computacionalmente simples e implementação simples.

## 4.4.2 Controlador Fuzzy PI

O controlador Fuzzy PI ou PI difuso, é baseado na proposta apresentada por Driankov [Driankov93], e é caracterizado por duas variáveis de entrada, o erro de controlo,  $e(k)$ , e a variação do erro de controlo,  $\Delta e(k)$ , e uma variável de saída o incremento da ação de controlo,  $\Delta u(k)$ . A estrutura do controlador PI difuso é representada [Gil10] na Figura 4.8.

A equação que traduz a ação do controlador PI difuso é dada por:

$$\begin{cases} u(k) = u(k-1) + k_{\Delta u} f_{NL}(e(k), k_e, \Delta e(k), k_{\Delta e}) \\ e(k) = \omega_g - \omega_{nom} \end{cases} \quad (4.21)$$

sendo  $f_{NL}$  uma função não linear que representa o mecanismo interno do controlador,  $k_e$  e  $k_{\Delta e}$  os fatores de escala associados às variáveis de entrada e  $k_{\Delta u}$  o fator de escala associado à variável de saída real.

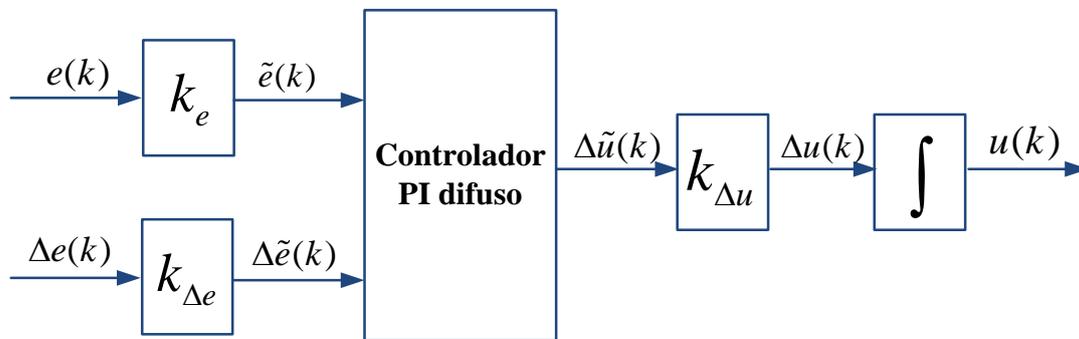


Figura 4.8 – Estrutura do controlador PI difuso [Gil10].

Os parâmetros dos fatores de escala foram obtidos através de um processo de tentativa e erro tendo em consideração o desempenho em cadeia fechada do sistema. Os parâmetros considerados são os seguintes:  $k_e = 0,4$ ,  $k_{\Delta e} = 0,5$  e  $k_{\Delta u} = 1,5$ .

O projeto do controlador PI difuso representado na Figura 4.8 utiliza as seguintes variáveis linguísticas:

- Variável linguística de entrada: erro,  $e(k)$ , e variação do erro,  $\Delta e(k)$ ;
- Variável linguística de saída: variação da ação de controlo,  $\Delta u(k)$ .

Para as variáveis linguísticas de entrada e de saída são considerados sete conjuntos difusos com os seguintes termos linguísticos {NG, NM, NP, ZO, PP, PM, PG} sendo NG: Negativo Grande; NM: Negativo Médio; NP: Negativo Pequeno, ZO: Zero, PG: Positivo Grande; PM: Positivo Médio; PP: Positivo Pequeno. O universo de discurso das variáveis linguísticas de entrada e de saída é definido como  $[-1.5, 1.5]$ .

As funções de pertença com a forma triangular foram adotadas para os conjuntos difusos. As funções de pertença do erro,  $\tilde{e}(k)$ , e da variação do erro,  $\Delta\tilde{e}(k)$ , estão representadas na Figura 4.9. e a função de pertença da variação da ação de controlo,  $\Delta\tilde{u}(k)$ , está representada na Figura 4.10.

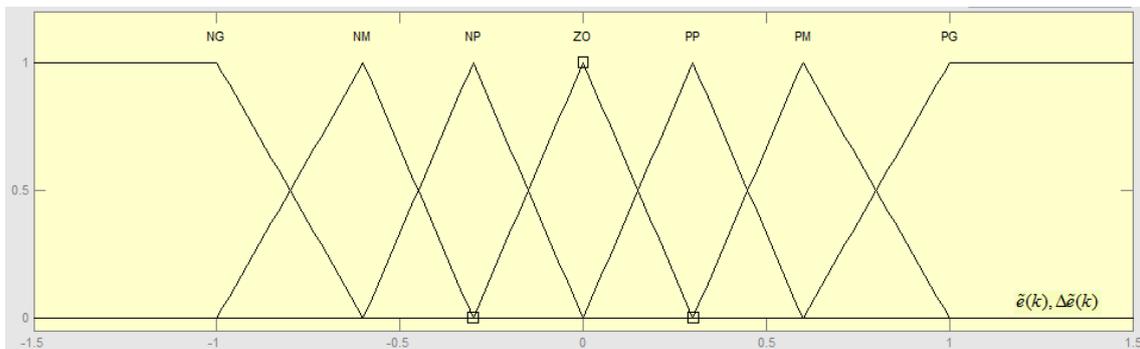


Figura 4.9 – Funções de pertinência de  $\tilde{e}(k)$  e de  $\Delta\tilde{e}(k)$ .

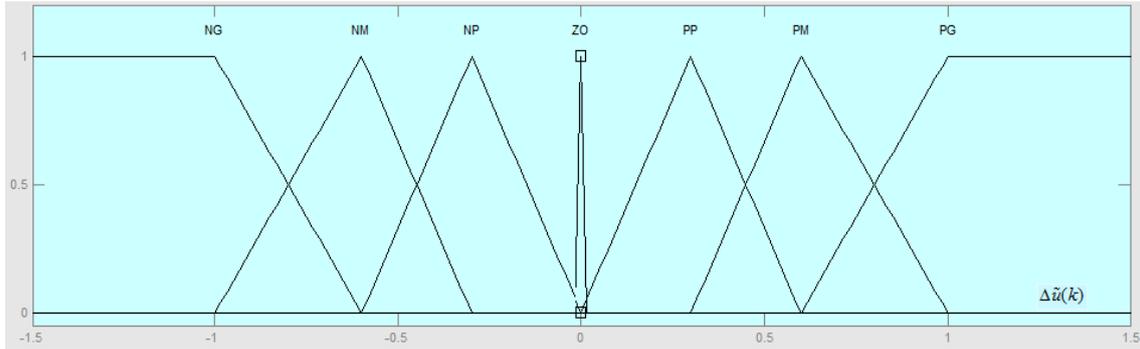


Figura 4.10 – Função de pertinência de  $\Delta\tilde{u}(k)$ .

O tipo de mecanismo de inferência utilizado foi o de Mamdani, dado por:

$$\mu_{e/\Delta e}(e, \Delta e) = \min(\mu_A(e), \mu_B(e)) \quad (4.22)$$

A saída cresa ou real do controlador é obtida pelo método de desfuzificação do centroide. As 49 combinações possíveis da base de regras estão indicadas na Tabela 4.1.

Tabela 4.1 – Base de regras para o controlador PI difuso

$\tilde{e} \setminus \Delta\tilde{e}$	<b>NG</b>	<b>NM</b>	<b>NP</b>	<b>ZE</b>	<b>PP</b>	<b>PM</b>	<b>PG</b>
<b>NG</b>	NG	NG	NG	NG	NM	NP	ZE
<b>NM</b>	NG	NG	NG	NM	NP	ZE	PP
<b>NP</b>	NG	NG	NM	NP	ZE	PP	PM
<b>ZE</b>	NG	NM	NP	ZE	PP	PM	PG
<b>PP</b>	NM	NP	ZE	PP	PM	PG	PG
<b>PM</b>	NP	ZE	PP	PM	PG	PG	PG
<b>PG</b>	ZE	PP	PM	PG	PG	PG	PG

Na Tabela 4.1 é possível observar que os valores de saída do controlador são negativos acima da diagonal, positivos abaixo da diagonal e assumem o valor zero na diagonal. A superfície das variáveis envolvidas na base de regras corresponde à superfície de controlo do controlador PI difuso. A superfície é representada na Figura 4.11.

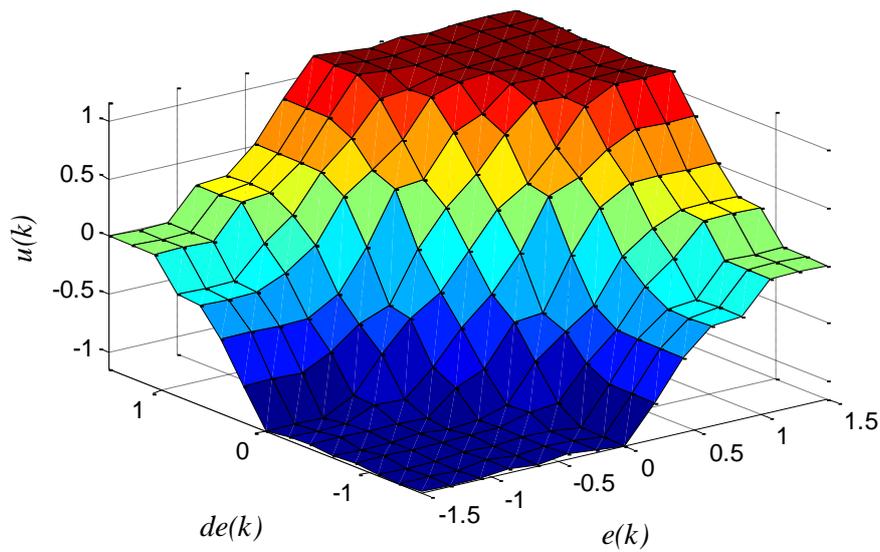


Figura 4.11 – Superfície da base de regras do controlador PI difuso.

O controlador PI difuso foi implementado em *Matlab* através da ferramenta *Fuzzy Logic Toolbox* [Math09].

## 4.5 Controladores Adaptativos

O controlador adaptativo é um controlador com parâmetros ajustáveis e com um mecanismo para ajustar os parâmetros [Astrom94]. O desempenho de um controlador pode ser avaliado através da sua resposta a uma determinada entrada, da sobrelevação, do tempo de estabelecimento e da capacidade de minimizar os erros estacionários. Na área do controlo linear quadrático (LQ), essas qualidades podem ser expressas através da seguinte função de custo quadrática dada por:

$$J = \int_0^{\infty} (r(t) - y(t))^2 dt \quad (4.23)$$

sendo  $r(t)$  uma entrada escalão de posição e  $y(t)$  a resposta de saída.

Através da minimização de (4.23), o controlador perfeito alcançaria de uma forma perfeita as qualidades descritas acima. No entanto, para atingir esse feito, é necessário que  $r(t) = y(t), \forall t$ . Esta igualdade implicaria um sinal de controlo infinito, que na realidade, não é possível. Assim, para aplicações físicas, como por exemplo o controlo de um SCEE, (4.23) pode ser reescrita pela equação [Burns01] dada por:

$$J = \int_0^{\infty} (x^T(t)Qx(t) + u^T(t)Ru(t))dt \quad (4.24)$$

sendo  $Q$  a matriz que penaliza as variáveis de estado e  $R$  a matriz que penaliza o esforço de controlo.

O controlo ótimo tem como objetivo minimizar a função de custo, e como tal tem que haver um compromisso na escolha das matrizes  $Q$  e  $R$  de modo a atingir esse mesmo objetivo. De seguida é apresentada a metodologia subjacente ao projeto de controladores ótimos para sistemas descritos por funções de transferência discretas.

Antes de se projetar um controlador é necessário identificar e analisar o sistema a controlar. A forma adotada nesta tese para identificar e analisar o sistema é baseada na recolha de dados do sistema [Odgaard13] de modo a recriar um modelo que se aproxime do seu comportamento. A estrutura de modelo paramétrico utilizada para a identificação de modelos é o modelo ARX, por ser o mais eficiente dos métodos de estimação de polinómios, porque a solução implica resolver regressões lineares na forma analítica e a sua solução é única [Gil02].

Um sistema dinâmico pode ser descrito na forma polinomial [Levine96] dado por:

$$A(z^{-1})y(k) = z^{-d}B(z^{-1})u(k) \quad (4.25)$$

sendo  $y(k)$  a saída do sistema,  $u(k)$  a ação de controlo no instante discreto  $k$ , e  $d$  o tempo de atraso do sistema.

Os polinómios  $A$  e  $B$ , são respetivamente o polinómio do denominador e numerador e são dados por:

$$A(z^{-1}) = 1 + a_1z^{-1} + a_2z^{-2} + \dots + a_nz^{-n} \quad (4.26)$$

$$B(z^{-1}) = b_0 + b_1z^{-1} + b_2z^{-2} + \dots + b_mz^{-m} \quad (4.27)$$

sendo  $n$  e  $m$  respetivamente a ordem do polinómio do denominador e numerador.

Para efeitos de critério de desempenho a função de custo quadrática pode ser descrita como uma soma de quadrados [Levine96] dada por:

$$J(k) = \left[ \sum_{i=0}^{N_p} p_i y(k+d-i) - \sum_{i=0}^{N_Q} q_i y(k-i) \right]^2 + \left[ \sum_{i=0}^{N_R} r_i u(k-i) \right]^2 \quad (4.28)$$

sendo as constantes  $p_i$ ,  $q_i$  e  $r_i$  coeficientes de peso escolhidos pelo projetista e representam respetivamente a penalização sobre a saída, sobre a referência e sobre a ação de controlo. Os polinómios de peso são dados por:

$$\begin{aligned} P(z^{-1}) &= 1_0 + p_1z^{-1} + p_2z^{-2} + \dots + p_{N_p}z^{-N_p} \\ Q(z^{-1}) &= q_0 + q_1z^{-1} + q_2z^{-2} + \dots + q_{N_Q}z^{-N_Q} \\ R(z^{-1}) &= r_0 + r_1z^{-1} + r_2z^{-2} + \dots + r_{N_R}z^{-N_R} \end{aligned} \quad (4.29)$$

A equação da função de custo quadrática (4.28) pode ser reescrita pela equação [Levine96] dada por:

$$J(k) = [Py(k+d) - Qy_r(k)]^2 + [Ru(k)]^2 \quad (4.30)$$

sendo  $y_r(k)$  o sinal de referência ou a saída desejada.

O problema de seguimento da referência pode ser resolvido fazendo  $P = 1$ ,  $Q = 1$  e  $R = r_0$  [Levine96] sendo a função de custo quadrática dada por:

$$J(k) = [y(k+d) - y_r(k)]^2 + [r_0 u(k)]^2 \quad (4.31)$$

Para o caso em que o sistema é de fase mínima, i.e., não apresenta zeros fora da circunferência unitária e portanto tem zeros estáveis, a solução que minimiza o critério de desempenho é obtida através da equação de Diofantina resolvida em ordem a  $F(z^{-1})$  e  $G(z^{-1})$  [Levine96]. A equação de Diofantina é dada por:

$$1 = A(z^{-1})F(z^{-1}) + z^{-d}G(z^{-1}) \quad (4.32)$$

Os polinómios intermédios  $F(z^{-1})$  e  $G(z^{-1})$  são obtidos através da divisão de 1 por  $A(z^{-1})$  [Levine96]. Como exemplo é considerado um modelo ARX(2,1,1) dado por:

$$\begin{aligned} A(z^{-1}) &= 1 - 2z^{-1} + 0.75z^{-2} \\ B(z^{-1}) &= 1 - 0.5z^{-1} \end{aligned} \quad (4.33)$$

A divisão é dada por:

$$\begin{array}{r} 1 \quad \left| \begin{array}{l} 1 - 2z^{-1} + 0.75z^{-2} \\ -1 + 2z^{-1} - 0.75z^{-2} \\ \hline 0 + 2z^{-1} - 0.75z^{-2} \end{array} \right. \\ \hline \end{array}$$

Os polinómios  $F(z^{-1})$  e  $G(z^{-1})$  são respetivamente o quociente e o resto da divisão. A equação (4.32) dada por:

$$1 = (1 - 2z^{-1} + 0.75z^{-2}) + z^{-1}(2 - 0.75z^{-1}) \quad (4.34)$$

A partir da solução encontrada, a sequência para o controlo ótimo [Levine96] é dada por:

$$\left[ P(z^{-1})B(z^{-1})F(z^{-1}) + \frac{r_0}{b_0}R(z^{-1}) \right] u(k) = -P(z^{-1})G(z^{-1})y(k) + Q(z^{-1})y_r(k) \quad (4.35)$$

A equação (4.35) representa uma equação às diferenças, através da qual a ação de controlo é calculada em cada instante a partir de valores passados da saída e da ação de controlo, bem como da referência no instante atual. A estrutura do controlador linear quadrático polinomial é representada [Levine96] na Figura 4.12.

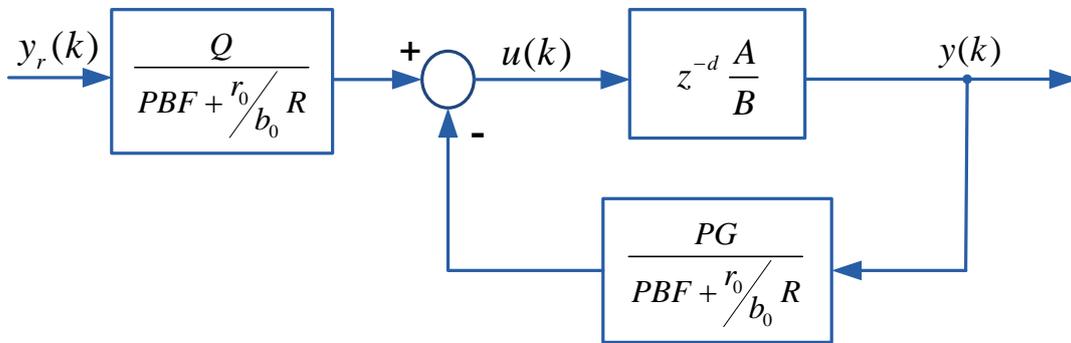


Figura 4.12 – Estrutura do controlador polinomial quadrático.

Escolhendo  $P(z^{-1}) = Q(z^{-1}) = 1$  e  $R(z^{-1}) = r(1 - z^{-1})$ , a equação que rege a ação do controlador polinomial [Levine96] é dada por:

$$u(k) = \left( \frac{b_0}{b_0^2 r^2} \right) \left[ \left( \frac{r^2 - b_1 b_0}{b_0} \right) u(k-1) + a_1 y(k) + a_2 y(k-1) + y_r(k) \right] \quad (4.36)$$

Devido à dinâmica imprevisível do sistema os parâmetros dos polinómios  $A(z^{-1})$  e  $B(z^{-1})$  são estimados usando o algoritmo recursivo dos mínimos quadrados [Gil02].

Na identificação recursiva as observações surgem sequencialmente em tempo real, pelo que se torna conveniente uma implementação recursiva.

O preditor pode ser definido como uma regressão linear dado por:

$$\hat{y}(k) = \varphi^T(k)\theta \quad (4.37)$$

sendo o vetor de regressão dado por:

$$\varphi(k) = [-y(k-1) \cdots -y(k-n) \quad u(k-1) \cdots u(k-m)]^T \quad (4.38)$$

e o vetor de parametrização dado por:

$$\theta = [a_1 \ a_2 \ \cdots \ a_n \ b_0 \ b_1 \ \cdots \ b_m] \quad (4.39)$$

A estimação dos parâmetros faz uso da equação normal [Gil02] dada por:

$$\Phi^T \Phi \theta = \Phi^T Y \quad (4.40)$$

sendo  $Y$  uma matriz que contém todas as amostras da saída,  $Y(N) = [y(1) \ y(2) \ \dots \ y(N)]^T$  e  $\Phi$  uma matriz que contém todas as amostras do

regressor,  $\Phi(N) = \begin{bmatrix} \varphi^T(1) \\ \dots \\ \varphi^T(N) \end{bmatrix}$ .

Resolvendo (4.40) em ordem a  $\theta$  dada por:

$$\hat{\theta} = (\Phi^T \Phi)^{-1} \Phi^T Y \quad (4.41)$$

Que por sua vez pode ser dada por:

$$\hat{\theta} = \Lambda^{-1} \sum_{k=1}^N y(k) \varphi(k) \quad (4.42)$$

Sendo a matriz de informação dada por:

$$\Lambda = \sum_{k=1}^N \varphi(k) \varphi^T(k) \quad (4.43)$$

A partir da equação normal (4.41) e usando a matriz da covariância,  $P(k)$ , o estimador de parâmetros [Gil02] dado por:

$$\hat{\theta}(k) = \hat{\theta}(k-1) + (P(k) \varphi(k)) \left[ y(k) - \varphi^T(k) \hat{\theta}(k-1) \right] \quad (4.44)$$

onde:

$$P(k) = [\Lambda(k) + \varphi(k) \varphi^T(k)]^{-1} \quad (4.45)$$

Para se proceder ao cálculo do estimador  $\hat{\theta}(k)$ , é necessário arranjar também um cálculo para obter o  $P(k)$  recursivamente. O cálculo de  $P(k)$  é efetuado com base no Lema da Inversão das Matrizes dado por:

$$(A + BCD)^{-1} = A^{-1} - A^{-1}B(C^{-1} + DA^{-1}B)^{-1}DA^{-1} \quad (4.46)$$

Aplicando este lema em (4.45) e fazendo  $A = P^{-1}(k-1)$ ,  $B = \varphi(k)$ ,  $C = I_n$  e  $D = \varphi^T(k)$ , a matriz de covariância é dada por:

$$P(k) = P(k-1) \left[ I_n - \frac{\varphi(k) \varphi^T(k) P(k-1)}{1 + \varphi^T(k) P(k-1) \varphi(k)} \right] \quad (4.47)$$

e  $I_n$  a matriz identidade.

Assim, é obtida uma forma de calcular um modelo do processo de forma recursiva, algo que se adequa perfeitamente no controlo adaptativo, pois o controlador estará sempre a receber modelos atualizados do processo.

O controlador linear quadrático polinomial (4.36) pode ser reescrito pela equação [Levine96] dada por:

$$u(k) = \left( \frac{\hat{b}_0}{\hat{b}_0^2 r^2} \right) \left[ \left( \frac{r^2 - \hat{b}_1 \hat{b}_0}{\hat{b}_0} \right) u(k-1) + \hat{a}_1 y(k) + \hat{a}_2 y(k-1) + \omega_{nom}(k) \right] \quad (4.48)$$

Assim (4.48) será utilizada na implementação prática referente ao controlador linear quadrático polinomial. O diagrama de blocos do controlador LQG está representado na Figura 4.13.

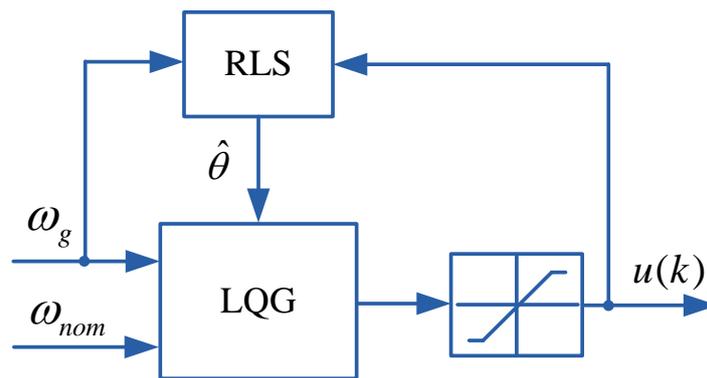


Figura 4.13 – Diagrama de blocos do controlador LQG.

Sendo o bloco RLS denominado *recursive least squares*, i.e., algoritmo recursivo dos mínimos quadrados.

## 4.6 Controladores Preditivos

O controlo baseado em modelos preditivos (*Model Predictive Control*, MPC) é capaz de antecipar comportamentos indesejados, incorporar e lidar com não-linearidades, restrições do projeto do controlo e incorporar qualquer funcional de custo de otimização [Maciejowski02, Rawlings09].

O conceito do controlo preditivo é encarado num contexto de janela, i.e., horizonte de predição móvel deslizante para o futuro, daí a designação de controlo de horizonte recidivo. Este conceito tem vindo a complementar cada vez mais a ação de realimentação de controlo de sistemas.

O controlo por antecipação, *feed-forward*, é naturalmente englobado no conceito de predição. A ideia básica do controlo preditivo é simples: com base num modelo do processo é previsto o comportamento do mesmo para diferentes ações de controlos. Da otimização de um funcional de custo, dependente dessas ações, é obtida a ação ótima a aplicar na cadeia de ação do sistema [Moreira02].

No controlo preditivo é utilizado o modelo do processo com a finalidade de obter o sinal de controlo pela minimização de uma função objetivo, também denominada por função custo.

O MPC apresenta uma série de vantagens sobre os outros métodos, entre os quais são destacados os seguintes [Fambrini09, Moreira02, Negenborg07]:

- A ideia subjacente é de fácil compreensão, uma vez que os conceitos são muito intuitivos e ao mesmo tempo a sintonização deste tipo de controladores é relativamente fácil;
- É utilizado numa grande variedade de processos, desde dinâmicas mais simples até dinâmicas mais complexas;

- A sua formulação base é extensível a sistemas (*multi-input multi-output*, MIMO) sem ser necessário recorrer a modificações proibitivas e complexas na estrutura base do controlador;
- Introduce o controlo por antecipação de uma forma natural para compensar as restrições do processo a controlar;
- É útil quando as referências futuras são conhecidas, por exemplo perturbações futuras, podendo ser incluídas na previsão efetuada pelo controlador, melhorando, desta forma, o desempenho do sistema.

Esta estratégia de controlo também tem inconvenientes, entre os quais são destacados os seguintes [Monteiro13]:

- As diferenças entre cada método devido ao aparecimento de numerosas variantes de controladores preditivos, embora pareçam ser mínimas, podem conduzir a desempenhos do sistema em cadeia fechada bastante distintos, o que pode confundir o projetista, tornando mais difícil a escolha do controlador a aplicar a uma dada situação;
- O aumento do número de restrições implica um crescente esforço computacional, apesar de hoje em dia não ser considerado um obstáculo uma vez que a capacidade de processamento dos computadores é cada vez maior;
- Tal como todos os controladores baseados em modelos, se o modelo for desadequado ao processo ou simplesmente mal conhecido, o resultado poderá ser não ser satisfatório.

Não obstante estes inconvenientes, o saldo final é positivo. Sendo este facto claramente demonstrado pelo sucesso de inúmeras aplicações industriais do controlo preditivo [Quin03].

### 4.6.1 Conceção Computacional do MPC

Nesta secção são descritos alguns dos elementos de base computacional inerentes ao controlador preditivo [Moreira02, Negenborg07, Scherer09]:

- **Função objetivo:** define o critério de desempenho utilizado e as ações desejadas segundo a minimização de um funcional de custo num horizonte finito de instantes de tempo futuros, chamado de horizonte de predição ou janela de controlo. De uma forma geral, a função objetivo, é uma expressão matemática que penaliza os desvios entre as saídas estimadas e a trajetória de referência;
- **Modelo de predição:** os controladores preditivos são baseados na predição do comportamento futuro do processo com base num modelo que inclui a sua própria dinâmica bem como a dinâmica do ruído ou das perturbações. Este modelo é o elemento principal do MPC, podendo assumir qualquer forma matemática. Para sistemas *single-input single-output* (SISO) utilizam-se frequentemente modelos de resposta impulsional finita (FIR). Os modelos no espaço de estados (MEE) são adequados para sistemas MIMO;
- **Restrições:** são elementos utilizados para representar as limitações do processo, tais como bandas mortas, tempos de atraso, perturbações, etc.. As restrições de operação nos atuadores e nas variáveis de estado podem ser de igualdade e/ou desigualdade, relacionando quaisquer elementos do problema, tais como entrada, saída e controlo. São adicionadas à função objetivo e é comum serem colocadas numa matriz de desigualdades envolvendo o vetor de entrada. Assim, o problema toma a forma padrão de um problema de programação quadrática;
- **Algoritmo de controlo:** sinteticamente, o algoritmo de controlo resulta iterativamente entre os itens descritos anteriormente, os quais são

executados a cada ciclo de controlo, i.e., período de amostragem da seguinte forma [Negenborg07]:

- o Passo a. Avaliação do estado atual do sistema dado pelo vetor de entradas futuras, pelo vetor de saídas estimadas e pela trajetória de referência;
- o Passo b. Determinação das ações a serem executadas no horizonte de predição pela resolução do seguinte problema de otimização: minimização da função objetivo ao longo do horizonte de predição, sujeito à dinâmica do sistema, contabilizando as restrições e avaliar o estado do sistema no início do atual ciclo de controlo;
- o Passo c. Implementação das ações calculadas no Passo a e no Passo b até ao ciclo de amostragem seguinte;
- o Passo d. Regresso ao Passo a.

Dos pressupostos anteriores, resulta que o MPC resolve um problema de otimização, através de um funcional de custo, num horizonte de predição finito a cada instante de amostragem. Contudo, apenas as ações de controlo atuais são aplicadas ao processo. No instante de tempo seguinte o mesmo tipo de otimização é repetido com novos cálculos e uma nova sequência de controlo é calculada e aplicada ao processo. Desta forma, a formulação do problema é encarada num contexto de horizonte recidivo ou janela deslizante. O conceito do MPC no horizonte de predição está representado [Monteiro13] na Figura 4.14.



custo  $J(\cdot)$ , são calculadas as entradas futuras ótimas  $u(k+j|k)$  estabelecendo a saída estimada  $\hat{y}(k+j|k)$  que se aproxime da trajetória de referência  $y_r(k+j)$  dentro do horizonte de predição. Ao sistema apenas é aplicada a primeira entrada futura calculada, i.e., o valor ótimo  $u^*(k|k)$ . No instante seguinte  $k+1$ , dentro do horizonte de predição  $k+1, \dots, N_p+1$ , todos os cálculos são efetuados novamente, obtendo o valor ótimo para a entrada cuja saída melhor se aproxima da referência, e assim sucessivamente num contexto de janela deslizante para o futuro.

### 4.6.2 Algoritmo do Controlo Preditivo

O controlo com base em controladores preditivos é digital e implementado computacionalmente. Por esta razão tem de se discretizar o MEE [Ding09].

O conceito de controlo MPC integrado no sistema que se pretende controlar, bem como o seu modelo de predição discretizado e do optimizador [Igreja10] está representado [Monteiro13] na Figura 4.15.

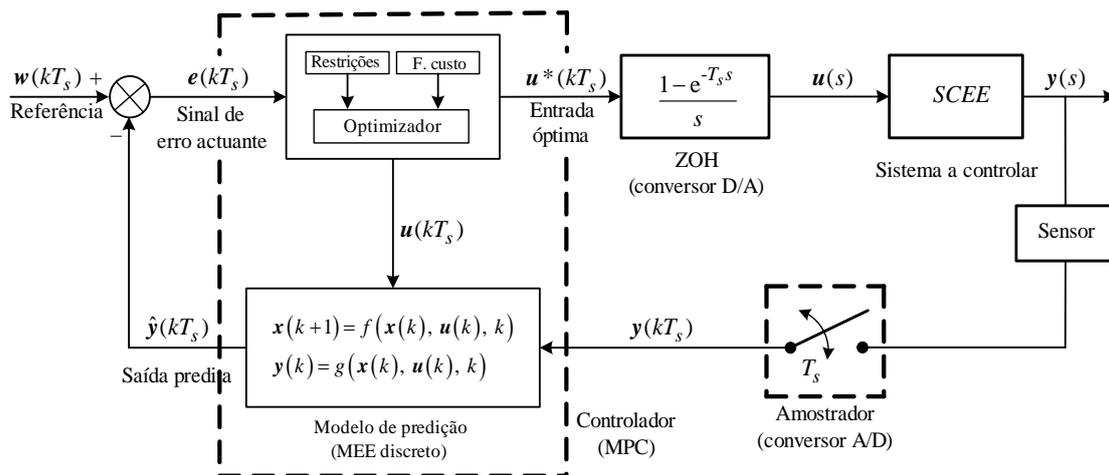


Figura 4.15 – Estrutura básica em malha fechada do controlador MPC.

A discretização do modelo de predição, com base no MEE, é dada por:

$$\begin{cases} x(k+1) = Ax(k) + Bu(k) \\ y(k) = Cx(k) + Du(k) \end{cases} \quad (4.49)$$

sendo  $x = [\omega_r \ \omega_g \ \theta_\Delta \ \tau_g \ \beta]^T \in \mathbb{R}^5$  o vetor de estados,  $u = [\tau_{g,r} \ \beta_r]^T \in \mathbb{R}^2$  o vetor da ação de controlo e  $y = [\omega_g \ P_g]^T \in \mathbb{R}^2$  o vetor de saída.

Este modelo permite antecipar o futuro, sendo este conhecido, e também reagir adequadamente a estímulos futuros. Considerando o MEE com um período de amostragem  $(0, T_s, 2T_s, \dots, kT_s)$ , as entradas e as saídas neste espaço são caracterizadas por  $u(k) = u(kT_s)$  e  $y(k) = y(kT_s)$ , respetivamente, onde  $k \in \mathbb{Z}$ .

No MPC, a nomenclatura  $x(k+j|k)$  é utilizada para mencionar a predição de  $x$  no instante futuro  $k+j$  predito no tempo  $k$ . Desta forma, resulta:  $x(k+j|k) = x(k+j)$ , para  $j \leq 0$  designando valores passados e  $x(k+j|k) = \hat{x}(k+j|k)$ , para  $j \geq 0$ , designando valores futuros.

O vetor de estado estimado é dado por:

$$\hat{x} = [\hat{x}(k+1|k)^T \ \hat{x}(k+2|k)^T \ \dots \ \hat{x}(k+j|k)^T \ \dots \ \hat{x}(k+N_p|k)^T]^T \quad (4.50)$$

O vetor de entradas futuras é dada por:

$$u = [u(k|k)^T \ u(k+1|k)^T \ \dots \ u(k+j-1|k)^T \ u(k+N_p-1|k)^T]^T \quad (4.51)$$

Baseado na aplicação recursiva da equação matricial de estado (4.49) é possível prever o comportamento e a dinâmica futura do sistema utilizando a informação atual do sistema e o incremento de controlo imposto a cada instante de amostragem  $k$ .

Seja a equação matricial de estado estimado dada por:

$$\begin{cases} \hat{x}(k+j+1|k) = A\hat{x}(k+j|k) + Bu(k+j|k) \\ j \geq 0 \end{cases} \quad (4.52)$$

Recursivamente, a partir de (4.52), é possível calcular o vetor de estado estimado, como enunciado em (4.50). Para os dois instantes iniciais o seu cálculo é dado por:

$j = 0$ : estado estimado para o instante  $k+1$ ,

$$\hat{x}(k+1|k) = A\hat{x}(k|k) + Bu(k|k) \quad (4.53)$$

$j = 1$ : estado estimado para o instante  $k+2$ ,

$$\hat{x}(k+2|k) = A\hat{x}(k+1|k) + Bu(k+1|k) \quad (4.54)$$

substituindo (4.53) em (4.54) resulta:

$$\hat{x}(k+2|k) = A^2\hat{x}(k|k) + ABu(k|k) + Bu(k+1|k) \quad (4.55)$$

$j = N_p$ : estado estimado para o instante  $k+N_p$  na forma compacta dada por:

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} \hat{x}(k+1|k) \\ \hat{x}(k+2|k) \\ \vdots \\ \hat{x}(k+N_p-1|k) \\ \hat{x}(k+N_p|k) \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} A \\ A^2 \\ \cdots \\ A^{N_p-1} \\ A^{N_p} \end{bmatrix} x(k|k) + \cdots \\ \cdots + \begin{bmatrix} B & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ AB & B & 0 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ A^{N_p-2}B & A^{N_p-3}B & A^{N_p-4}B & \cdots & 0 \\ A^{N_p-1}B & A^{N_p-2}B & A^{N_p-3}B & \cdots & B \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u(k|k) \\ u(k+1|k) \\ u(k+2|k) \\ \vdots \\ u(k+N_p-1|k) \end{bmatrix}. \end{aligned} \quad (4.56)$$

A equação matricial de estados (4.56) na forma compacta é dada por:

$$\hat{x} = \Phi x(k|k) + \Gamma u \quad (4.57)$$

sendo  $\Phi$  a matriz de transição dinâmica para o instante de tempo atual,  $\Gamma$  é a matriz de transição das entradas futuras, e, como se referiu anteriormente,  $u$  e  $\hat{x}$  são os vetores de entradas futuras e estados estimados, respetivamente.

Multiplicando ambos os membros de (4.57) pela matriz de saída do sistema  $C$  dada por:

$$C\hat{x} = C\Phi x(k|k) + C\Gamma u \quad (4.58)$$

o qual resulta a saída predita dada por:

$$\hat{y} = \hat{y}_0 + Gu \quad (4.59)$$

sendo  $\hat{y} = C\hat{x}$  o vetor de saídas estimadas no horizonte de predição,  $\hat{y}_0 = C\Phi x(k|k)$  o vetor de saídas preditas no instante inicial, i.e., na ausência de ação de controlo.

### 4.6.3 Solução Ótima

Para uma dada referência  $y_r(k+j)$ , discretizada a cada instante de amostragem  $T_s$ , dentro de um horizonte de predição  $N_p$ , o objetivo do sistema de controlo preditivo é conduzir, tão próximo quanto possível, a saída predita  $\hat{y}(k+j|k)$  a alcançar a referência. Este objetivo é então traduzido de forma a encontrar a melhor sequência para as entradas futuras  $u(k+j|k)$ , sendo a função de erro  $e(k+j|k)$  entre a referência e a saída predita minimizada [Wang09] dada por:

$$e(k+j|k) = y_r(k+j|k) - \hat{y}(k+j|k) \quad (4.60)$$

Assumido que um vetor contém toda a informação acerca da referência no horizonte de predição, i.e.,  $y_r = [1 \cdots 1 \cdots N_p]^T y_r(k+j)$ , define-se o funcional de custo quadrático  $J(\cdot)$ , refletindo o objetivo do controlo. De uma forma geral, este funcional de custo ou função, é uma expressão que penaliza os desvios entre as saídas estimadas e a trajetória de referência [Igreja05].

O problema de otimização, considerando as restrições, é dado em [Ding09]. A função objetivo é dada por:

$$\begin{aligned}
 J(k) = & \overbrace{\sum_{j=1}^{N_p} \left[ y_r(k+j) - \hat{y}(k+j|k) \right]^T Q(j) \left[ y_r(k+j) - \hat{y}(k+j|k) \right]}^{\text{erro quadrático}} + \cdots \\
 & \cdots + \overbrace{\sum_{j=0}^{N_p-1} \left[ u(k+j|k) \right]^T R(j) \left[ u(k+j|k) \right]}^{\text{esforço de controlo}}
 \end{aligned} \tag{4.61}$$

substituindo (4.60) em (4.61) resulta:

$$\begin{aligned}
 J(k) = & \overbrace{\sum_{j=1}^{N_p} \left[ e(k+j|k) \right]^T Q(j) \left[ e(k+j|k) \right]}^{\text{erro quadrático}} + \overbrace{\sum_{j=0}^{N_p-1} \left[ u(k+j|k) \right]^T R(j) \left[ u(k+j|k) \right]}^{\text{esforço de controlo}}
 \end{aligned} \tag{4.62}$$

sendo  $Q$  a uma matriz de pesos que penaliza o erro quadrático. Dependendo do valor de  $Q$ , existe uma maior ou menor convergência, em diferentes pesos, das variáveis de estados relativamente à referência. A matriz  $R$  minimiza o esforço de controlo de forma a garantir amplitudes compatíveis com a gama do sinal de entrada do sistema em causa. Se  $R$  for grande, a penalização da amplitude de  $u(k+j|k)$  é maior, i.e.,  $u$  varia menos, contribuindo com uma convergência para a referência mais lenta e uma resposta menos oscilatória; se  $R$  for pequeno o oposto é verificado [Igreja05].

As restrições que o sistema impõe são dadas por:

$$\beta_{\min} \leq \beta_r \leq \beta_{\max} \quad (4.63)$$

$$(\omega_{nom} - \omega_{\Delta}) \leq \omega_g \leq (\omega_{nom} + \omega_{\Delta}) \quad (4.64)$$

$$v_{\min} \leq v_w \leq v_{\max} \quad (4.65)$$

A solução para determinar  $u$  ótimo que minimiza a função objetivo é dada por:

$$u^* = \min_{u(k) \dots \hat{u}(k+Np-1)} J(k) = \underbrace{\sum_{j=1}^{Np} \left[ e(k+j|k) \right]^T Q(j) \left[ e(k+j|k) \right]}_{\text{erro quadrático}} + \dots \quad (4.66)$$

$$\dots + \underbrace{\sum_{j=0}^{Np-1} \left[ u(k+j|k) \right]^T R(j) \left[ u(k+j|k) \right]}_{\text{esforço de controlo}}$$

De acordo com a estratégia de horizonte de predição recidivo, apenas a primeira entrada de  $u^*(k)$  é aplicada ao sistema. As restantes sequências de entrada de  $u^*$  são descartadas e um novo problema de controlo de otimização é repetido no instante  $k+1$ .

## 4.7 Supervisão do SCEE

A supervisão do SCEE baseada em máquinas de estados finitos tem a capacidade de agendar convenientemente as diferentes fases de operação de um processo tais como: início, produção e encerramento, de forma a atingir as especificações exigidas na operação baseadas na informação obtidas pelo estado atual. O supervisor baseado em estados assenta na teoria de controlo da supervisão e tem



#### 4.7.1.1 Máquinas de Estados Finitos

As máquinas de estados finitos são frequentemente utilizadas na modelação e controlo de eventos discretos, quando comparados com outros modelos, sendo consideradas as mais simples [Zhao12]. Representam o comportamento de sistemas ou processos, e as transições entre estados ocorrem consoante o cumprimento de condições. As máquinas de estado são compostas por:

- Estados que definem comportamentos;
- Transições que definem a passagem entre estados;
- Regras ou condições que devem ser cumpridas para permitir a transição;

A máquina de estado finita pode ser descrita por um modelo formal quántuplo [Cassandras08] dado por:

$$MEF = (\Sigma, Q_f, \partial, q_0, Q_m) \quad (4.67)$$

sendo  $\Sigma$  o conjunto de eventos finitos,  $Q_f$  o conjunto de estados finitos,  $\partial: \Sigma \times Q$  a função de transição,  $q_0$  o estado inicial e  $Q_m$  os estados marcados ou finais.

#### 4.7.1.2 Estrutura do Supervisor

A estrutura do modelo do SCEE proposta com o supervisor, no qual estão representados os estados, as transições e as respetivas condições, é representada [Viveiros15b] na Figura 4.17.

O supervisor tem de analisar as condições para determinar quais os estados operacionais do SCEE que estarão em funcionamento. São definidos quatro estados operacionais tais como: início, geração, travagem e estacionado.

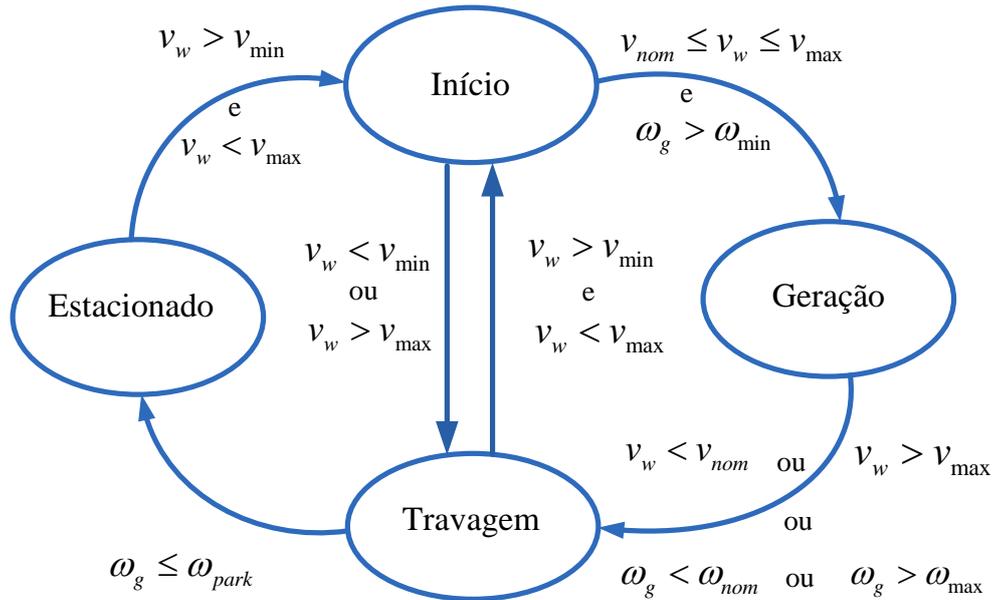


Figura 4.17 – Modos de operação do supervisor.

O estado inicial do SCEE é o estado estacionado uma vez que a velocidade do vento  $v_w$  é muito baixa. Neste estado as pás da turbina eólica estão paradas, o travão está acionado e o gerador não está ligado à rede elétrica. Quando a velocidade do vento é superior à velocidade mínima e inferior à velocidade máxima,  $v_{min} < v_w < v_{max}$ , existe uma mudança de estado operacional, neste caso, para o estado *início*.

No estado início, as pás da turbina eólica começam a rodar de forma a captar a maior quantidade de energia possível obtida através do vento, o travão está desligado e o gerador está a injetar energia na rede mas não necessariamente associada à potência nominal. Este estado é considerado como estado maximização da potência. Mediante as condições, o estado início pode mudar para o estado geração ou para o estado travagem. A mudança para o estado geração ocorre quando a velocidade do vento está compreendida entre a velocidade nominal e a velocidade máxima,  $v_{nom} \leq v_w \leq v_{max}$  e a velocidade de rotação do gerador é superior à velocidade de rotação mínima,  $\omega_g > \omega_{min}$ . A

mudança para o estado travagem ocorre quando a velocidade do vento volta a ser inferior ao valor mínimo,  $v_w < v_{\min}$ .

No estado geração, as pás da turbina rodam, ajustando o ângulo de passo da pá de forma a manter a velocidade de rotação do gerador constante na velocidade de rotação nominal e o gerador está a injetar energia na rede associada à potência nominal. Este estado é considerado como estado produção da potência. A mudança de estado operacional para o estado travagem, ocorre quando a velocidade do vento é superior à velocidade máxima, ou inferior à velocidade nominal,  $v_{\max} < v_w < v_{\text{nom}}$ , ou a velocidade de rotação de gerador é superior à velocidade de rotação máxima, ou inferior à velocidade de rotação nominal,  $\omega_{\max} < \omega_g < \omega_{\text{nom}}$ .

No estado travagem, o ângulo de passo da pá é ajustado de forma a diminuir a velocidade de rotação do rotor da turbina. Mediante as condições, o estado travagem pode mudar para o estado início ou para o estado estacionado. A mudança para o estado início ocorre quando a velocidade do vento é superior à velocidade mínima e inferior à velocidade máxima,  $v_{\min} < v_w < v_{\max}$ . A mudança para o estado estacionado ocorre quando a velocidade de rotação do gerador é inferior a uma velocidade de rotação  $\omega_g \leq \omega_{\text{park}}$ . Sendo  $\omega_{\text{park}}$  uma velocidade de rotação inferior à velocidade de rotação mínima que permite a paragem ou estacionamento da turbina eólica.

## 4.8 Conclusões

O controlo do SCEE é realizado utilizando diferentes tipos de controlo, nomeadamente controladores de ordem inteira, controladores de ordem fracionária, controladores de lógica difusa, controladores adaptativos e

predictivos. É realizado o estudo de cada um dos controladores e apresentada a respetiva ação de controlo.

A supervisão do SCEE é baseada na máquina de estados finitos sendo o método mais simples e mais utilizado em sistemas de eventos discretos. O supervisor analisa as condições para determinar quais os estados operacionais do SCEE que estarão em funcionamento. São definidos quatro estados operacionais e a transição entre cada estado depende das condições definidas.

A estrutura do SCEE com supervisor proposta nesta tese é considerada uma contribuição original [Viveiros14c, Viveiros15a, Viveiros15b, Viveiros15c].

---

# CAPÍTULO

# 5

---

## Simulação Computacional

*Neste capítulo são apresentados os resultados numéricos obtidos e as conclusões sobre o desempenho do sistema eólico ligado a uma rede elétrica, recorrendo a simulações computacionais. O desempenho do SCEE é estudado utilizando controladores do tipo PI, FOPI, Fuzzy PI, LQG ou MPC sem ou com a ação proveniente do nível superior da estrutura hierárquica de controlo, i.e., a ação do supervisor.*

## 5.1 Introdução

Neste capítulo são apresentados os resultados numéricos provenientes das simulações computacionais e as conclusões sobre o desempenho do SCEE ligado a uma rede elétrica.

O SCEE é constituído por uma turbina eólica de velocidade variável; um sistema de transmissão mecânico descrito respetivamente por um veio de duas massas; uma caixa de velocidades, um gerador de indução com rotor duplamente alimentado e um conversor eletrónico de energia de dois níveis.

No controlo do SCEE são considerados os controlos realizados por controladores de ordem inteira clássicos, PI, controladores de ordem fracionária, FOPI, controladores de lógica difusa, Fuzzy PI, controladores adaptativos, LQG ou preditivos; MPC. As técnicas de controlo são simuladas sem ou com a ação proveniente do nível superior da estrutura hierárquica de controlo, i.e., a ação do supervisor. A comparação entre as técnicas de controlo é avaliada em termos da resposta do SCEE em regime permanente e em termos do esforço da ação de controlo.

Os modelos matemáticos para estudar o desempenho do SCEE foram implementados em *Matlab e Simulink*. O supervisor, baseado na máquina de estados finitos, utiliza a ferramenta *Stateflow Chart*. Todas as simulações utilizam o horizonte temporal de 4500 s e um tempo de amostragem  $T_s = 0,01$  s. A solução das equações de estado que traduzem o comportamento dinâmico do sistema utiliza o método de integração de *Runge Kutta* de quarta ordem com um passo de integração de 0,01 ms. O SCEE tem a potência nominal de 4,8 MW, sendo os parâmetros utilizados nas simulações computacionais, caracterizando o SCEE, os indicados na Tabela 5.1.

Tabela 5.1 – Parâmetros do SCEE.

<b>Parâmetros da pá e ângulo de passo</b>	
Raio da pá: R	57,5 m
Densidade do ar: $\rho$	1,225 kg/m <sup>3</sup>
Fator de amortecimento: $\xi$	0,6
Frequência natural: $\omega_n$	11,11 rad/s
<b>Parâmetros do sistema de transmissão</b>	
Coeficiente de amortecimento torsional do sistema de transmissão: $B_{dt}$	775,49 Nms/rad
Coeficiente atrito viscoso do eixo de alta velocidade: $B_g$	45,6 Nms/rad
Coeficiente atrito viscoso do eixo de baixa velocidade: $B_r$	7,11 Nms/rad
Relação entre dentes: $N_g$	95
Constante de rigidez torsional do sistema de transmissão: $K_{dt}$	$2,7 \times 10^9$ Nm/rad
Eficiência do sistema de transmissão: $\eta_{dt}$	97%
Momento de inércia do eixo de alta velocidade: $J_g$	390 kgm <sup>2</sup>
Momento de inércia do eixo de baixa velocidade: $J_r$	$55 \times 10^6$ kgm <sup>2</sup>
<b>Parâmetros do gerador e do conversor</b>	
Parâmetro do modelo gerador conversor: $\alpha_{gc}$	50 rad/s
Eficiência do gerador: $\eta_g$	98 %
<b>Parâmetros do controlador</b>	
Pequeno desvio: $\omega_\Delta$	15 rad/s
Velocidade de rotação nominal: $\omega_{nom}$	162 rad/s
Potência nominal: Pr	4,8 MW

A velocidade do vento considerada nas simulações resulta das leituras efetuadas num parque eólico reportado em [Odgaard13]. As variações para esta velocidade estão compreendidas entre 7,5 m/s e 22,5 m/s, i.e., entre a região II e a região III para a operação do SCEE. Ainda, com o objetivo de poder observar de forma conveniente o desempenho, é adicionado ruído branco à velocidade do vento de forma a simular perturbações como a representada na Figura 5.1.

Na região II, a velocidade do vento está compreendida entre a velocidade mínima e a velocidade nominal do vento, na região III a velocidade do vento está compreendida entre a velocidade nominal e a velocidade máxima do vento. A estratégia de controlo muda da região II para a região III quando  $P_g(k) > P_r(k)$  e  $\omega_g(k) > \omega_{nom}(k)$  e muda da região III para a região II quando

$\omega_g(k) < \omega_{nom}(k) - \omega_\Delta$ , onde  $\omega_\Delta$  é um pequeno desvio usado na prevenção de comutações elevadas entre as regiões.

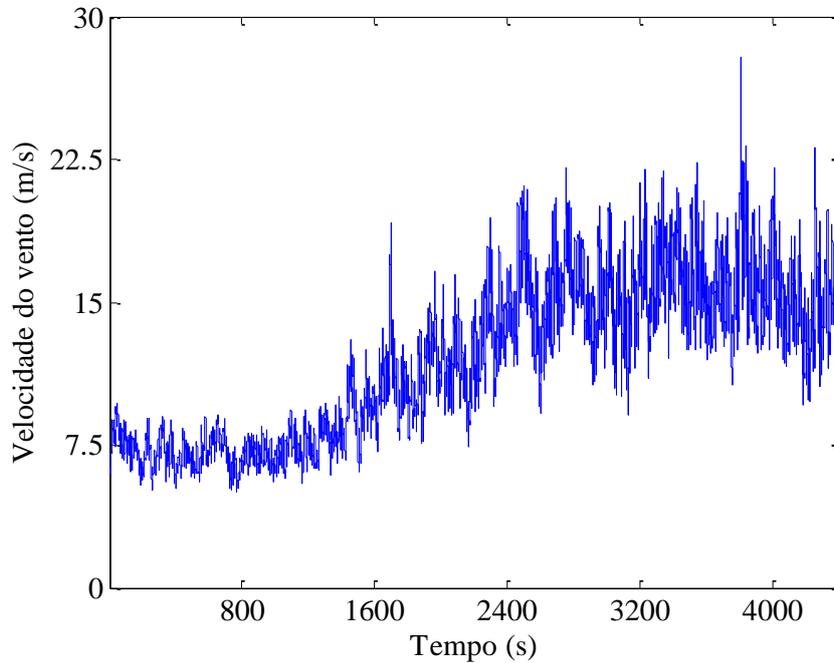
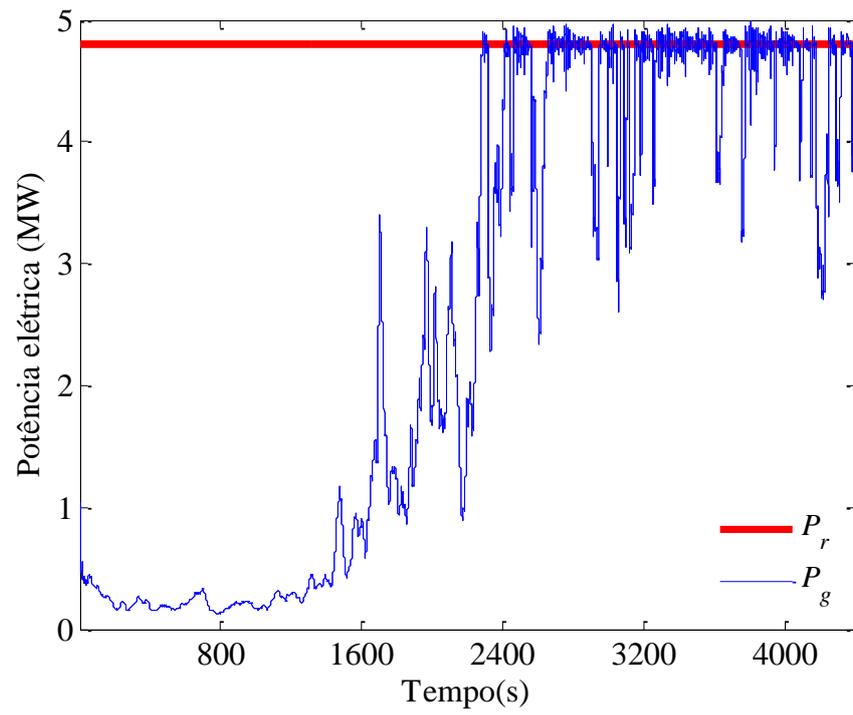


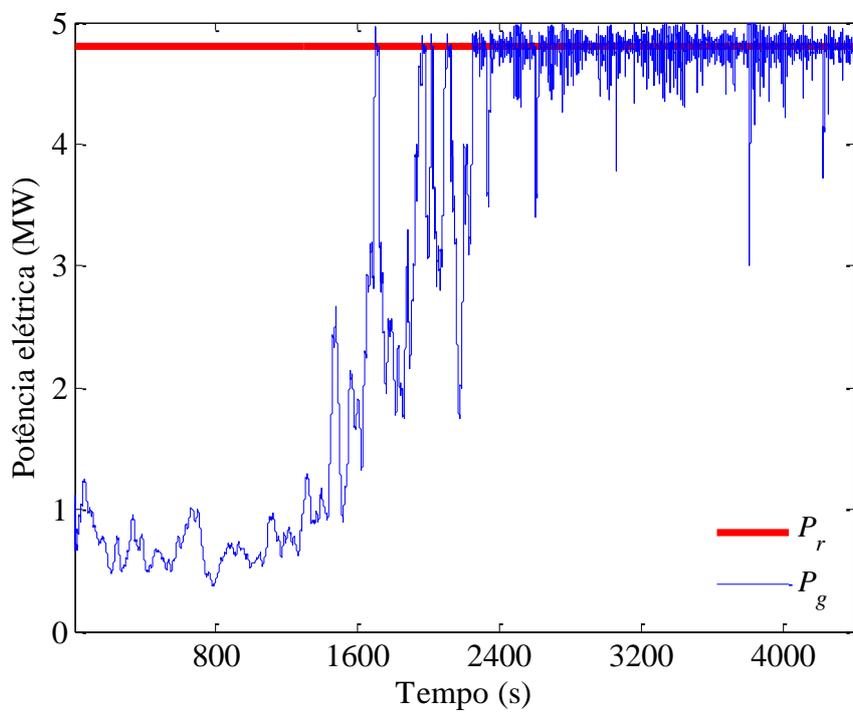
Figura 5.1 – Velocidade do vento com perturbações.

## 5.2 Controlador PI

O objetivo da simulação computacional é observar a ação do controlador PI sobre o comportamento dinâmico do SCEE, sem ou com a ação do supervisor [Viveiros13a, Viveiros14b, Viveiros14c, Viveiros15a]. Na Figura 5.2, estão representadas a potência elétrica do GIDA, azul, e a potência de referência, vermelho. Na Figura 5.3, está representada a variação do ângulo do passo da pá. Na Figura 5.4, estão representadas a velocidade de rotação da turbina do GIDA, azul, e a velocidade nominal, vermelha. Na Figura 5.5, está representada a comutação entre as regiões II e III. As variáveis observadas sem ação do supervisor são indicadas com o índice (a) e as variáveis observadas com a ação do supervisor são indicadas com o índice (b).

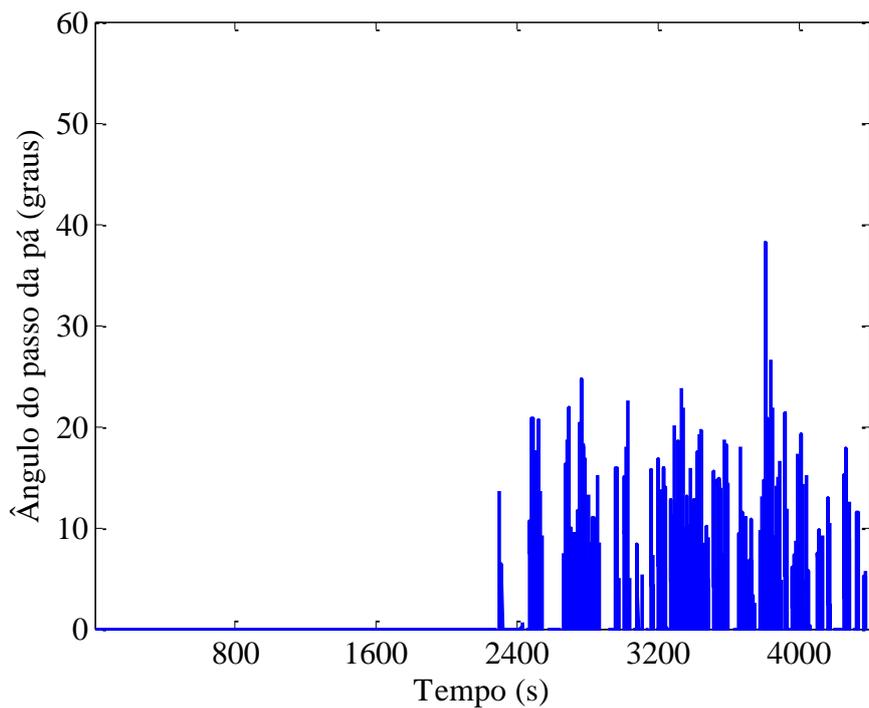


(a)

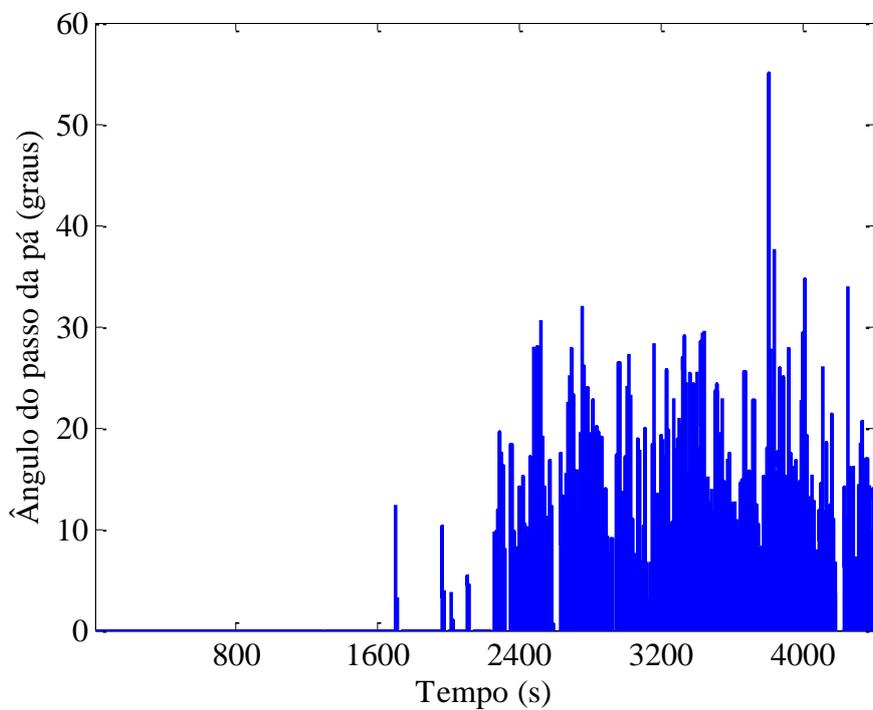


(b)

Figura 5.2 – Potência elétrica do GIDA e de referência da turbina.

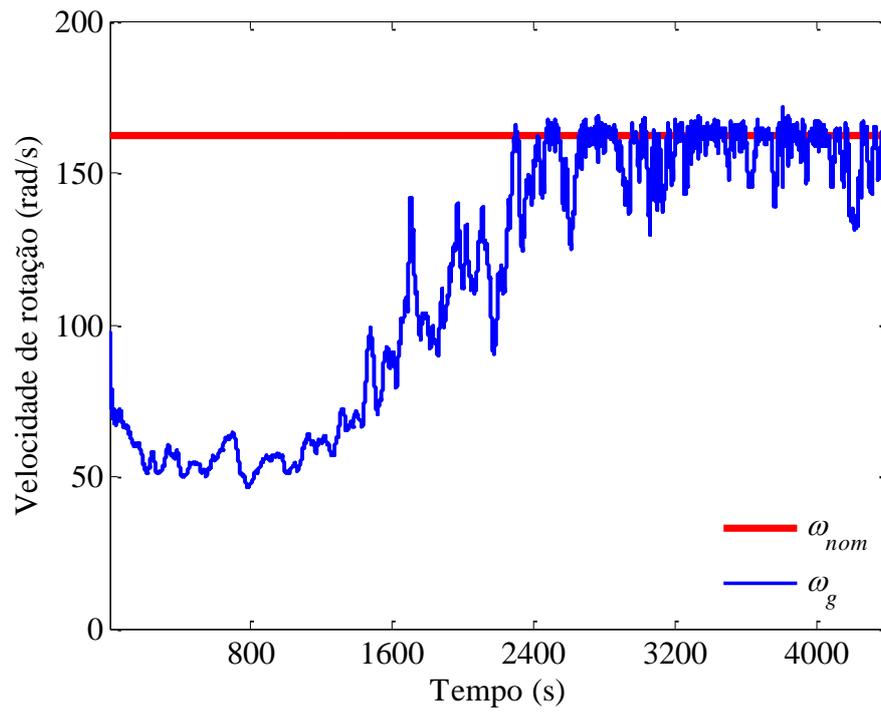


(a)

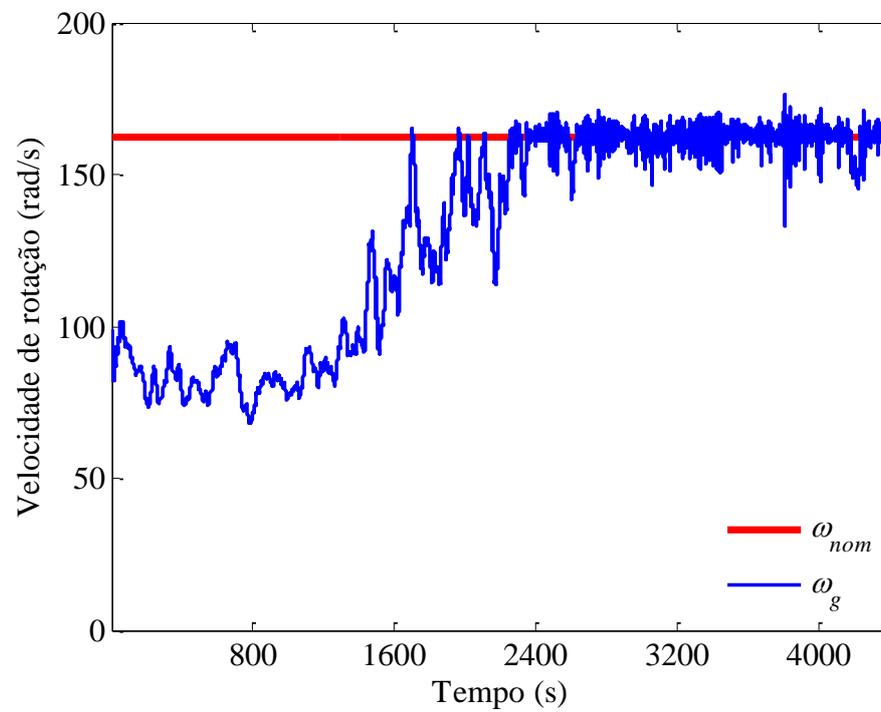


(b)

Figura 5.3 – Variação do ângulo do passo da pá.

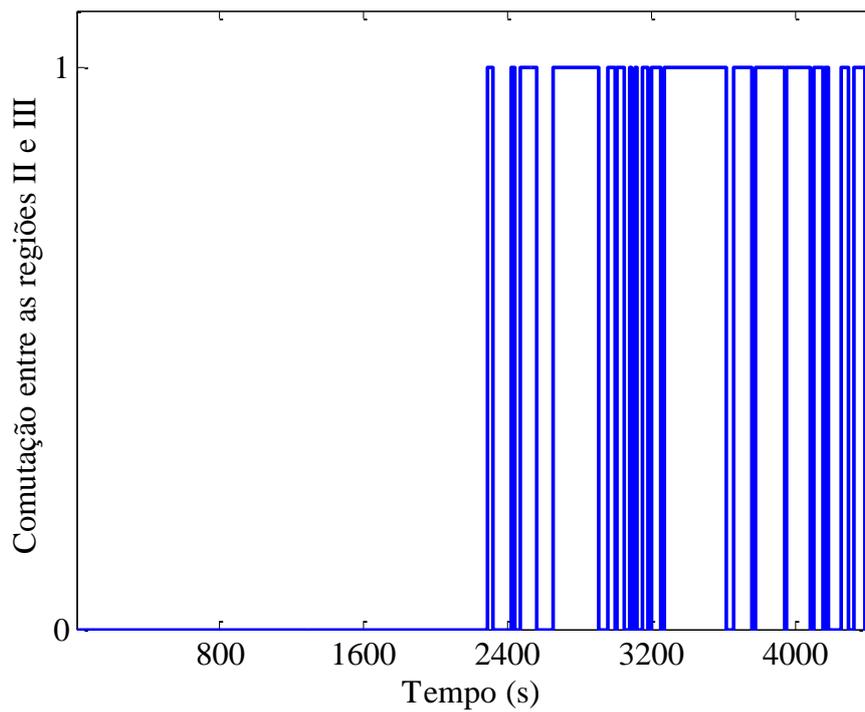


(a)

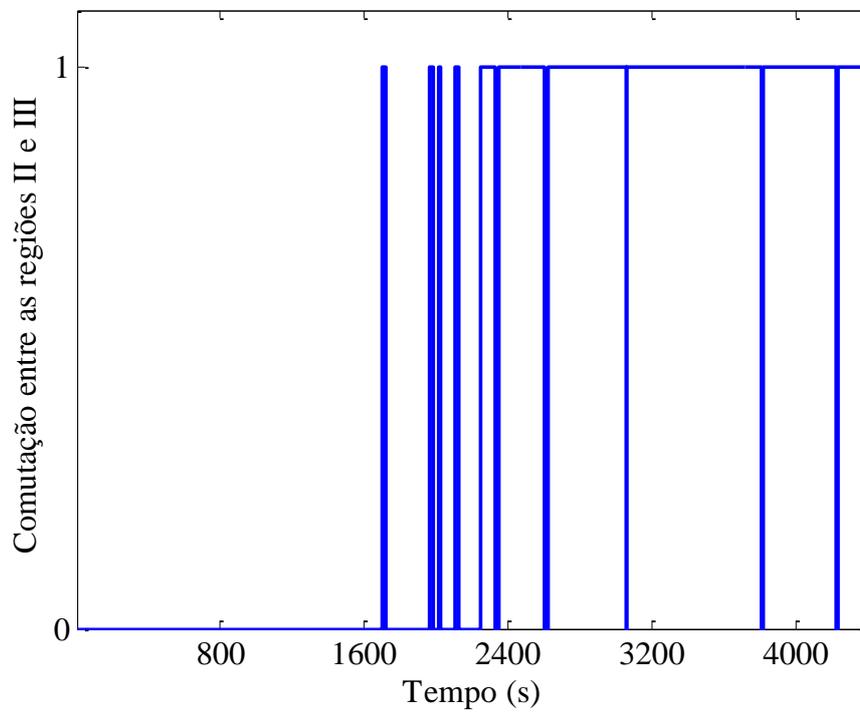


(b)

Figura 5.4 – Velocidade de rotação do GIDA e velocidade nominal.



(a)



(b)

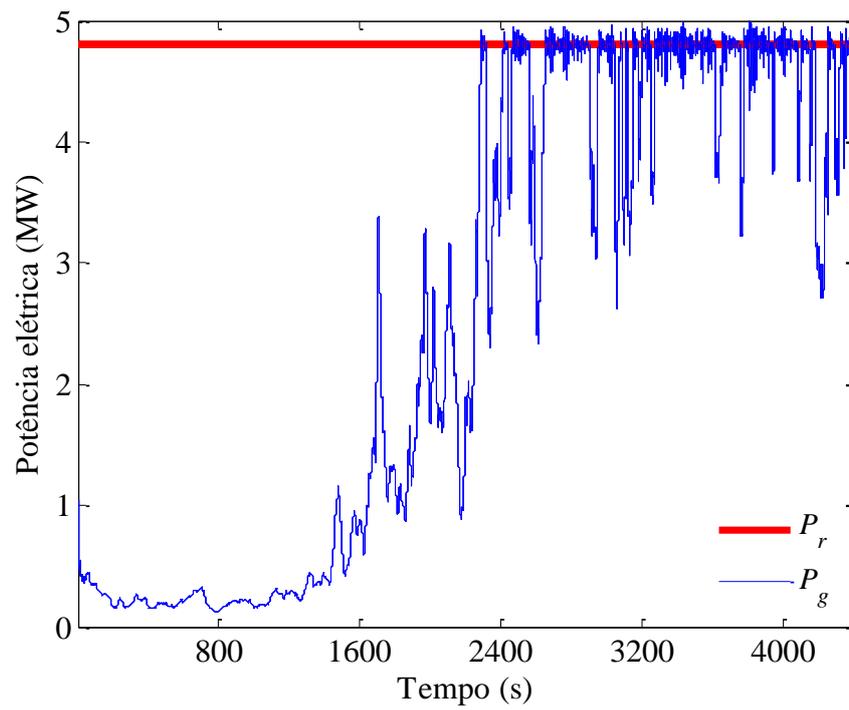
Figura 5.5 – Comutação entre as regiões II e III.

Na Figura 5.2a, sem a ação do supervisor, a potência elétrica à saída varia após 2400 s em torno da referência com algum ruído, sendo os picos observados devido à consideração do ruído branco com o objetivo de simular rajadas na velocidade do vento. Na Figura 5.3a, o ângulo do passo da pá varia com um predomínio entre  $10^\circ$  e  $20^\circ$ , sendo observado um pico que atinge um valor máximo perto de  $40^\circ$ . Na Figura 5.4a, a velocidade de rotação do gerador varia após 2400 s em torno da referência com algum ruído. Na Figura 5.5a, é observada uma comutação frequente entre as regiões II e III. Na Figura 5.2b, com a ação do supervisor, a potência elétrica à saída varia após 2400 s em torno da referência com algum ruído sendo observado que os picos têm menor elongações. Na Figura 5.3b, o ângulo do passo da pá varia com um predomínio entre  $10^\circ$  e  $30^\circ$ , sendo observado um pico que atinge um valor máximo perto de  $60^\circ$ . Na Figura 5.4b, a velocidade de rotação do gerador varia após 2400 s em torno da referência com menos elongações. Na Figura 5.5b, é observada uma comutação menos frequente entre as regiões II e III.

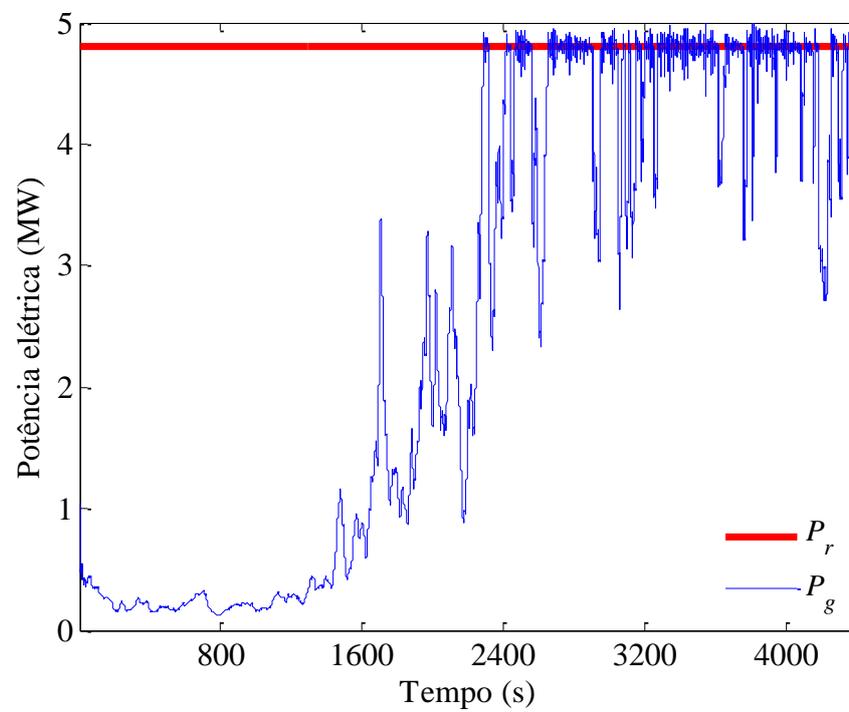
### 5.3 Controlador FOPI

O objetivo da simulação computacional é observar a ação do controlador FOPI sobre o comportamento dinâmico do SCEE, considerando o comportamento, sem ou com a ação do supervisor [Viveiros14b, Viveiros14c, Viveiros15b]

Na Figura 5.6, estão representadas a potência elétrica do GIDA, azul, e a potência de referência, vermelho. Na Figura 5.7, está representada a variação do ângulo do passo da pá. Na Figura 5.8, estão representadas a velocidade de rotação da turbina do GIDA, azul, e a velocidade nominal, vermelha. Na Figura 5.9, está representada a comutação entre as regiões II e III. As variáveis observadas sem ação do supervisor são indicadas com o índice (a) e as variáveis observadas com a ação do supervisor são indicadas com o índice (b).

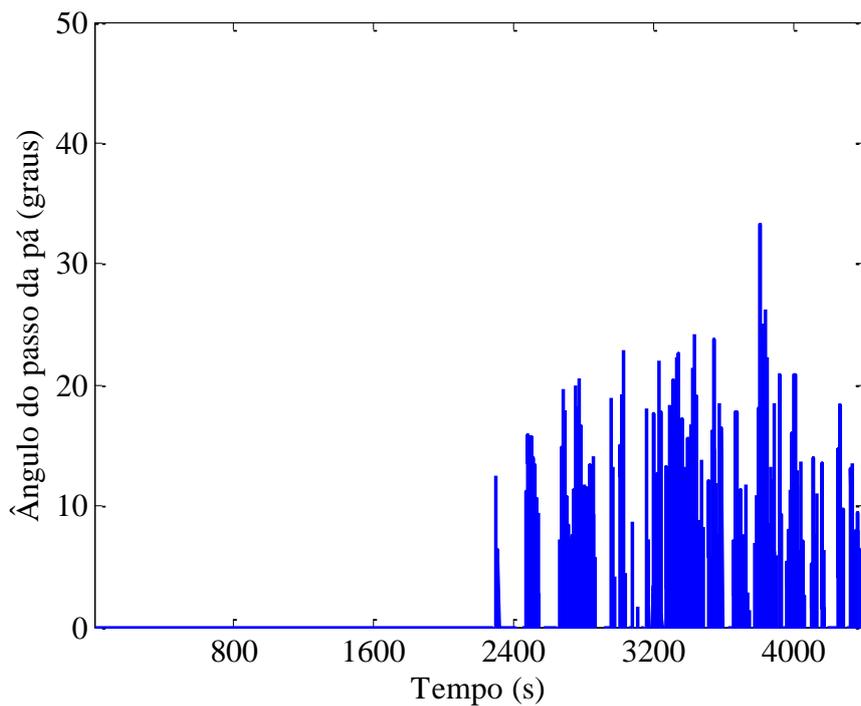


(a)

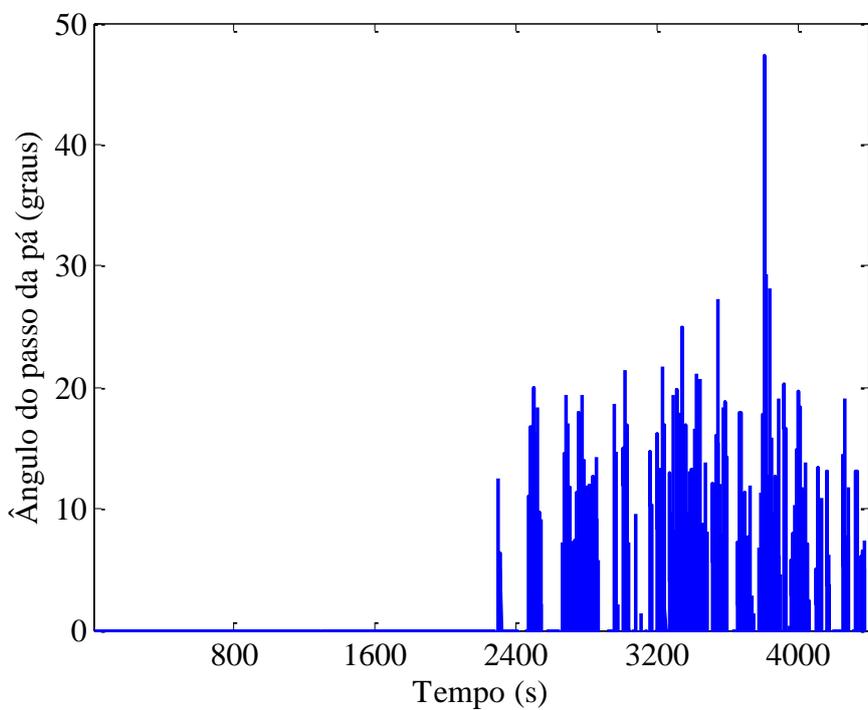


(b)

Figura 5.6 – Potência elétrica do GIDA e de referência da turbina.

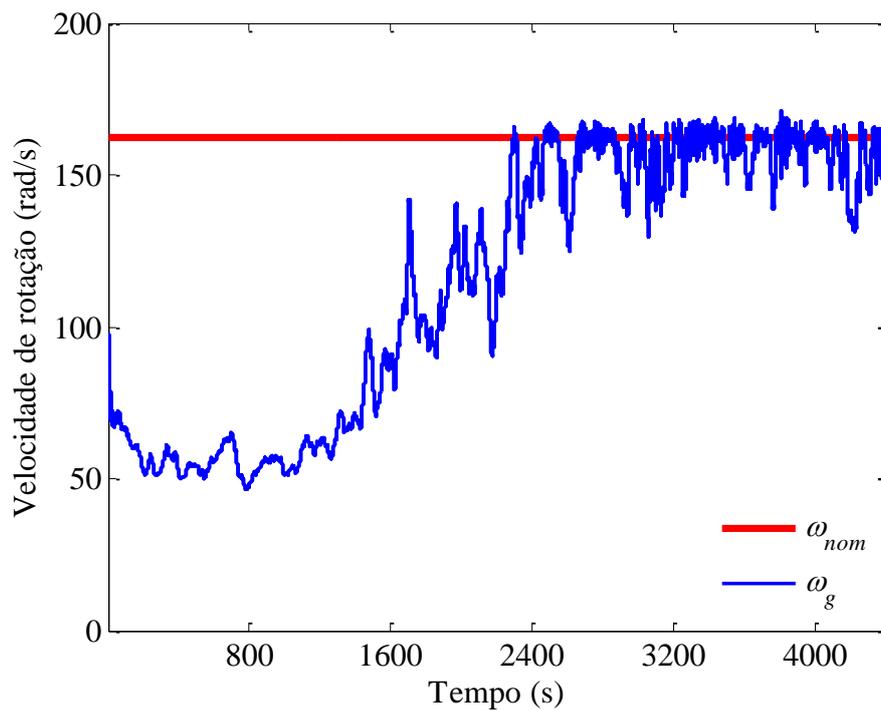


(a)

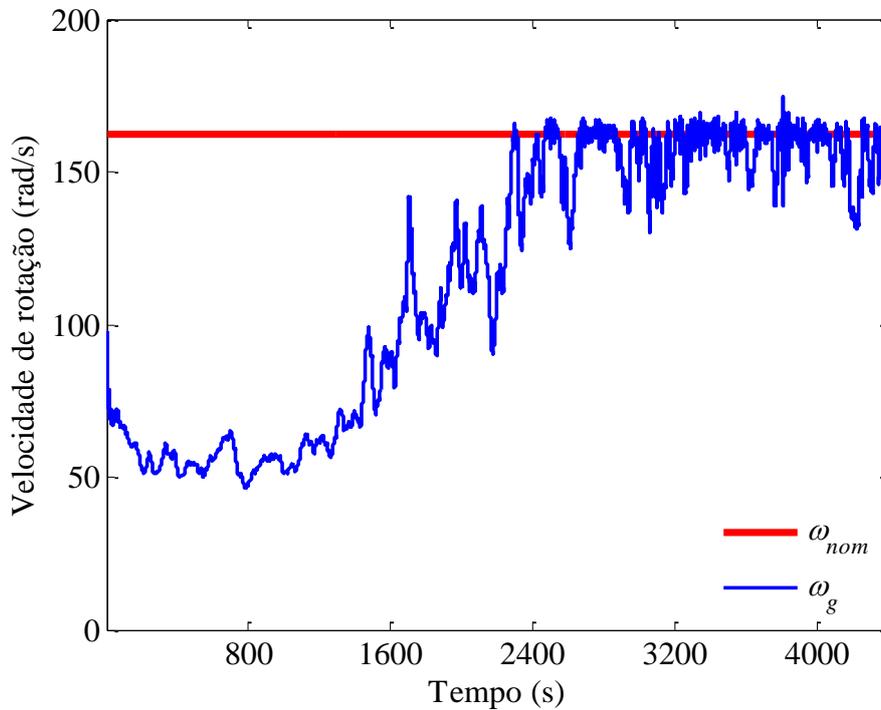


(b)

Figura 5.7 – Variação do ângulo do passo da pá.

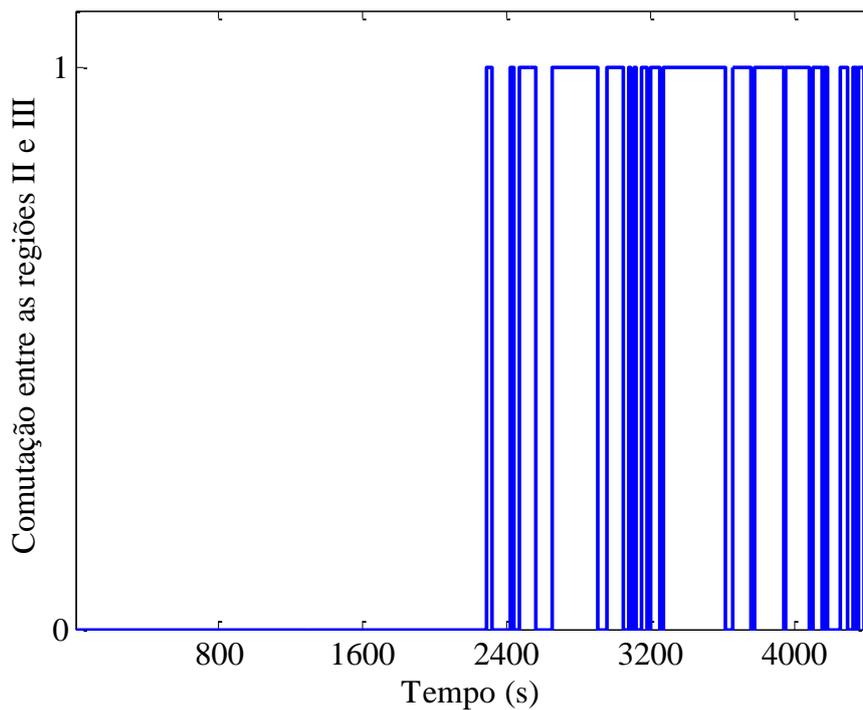


(a)

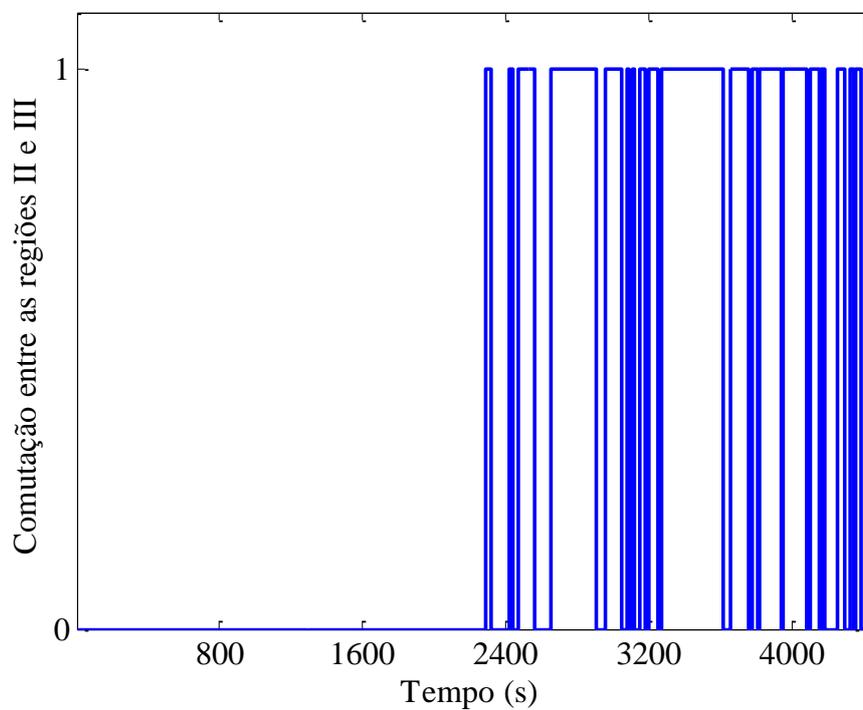


(b)

Figura 5.8 – Velocidade de rotação do GIDA e velocidade nominal.



(a)



(b)

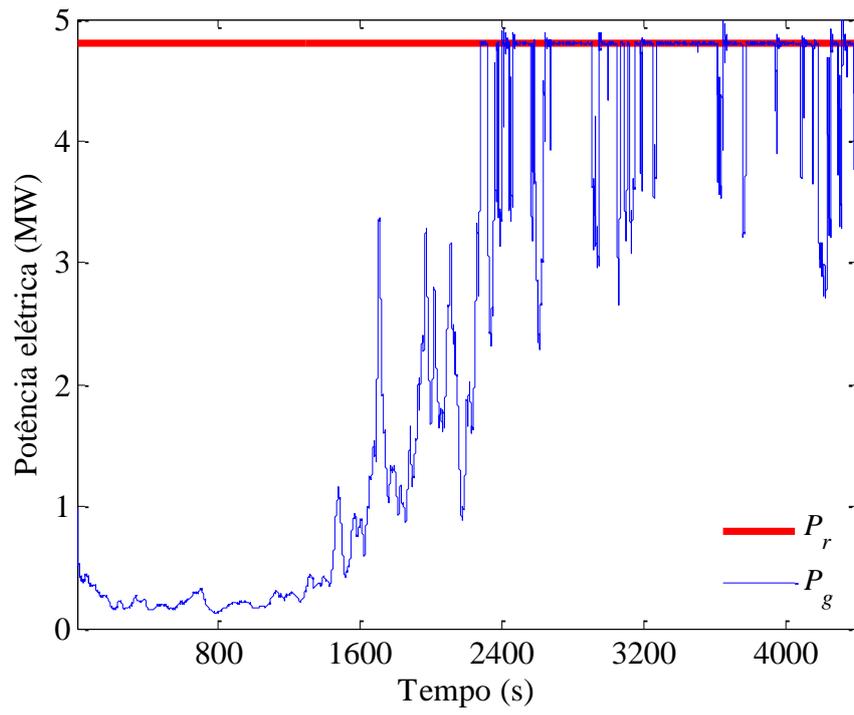
Figura 5.9 – Comutação entre as regiões II e III.

Na Figura 5.6a e b, respetivamente sem e com a ação do supervisor, a potência elétrica à saída varia após 2400 s em torno da referência com algum ruído, sendo os picos observados devido à consideração do ruído branco com o objetivo de simular rajadas na velocidade do vento. A observação das figuras permite concluir que o comportamento da potência elétrica à saída não é significativamente diferenciado. Na Figura 5.7a, o ângulo do passo da pá varia com um predomínio entre  $5^\circ$  e  $25^\circ$ , sendo observado apenas um pico com um valor máximo acima de  $30^\circ$ . Na Figura 5.7b, o ângulo do passo da pá varia com um predomínio entre  $5^\circ$  e  $30^\circ$ , sendo observado apenas um pico com um valor máximo acima de  $50^\circ$ . Na Figura 5.8a e b, a velocidade de rotação do gerador varia após 2400 s em torno da referência com algum ruído. A observação das figuras permite concluir que o comportamento da velocidade de rotação do gerador não é significativamente diferenciado. Na Figura 5.9a e b, é observada uma comutação frequente entre as regiões II e III. A observação das figuras é coerente com o facto de não haver diferenciação significativa.

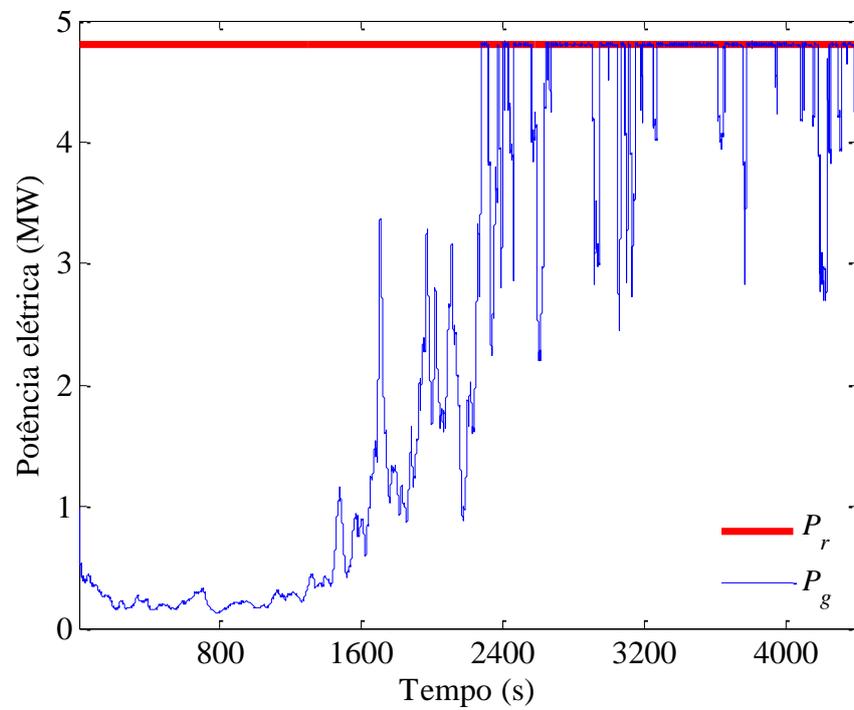
## 5.4 Controlador Fuzzy PI

O objetivo da simulação computacional é observar a ação do controlador Fuzzy PI sobre o comportamento dinâmico do SCEE, sem ou com a ação do supervisor [Viveiros13b, Viveiros14a, Viveiros14b, Viveiros15b, Viveiros15c].

Na Figura 5.10, estão representadas a potência elétrica do GIDA, azul, e a potência de referência, vermelho. Na Figura 5.11, está representada a variação do ângulo do passo da pá. Na Figura 5.12, estão representadas a velocidade de rotação da turbina do GIDA, azul, e a velocidade nominal, vermelha. Na Figura 5.13, está representada a comutação entre as regiões II e III. As variáveis observadas sem ação do supervisor são indicadas com o índice (a) e as variáveis observadas com a ação do supervisor são indicadas com o índice (b).



(a)



(b)

Figura 5.10 – Potência elétrica do GIDA e de referência da turbina.

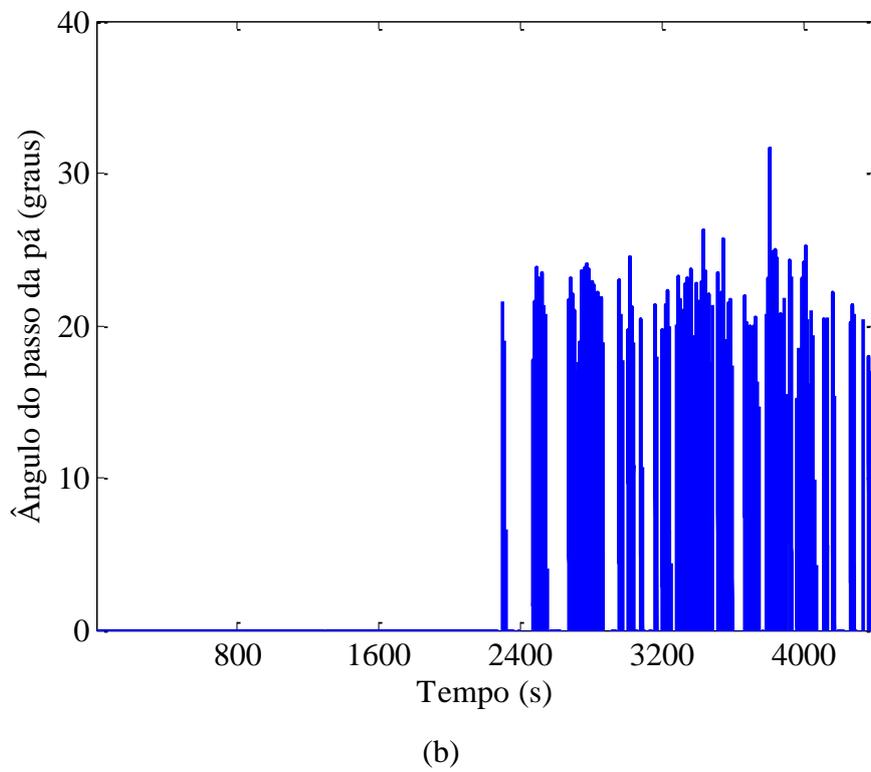
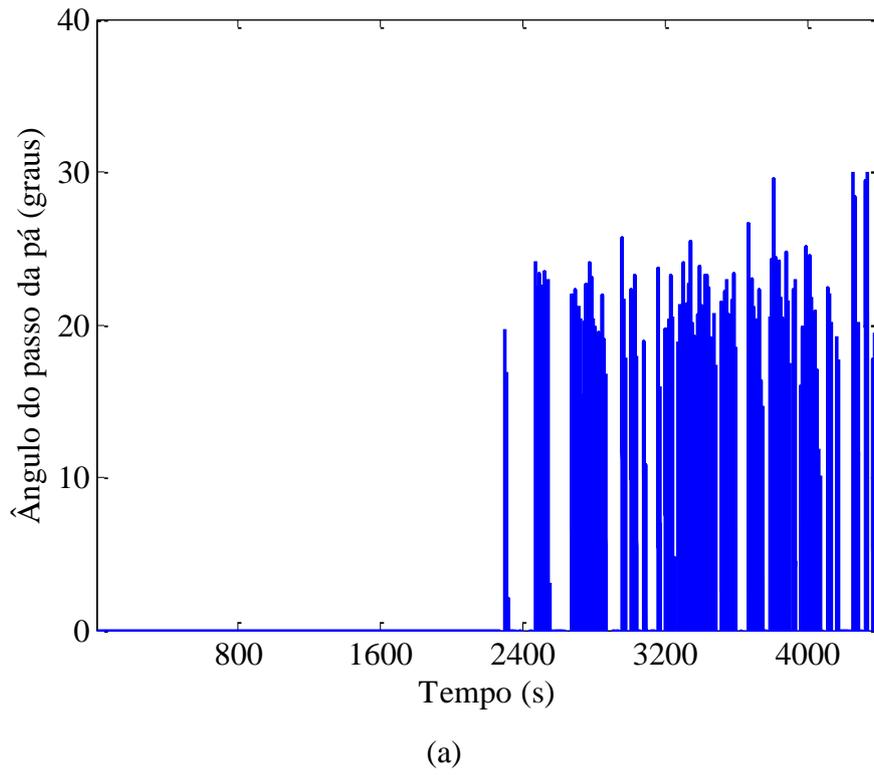
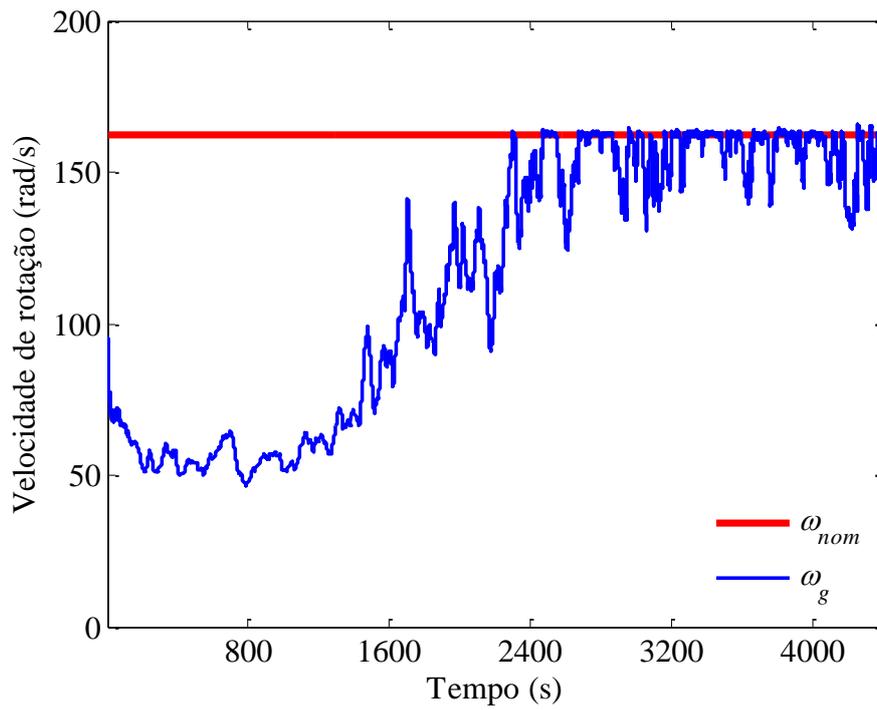
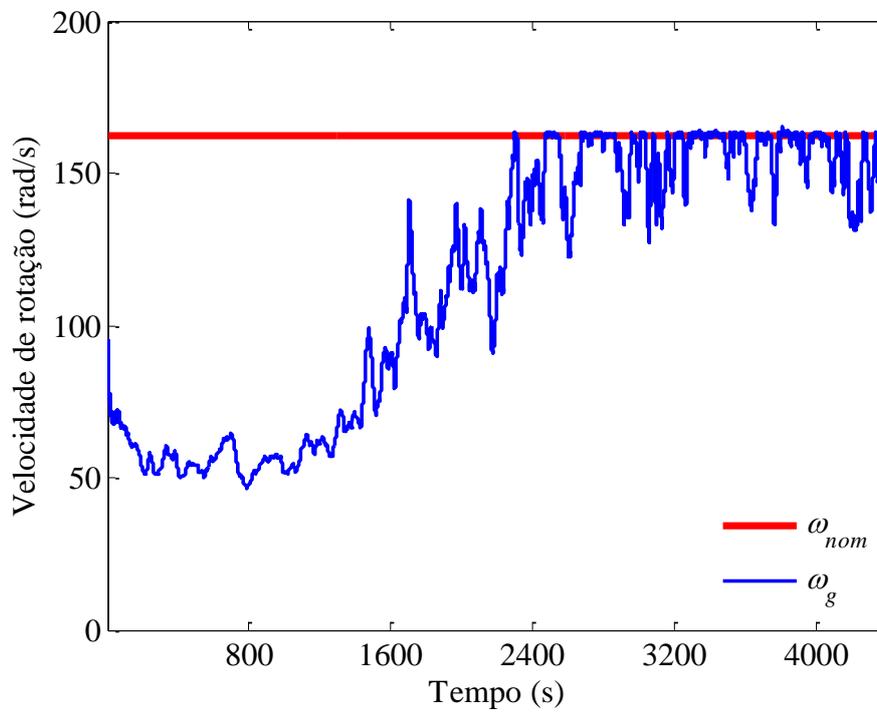


Figura 5.11 – Variação do ângulo do passo da pá.

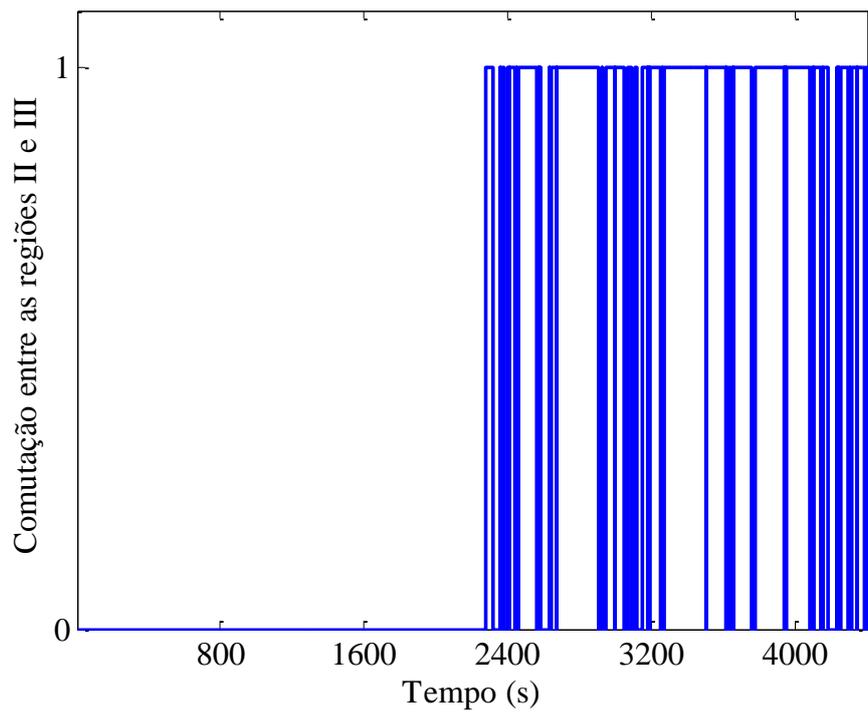


(a)

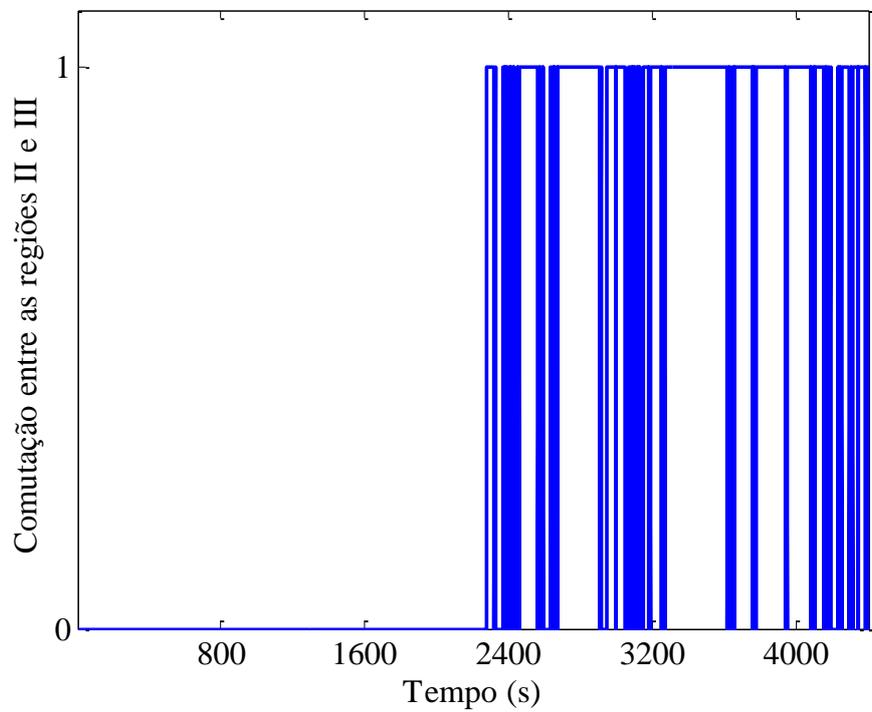


(b)

Figura 5.12 – Velocidade de rotação do GIDA e velocidade nominal.



(a)



(b)

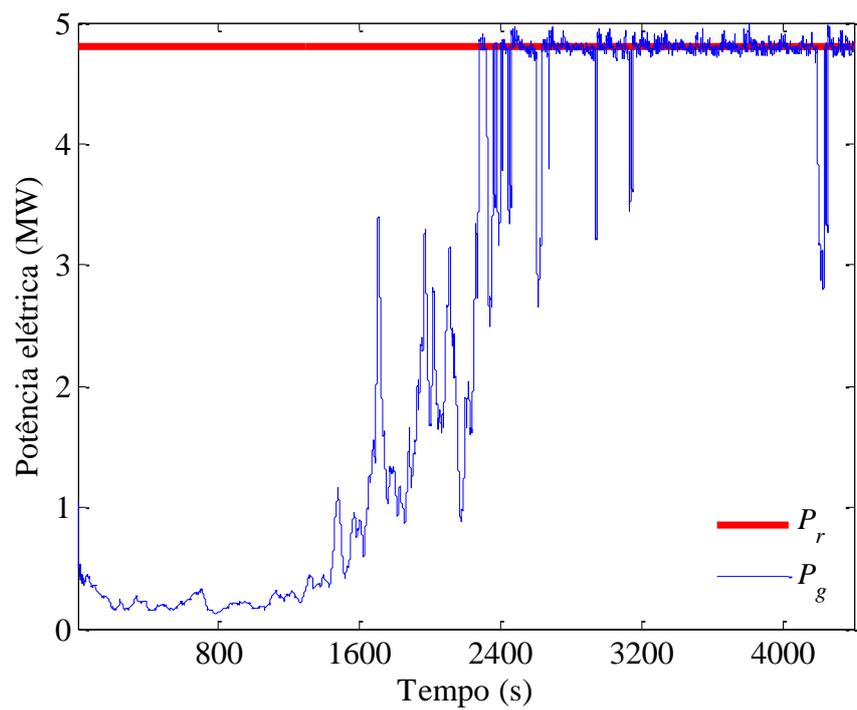
Figura 5.13 – Comutação entre as regiões II e III.

Na Figura 5.10a e b, respetivamente sem e com a ação do supervisor, a potência elétrica à saída varia após 2400 s em torno da referência com menos ruído relativamente ao controlador FOPI, sendo os picos observados devido à consideração do ruído branco com o objetivo de simular rajadas na velocidade do vento. A observação das figuras permite concluir como no caso do controlador FOPI que a potência elétrica não é significativamente diferenciada. Na Figura 5.11a, o ângulo do passo da pá varia com um predomínio entre  $15^\circ$  e  $30^\circ$ . Na Figura 5.11b, o ângulo do passo da pá varia com um predomínio entre  $15^\circ$  e  $30^\circ$ , sendo observado apenas um pico com um valor máximo acima de  $30^\circ$ . Na Figura 5.12a e b, a velocidade de rotação do gerador varia após 2400 s em torno da referência com algum ruído. A observação das figuras permite concluir que a velocidade de rotação do gerador não é significativamente diferenciada. Na Figura 5.13a e b, é observada uma comutação frequente entre as regiões II e III. A observação das figuras é como no caso do controlador FOPI coerente com o facto de não haver diferenciação significativa.

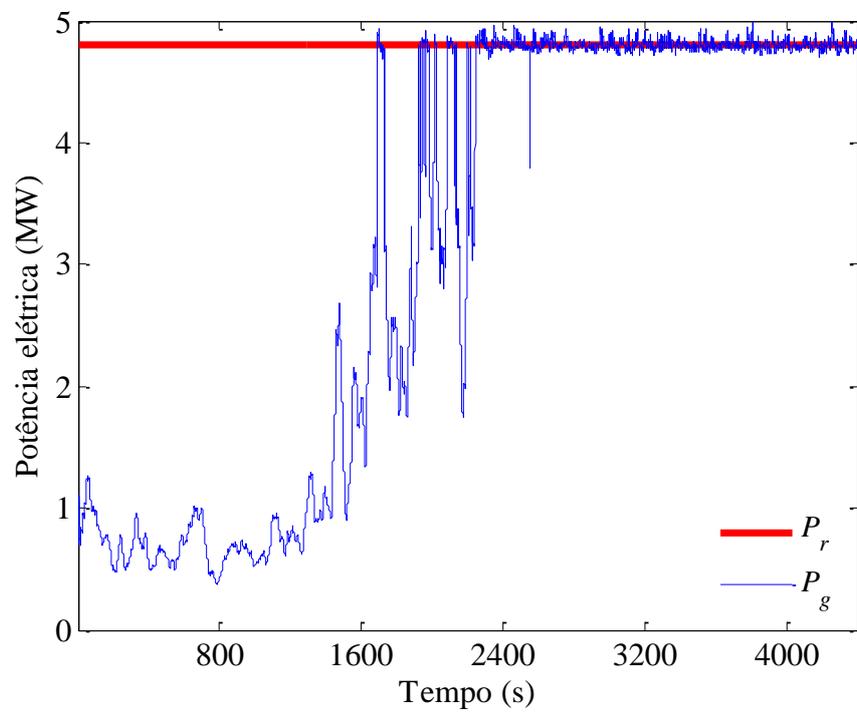
## 5.5 Controlador LQG

O objetivo da simulação computacional é observar a ação do controlador LQG sobre o comportamento dinâmico do SCEE, sem ou com a ação do supervisor [Viveiros13b, Viveiros14a, Viveiros15c].

Na Figura 5.14, estão representadas a potência elétrica do GIDA, azul, e a potência de referência, vermelho. Na Figura 5.15, está representada a variação do ângulo do passo da pá. Na Figura 5.16, estão representadas a velocidade de rotação da turbina do GIDA, azul, e a velocidade nominal, vermelha. Na Figura 5.17, está representada a comutação entre as regiões II e III. As variáveis observadas sem ação do supervisor são indicadas com o índice (a) e as variáveis observadas com a ação do supervisor são indicadas com o índice (b).

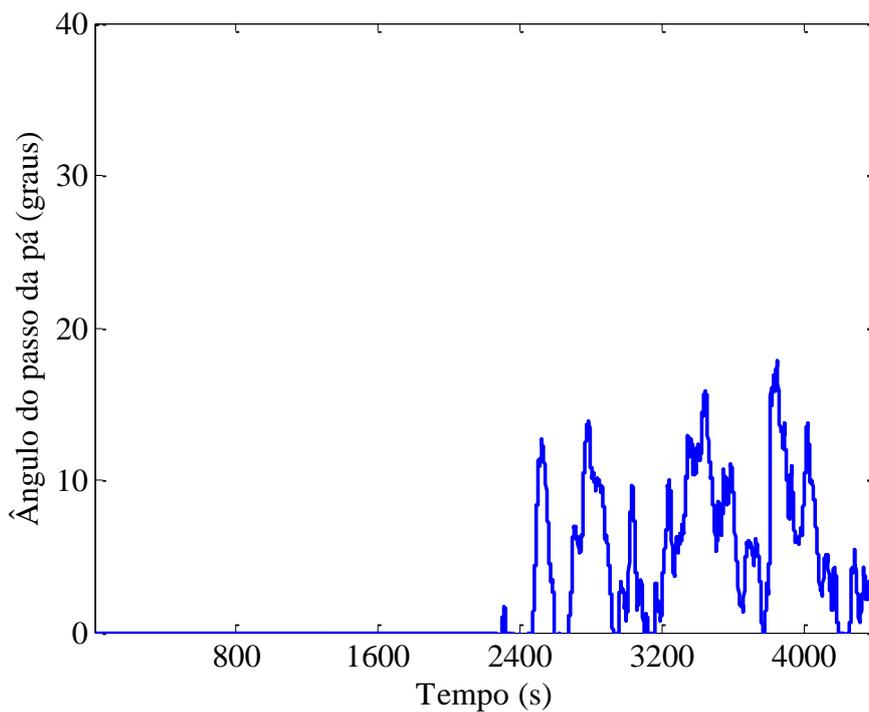


(a)

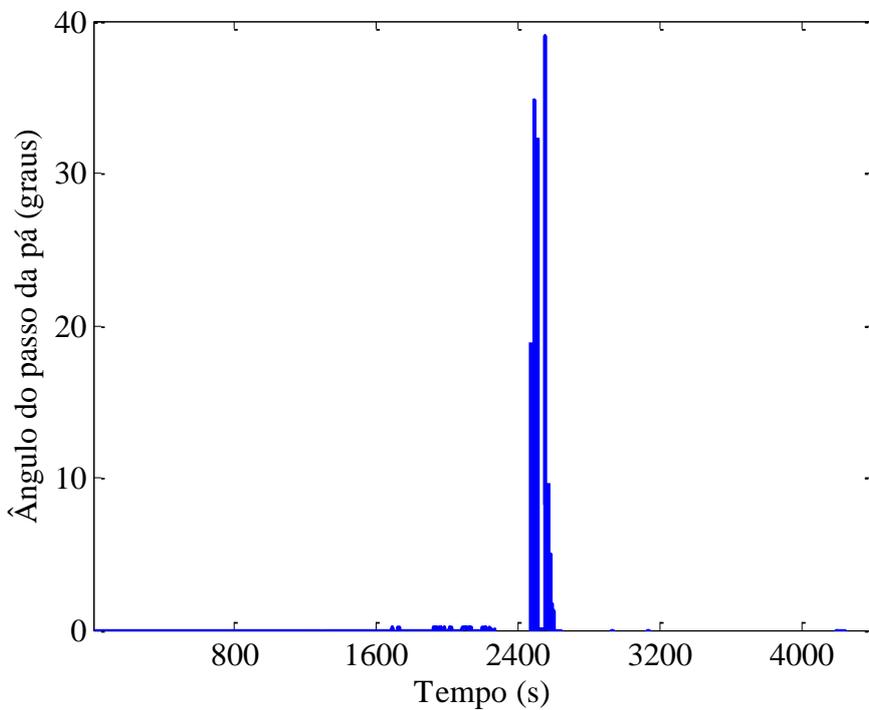


(b)

Figura 5.14 – Potência elétrica do GIDA e de referência da turbina.

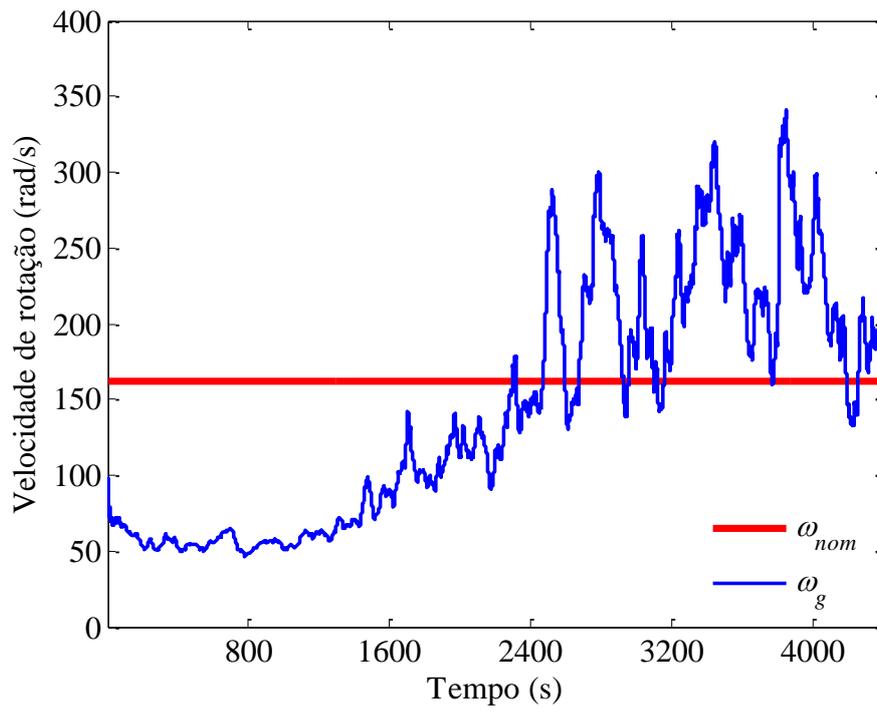


(a)

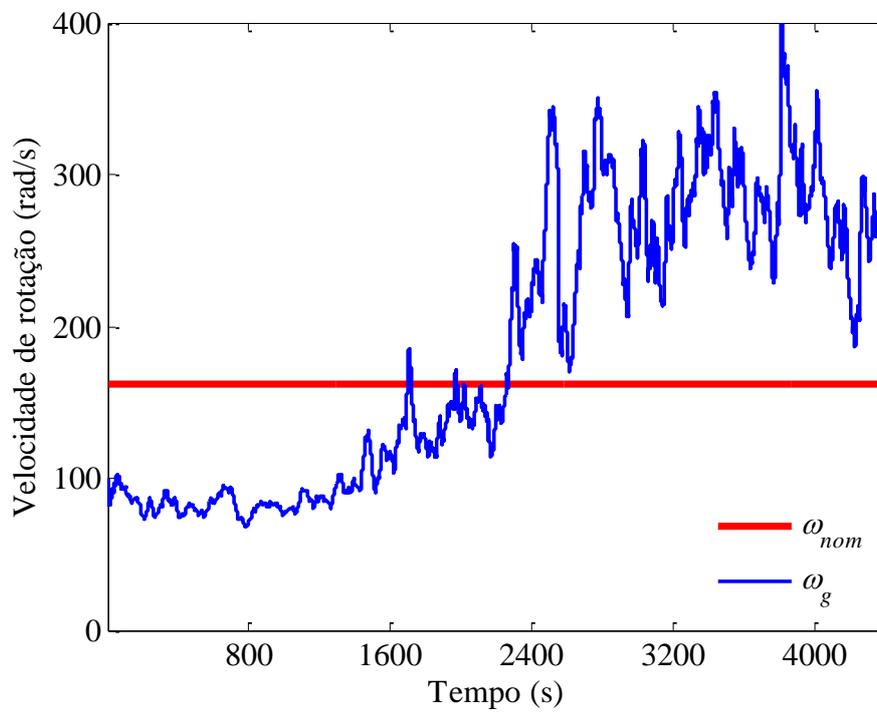


(b)

Figura 5.15 – Variação do ângulo do passo da pá.

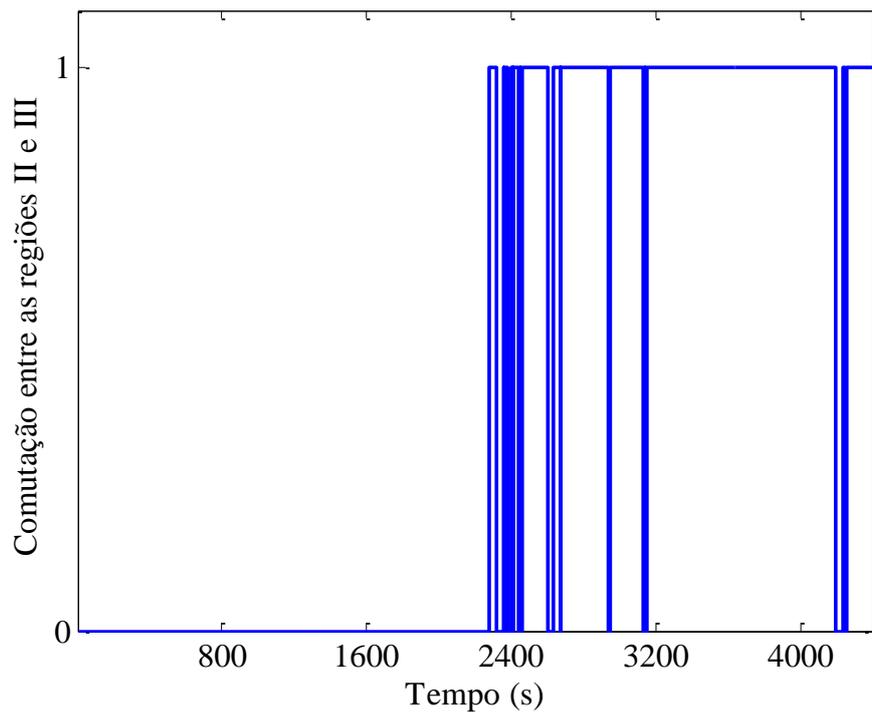


(a)

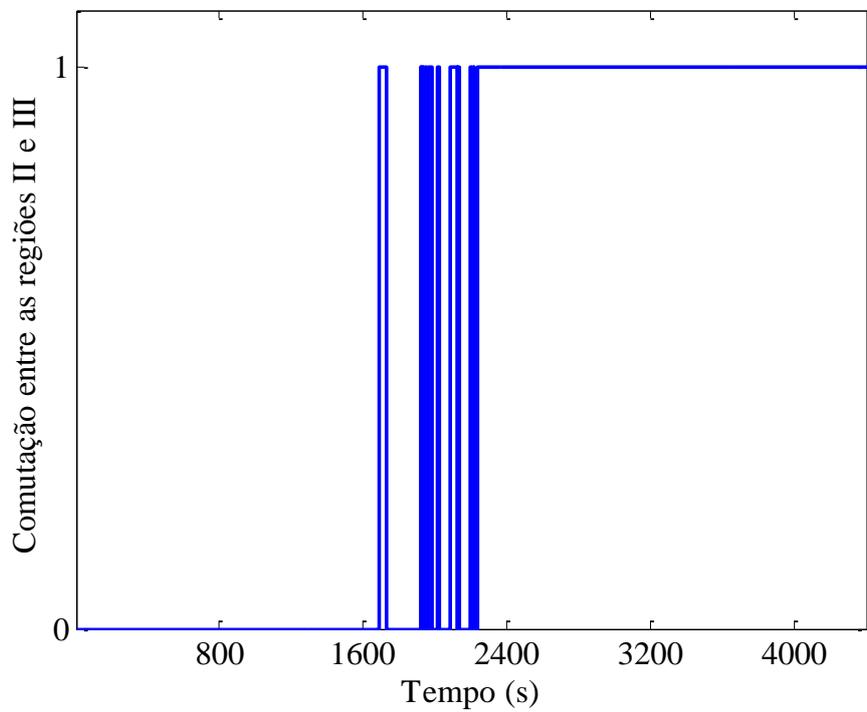


(b)

Figura 5.16 – Velocidade de rotação do GIDA e velocidade nominal.



(a)



(b)

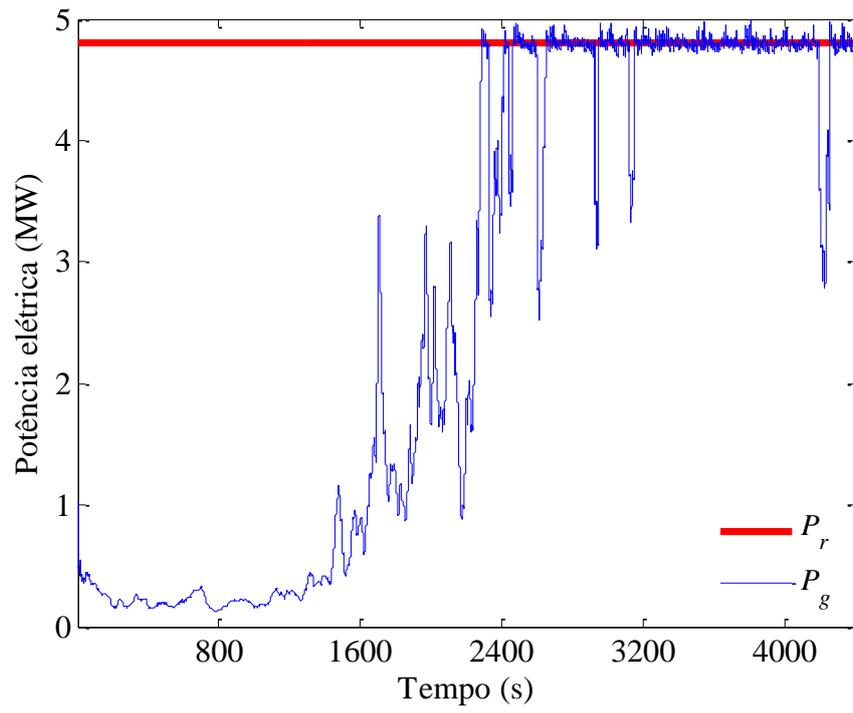
Figura 5.17 – Comutação entre as regiões II e III.

Na Figura 5.14a, sem a ação do supervisor, a potência elétrica à saída varia após 2400 s em torno da referência com algum ruído, sendo os picos observados devido à consideração do ruído branco com o objetivo de simular rajadas na velocidade do vento. Na Figura 5.15a, o ângulo do passo da pá varia com um predomínio entre  $5^\circ$  e  $20^\circ$ . Na Figura 5.16a, a velocidade de rotação do gerador varia após 2400 s em torno da velocidade nominal com predomínio para valores por excesso inferiores a 350 rad/s. Na Figura 5.17a, é observada uma comutação menos frequente entre as regiões II e III relativamente aos casos dos controladores PI e FOPI, apresentando uma maior permanência na região III.

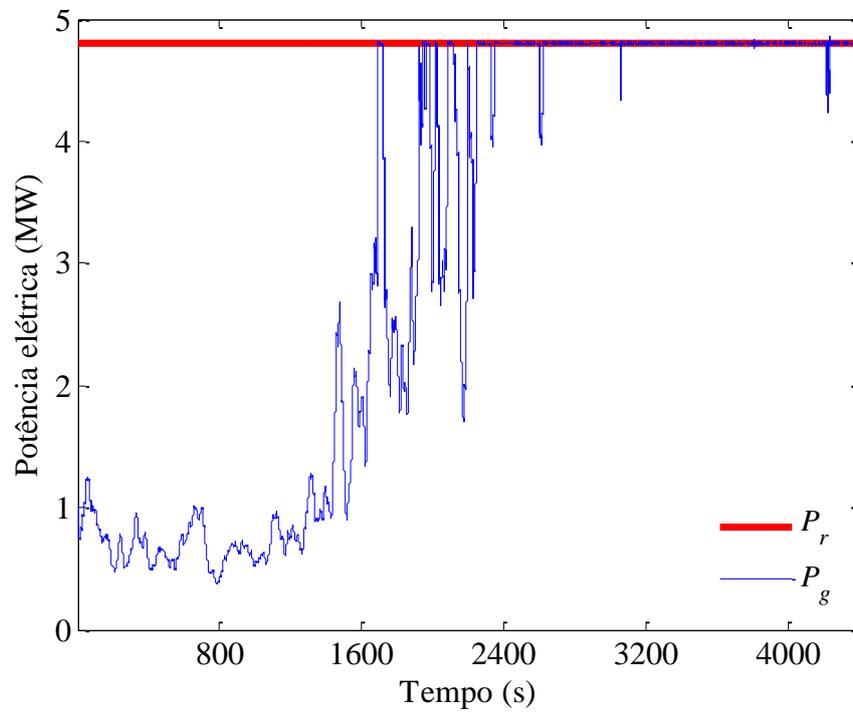
Na Figura 5.14b, com a ação do supervisor, a potência elétrica à saída varia após 2400 s em torno da referência com algum ruído e com picos de menor elongação. Na Figura 5.15b, o ângulo do passo da pá varia entre  $10^\circ$  e  $40^\circ$  no intervalo de tempo entre 2400 s e 2800 s. Na Figura 5.16b, a velocidade de rotação do gerador varia após 2400 s acima da velocidade nominal e os 400 rad/s. Na Figura 5.17b, é observada uma comutação menos frequente entre as regiões II e III sendo que após 2400s, a posição do controlador é mantida na região III.

## 5.6 Controlador MPC

O objetivo da simulação computacional é observar a ação do controlador MPC sobre o comportamento dinâmico do SCEE, sem ou com a ação do supervisor [Viveiros15a]. Na Figura 5.18, estão representadas a potência elétrica do GIDA, azul, e a potência de referência, vermelho. Na Figura 5.19, está representada a variação do ângulo do passo da pá. Na Figura 5.20, estão representadas a velocidade de rotação da turbina do GIDA, azul, e a velocidade nominal, vermelha. Na Figura 5.21, está representada a comutação entre as regiões II e III. As variáveis observadas sem ação do supervisor são indicadas com o índice (a) e as variáveis observadas com a ação do supervisor são indicadas com o índice (b).

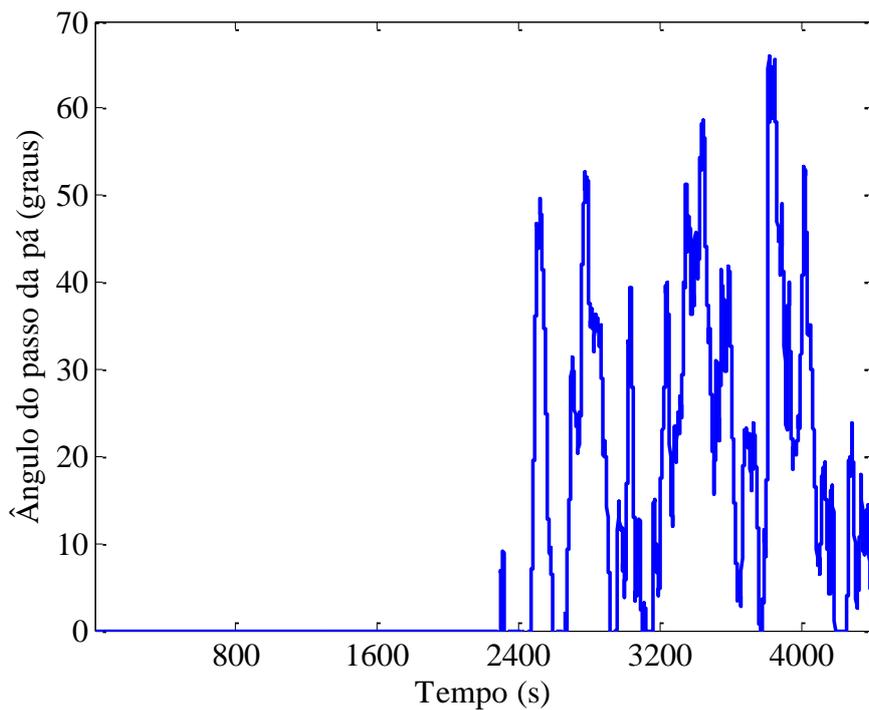


(a)

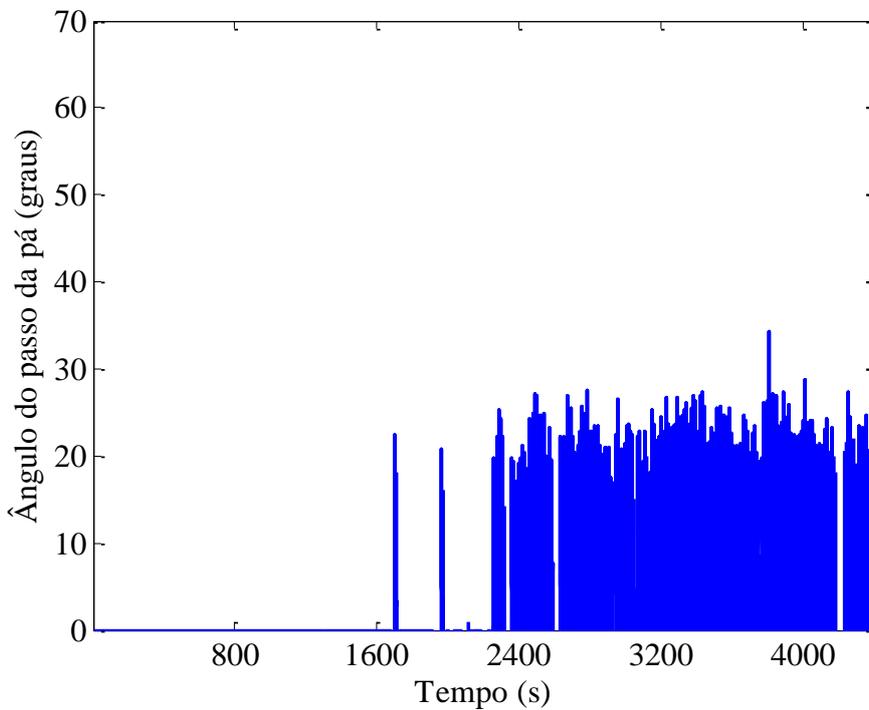


(b)

Figura 5.18 – Potência elétrica do GIDA e de referência da turbina.



(a)



(b)

Figura 5.19 – Variação do ângulo do passo da pá.

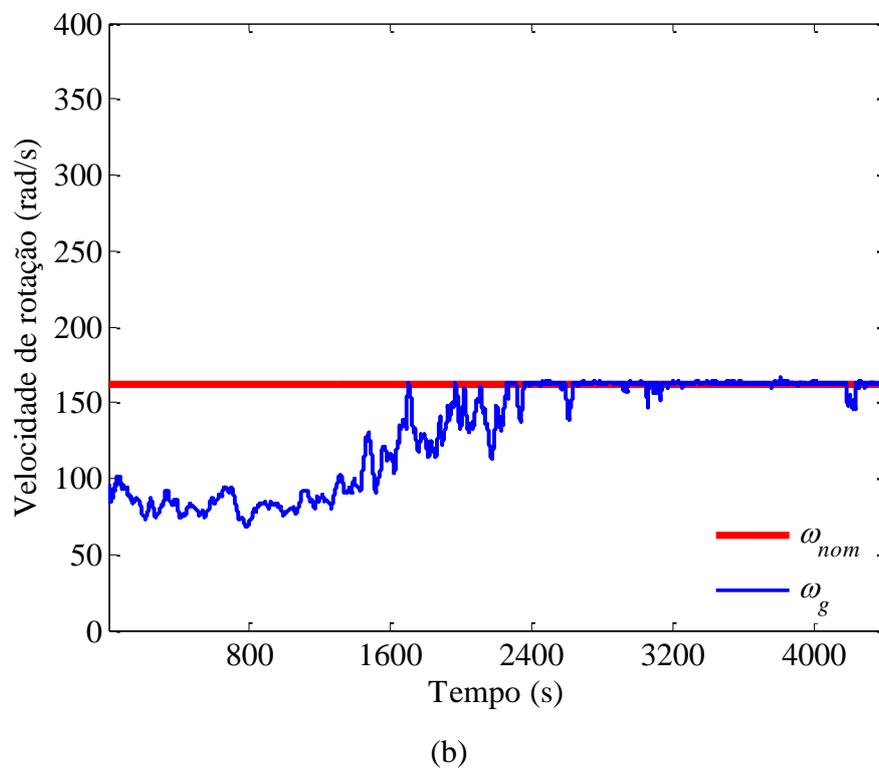
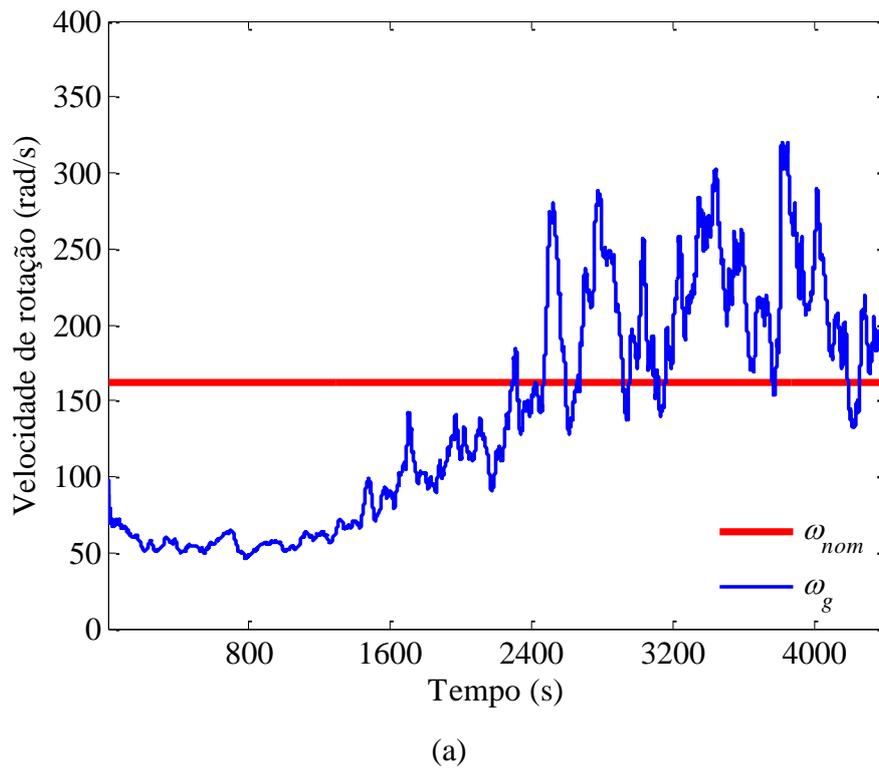
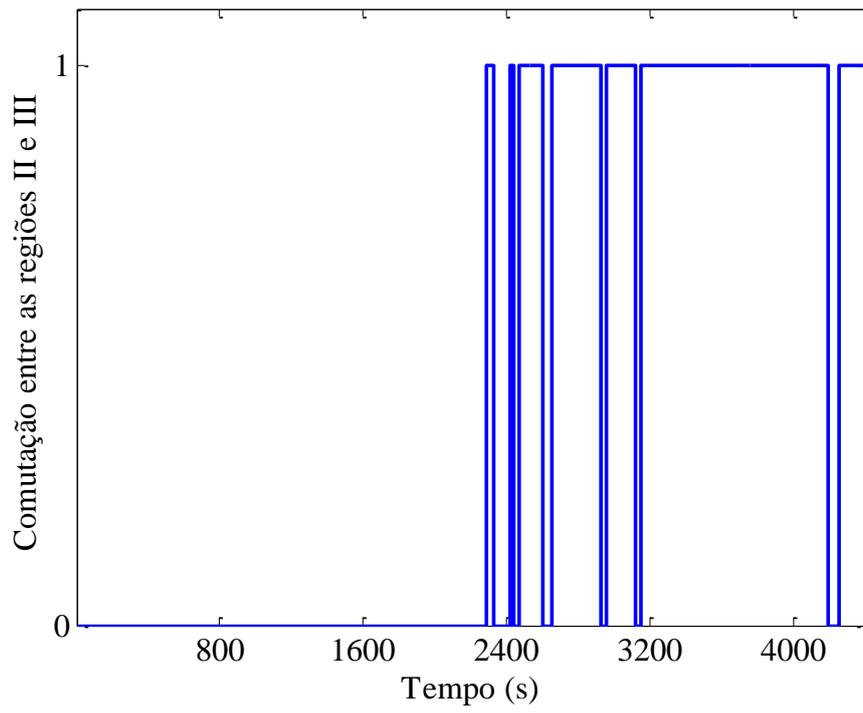
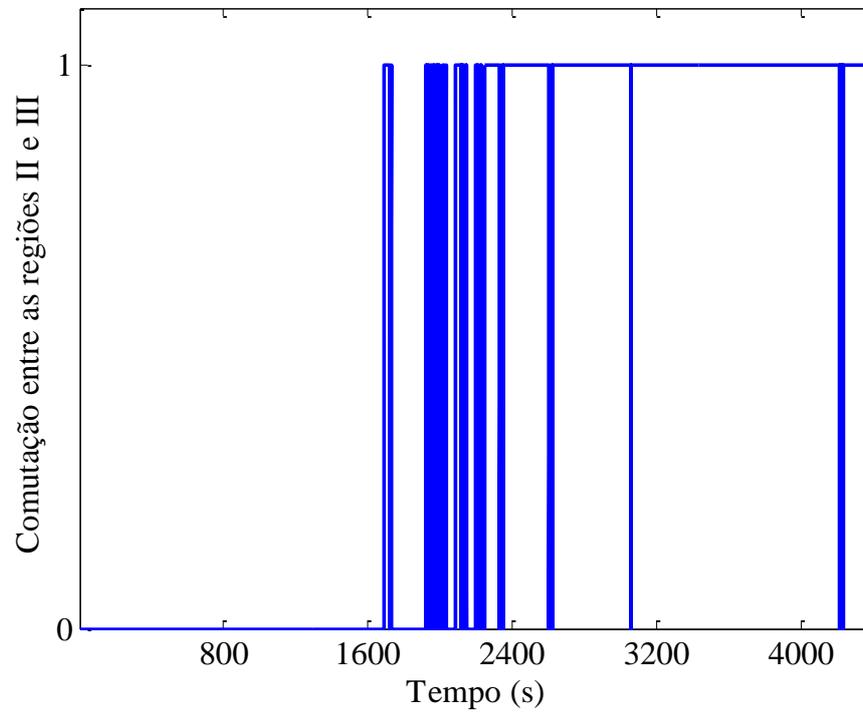


Figura 5.20 – Velocidade de rotação do GIDA e velocidade nominal.



(a)



(b)

Figura 5.21 – Comutação entre as regiões II e III.

Na Figura 5.18a, sem a ação do supervisor, a potência elétrica à saída varia após 2400 s em torno da referência com algum ruído e com picos com uma amplitude considerável. Na Figura 5.19a, o ângulo do passo da pá varia entre  $10^\circ$  e  $70^\circ$ . Na Figura 5.20a, a velocidade de rotação do gerador varia após 2400 s em torno da velocidade nominal com predomínio para valores por excesso inferiores a 350 rad/s. Na Figura 5.21a, é observada uma comutação menos frequente entre as regiões II e III com permanência na região III. Na Figura 5.18b, com a ação do supervisor, a potência elétrica à saída varia após 2400 s em torno da referência com um ruído comparativamente mínimo, i.e., as elongações dos picos são comparativamente inferiores. Na Figura 5.19b, o ângulo do passo da pá varia com um predomínio entre  $10^\circ$  e  $30^\circ$ , sendo observado um pico com um valor máximo acima de  $30^\circ$ . Na Figura 5.20b, a velocidade de rotação do gerador varia após 2400 s em torno da velocidade nominal com menos oscilações comparativamente às anteriores. Na Figura 5.21b, é observado que a ação do supervisor consegue uma maior permanência na região III.

## 5.7 Desempenho dos Controladores

Nesta secção é avaliado o desempenho dos controladores através da utilização de métricas. As métricas utilizadas permitem aferir o desempenho dos controladores, em termos do erro em regime forçado ITAE e em termos do esforço da ação do controlador ISV.

Tabela 5.2 – Desempenho dos controladores

Controlador	PI	FOPI	Fuzzy PI	LQG	MPC
<b>Sem Supervisor</b>					
<b>ITAE</b>	$1,2103 \times 10^{15}$	$1,2073 \times 10^{15}$	$1,1752 \times 10^{15}$	$1,0792 \times 10^{15}$	$1,0886 \times 10^{15}$
<b>ISV</b>	$6,054 \times 10^6$	$5,7895 \times 10^6$	$6,4604 \times 10^6$	$1,0770 \times 10^7$	$1,4791 \times 10^7$
<b>Com Supervisor</b>					
<b>ITAE</b>	$1,2048 \times 10^{15}$	$1,2087 \times 10^{15}$	$1,1643 \times 10^{15}$	$7,0328 \times 10^{14}$	$7,0250 \times 10^{14}$
<b>ISV</b>	$5,7652 \times 10^6$	$5,8518 \times 10^6$	$6,1677 \times 10^6$	$2,7171 \times 10^5$	$1,7276 \times 10^7$

Na Tabela 5.2 são quantificados os valores do ITAE e ISV, respetivamente sem e com a ação do supervisor. A Tabela 5.3. é obtida com o objetivo de estabelecer uma comparação entre o desempenho dos controladores, considerando valores de desempenho por unidade do que apresenta menor valor de desempenho.

Tabela 5.3 – Desempenho dos controladores em valores por unidade

Controlador	PI	FOPI	Fuzzy PI	LQG	MPC
<b>Sem Supervisor</b>					
<b>ITAE</b>	1,12	1,12	1,09	1,00	1,01
<b>ISV</b>	1,05	1,00	1,12	1,87	2,57
<b>Com Supervisor</b>					
<b>ITAE</b>	1,72	1,72	1,66	1,00	1,00
<b>ISV</b>	21,22	21,54	22,70	1,00	63,58

Na Tabela 5.3, no caso sem a ação do supervisor é possível observar o menor erro de seguimento obtido com a ação do controlador LQG, sendo que o MPC apresenta um erro comparativamente superior em cerca de 1%. Pelo que, ambos os controladores apresentam um desempenho equivalente. Relativamente ao esforço da ação de controlo, é observado um aumento do esforço nos controladores LQG e MPC devido ao facto da ação de controlo ser realizada com maior solicitação. No caso com a ação do supervisor é possível observar também que o menor erro de seguimento é obtido com a ação do controlador LQG e do MPC. Pelo que, ambos os controladores apresentam um desempenho equivalente no que respeita ao erro. Relativamente ao esforço da ação de controlo, é observado que o menor esforço é obtido com o controlador LQG, tendo o MPC o maior esforço.

## 5.8 Conclusões

A observação das Figuras 5.2 até à Figura 5.21 permite concluir que consoante o tipo de controlador, sem ou com a ação do supervisor, as respostas apresentam desempenhos com diversidade que quantificados pelo ITAE e ISV, como apresentado na Tabela 5.2 e 5.3, têm de satisfazer um compromisso entre o erro de regime forçado e o esforço da ação de controlo. Assim e em conformidade com os resultados numéricos sobre o desempenho dos controladores, o LQG e o MPC apresentam melhor desempenho, sendo a ação do supervisor favorável no que respeita à estabilização da potência elétrica e da velocidade de rotação do gerador.

Com o controlador PI sob a ação do supervisor, é observada uma melhoria no que respeita ao erro de seguimento e à influência do ruído branco na potência elétrica e na velocidade de rotação do gerador. Esta melhoria é justificada por se observar uma maior variação do ângulo de passo da pá pelo facto da ação de controlo se realizar com predominância na região III.

A comparação, sem ou com a ação do supervisor, observada com o controlador FOPI permite concluir que existe semelhança na resposta da potência elétrica de saída, na resposta de velocidade de rotação e na comutação frequente entre as regiões II e III. Com a ação do supervisor a variação do ângulo de passo da pá é maior.

Com o controlador Fuzzy PI, sem ou com a ação do supervisor, é observada uma melhoria no que respeita ao ruído na resposta da potência elétrica de saída. Contudo, ainda é possível observar alguns picos com amplitude considerável. Existem semelhanças, sem ou com a ação do supervisor, nas respostas de velocidade de rotação do gerador que segue a referência com algum ruído e nas comutações frequentes entre as regiões II e III. Relativamente à variação do ângulo de passo da pá, existe uma amplitude maior e constante.

Com o controlador LQG e sob a ação do supervisor, é observada uma melhoria na resposta da potência elétrica de saída no seguimento da referência devido à predominante ausência de picos, sendo observado ainda algum ruído. Esta melhoria é justificada pelo facto da ação de controlo se realizar sempre na região III. As respostas de velocidade de rotação são semelhantes, sem ou com a ação do supervisor. Relativamente à variação do ângulo de passo da pá, existe uma variação com uma amplitude menor ao longo da região III sem a ação do supervisor e uma variação pontual com uma amplitude elevada com a ação do supervisor.

Com o controlador MPC e sob a ação do supervisor, é observada uma melhoria na resposta da potência elétrica de saída no seguimento da referência devido à ausência de picos e de ruído e na resposta de velocidade de rotação no seguimento da velocidade nominal. Relativamente à variação do ângulo de passo da pá, existe uma variação com uma amplitude maior na ausência do supervisor e existe uma variação constante com uma amplitude menor na presença do supervisor.

---

# CAPÍTULO

# 6

---

## Conclusão

*Neste capítulo são apresentadas as contribuições originais desta tese sobre o tema do controlo e supervisão de sistemas de conversão de energia eólica ligados à rede elétrica. Adicionalmente, são indicadas as publicações científicas que resultaram, no contexto de divulgação à comunidade científica, do trabalho de investigação realizado durante a elaboração desta tese. No final do capítulo são indicadas linhas de investigação para futuros desenvolvimentos.*

## 6.1 Contribuições

O trabalho de investigação realizado sobre o tema de controlo e supervisão do SCEE ligado à rede elétrica, conducente à elaboração desta tese, depende da execução das seguintes tarefas:

- T1 Estudo dos modelos que integram o SCEE tais como o modelo da pá da turbina e ângulo de passo, o modelo do sistema de transmissão mecânico, o modelo do sistema gerador e conversor e o modelo do sistema de controlo;
- T2 Desenvolvimento de uma arquitetura de controlo com dois níveis, nível de supervisão e nível de execução;
- T3 Estudo de diferentes tipos de controladores tais como controladores de ordem inteira, controladores de ordem fracionária, controladores de lógica difusa, controladores adaptativos e controladores preditivos.
- T4 Estudo de um supervisor cuja função é determinar qual o estado operacional mais adequado entre os estados possíveis;
- T5 Simulação dos diferentes tipos de controladores;
- T6 Simulação da integração do supervisor com os diferentes tipos de controladores;
- T7 Avaliação do desempenho dessa mesma integração e realização de análise crítica dos resultados obtidos com a ação de cada controlador.

Esta tese apresenta contribuições para o desenvolvimento de estruturas hierárquicas de supervisão e controlo aplicados ao SCEE com especial realce na comparação do desempenho de diferentes tipos de controladores sem e com supervisão. Em particular:

1 O estudo exploratório do desempenho de cinco tipos de controladores: controlador PI, o controlador FOPI, o controlador Fuzzy PI, o controlador LQG e o controlador MPC aplicado ao SCEE [Viveiros13b, Viveiros14b];

2 O desenvolvimento de uma estrutura hierárquica com dois níveis de operação: nível de supervisão e controlo. O nível de supervisão, baseado em máquinas de estado que traduzem as regiões de operação do SCEE, determina os estados operacionais. O nível de controlo recebe a informação do estado operacional do SCEE e através da ação do tipo de controlador utilizado, age em conformidade [Viveiros14c, Viveiros15b];

3 O estudo comparativo de avaliação do desempenho da estrutura hierárquica desenvolvida, para os cinco tipos diferentes de controladores na ausência e na presença do supervisor [Viveiros14a, Viveiros15c].

## 6.2 Publicações

Quando se adota numa determinada área um tema de investigação original, cujos trabalhos têm como objetivos principais não só contribuir para o desenvolvimento científico e tecnológico da área escolhida, mas também, a obtenção de um determinado grau académico pós-graduado, como é o caso desta tese, é fundamental, à medida que as diferentes tarefas previamente planeadas vão sendo cumpridas, que os respectivos resultados sejam publicados periodicamente com a finalidade de os submeter à comunidade científica, assim

como incentivar à discussão e à troca de ideias, resultando usualmente no aperfeiçoamento daqueles resultados. Em consequência, e de acordo com o objetivo de submeter à comunidade científica as contribuições que resultaram da elaboração desta tese, é feita a apresentação da lista dos trabalhos publicados.

### **Publicações científicas em revistas**

- 1 Viveiros, C., Melicio, R., Igreja, J.M., Mendes, V.M.F., "Performance assessment of a wind energy conversion system using a hierarchical controller structure", Elsevier Energy Conversion and Management 93, pp. 40-48, 2015. (ISI Web of Science)
- 2 Viveiros, C., Melicio, R., Igreja, J.M., Mendes, V.M.F., "Supervisory control of a variable speed wind turbine with doubly fed induction generator", Elsevier Energy Reports 1, pp. 89-95, 2015.

### **Capítulos em livros**

- 1 Viveiros, C., Melicio, R., Igreja, J.M., Mendes, V.M.F., "Performance assessment of a wind turbine using benchmark model: fuzzy controllers and discrete adaptive LQG", *Conference on Electronics, Telecommunications and Computers, CETC 2013*, Fantoni, A., Ferreira, A.J., Ed.: Elsevier Procedia Technology, Lisboa, 2014, Vol. 17, pp. 487-494.
- 2 Viveiros, C., Melicio, R., Igreja, J.M., Mendes, V.M.F., "On wind turbine model predictive pitch control: an event-based simulation approach", *11th Portuguese Conference on Automatic Control, CONTROLO 2014*, Ed.: Moreira, A.P., Matos, A., Veiga, G., Springer Lecture Notes in Electrical Engineering, Heidelberg, New York, 2015, Vol. 321, pp. 91-100.

### **Publicações científicas em conferências**

- 1 Viveiros, C., Melicio, R., Igreja, J.M., Mendes, V.M.F., "A wind turbine control simulation", Atas 3as Jornadas de Informática da Universidade de Évora, JIUE 2013, pp. 80-85, Évora, Portugal, Fevereiro 2013.
- 2 Viveiros, C., Melicio, R., Igreja, J.M., Mendes, V.M.F., "Application of a discrete adaptive LQG and Fuzzy control design to a wind turbine benchmark model", Proc. International Conference on Renewable Energy Research and Applications, ICRERA 2013, pp. 488-493, Madrid, Spain, October 2013.
- 3 Viveiros, C., Melicio, R., Igreja, J.M., Mendes, V.M.F., "Fuzzy, integer and fractional order control: application on a wind turbine benchmark model", Proc. 19th International Conference on Methods and Models in Automation and Robotics, MMAR 2014, pp. 252-257, Międzyzdroje, Poland, September 2014.
- 4 Viveiros, C., Melicio, R., Igreja, J.M., Mendes, V.M.F., " Fractional order control on a wind turbine benchmark", Proc. 18th International Conference on System Theory, Control and Computing, ICSTCC 2014, pp. 76-81, Sinaia, Romania, October 2014.

## **6.3 Direções de Investigação**

Ao longo da elaboração desta tese surgiram diversos tópicos que suscitaram algum interesse e que poderão servir de base em trabalhos a desenvolver no futuro. Com base nos tópicos considerados os mais interessantes, é possível estabelecer um conjunto de direções de investigação:

- 1 O estudo do desempenho do SCEE utilizando tipos diferentes de controladores multimodelo nas diferentes regiões de operação [Boling05];
- 2 Incluir no SCEE o controlo comutado entre diferentes tipos de controladores por avaliação de desempenho com diferentes regimes de vento [Rato02];
- 3 O estudo do comportamento da estrutura hierárquica na presença de falhas, por exemplo, em sensores [Esbensen09].

## Referências Bibliográficas

- [Abrahamsen01] Abrahamsen, F., *Energy optimal control of induction motor drives*, PhD Dissertation, Aalborg University, Norway, February 2001.
- [Aissaoui13] Aissaoui, A.G., Tahour, A., Essounbouli, N., Nollet, .F, Abid, M., Chergui, M.I., "A fuzzy-pi control to extract an optimal power from wind turbine", *Elsevier Energy Conversion and Management*, Vol. 65, pp. 688-696, 2013.
- [Akmatov00] Akmatov, V., Knudsen, H., Nielsen, A.H., "Advanced simulation of windmills in the electric power supply", *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, Vol. 22, pp. 421-434, August 2000.
- [Amenedo03] Amenedo, J. L. R., Díaz, J.C.B., Gómez, S. A., *Sistemas eolicos de producción de energia eléctrica*, Editorial Rueda, Madrid, España, 2003.
- [Arijit09] Arijit, B., Swagatam, D., Sambarta, D., "Design of fractional-order PI-lambda-D-mu-controllers with an improved differential evolution", *Eng. Appl. Artif. Intell.*, Vol. 22, pp. 343-350, 2009.
- [Astrom94] Astrom, K. J, Wittenmark, B., *Adaptative control*, 2<sup>nd</sup> Ed., Prentice Hall, December 1994.
- [Astrom02] Astrom, K. J., *Control system design*, Lectures notes for ME 155A, Chapter 6, Department of Mechanical and Environmental Engineering, University of California, USA, 2002.

- [Badrzadeh06] Badrzadeh, B., Salman, S.K., "Mechanical analogous model of wind turbine generators for grid connection studies", *IET PEMD*, pp. 36-41, March 2006.
- [Barbosa05] Barbosa, R.S., *Análise dinâmica e controlo de sistemas de ordem fraccionária*, Dissertação de Doutoramento, Faculdade de Engenharia, Universidade do Porto, Portugal, Fevereiro 2005.
- [Barbosa06] Barbosa, R.S., Tenreiro Machado, J.A., "Implementation of discrete-time fractional-order controllers based on LS approximations", *Int. J. Acta Polytechnica Hungarica*, Vol. 3, No. 4, pp. 5-22, 2006.
- [Baroudi07] Baroudi, J.A., Dinavahi, V., Knight, A., "A review of power converter topologies for wind generators", *Int. J. Renewable Energy*, Vol. 32, No. 14, pp. 2369-2385, November 2007.
- [Bianchi07] Bianchi, F.D., De Battista, H., Mantz, R.J., *Wind turbine control systems*, Springer-Verlag, London Limited, 2007.
- [Betz20] Betz, A., "Das maximum der teoretisch möglichen ausnützung des windes durch windmotoren", *Int. J. Zeitschrift für das Gesante Turbinewesen*, Vol. 26, pp. 307-309, 1920.
- [Boling05] Boling, J.M., Seborg, D.E., Hespanha, J.P., " Multi-model control of a simulated pH neutralization process", *Proc. of 16<sup>th</sup> IFAC World Congress*, pp. 1671-1677, Czech Republic, July 2005.

- [Boukhezzar 07] Boukhezzar, B., Lupu, L., Siguerdidjane, H., Hand, M., "Multivariable control strategy for variable speed, variable pitch wind turbines", *Elsevier Energy Conversion and Management*, Vol. 65, pp. 688-696, 2007.
- [Brederode97] Brederode, V., *Fundamentos de aerodinâmica incompressível*, Departamento de Engenharia Mecânica, Instituto Superior Técnico, Universidade Técnica de Lisboa, Portugal, 1997.
- [Burns01] Burns, R.S., *Advanced control engineering*, Butterworth Heinemann, 2001.
- [Burton11] Burton, T., Jenkins, N., Sharpe, D., Bossanyi, E., *Wind energy handbook*, 2<sup>nd</sup> Ed., John Wiley & Sons, Ltd, 2011.
- [Cafagna07] Cafagna, D., "Fractional calculus: a mathematical tool from the past for present engineers", *IEEE Ind. Electron. Mag.*, Vol. 1, No. 2, pp. 35-40, Summer 2007.
- [Calderón06] Calderón, A.J., Vinagre, B.M., Feliu, V., "Fractional order control strategies for power electronic buck converters", *Int. J. Signal Processing*, Vol. 86, No. 10, pp. 2803-2819, March 2006.
- [Cassandras08] Cassandras, C.G., Lafortune, S., *Introduction to discrete event systems*, Springer Science Business Media, New York, USA, 2008.

- [Castro11] Castro, R., *Uma introdução às energias renováveis: eólica, fotovoltaica e mini-hídrica*, Coleção Ensino da Ciência e da Tecnologia, IST - Instituto Superior Técnico, Universidade Técnica de Lisboa, Portugal, 2011.
- [Chandrasekaran14] Chandrasekaran, S., *Grid connected doubly fed induction generator based wind turbine under lvd*, PhD Dissertation, University of Bologna, Italy, March 2014.
- [Chen09] Chen, Y. Q., Petráš, I., Xue, D., "Fractional order control-a tutorial", *Proc. American Control Conference – ACC2009*, pp. 1397-1411, St. Louis, USA, June 2009.
- [Conroy07] Conroy, J.F., Watson, R., "Low-voltage ride-through of a full converter wind turbine with permanent magnet generator", *IET Renewable Power Generation*, Vol. 1, pp. 182-189, September 2007.
- [Cutululis06] Cutululis, N.A., Bindner, H., Munteanu, I., Bratcu, A., Ceanga, E., Soerensen, P., "LQ optimal control of wind turbines in hybrid power systems", *European Wind Energy Conference & Exhibition – EWEC 2006*, pp. 1-6, Athens, March 2006.
- [da Costa15] da Costa, A.S., "Estratégia para o crescimento verde: A eletricidade renovável em Portugal", *Ciclo de Conferências Engenharia em Movimento*, pp. 1-29, Janeiro 2015.
- [DecretoLei10] Decreto-Lei 51/2010, Diário da República, 1ª série N.º 98, *Regulamento sobre equipamento.*, Lisboa, Portugal, 20 de Maio de 2010.

- [Ding09] Ding, B.C., *Modern predictive control*, CRC Press, Taylor & Francis, Boca Raton, 2009.
- [Dolan06] Dale-Dolan, S.L., Lehn, P.W., "Simulation model of wind turbine 3p torque oscillations due to wind shear and tower shadow", *Proc. IEEE Power Syst. Conf. Exposition, PSCE'06*, pp. 2050-2057, October-November 2006.
- [Driankov93] Driankov, D., Hellendoorn, H., Reinfrank, M., *An introduction to fuzzy control*, Springer-Verlag, New York, USA, 1993.
- [E2P14] Energias Endógenas de Portugal, *Parques eólicos em Portugal*, Dezembro, 2014.
- [Enercon14] Enercon, E126 state of the art, URL: <http://www.enercon.de/en-en/66.htm>, 2014.
- [Entezami13] Entezami, M., *Novel operational condition monitoring techniques for wind turbine brake systems*, PhD Dissertation, University of Birmingham, July 2013.
- [Esbensen09] Esbensen, T., Sloth, C., *Fault diagnosis and fault-tolerant control of wind turbines*, Master's Thesis, Aalborg University, 2009.
- [Estanqueiro07] Estanqueiro, A.I., "A dynamic wind generation model for power systems studies", *IEEE Trans. Power Systems*, Vol. 22, No. 3, pp. 920-928, August 2007.
- [EWEA11] European Wind Energy Association, *Upwind Report 2011*, March 2011.

- [Fambrini09] Fambrini, V., Martinez, C.O., *Modelling and decentralized model predictive control of drinking water networks: the barcelona case study*, Technical Report, Universitat, 2009.
- [Feng13] Feng, X., Patton, R., "A model-based predictive control for FTC for wind turbine wind speed sensor fault", *Conf on Control and Fault-Tolerant Systems – Systol2013*, pp. 504-509, Nice, October 2013.
- [Fernandes14] Fernandes, A.C., Teixeira, A., Guerra, M.G., Ribeiro, R., Rodrigues, S., Alvarenga, A., *Relatório do estado do ambiente 2014*, Relatório Técnico, Agência Portuguesa do Ambiente, Portugal, Dezembro 2014.
- [Franklin98] Franklin, G.F., Powell, J.D., Workman, M., *Digital control of dynamic systems*, 3rd edition, Addison-Wesley, 1998.
- [Gao93] Gao, J.D., Wang, X.H., Li, F.H., *Analysis of alternative current electric machine system*, The Qinghua Press, Beijing, 1993.
- [Gil02] Gil, P., *Identificação e controlo adaptativo*, Slides de Apoio à Disciplina Controlo Inteligente, Departamento de Engenharia Electrotécnica e de Computadores, Universidade Nova de Lisboa, Portugal, 2002.
- [Gil10] Gil, P., *Introdução ao controlo difuso*, Slides de Apoio à Disciplina Controlo Inteligente, Departamento de Engenharia Electrotécnica e de Computadores, Universidade Nova de Lisboa, Portugal, 2010.
- [H2Now07] ClubH2Now, Fuhrländer installs highest wec worldwide, URL: <http://www.h2now.net/en/windenergy/news>, 2007.

- [Hansen08] Hansen, A.D., Michalke, G., "Modelling and control of variable-speed multi-pole permanent magnet synchronous generator wind turbine", *Int. J. Wind Energy*, No. 11, pp. 537-554, 2008.
- [Harrison00] Harrison, R., Hau, E., Snel, H., *Large wind turbines, design and economics*, John Wiley and Sons, West Sussex, England, 2000.
- [Ieawind13] International Energy Agency Wind, *2013 Anual Report*, August, 2014.
- [Igreja05] Igreja, J.M., *Tecnologias Avançadas para Controlo de Processos Químicos*, Dissertação à vaga de Professor Coordenador, Instituto Superior de Engenharia de Lisboa, Portugal, 2005.
- [Igreja10] Igreja, J.M., *Seminário em Controlo Preditivo*, Instituto Superior de Engenharia de Lisboa, Portugal, 2010.
- [Jazaeri14] Jazaeri, M., Samadi, A.A., "Self-tuning fuzzy PI-based controller of DFIG wind turbine for transient conditions enhancement", *International Transactions on Electrical Energy Systems*, August 2014.
- [Johnson06] Johnson, K.E., Pao, L.Y., Balas, M.J., Fingersh, L.J., "Control of variable-speed wind turbines: standard and adaptive techniques for maximizing energy capture", *IEEE Control Systems Magazine*, Vol. 26, No. 3, pp. 70-81, 2006.

- [Jun06] Jun-Yi, C., Bing-Gang, C., "Design of fractional order controllers based on particle swarm optimization", *Proc Industrial Electronics and Applications – ICIEA 2006*, pp. 1-6, Singapore, May 2006.
- [Kaneko12] Kaneko, A., Hara, N., Konishi, K., "Model predictive control of DFIG-based wind turbines", *Proc. of American Control Conference – ACC2012*, pp. 2264-2269, Montreal, June 2012.
- [Klir95] Klir, G.J., Yuan, B., *Fuzzy sets and fuzzy logic: theory and applications*, 1<sup>st</sup> Ed, Prentice Hall PTR, NJ, USA, 2000.
- [Kovačić06] Kovačić, Z., Bogdan, Z., *Fuzzy controller design: theory and applications*, 1<sup>st</sup> Ed, Boca Raton CRC Press, Florida, USA, 2000.
- [Kuik04] Kuik, G.A.M. van, "An inconsistency in the actuator disc momentum theory", *Int. J. Wind Energy*, No. 7, pp. 9-19, 2004.
- [Lee90] Lee, C., "Fuzzy logic in control systems: fuzzy logic controller-Part I", *IEEE Trans. Systems, Man and Cybernetics.*, Vol. 20 (2), pp. 404-418, 1990.
- [Levine96] Levine, W., *The control handbook*, 1<sup>st</sup> Ed, CRC Press, Florida, USA, 1996.
- [Li07] Li, H., Chen, Z., "Transient stability analysis of wind turbines with induction generators considering blades and shaft flexibility", *Proc. 33rd IEEE Annual Conf. Ind. Electronics Society, IECON 2007*, pp. 1604-1609, November 2007.

- [Lubosny03] Lubosny, Z., *Wind turbine operation in electric power systems*, Springer Berlin Heidelberg New York, 2003.
- [Macedo12] Macedo, A.V.A., Mota, W.S., "Wind turbine pitch angle control using fuzzy logic", *Transmission and Distribution: Latin America Conference and Exposition, 2012 Sixth IEEE/PES*, pp. 1-6, Montevideo, September 2012.
- [Maciejowski02] Maciejowski, J.M., *Predictive control with constraints*, Prentice Hall, New York, USA, 2002.
- [Maione07] Maione, G., Lino, P., "New tuning rules for fractional PI-alfa controllers", *Nonlinear Dynamics*, No. 49, pp. 251-257, 2007.
- [Mamdani75] Mamdani, E.H., Assilian, S., "An experiment linguistic synthesis with a fuzzy logic controller", *International Journal of Man-Machine Studies*, Vol. 7, No. 1, pp. 1-13, 1975.
- [Manwell03] Manwell, J.F., McGowan, J.G., Rogers, A.L., *Wind energy explained theory, design and application*, John Willey, West Sussex, England, 2002.
- [Martins08] Martins, F.R., Guarnieri, R.A., Pereira, E.B., "O aproveitamento da energia eólica", *Revista Brasileira de Ensino de Física*, Vol. 30, No. 1, pp. 1-13, 2008.
- [Mateescu12] Macedo, A.V.A., Mota, W.S., "Discrete-time lqg control with disturbance rejection for variable speed wind turbines", *1<sup>st</sup> International Conference on Systems and Computer Science*, pp. 1-6, Romania, August 2012.

- [Math09] R2009a Documentation. Fuzzy logic toolbox. MathWorks, Inc. Matlab Central File Exchange, URL: <http://www.mathworks.com/help/fuzzy/index.html>.
- [Mathew06] Mathew, S., *Wind energy: fundamentals, resource analysis, and economics*, Springer Berlin Heidelberg New York, 2006.
- [Melício04] Melício, R., *Um modelo integrado de sistemas eólicos equipados com máquinas síncronas de velocidade variável*, Tese de Mestrado, Instituto Superior Técnico, Universidade Técnica de Lisboa, Portugal, Julho 2004.
- [Melício05] Melício, R., Mendes, V.M.F., "Doubly fed induction generator systems for variable speed wind turbine", *Proc. of the 9th Spanish-Portuguese Congress on Electrical Engineering – 9CHLIE*, Marbella, Spain, June 2005.
- [Melício09] Melício, R., Mendes, V.M.F., Catalão, J.P.S., "Computer simulation of wind power systems: power electronics and transient stability analysis", *Proc. International Conference on Power Systems Transients IPST'2009*, Kyoto, Japan, 2009.
- [Melício10] Melício, R., *Modelos dinâmicos de sistemas de conversão de energia eólica ligados à rede elétrica*, Tese de Doutoramento, Universidade da Beira Interior, Portugal, Fevereiro 2010.
- [Mohan03] Mohan, N., Undeland, T.M., Robbins, W.P., *Power electronics – converters, applications, and design*, 3<sup>rd</sup> Ed., John Wiley & Sons Inc, USA, 2003.

- [Monje08] Monje, C.A., Vinagre, B.M., Feliu, V., Chen, Y.Q., "Tuning and auto-tuning of fractional-order controllers for industry applications", *Control Engineering Practice*, Vol. 16, pp. 798-812, 2008.
- [Monteiro13] Monteiro, L., *Controlo clássico vs. preditivo em redes de energia eléctrica: regulação de frequência e da potência activa na carga*, Tese de Mestrado, Instituto Superior de Engenharia de Lisboa, Portugal, Setembro 2013.
- [Moreira02] Moreira, A., *Controlo preditivo*, Texto Didático, Departamento de Engenharia Electrotécnica e de Computadores, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Portugal, 2002.
- [Munteanu08] Munteanu, I., Bratcu, A.I., Cutululis, N.A., Caenga, E., *Optimal control of wind energy systems towards a global approach*, Springer-Verlag, London, UK, 2008.
- [Muyeen06] Muyeen, S.M., Hasan Ali, M., Takahashi, R., Murata, T., Tamura, J., Tomaki, J., Sakahara, A., Sasano, E., "Transient stability analysis of grid connected wind turbine generator system considering multi-mass shaft modeling", *Electr. Power Compon. Syst.*, Vol. 34, pp. 1121-1138, 2006.
- [Negenborg07] Negenborg, R.R., *Multi-agent predictive control with applications to power network*, PhD Dissertation, Delft University of Technology, Netherland, December 2007.
- [Nise02] Nise, N.S., *Engenharia de sistema de controle*, 3ª Edição, Editora LTC, Rio de Janeiro, 2002.

- [Nourdine10] Nourdine, S., Camblong, H., Vechiu, I., Tapia, G., "Comparison of wind turbine LQG controllers using individual pitch control to alleviate fatigue loads", *18<sup>th</sup> Mediterranean Conference on Control and Automation – MED 2010*, pp. 1591-1596, Marrakech, June 2010.
- [Odgaard13] Odgaard, P.F., Stroustrup, J., Kinnaert, M., "Fault tolerant control of wind turbines: a benchmark model", *IEEE Trans. on Control Systems Technology*, Vol. 21, No. 4, pp. 1168-1182, 2013.
- [Ogata00] Ogata, K., *Engenharia de controle moderno*, 3<sup>a</sup> Edição, Pearson Prentice Hall, Livros Téc. e Cient. Editora, São Paulo, Brasil, 2000.
- [Ortigueira04] Ortigueira, M.D., Machado, J.A.T., Costa, J.S., "Considerations about the choice of a differintegrator", *Proc. 2nd IEEE International Computational Cybernetics—ICCC 2004 Conf.*, pp. 385-389, Vienna, 2004.
- [Petráš02] Petráš, I., Vinagre, B. M., "Practical application of digital fractional-order controller to temperature control", *Int. J. Acta Montanistica Slovaca*, Vol. 7, No. 2, pp. 131-137, 2002.
- [Petráš11] Petráš, I., "Discrete fractional order pid controller", MathWorks, Inc. Matlab Central File Exchange, URL: <http://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/33761>, 2011.

- [Petráš12] Petráš, I., "Tuning and implementation methods for fractional-order controllers", *Fractional Calculus and Applied Analysis*, Vol. 5, pp. 282-303, 2012.
- [Pires00] Pires, V.M.C.F., *Rectificadores do tipo redutor-elevador de alto rendimento e de factor de potência quase unitário*, Tese de Doutoramento, Instituto Superior Técnico, Universidade Técnica de Lisboa, Portugal, Setembro 2000.
- [Podlubny99] Podlubny, I., "Fractional-order systems and PI-lambda-D-mu-controllers", *IEEE Trans. Autom. Control*, Vol. 44, No. 1, pp. 208-214, January 1999.
- [Qi11] Qi, W., Liu, J., Chen, X., Christofides, P.D., "Supervisory predictive control of standalone wind/solar energy generation systems", *IEEE Trans. on Control Systems Technology*, Vol. 19, No. 1, pp. 199-207, 2011.
- [Quin03] Quin, S.J., Badgwell, T.A., "A survey of industrial model predictive control technology", *Control Engineering Practice*, Vol. 11, pp. 733-764, 2003.
- [Rankine865] Rankine, W., "On the second law of thermodynamics", *Miscellaneous Scientific Papers*, pp. 427-431, Birmingham, 1865.
- [Ramadge87] Ramadge, P., Wonham, W.M., "Supervisory control of a class of discrete event processes", *SIAM Journal on Control and Optimization*, Vol. 25, pp. 206-230, 1987.

- [Ramtharan07] Ramtharan, G., Jenkins, N., "Influence of rotor structural dynamics representations on the electrical transient performance of DFIG wind turbines", *Int. J. Wind Energy*, Vol. 10, pp. 293-301, March 2007.
- [Rato02] Rato, L.M., *Controlo comutados baseado em modelos múltiplos*, Tese de Doutoramento, Instituto Superior Técnico, Universidade Técnica de Lisboa, Portugal, Março 2002.
- [Rawlings09] Rawlings, J.B., Mayne, D.Q., *Model predictive control: theory and practice*, Nob Hill Publishing, Wisconsin, USA, 2009.
- [Resende11] Resende, F., "Evolução tecnológica dos sistemas de conversão de energia eólica para ligação à rede", *E-LP Engineering and Technology Journal*, Vol. 2, pp. 22-36, 2011.
- [Rodrigues08] Rodrigues, A., *Parques eólicos em Portugal*, INEGI, Instituto de Engenharia Mecânica e Gestão Industrial, Portugal, Dezembro 2008.
- [Salman03] Salman, S.K., Teo, A.L.J., "Windmill modeling consideration and factors influencing the stability of a grid-connected wind power-based embedded generator", *IEEE Trans. Power Systems*, Vol. 18, No. 2, pp. 793-802, May 2003.

- [Salomão12] Salomão, L., Cuatzin, H., "Fuzzy logic control and pi control comparison for a 1.5 MW horizontal axis wind turbine", *Proc. 16<sup>th</sup> International Conference on System Theory, Control and Computing*, pp. 1-6, Mexico, October 2012.
- [Sarrias11] Sarrias, R., Fernández, L.M., Garcia, C.A., Jurado, F., "Supervisory control system for DFIG wind turbine with energy storage system based on battery", *International Conference on Power Engineering, Energy and Electrical Drives – POWERENG*, pp. 1-6, Malaga, May 2011.
- [Scherer09] Scherer, H.F., *Controlo preditivo com otimização distribuída aplicado a colunas de destilação*, Dissertação de Mestrado, UFSC, Florianópolis, Brasil, 2013.
- [Scherillo12] Scherillo, F., Izzo, L., Coiro, D., Lauria, D., "Fuzzy logic control for a small pitch controlled wind turbine", *International Symposium on Power Electronics. Eletrical Drives, Automation and Motion*, pp. 588-593, Italy, June 2012.
- [Schlipf12] Schlipf, D., Pao, L.Y., Chen, P.W., "Comparison of feedforward and model predictive control of wind turbines using LIDAR", *51<sup>st</sup> Annual Conference on Decision and Control – CDC2012*, pp. 3050-3055, Maui, December 2012.
- [Silva03] Silva, M. F., Machado, J. A. T., Lopes, A. M., "Comparison of fractional and integer order control of a hexapod robot", *Proc. ASME 19<sup>th</sup> Biennal Conf. Mechanical Vibration and Noise*, Chicago, USA, 2003.

- [Silva06] Silva, M. F., Machado, J. A. T., "Fractional order PD<sup>α</sup> joint control legged robots", *Int. J. of Vibration and Control*, Vol. 12, No. 12, pp. 1483-1501, 2006.
- [Silva10] Silva, R.N., *Teoria de sistemas*, Texto Didático de Apoio à Disciplina de Teoria de Controlo, Departamento de Engenharia Electrotécnica e de Computadores, Universidade Nova de Lisboa, Portugal, 2010.
- [Silva13] Silva, H.V.D., Gongora, W.S., Sumar, R.R., Vallim, B.R., Goedtel, A., "Estudo comparativo entre os controladores fuzzy e pid aplicados ao controle de um pêndulo invertido utilizando plataforma lego mindstorms NXT", *XI Simpósio Brasileiro de Automação Inteligente SBAI'2013.*, pp. 1-6, Fortaleza, Outubro 2013.
- [Slootweg03a] Slootweg, J.G., de Haan, S.W.H., Polinder, H., Kling, W.L., "General model for representing variable speed wind turbines in power system dynamics simulations", *IEEE Trans. Power Syst.*, Vol. 18, No. 1, pp. 144-151, February 2003.
- [Slootweg03b] Slootweg, J.G., Polinder, H., Kling, W.L., "Representing wind turbine electrical generating systems in fundamental frequency simulations", *IEEE Trans. Power Syst.*, Vol. 18, No. 4, pp. 516-524, December 2003.
- [Slootweg03c] Slootweg, J.G., Kling, W.L., "Aggregated modelling of wind parks in power system dynamics simulations", *Proc. IEEE Power Tech Conf.*, Vol. 3, Bologna, June 2003.

- [Slootweg03d] Slootweg, J.G., Kling, W.L., "Is the answer blowing in the wind?", *IEEE Power and Energy Magazine*, Vol. 3, pp. 26-33, November/December 2003.
- [Sohn14] Sohn, A.P., *Estudos de estabilidade de sistemas elétricos de potência na presença de diferentes modelos de unidades eólicas*, Dissertação de Doutorado, Universidade de São Paulo, Brasil, Fevereiro 2014.
- [Soliman11] Soliman, M., Malik, O.P., Westwick, D.T., "Multiple Model Predictive Control for Wind Turbines with Doubly Fed Induction Generators", *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, Vol. 2, No. 3, pp. 215-226, July 2011.
- [Sørensen01] Sørensen, J.N., Mikkelsen, R., "On validity of blade element momentum method", *Proc. European Wind Energy. Conf.*, pp. 362-366, Denmark, July 2001.
- [Spera77] Spera, D.A., Janetzke, D.C., Richards, T.R., "Dynamic blade loading in the ERDA/NASA 100 kW and 200 kW wind turbines", *Proc. National Conference of the American Wind Energy Association*, Boulder, Colorado, May 1977.
- [Spooner96] Spooner, E., Williamson, A.C., "Direct coupled, permanent magnet generators for wind turbine applications", *IEE Proc.-Electr. Power Appl.*, Vol. 143, No. 1, pp. 1-8, January 1996.
- [Suárez03] Suárez, J. I., Vinagre, B. M., Chen, Y. Q., "Spatial path tracking of an autonomous industrial vehicle using fractional order controllers", *Proc. 11<sup>th</sup> Int. Conf. On Advanced Robotics, ICAR 2003*, Coimbra, Portugal, June-July 2003.

- [Toffler82] Toffler, A., *La tercera ola*, Plaza y Janes Editores, Barcelona, España, 1982.
- [Valério05] Valério, D.P.M.O., *Fractional Robust System Control*, Tese de Doutoramento, Instituto Superior Técnico, Universidade Técnica de Lisboa, Portugal, Outubro 2005.
- [Viveiros13a] Viveiros, C., Melicio, R., Igreja, J.M., Mendes, V.M.F., "A wind turbine control simulation", *Atas 3<sup>as</sup> Jornadas de Informática da Universidade de Évora, JIUE 2013*, pp. 80-85, Évora, Portugal, Fevereiro 2013.
- [Viveiros13b] Viveiros, C., Melicio, R., Igreja, J.M., Mendes, V.M.F., "Application of a discrete adaptive LQG and Fuzzy control design to a wind turbine benchmark model", *Proc. International Conference on Renewable Energy Research and Applications, ICRERA 2013*, pp. 488-493, Madrid, Spain, October 2013.
- [Viveiros14a] Viveiros, C., Melicio, R., Igreja, J.M., Mendes, V.M.F., "Performance assessment of a wind turbine using benchmark model: fuzzy controllers and discrete adaptive LQG", *Conference on Electronics, Telecommunications and Computers, CETC 2013*, Fantoni, A., Ferreira, A.J., Ed.: *Elsevier Procedia Technology*, Lisboa, 2014, Vol. 17, pp. 487-494.

- [Viveiros14b] Viveiros, C., Melicio, R., Igreja, J.M., Mendes, V.M.F., "Fuzzy, integer and fractional order control: application on a wind turbine benchmark model", *Proc. of 19th International Conference on Methods and Models in Automation and Robotics- MMAR 2014*, pp. 252-257, Międzyzdroje, Poland, September 2014.
- [Viveiros14c] Viveiros, C., Melicio, R., Igreja, J.M., Mendes, V.M.F., "Fractional Order Control on a Wind Turbine Benchmark", *Proc. 18th International Conference on System Theory, Control and Computing, ICSTCC 2014*, pp. 76-81, Sinaia, Romania, October 2014.
- [Viveiros15a] Viveiros, C., Melicio, R., Igreja, J.M., Mendes, V.M.F., "On wind turbine model predictive pitch control: an event-based simulation approach", *Proc. of 11th Portuguese Conference on Automatic Control, CONTROLO 2014*, Ed.: Moreira, A.P., Matos, A., Veiga, G., Springer Lecture Notes in Electrical Engineering, Heidelberg, New York, 2015, Vol. 321, pp. 91-100.
- [Viveiros15b] Viveiros, C., Melicio, R., Igreja, J.M., Mendes, V.M.F., "Performance assessment of a wind energy conversion system using a hierarchical controller structure", *Elsevier Energy Conversion and Management*, Vol. 93, pp. 40-48, 2015.
- [Viveiros15c] Viveiros, C., Melicio, R., Igreja, J.M., Mendes, V.M.F., "Supervisory control of a variable speed wind turbine with doubly fed induction generator", *Elsevier Energy Reports*, Vol. 1, pp. 89-95, 2015.

- [Wang09] Wang, L., *Model predictive control system design and implementation using matlab*, Springer-Verlag, London, UK, 2009.
- [Wang11] Wang, J., Tse, N., Gao, Z., "Synthesis on PI-based pitch controller of large wind turbines generator", *Elsevier Energy Conversion and Management*, Vol. 52, pp. 1288-1294, 2015.
- [Web1] [www.energiasrenovaveis.com/BibliotecaListagem.asp?ID\\_BBconteudos=22&ID\\_area=21&ID\\_BBarea=3](http://www.energiasrenovaveis.com/BibliotecaListagem.asp?ID_BBconteudos=22&ID_area=21&ID_BBarea=3), ultimo acesso em Janeiro de 2015.
- [WWEA10] World Wind Energy Association, *World Wind Energy Report 2010*, April 2011.
- [WWEA14] World Wind Energy Association, *Half-Year Report 2014*, October, 2014.
- [Xing05] Xing, Z.X., Zheng, Q.L., Yao, X.J., Jing, Y.J., "Integration of large doubly-fed wind power generator system into grid", *Proc. 8th Int. Conf. Electrical Machines and Systems*, pp. 1000-1004, September 2005.
- [Zadeh65] Zadeh, L.A., "Fuzzy sets", *Information and Control*, Vol. 8, No. 3, pp. 338-353, 1965.
- [Zhao12] Zhao, J., Chen, Y.L., Chen, Z., Lin, F., Caisheng, W., Zhang, H., "Modeling and Control of Discrete Event Systems Using Finite State Machines with Variables and Their Applications in Power Grids", *Elsevier Systems & Control Letters*, Vol. 93, No.1, pp. 212-222, 2012.