

DEPARTAMENTO DE
ENGENHARIA ELECTROTÉCNICA E DE COMPUTADORES

FACULDADE DE ENGENHARIA
UNIVERSIDADE DO PORTO

Rua dos Bragas, 4099 Porto Codex - PORTUGAL

1.342
fes

TESE DE MESTRADO

A SIMULAÇÃO NO PROJECTO DE CONTROLADORES DE SISTEMAS EÓLICOS DE VELOCIDADE VARIÁVEL

20223 - of. M
621.3(043)
/ / / 95
N.V. 34682

António Manuel Elias de Morais Carrapatoso

1991

043 M
C.29810
2X.2

ÍNDICE

Agradecimentos	I
Resumo	II
Lista de figuras	III
Lista de tabelas	VI
Lista de símbolos	VII
Introdução	1
Capítulo 1: Energia eólica	3
1.1 Energias renováveis	4
1.2 A energia eólica face a outras energias.....	5
1.3 O estado da arte da tecnologia.....	7
1.4 Aplicações.....	10
Capítulo 2: Sistemas de conversão de energia eólica	12
2.1 Componentes fundamentais	13
2.2 Modos de operação	14
Capítulo 3: Métodos de controlo de um sistema de conversão de energia eólica.	16
Capítulo 4: Sistema a simular	21
4.1 Sistema real.....	22
4.2 Objectivo da simulação	23
4.3 Meios de simulação	25

Capítulo 5: Modelo do sistema	26
5.1 Estados de funcionamento do sistema.....	28
5.1.1 Arranque.....	29
5.1.2 Funcionamento normal.....	30
5.1.3 Sobrevelocidade.....	30
5.1.4 Paragem.....	30
5.2 Equações básicas da turbina eólica.....	31
5.3 Modelos dos componentes.....	33
Capítulo 6: Resultados	42
6.1 Características do sistema.....	44
6.1.1 Características de binário e de potência.....	44
6.1.2 Características estáticas.....	47
6.2 Arranque da turbina.....	49
6.2.1 Papel do controlador do ângulo de pás.....	49
6.2.2 Influência da velocidade do vento.....	50
6.3 Comportamento dinâmico em regime nominal.....	53
6.3.1 Resposta a uma entrada em degrau positivo.....	54
6.3.2 Resposta a uma entrada em degrau negativo.....	55
6.3.3 Influência do ponto de funcionamento.....	57
6.3.4 Resposta em malha aberta.....	59
6.4 Comportamento dinâmico em regime nominal e não nominal.....	60
6.4.1 Regime nominal.....	61

6.4.2 Regime com λ não óptimo.....	61
6.4.3 Regime de sobrevelocidade	62
6.5 Influência dos parâmetros do controlador de velocidade	63
6.6 Resposta às rajadas.....	68
6.6.1 Rajada com uma duração de um segundo	68
6.6.2 Rajada com uma duração de três segundos	69
6.6.3 Rajada com uma duração de cinco segundos	70
6.7 Acção sobre o ângulo das pás para valores baixos de λ	72
Capítulo 7: Conclusões e perspectivas de desenvolvimentos futuros.....	75
7.1 Conclusões.....	76
7.2 Sugestões para trabalho futuro	79
Referências.....	81
Anexo: Diagrama de blocos detalhado do modelo.....	87

AGRADECIMENTOS

Ao supervisor deste trabalho, Dr. José Manuel Baptista Mendonça, por todo o apoio e encorajamento durante a realização do mesmo.

À Dra. Lúcia Rosas e ao Eng. João Vieira pelo apoio e pela cedência do computador utilizado para a escrita do documento.

À minha mãe e tia por todo o apoio que me deram.

Ao meu irmão por me ter convencido a fazê-lo.

À minha filha por me ter deixado fazê-lo.

À minha mulher pela ajuda dada na elaboração e correcção do mesmo, pelo encorajamento e pela paciência manifestada.

RESUMO

Este trabalho debruça-se sobre os sistemas de conversão de energia eólica em energia eléctrica, incidindo essencialmente sobre as estratégias de controlo de velocidade em sistemas de velocidade variável. O trabalho consiste na modelização de um sistema eólico e do respectivo sistema de controlo e na realização de simulações sobre esse mesmo modelo, com o objectivo da análise do seu comportamento dinâmico e do projecto de compensadores.

O primeiro capítulo debruça-se sobre a energia eólica em geral, designadamente sobre aspectos comparativos com outras energias renováveis e sobre aspectos económicos da exploração de sistemas eólicos.

O segundo capítulo incide sobre os diversos tipos de sistemas de conversão de energia eólica, quer no que diz respeito à constituição dos mesmos, quer quanto ao tipo de utilização da energia eléctrica extraída do vento.

O terceiro capítulo debruça-se sobre os métodos de controlo de um sistema eólico, incidindo essencialmente sobre o controlo de sistemas de velocidade variável.

O quarto capítulo descreve quer o sistema que se pretende simular, quer as ferramentas de simulação utilizadas.

O quinto capítulo introduz e justifica o modelo do sistema que foi utilizado nas simulações efectuadas.

O sexto capítulo apresenta os resultados das simulações efectuadas sobre o modelo, incidindo em vários aspectos, nomeadamente características do sistema, comportamento dinâmico, dimensionamento dos componentes e modos de operação.

O sétimo e último capítulo apresenta as conclusões obtidas, e algumas sugestões para outros trabalhos nesta área a desenvolver futuramente.

LISTA DE FIGURAS

- Fig. 3.1 - Diagrama de blocos simplificado de um sistema com controlo de velocidade específica
- Fig. 3.2 - Diagrama de blocos simplificado de um sistema com controlo de potência
- Fig. 5.1- Diagrama de blocos do sistema eólico
- Fig. 5.2 - Diagrama de blocos dos controladores de velocidade e de ângulo de pás
- Fig. 5.3 - Diagrama de estados de funcionamento
- Fig. 5.4 - Curvas de coeficiente de potência em função de λ para vários valores de ângulo de pás
- Fig. 5.5 - Curvas de coeficiente de binário em função de λ para vários valores de ângulo de pás
- Fig. 6.1 - Curvas de binário motor da turbina e binário resistente do alternador em função da velocidade de rotação deste, para diferentes valores da velocidade de vento e resistência de carga
- Fig. 6.2 - Curvas de potência mecânica da turbina e potência eléctrica do alternador em função da velocidade de rotação deste, para diferentes valores da velocidade de vento e resistência de carga
- Fig. 6.3 - Determinação das características estáticas - resposta a uma entrada de vento em rampa
- Fig. 6.4 - Arranque com vento de 2 m/s

- Fig. 6.5 - Arranque com vento de 4 m/s
- Fig. 6.6 - Arranque com vento de 6 m/s
- Fig. 6.7 - Arranque com vento de 8 m/s
- Fig. 6.8 - Arranque com vento de 10 m/s
- Fig. 6.9 - Degrau positivo de 5 para 6 m/s
- Fig. 6.10 - Degrau negativo de 5 para 4 m/s
- Fig. 6.11 - Degrau positivo de 4 para 5 m/s
- Fig. 6.12 - Degrau negativo de 6 para 5 m/s
- Fig. 6.13 - Resposta em malha aberta a um degraú positivo de 5 para 6 m/s
- Fig. 6.14 - Permanência em regime nominal
- Fig. 6.15 - Transição para regime de funcionamento com λ não óptimo
- Fig. 6.16 - Transição para regime de sobrevelocidade
- Fig. 6.17 - Controlador PI com limitação do integral do erro
- Fig. 6.18 - Controlador P com ganho proporcional baixo
- Fig. 6.19 - Controlador P com ganho proporcional elevado
- Fig. 6.20 - Controlador PI com ganho integral elevado, sem limitação do integral do erro

Fig. 6.21 - Rajada com um segundo de duração

Fig. 6.22 - Rajada com três segundos de duração

Fig. 6.23 - Rajada com cinco segundos de duração

Fig. 6.24 - Resposta a rajada com ângulo de pás variável

Fig. 6.25 - Resposta a rajada com ângulo de pás fixo

LISTA DE TABELAS

Tab.5.1 - Resistências de carga

Tab.5.2 - Resistências aplicadas ao alternador

Tab.5.3 - Ângulo de pás função de λ

LISTA DE SÍMBOLOS

A	Área varrida pelo rotor
C_p	Coefficiente de potência
C_q	Coefficiente de binário
E	Energia
E	Força electromotriz do alternador
I	Corrente do alternador
J	Coefficiente de inércia
L	Indutância do alternador
N	Razão de transmissão
P	Potência
P_a	Potência do vento
P_m	Potência mecânica no veio da turbina
P_e	Potência eléctrica do alternador
Q	Binário
Q_1	Binário no veio primário
Q_2	Binário no veio secundário
Q_e	Binário eléctrico do alternador
Q_m	Binário motor
R	Raio do rotor
Rl	Resistência de carga
V	Velocidade do vento
V	Tensão de saída do alternador
X	Reactância do alternador
α	Ângulo de pás
λ	Velocidade específica
ρ	Densidade do ar
Ω_a	Velocidade de rotação do alternador
Ω_e	Frequência angular da onda sinusoidal eléctrica
Ω_m	Velocidade de rotação
Ω_t	Velocidade de rotação da turbina

INTRODUÇÃO

INTRODUÇÃO

Este trabalho debruça-se essencialmente sobre o comportamento de sistemas de conversão de energia eólica em energia eléctrica, sendo o estudo do mesmo realizado através de simulações efectuadas sobre um modelo de um sistema real.

A escolha de um sistema eólico deve-se essencialmente aos seguintes pontos:

Portugal é um sistema amplamente dependente da importação de energia, quer sob a forma de energia eléctrica, quer sob a forma de combustíveis fósseis, carvão ou petróleo, utilizados nas centrais térmicas e dos quais praticamente não dispõe de reservas. Tem, no entanto, abundantes recursos renováveis, dos quais o vento é um dos mais facilmente exploráveis.

Com uma costa atlântica com várias centenas de quilómetros de extensão apresentando regimes de vento propícios para a instalação de sistemas eólicos, e próxima da mais densamente povoada e mais industrializada zona do país, encontram-se reunidas boas condições para que a exploração da energia eólica seja uma actividade, em termos económicos, interessante.

Há um interesse efectivo da comunidade científica portuguesa no tema, demonstrado pelos vários trabalhos efectuados [1.1], [1.2], [1.3],[1.4], [1.5], [1.6], [1.7].

Sendo o sistema de conversão de energia eólica um sistema não linear, coloca problemas interessantes, em termos de modelização e controlo, nomeadamente quando se pretende utilizar um controlador digital.

O facto de as simulações serem efectuadas sobre um modelo de um sistema eólico que irá ser brevemente instalado, permite que possa ser feito um estudo de avaliação, a posteriori, da validade do mesmo.

CAPÍTULO 1: ENERGIA EÓLICA

1 ENERGIA EÓLICA

1.1 ENERGIAS RENOVÁVEIS

As energias renováveis, nomeadamente a energia solar, eólica, geotérmica, obtida a partir da biomassa ou de centrais mini-hídricas, são formas de energia com graus de divulgação e utilização crescente. Os motivos mais relevantes de tal crescimento são, nomeadamente:

- a escassez energética;

A dependência de combustíveis fósseis, nomeadamente carvão e petróleo, com reservas mundiais limitadas, pode provocar perturbações importantes, como pode ser verificado pelos vários "choques petrolíferos" e pelos recentes acontecimentos no Golfo Pérsico.

- os recursos locais;

A utilização de recursos energéticos locais, sendo a energia obtida nas proximidades dos consumidores, pode permitir evitar investimentos vultuosos em redes de transporte e grande distribuição.

- as energias limpas;

Ao contrário das centrais térmicas, com problemas graves de poluição devido à libertação de gases, ao problema das cinzas, etc., e das centrais nucleares, com o problema do armazenamento dos resíduos, estas formas de energia não são poluentes e têm um impacto ambiental reduzido, nomeadamente pela sua não contribuição para o efeito de estufa, a chuva ácida, etc.

- as energias renováveis;

Sendo as fontes primárias de energia recursos não consumidos no processo de conversão, não se põe, para estas formas de energia, o problema do esgotamento dos recursos.

1.2 A ENERGIA EÓLICA FACE A OUTRAS ENERGIAS

Uma análise económica comparativa é uma tarefa complexa, sobretudo ao considerar um leque alargado de formas de energia e de tipos de utilização.

No que respeita às energias renováveis os factores determinantes da rentabilidade económica são a disponibilidade e o custo da tecnologia e a abundância do recurso energético no local considerado.

As breves considerações que se seguem restringem-se a sistemas agrupados em parques de eólicas para produção de energia eléctrica integrados no sistema electroprodutor, por serem os casos cuja viabilidade económica é discutida com mais frequência na bibliografia [1.1], [1.2], [1.3], [1.4]

Nos casos de sistemas autónomos, os custos de instalação e manutenção por kWh serão decerto mais elevados, mas isso é compensado pelo superior valor da energia produzida.

Custos da energia produzida

Comparativamente com as outras energias renováveis a energia eólica apresenta, de uma forma geral, custos por kWh produzido mais baixos.

A título de exemplo, pode ser referido que os custos por kWh produzido são da ordem de 0.05 a 0.1 USD nos parques eólicos da Califórnia, e cerca de 0.37 DKR nos da Dinamarca. Os custos da energia obtida a partir de biomassa oscilam entre 0.07 e 0.16 USD/kWh, nas centrais mini-hídricas variam entre 0.05 e 0.12 USD/kWh e para energia obtida a partir de células fotovoltaicas entre 0.1 e 0.4 USD/kWh [1.1], [1.4].

Deve, no entanto, ser notado que estes custos são afectados pelo facto de haver taxas de juro bonificadas para estimular os investimentos em energias renováveis, como parques eólicos, centrais solares, etc. (taxas anuais da ordem dos 7%), e só são possíveis para um número limitado de locais.

Comparando esses custos com os da energia obtida a partir de centrais nucleares ou a carvão, continuamos a encontrar valores competitivos para a energia eólica, pois os custos por kWh são de 0.15 a 0.2 USD/kWh para as centrais nucleares e 0.07 a 0.22 USD/kWh para as centrais a carvão [1.1].

Custos de instalação

Comparativamente com as outras energias renováveis, a energia eólica apresenta igualmente custos por kW instalado mais baixos.

Novamente a título de exemplo, podem ser referidos valores que evidenciam a notável evolução tecnológica que os sistemas de conversão de energia eólica sofreram na última década:

- 3100 USD/kW em 1981,
- 1100 USD/kW em 1989,
- 700 USD/kW expectáveis a curto prazo.

Quando comparado com o custo por kW instalado para uma central nuclear (4000 a 5000 USD/kW), o custo de uma instalação eólica, para a mesma potência instalada, é significativamente mais baixo.

Mesmo entrando em consideração com o facto de que a taxa de utilização das centrais nucleares (tipicamente 55%) é significativamente maior que a das instalações eólicas (20 a 30%), o que obriga a um sobredimensionamento da instalação a fim de obter a mesma energia, o custo das instalações eólicas, para a mesma energia produzida, é mais baixo [1.1].

Custos de exploração e manutenção

Actualmente os custos de manutenção e exploração de sistemas eólicos oscilam entre 0.008 e 0.012 USD/kWh.

Adicionalmente, deve observar-se que as operações de manutenção são pouco frequentes (tipicamente quatro inspeções por ano) e envolvem equipas de manutenção pouco numerosas.

Disponibilidade

Nos últimos anos tem-se verificado um aumento da disponibilidade dos sistemas eólicos.

Assim, passou-se de valores da ordem dos 60% em 1981 para valores de mais de 95% em 1985 [1.1]. De notar que estes são valores reais médios de exploração de parques eólicos. A maioria dos fabricantes publicitam para as suas máquinas valores naturalmente superiores.

Energia de ponta do diagrama de cargas

Um sistema de conversão de energia eólica, situado num local com características favoráveis, pode permitir obter energia a preços muito competitivos quando comparados com os das soluções tradicionais para produção de energia para cobrir as pontas dos diagramas de carga (turbinas a gás, por exemplo).

1.3 O ESTADO DA ARTE DA TECNOLOGIA

Breve resenha histórica

A tecnologia para utilização da energia eólica tem uma história muito longa, pois as suas origens situam-se na China há cerca de 4000 anos atrás. Desde a idade média até ao aparecimento da máquina a vapor, uma grande parte das necessidades energéticas da humanidade eram supridas pelo vento nomeadamente através de:

- moinhos para bombagem e moagem,
- barcos à vela,
- instalações de secagem de cereais.

A título de exemplo, pode ser referido que nos Estados Unidos, no final do século passado, havia 192 fabricantes de turbinas e cerca de 2.5 milhões de turbinas instaladas, maioritariamente para bombagem de água.

Em 1890, na Dinamarca, foi efectuada a primeira ligação de um sistema eólico à rede de distribuição de energia eléctrica.

Entre 1920 e 1930, nos Estados Unidos, foram vendidas, em zonas rurais, dezenas de milhar de carregadores de baterias eólicos que supriam as então reduzidas necessidades em energia eléctrica (iluminação, rádio,...).

A partir dessa altura, tanto nos Estados Unidos como na Europa, os preços competitivos e os incentivos ao consumo diurno de energia eléctrica oferecidos pelas companhias distribuidoras, impuseram-na de forma quase total. A energia eólica deixou então de ser competitiva, face ao investimento exigido para aquisição de um sistema conversor e à necessidade de um esforço de manutenção elevado.

Só nos anos 70, em consequência das diversas crises petrolíferas, voltou a reacender-se o interesse pela energia eólica como fonte energética alternativa, como aliás por todas as energias renováveis.

Em 1980, o número de fabricantes nos Estados Unidos era de 78. Foi introduzido nessa altura o conceito de parque de eólicas. Os incentivos fiscais que o governo introduziu deram origem ao negócio da exploração de parques eólicos, vendendo a energia eléctrica produzida aos distribuidores locais, e à sua explosão na Califórnia.

Em 1989, na Dinamarca, foram produzidos por turbinas eólicas cerca de 300 GWh, o que representou cerca de 1% do consumo total do país.

A Dinamarca tem em curso um projecto ambicioso, envolvendo tanto empresas produtoras e distribuidoras de energia eléctrica como particulares em regime de autoprodução, cujo objectivo é suprir utilizando energia eólica 5% da energia eléctrica consumida no país no final da década.

Eólicas de eixo horizontal

A tecnologia das turbinas eólicas de eixo horizontal está hoje razoavelmente dominada, existindo já em termos comerciais máquinas com potências desde 50 W a 300 kW. Actualmente estão já instalados muitos sistemas eólicos, com uma potência total instalada de muitos milhares de MW.

Podemos referir, a título de exemplo, os parques de eólicas existentes na Dinamarca e nos Estados Unidos (sobretudo na Califórnia).

Uma análise dos diferentes tipos de sistemas existentes sai fora do âmbito deste trabalho, pelo que se alinhará simplesmente alguma da bibliografia existente sobre o assunto: [1.5], [1.6], [1.7].

Eólicas de eixo vertical

A tecnologia das turbinas eólicas de eixo vertical está ainda numa fase menos desenvolvida. As suas vantagens, por exemplo dispensarem sistema de orientação, não conseguem compensar o menor rendimento aerodinâmico e a necessidade de um sistema auxiliar de arranque. Os sistemas actualmente instalados são essencialmente protótipos, quase exclusivamente dedicados a fins de investigação. Por outro lado, o número de adeptos deste tipo de sistemas eólicos, é relativamente baixo. No entanto, o actual esforço de investigação e desenvolvimento poderá vir a alterar esta situação.

Tal como no caso anterior é deixada referência à bibliografia existente: [1.5], [1.8]

Investigação e desenvolvimentos actuais

Embora exista tecnologia disponível comercialmente, muito há ainda a esperar dos esforços de I&D actualmente em curso em dezenas de países, nomeadamente nos EUA e em diversos países europeus.

As grandes linhas de I&D actuais no campo da energia eólica incidem essencialmente nos seguintes pontos:

- avaliação de recursos,
- modelização,
- optimização do controlo,
- materiais,
- dinâmica,
- comportamento estrutural.

1.4 APLICAÇÕES

Os sistemas de conversão de energia eólica em energia eléctrica podem ter diferentes modos de funcionamento e cobrem um largo espectro de aplicações [1.5].

Relativamente ao seu modo de operação podemos dividi-los em três grupos, cada um dos quais se identifica com determinado tipo de aplicações.

- Sistemas de frequência fixa

Os sistemas de frequência fixa são normalmente utilizados integrados num sistema de produção e distribuição de energia eléctrica, regional ou nacional, em que funcionam como qualquer outro centro produtor.

- Sistemas de frequência variável

Os sistemas de frequência variável são normalmente utilizados em aplicações autónomas, especialmente em zonas rurais, nomeadamente para bombagem de água, alimentação de carregadores de baterias ou aquecimento doméstico e de estufas.

As aplicações para carregadores de baterias têm ainda outros mercados específicos, como o das telecomunicações, aplicações militares ou barcos.

- Sistemas eólico-diesel

Os sistemas eólico-diesel são normalmente utilizados integrados em redes de produção e distribuição locais, em que existem simultaneamente geradores eólicos e grupos diesel. Nestas aplicações, há normalmente grupos diesel e

geradores eólicos a alimentar a base do diagrama de cargas e outros grupos diesel, de menor capacidade, para suportar as pontas e compensar as flutuações da energia fornecida pelos geradores eólicos devidas a variações na velocidade do vento.

O tipo de sistema a utilizar depende essencialmente do fim a atingir com a produção da energia eléctrica.

Uma das variantes é funcionar como auto-produtor, vendendo energia à companhia exploradora da rede de distribuição e rentabilizando assim o espaço disponível. Esta solução é actualmente usada nos parques de eólicas existentes na Dinamarca e na Califórnia. A ocupação de solo é mínima, e praticamente toda a área permanece disponível para exploração agrícola.

Uma outra variante tem a ver com o aproveitamento da fonte energética, o vento, em locais remotos, sem rede eléctrica e em que o recurso aos grupos diesel se mostre pouco atractivo, devido aos custos ou dificuldades do transporte do combustível e da manutenção do grupo gerador.

Como casos típicos desta segunda variante, podemos indicar países subdesenvolvidos ou regiões subdesenvolvidas, e os casos específicos das ilhas. De referir neste contexto os programas de organismos dependentes das Nações Unidas e da CEE para a divulgação e apoio da utilização da energia eólica como recurso endógeno de países subdesenvolvidos energeticamente dependentes do exterior [1.9].

CAPÍTULO 2: SISTEMAS DE CONVERSÃO DE ENERGIA EÓLICA

2 SISTEMAS DE CONVERSÃO DE ENERGIA EÓLICA

São a seguir apresentadas algumas noções introdutórias sobre os componentes fundamentais e os modos de operação dos sistemas de conversão de energia eólica, consideradas relevantes no âmbito deste trabalho.

Informação complementar pode encontrar-se no vasto leque de referências existentes nomeadamente em [2.1], [2.2], [2.3], [2.4], [2.5].

2.1 COMPONENTES FUNDAMENTAIS

Os sistemas de conversão de energia eólica em energia eléctrica são basicamente constituídos por uma turbina eólica, uma caixa desmultiplicadora e um gerador eléctrico.

Turbina

A turbina eólica pode ser de eixo horizontal ou vertical. As turbinas de eixo vertical são normalmente utilizadas em sistemas de média ou grande potência (várias centenas de kW ou mesmo alguns MW) e têm a vantagem de não necessitarem de sistemas de orientação, embora necessitem de sistemas auxiliares de arranque. As turbinas de eixo horizontal não necessitam de sistemas auxiliares de arranque e tanto podem ser auto-orientadas, como necessitarem de sistemas que garantam a sua orientação em função da direcção do vento, conforme tenham o rotor a jusante ou a montante da torre de suporte. No que diz respeito à potência, são actualmente utilizadas numa gama muito vasta, que vai desde algumas dezenas de kW, até às várias centenas de kW ou mesmo alguns MW.

Caixa desmultiplicadora

As caixas desmultiplicadoras servem essencialmente para adaptar a velocidade de rotação da turbina à velocidade de rotação do gerador eléctrico, pois mesmo as turbinas ditas rápidas têm velocidades de rotação muito menores do que as dos geradores normalmente utilizados.

O facto de terem de suportar picos de binário várias vezes superiores aos valores nominais leva a que estes componentes tenham de ser em geral bastante sobredimensionados.

Gerador

Os geradores podem ser síncronos ou assíncronos. Os geradores síncronos têm a vantagem de poderem ser autónomos, podendo trabalhar a frequência fixa ou variável [2.6]. Os geradores assíncronos precisam de estar ligados a uma rede de distribuição que lhes imponha a frequência de sincronismo, ou de estar dotados de sistemas autónomos de bancos capacitivos para auto-excitação.

Geradores especiais ou integrando esquemas específicos são alternativas possíveis aos dois casos clássicos, de resto os mais divulgados, podendo ser identificadas variadíssimas opções de interface eléctrico [1.5].

2.2 MODOS DE OPERAÇÃO

A energia eléctrica obtida pode ser injectada numa rede de distribuição ou ser utilizada localmente.

A ligação do sistema eólico a uma rede de distribuição de frequência fixa obriga a operar a turbina a velocidade constante, ou a utilizar sistemas de conversão de frequência, normalmente conversores estáticos AC/DC e DC/AC.

A utilização isolada do sistema eólico permite que o mesmo funcione a frequência variável, dependente da velocidade do vento, o que limita no entanto a utilização da energia eléctrica obtida ao consumo local, normalmente para fins de aquecimento. Tal utilização impõe todavia que os consumidores suportem flutuações consideráveis na energia fornecida, pois esta depende da velocidade do vento, que pode ter flutuações consideráveis, quer em intervalos de tempo longos (variações ao longo do dia e variações sazonais), quer em intervalos de tempo muito curtos (rajadas).

A utilização de um sistema de frequência variável, em que a turbina acelera ou desacelera em função da velocidade do vento, apresenta diversas vantagens relativamente aos sistemas de frequência fixa, nomeadamente a obtenção de melhor rendimento aerodinâmico e a limitação dos valores de binário aplicados à caixa desmultiplicadora durante os transitórios de vento.

A utilização de conversores estáticos para ligação de sistemas de frequência variável a redes de distribuição de frequência fixa tem o grave inconveniente de agravar muito o custo do sistema, sobretudo em sistemas de pequena potência.

**CAPÍTULO 3: MÉTODOS DE CONTROLO DE
UM SISTEMA DE CONVERSÃO
DE ENERGIA EÓLICA**

3 MÉTODOS DE CONTROLO DE UM SISTEMA DE CONVERSÃO DE ENERGIA EÓLICA.

Dado o carácter aleatório que apresenta a fonte de energia primária, o vento, é necessário controlar o funcionamento do sistema de conversão de energia eólica de forma a obter um comportamento satisfatório, quer do ponto de vista dinâmico quer do de extracção de energia [3.1].

Nos sistemas de frequência fixa, é necessário que a turbina rode sempre à mesma velocidade, para manter o sincronismo com a rede. Isso leva a que, dadas as flutuações de binário mecânico a que é sujeita, a turbina não possa estar sempre no seu ponto de funcionamento de maior rendimento aerodinâmico.

Nos sistemas de frequência variável, independentemente da estratégia de controlo, o fim a atingir é normalmente a maximização da extracção de energia aliada a um bom comportamento dinâmico.

O sistema que pretendemos simular no âmbito deste trabalho é um sistema de frequência variável, pelo que passamos a analisar com maior detalhe as várias estratégias de controlo aplicáveis a este tipo de sistemas.

Os métodos mais utilizados são o método vulgarmente conhecido por " λ óptimo" (controlo da velocidade específica da turbina) e os de maximização da potência extraída (controlo da potência eléctrica obtida). Em qualquer dos casos, a actuação do controlador consiste fundamentalmente na variação da carga aplicada ao gerador, e portanto do binário resistente aplicado à turbina, com o objectivo de, em cada momento, obter um equilíbrio dinâmico de binários [2.1], [3.1], [3.2], [3.3], [3.4], [3.5] .

O método de " λ óptimo", tem por objectivo fazer com que o parâmetro λ , ou "tip-speed ratio" (relação entre a velocidade de rotação da extremidade da pá da turbina e a velocidade do vento, ou velocidade específica) da turbina seja constante, independentemente da velocidade do vento, e igual ao valor que maximiza o rendimento aerodinâmico e, portanto, a extracção energética.

A figura 3.1 ilustra de forma simples este método de controlo.

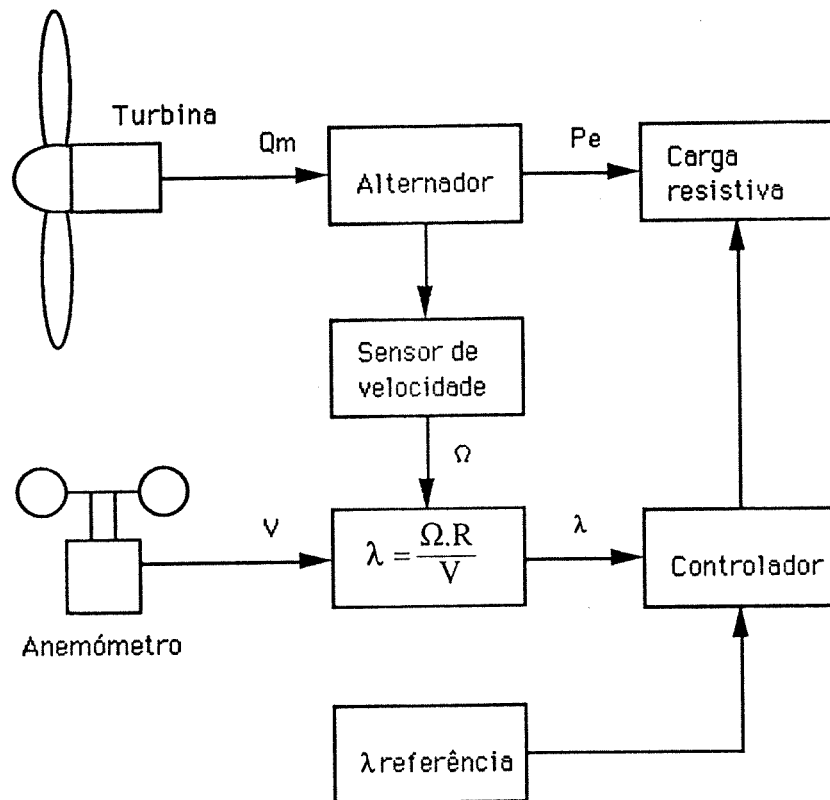


Fig. 3.1 - Diagrama de blocos simplificado de um sistema com controlo de velocidade específica

Os métodos de maximização da potência eléctrica obtida são essencialmente de dois tipos.

Por um lado, os que têm por objectivo fazer com que o sistema esteja em cada momento no ponto de funcionamento que, para a velocidade de vento actual, permite extrair o máximo de energia eléctrica, o que obriga a conhecer as características do sistema turbina/alternador [3.1].

Este método está ilustrado na figura 3.2.

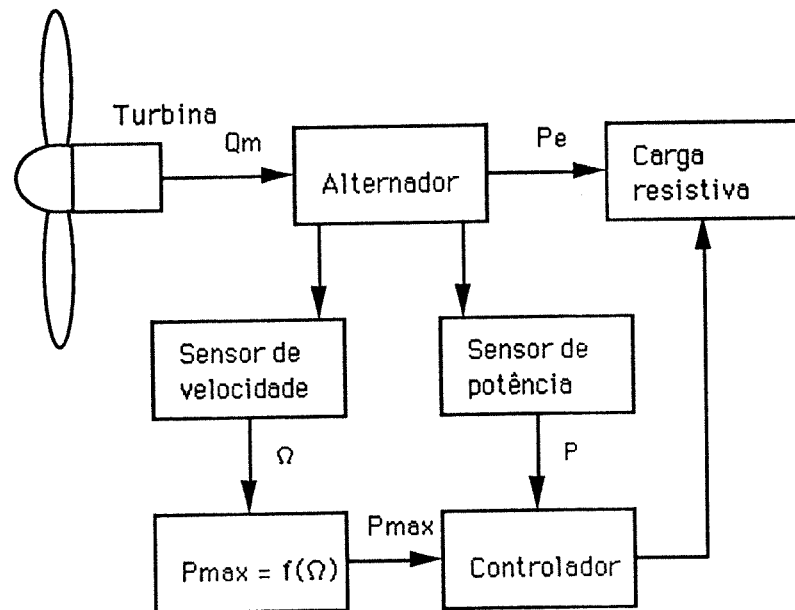


Fig. 3.2 - Diagrama de blocos simplificado de um sistema com controle de potência

Por outro, os métodos que, usando algoritmos de otimização do tipo "hill climbing", cumprem o objectivo de maximizar a energia extraída introduzindo perturbações no sistema e utilizando a reacção a essas perturbações para levar o mesmo a evoluir sempre no sentido de energia extraída crescente. Neste caso dispensa-se um conhecimento detalhado do sistema físico a controlar mas é exigido um esforço, por vezes considerável, de sintonização de parâmetros dos algoritmos [3.1], [3.6].

Em qualquer dos casos apresentados, é necessário variar o binário resistente aplicado à turbina. Tal variação pode ser obtida por acção de controlo sobre o alternador ou sobre a carga.

Se a corrente de excitação do alternador for controlável, o binário resistente do mesmo pode ser variado actuando sobre a mesma. No caso de alternadores de magnetes permanentes tal actuação não é possível, restando a alternativa de actuação sobre a carga.

No caso de o gerador ser ligado através de conversores AC/AC a uma rede de distribuição, a variação de binário resistente por variação da carga é obtida actuando sobre o conversor. No caso de se tratar de um sistema autónomo, essa

variação de binário é normalmente feita por variação de uma carga resistiva aplicada ao gerador.

Esta carga resistiva pode ser basicamente de dois tipos, designados por "cargas AC" (de corrente alternada) e "cargas DC" (de corrente contínua) [3.1].

As cargas AC são normalmente constituídas por resistências variáveis por escalões (várias resistências em paralelo controladas, por exemplo, por relés de estado sólido), montadas em estrela ou triângulo.

As cargas DC são normalmente constituídas por uma ponte rectificadora semi-comandada, debitando sobre uma resistência fixa.

Independentemente dos métodos de controlo tendentes a maximizar a extracção de energia, é ainda necessário considerar situações particulares, como sejam a situação de arranque da turbina e a situação de limitação de velocidade de rotação da mesma para velocidades de vento excessivas. A actuação sobre a turbina é feita nestes casos, não por variação da carga aplicada ao gerador, mas sim por variação do binário mecânico através do controlo do ângulo das pás ("pitch control").

Esta malha de controlo, que não foi incluída nos diagramas das figuras 3.1 e 3.2, vai naturalmente interactuar com as malhas de controlo de velocidade específica ou de potência extraída.

CAPÍTULO 4: SISTEMA A SIMULAR

4 SISTEMA A SIMULAR

Passamos a descrever o sistema real, os fins a atingir com as simulações efectuadas e os meios utilizados nesse trabalho de simulação.

4.1 SISTEMA REAL

O sistema concreto que se pretende simular no âmbito deste trabalho é formado essencialmente por uma turbina, uma caixa desmultiplicadora, um alternador, uma carga AC e respectivo actuador e um sistema de variação do ângulo de pás.

O rotor da turbina tem três pás, 2.92 metros de raio, e um valor óptimo de λ igual a 4.7. O projecto do rotor teve como objectivo bom rendimento para velocidades de vento moderadas (entre 3 e 7 m/s), prevendo-se uma gama de velocidades de funcionamento entre 100 e 200 rpm. A máxima potência mecânica disponível, cerca de 10 kW para velocidades de vento de 12 m/s, não está obviamente contemplada na zona de funcionamento nominal.

Características mais detalhadas da turbina podem ser encontradas em [4.1].

A caixa desmultiplicadora utilizada tem uma razão de desmultiplicação de 10.6, e é um componente de série.

O alternador, de magnetes permanentes, tem uma potência nominal de 2.5 kW a uma velocidade de rotação nominal de 1000 rpm, podendo todavia a velocidade de rotação e potência nominais ser largamente ultrapassadas (até 2000 rpm e 3.0 kW respectivamente).

Características mais detalhadas do alternador podem ser encontradas em [4.2].

A escolha deste alternador procurou servir o objectivo de realizar testes de campo com diferentes rótores da turbina, sendo por outro lado limitada pelas alternativas existentes no mercado.

A carga resistiva é constituída por três conjuntos de resistências, montadas em estrela. Cada conjunto é formado por três resistências em paralelo que podem ser controladas individualmente através de relés de estado sólido.

O dimensionamento da carga resistiva foi efectuado tendo em vista as características deste alternador, mas também as do alternador de um outro sistema eólico entretanto testado nas mesmas instalações.

Os compromissos que, por razões de ordem prática, tiveram de ser aceites relativamente ao alternador utilizado e respectiva carga poderão fazer sentir o seu efeito na forma de um menor desempenho do sistema.

O sistema de variação do ângulo de pás é baseado num motor de relutância com características especiais, denominado motor de binário, que actua sobre as pás através de um conjunto de braços mecânicos.

Associado a estes elementos, existe um sistema de controlo digital que implementa as funções de controlo de carga, controlo de velocidade e controlo de ângulo de pás.

Finalmente existe ainda um conjunto de elementos auxiliares necessários ao funcionamento do sistema, como sejam os sensores de velocidade de vento e velocidade de rotação, o sistema mecânico de travagem, etc.

4.2 OBJECTIVO DA SIMULAÇÃO

Os objectivos da simulação deste sistema de conversão de energia eólica são, fundamentalmente:

- validar as opções tomadas durante o projecto do mesmo;
- estudar as estratégias de controlo nas situações de arranque, funcionamento normal e de sobrevelocidade e a influência de variações dos parâmetros do controlador;

- analisar o comportamento global do sistema, antes da sua implementação física no local.

Pretende-se igualmente estudar quais os algoritmos a implementar nos controladores de velocidade e de ângulo de pás, e verificar, através de simulação, qual o desempenho desses controladores.

A utilização da simulação antes da implementação real do sistema apresenta várias vantagens permitindo nomeadamente:

- testar o comportamento do sistema, nas mais variadas situações, quer de estados de funcionamento interno quer de estímulos aplicados, sem que seja necessário proceder à implementação e montagem de todo o sistema;
- analisar com detalhe a evolução do sistema em situações particulares, de difícil obtenção no sistema real, nomeadamente criando situações limite, potencialmente destrutivas para o equipamento caso não tenham sido convenientemente tratadas, sem correr riscos;
- monitorizar todo um conjunto de variáveis, muitas vezes de difícil acesso no sistema real e sem os custos inerentes de instrumentação;
- obter e analisar a resposta do sistema a estímulos externos pré-definidos, ensaio de difícil realização sobre o sistema real, quando o estímulo/perturbação exterior pretendido tem um carácter tão aleatório como o vento;
- obter informação que ajude à escolha da estrutura e dos valores dos parâmetros do compensador digital que será implementado no sistema real;
- estudar a interacção entre as diferentes malhas de controlo.

4.3 MEIOS DE SIMULAÇÃO

Para simular o sistema, foi utilizado um pacote de software de simulação numérica, "TUTSIM", desenvolvido na Twente University of Technology, Holanda [4.3].

Este pacote é executável em computadores IBM PC ou compatíveis, e permite a simulação de sistemas lineares e não lineares. Para este trabalho, foi usada uma versão de nível intermédio, designada por "student version" que, embora tendo as funcionalidades da versão mais potente, apresenta algumas limitações relativamente à dimensão do sistema a simular. Tal escolha deveu-se à impossibilidade de, em tempo útil, obter a versão mais potente.

Definidos e caracterizados os vários blocos constituintes do sistema e as respectivas interligações, é possível obter gráficos e listagens das evoluções temporais das variáveis de saída de cada um desses blocos para excitações diversas.

Além dos blocos integradores, diferenciadores, ganhos, atenuações, somadores, multiplicadores, divisores, etc., é também possível incluir blocos que implementam funções "piecewise linear", controladores PID e blocos que implementam funções lógicas (AND, OR ou mesmo funções do tipo IF...THEN...ELSE...).

Sendo o processo de simulação numérico, é igualmente possível definir qual o valor do incremento temporal a ser utilizado durante o processo de cálculo, pois esse é um parâmetro que pode afectar a precisão da simulação, nomeadamente no caso dos blocos integradores e diferenciadores.

CAPÍTULO 5: MODELO DO SISTEMA

5 MODELO DO SISTEMA

O modelo do sistema é composto basicamente pelos seguintes componentes:

- turbina,
- caixa desmultiplicadora,
- alternador,
- carga resistiva de fracções comutáveis,
- sistema de variação do ângulo de pás,
- controlador de λ ou de velocidade específica,
- controlador do ângulo de pás.

O esquema geral do modelo utilizado para representar o sistema eólico está representado na figura 5.1.

Não foram incluídos no modelo componentes auxiliares, como por exemplo o sistema de travagem, pois o comportamento dos mesmos, se bem que relevante para o sistema real, não tem influência na análise do comportamento dinâmico ou da extracção energética, que são os pontos fundamentais sobre os quais este trabalho se debruça.

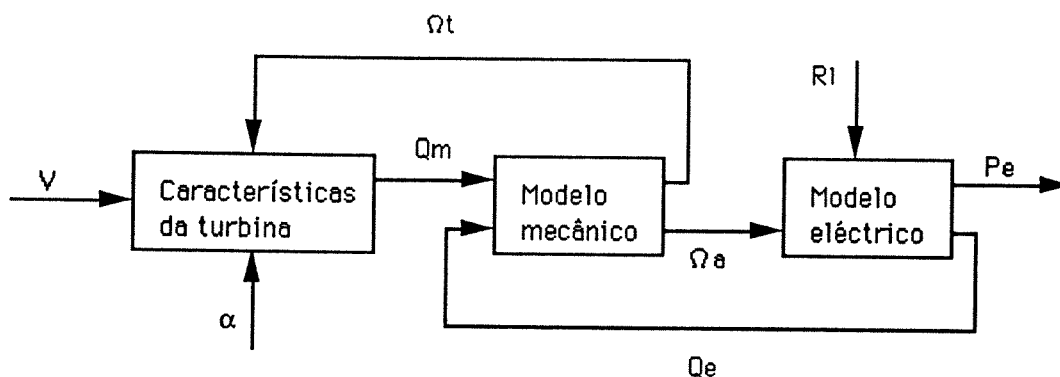


Fig. 5.1 - Diagrama de blocos do sistema eólico

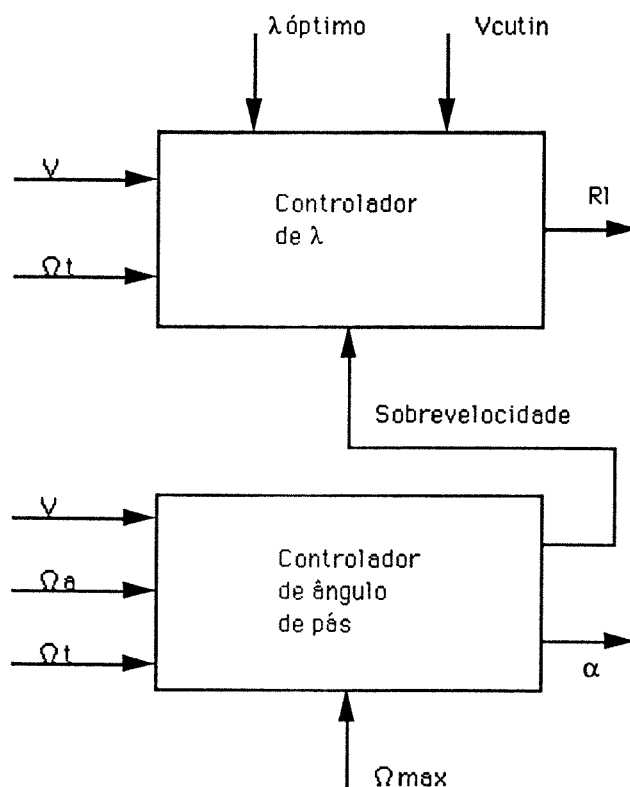


Fig. 5.2 - Diagrama de blocos dos controladores de velocidade e de ângulo de pás

Ao modelo do sistema de conversão de energia eólica em energia eléctrica, juntam-se os modelos dos controladores de velocidade e de ângulo de pás.

Na figura 5.2 pode ser observada a influência do controlador do ângulo de pás sobre o controlador de λ , através da indicação de detecção de sobrevelocidade (velocidade de rotação excessiva).

Essa indicação condiciona o funcionamento do controlador de velocidade em alguns dos estados de funcionamento do sistema, que passamos a descrever.

5.1 ESTADOS DE FUNCIONAMENTO DO SISTEMA

O sistema de conversão de energia eólica tem essencialmente quatro estados de funcionamento: arranque, funcionamento normal, sobrevelocidade e paragem.

A figura 5.3 apresenta um Diagrama de Estados do sistema, ilustrando as condições de transição respectivas.

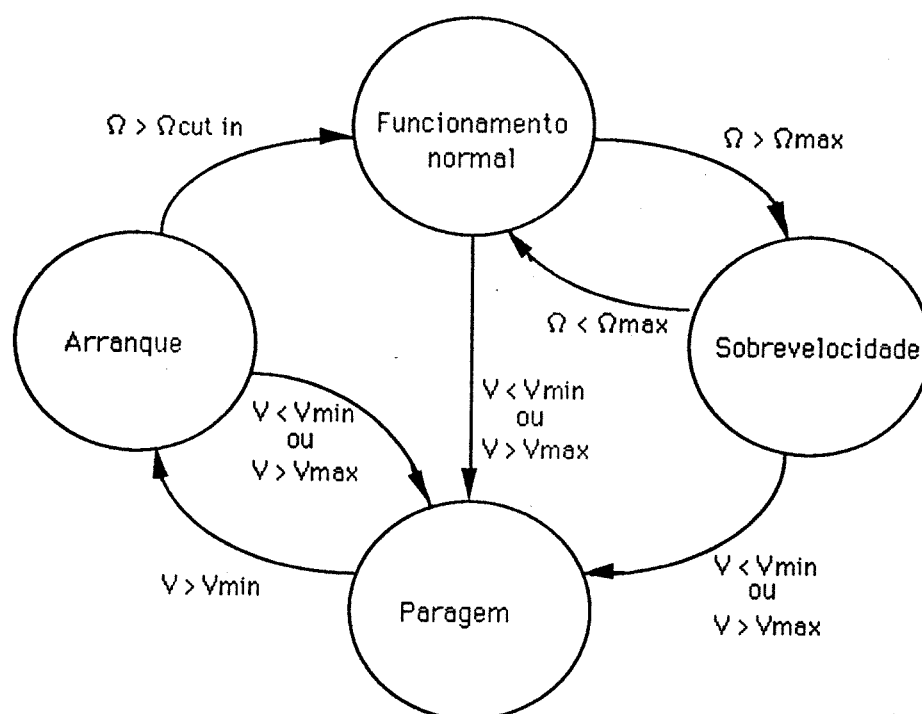


Fig. 5.3 - Diagrama de estados de funcionamento

5.1.1 Arranque

O estado de arranque é um estado em que a turbina, inicialmente imóvel, após a remoção do sistema mecânico de travagem, começa a acelerar sob a acção do vento.

Este estado termina ao ser atingida uma velocidade de rotação mínima (velocidade de "cut-in"). Durante este estado, o controlador de λ está inactivo, não sendo aplicada qualquer carga ao alternador.

O controlador do ângulo de pás, em função do valor de velocidade específica, selecciona o ângulo de pás a utilizar, a fim de maximizar o binário motor e a aceleração da turbina.

5.1.2 Funcionamento normal

O sistema transita para este estado a partir do estado de arranque, ao ser atingida a velocidade de "cut-in".

Neste estado, quer o controlador de λ quer o de ângulo de pás estão activos. O primeiro modulando a carga aplicada ao alternador, a fim de manter o valor de λ igual ao valor de referência (λ_{opt}), e o segundo actuando sobre o sistema de variação de ângulo de pás, a fim de permitir obter binários motores razoáveis se o valor da velocidade específica se tornar demasiado baixo devido a transitórios de vento.

5.1.3 Sobrevelocidade

A transição do estado normal para o estado de sobrevelocidade ocorre quando é atingida a velocidade de rotação máxima tolerada pelo conjunto turbina/alternador.

Neste estado, a actuação do controlador de λ sobre a carga é inibida, sendo aplicada a carga máxima ao alternador, e o controlador de ângulo de pás actua sobre o respectivo sistema de variação a fim de manter a velocidade de rotação no valor limite.

O retorno ao estado de funcionamento normal verifica-se quando a velocidade de rotação do conjunto cair para um valor inferior ao valor limite. A fim de evitar situações de transição frequente entre estados, o valor limite da velocidade de rotação para retorno ao estado normal é ligeiramente inferior ao estipulado para a transição inversa, i. e. a detecção de sobrevelocidade é feita com histerese.

5.1.4 Paragem

Neste estado, é aplicado um sistema de travagem mecânico e, após a desaceleração da turbina, o sistema de variação do ângulo de pás leva as mesmas à posição de ângulo máximo (pás em bandeira). Os controladores de λ e ângulo de pás são então inibidos.

A transição para este estado pode ocorrer por dois motivos:

- velocidade de vento insuficiente,
- velocidade de vento excessiva.

A primeira situação ocorre no caso de a velocidade de vento se tornar demasiado baixa, de tal forma que a energia que pode ser extraída não justifique o funcionamento do sistema.

A segunda situação ocorre para situações meteorológicas anormais, de ventos de intensidade muito elevada que, embora interessantes sob o ponto de vista de extracção de energia, poderiam causar danos ao sistema devidos a esforços mecânicos excessivos.

5.2 EQUAÇÕES BÁSICAS DA TURBINA EÓLICA

São a seguir alinhadas algumas equações fundamentais com o objectivo de facilitar a compreensão dos pontos seguintes. Tratamentos mais detalhados do assunto podem encontrar-se em [1.5], [5.1]

A potência teórica utilizável devido ao vento que atravessa uma área A perpendicular ao fluxo com a velocidade V é dada por:

$$P_a = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot V^3 \cdot A \quad (1)$$

A potência mecânica no veio da turbina, pode ser descrita a partir da potência do vento, com recurso a um parâmetro adimensional C_p (coeficiente de potência)

$$P_m = C_p \cdot P_a \quad (2)$$

C_p é um parâmetro simultaneamente dependente da velocidade do vento e da velocidade de rotação da turbina, e representa o seu rendimento aerodinâmico.

Para um ponto da pá da turbina a uma distância r do centro, pode ser definido um valor da velocidade específica ("local speed ratio"), que é a relação entre a velocidade linear desse ponto e a velocidade do vento, através de

$$\lambda_r = \frac{\Omega \cdot r}{V} \quad (3)$$

Para um ponto na extremidade da pá de uma turbina com raio R , esse valor representa a velocidade específica da turbina na ponta da pá ("tip speed ratio"), e é dado por

$$\lambda_R = \frac{\Omega \cdot R}{V} \quad (4)$$

e, dado que o binário é dado por

$$Q = \frac{P}{\Omega} \quad (5)$$

podemos definir um outro parâmetro C_q , designado coeficiente de binário

$$C_q = \frac{Q}{\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot V^2 \cdot \pi \cdot R^3} \quad (6)$$

o qual está relacionado com o coeficiente de potência através de

$$C_p = C_q \cdot \lambda \quad (7)$$

Para uma dada turbina é possível obter as curvas de potência e binário em função da velocidade de rotação e parametrizadas pela velocidade do vento.

A partir dessas curvas, é ainda possível obter a curva do coeficiente de potência C_p em função de λ e do coeficiente de binário C_q em função de λ , características fundamentais da turbina (figuras 5.4 e 5.5).

Nessas curvas pode ser observado que há um valor de λ para o qual o valor de C_p é máximo. Estando a turbina a rodar à velocidade correspondente a esse valor de λ , é pois maximizado o rendimento aerodinâmico e conseqüentemente a potência utilizável no veio da mesma.

Deve ser notado que as expressões acima indicadas são válidas para situações estacionárias ou de variação lenta.

Nas simulações efectuadas, essas mesmas expressões foram igualmente utilizadas em regime dinâmico. Isso deve-se ao facto de o estudo do comportamento aerodinâmico da turbina estar fora do âmbito deste trabalho, e a utilização das mesmas expressões não invalidar qualitativamente os resultados obtidos, embora possa afectar alguns dos resultados quantitativos.

5.3 MODELOS DOS COMPONENTES

Qualquer trabalho de análise dinâmica de sistemas com objectivo do projecto de controladores exige um modelo matemático suficientemente preciso do processo ou sistema físico a ser controlado.

A obtenção de uma descrição matemática adequada desse sistema físico exige um esforço muitas vezes de uma ordem de grandeza superior ao exigido no projecto do controlador [5.2].

A escolha dos modelos para os diversos componentes do sistema privilegiou sobretudo, e após uma análise do que é proposto na abundante bibliografia [1.5], [2.1], [3.1], [3.2], [3.3], [3.4], [3.5], a simplicidade.

Turbina

A turbina é modelizada através de um sistema mecânico rotativo, com parâmetros concentrados, com um coeficiente de inércia J_t . O coeficiente de binário da turbina é uma função não linear, dependente de λ e do ângulo de pás α .

No modelo utiliza-se uma família de funções "piecewise linear", que permitem obter o valor do coeficiente de binário em função do valor de λ para um valor fixo do ângulo de pás, sendo a escolha da função apropriada feita em função deste ângulo.

Os valores dos parâmetros necessários à modelização da turbina foram obtidos de [4.1].

Relativamente à turbina os parâmetros considerados foram os seguintes:

Raio do rotor da turbina : $R_t = 2.92 \text{ m}$

Coefficiente de inércia estimado : $J_t = 108 \text{ kg m}^2$

As curvas do coeficiente de potência e do coeficiente de binário em função de λ para vários valores de ângulo de pás α , são apresentadas nas figuras 5.4 e 5.5

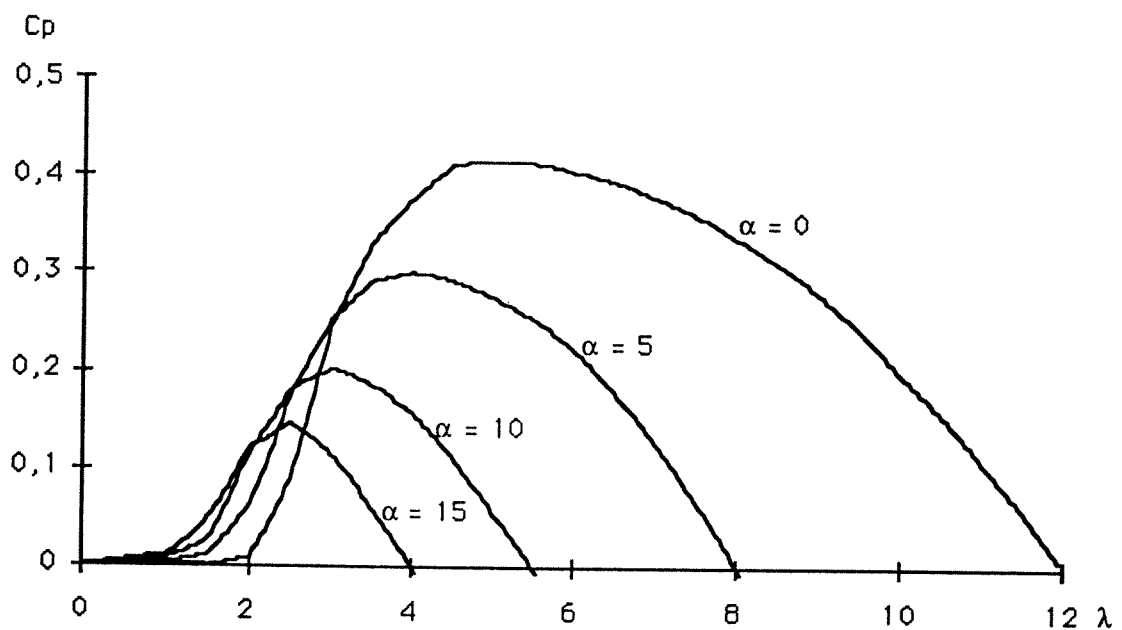


Fig. 5.4 - Curvas do coeficiente de potência em função de λ para vários valores de ângulo de pás

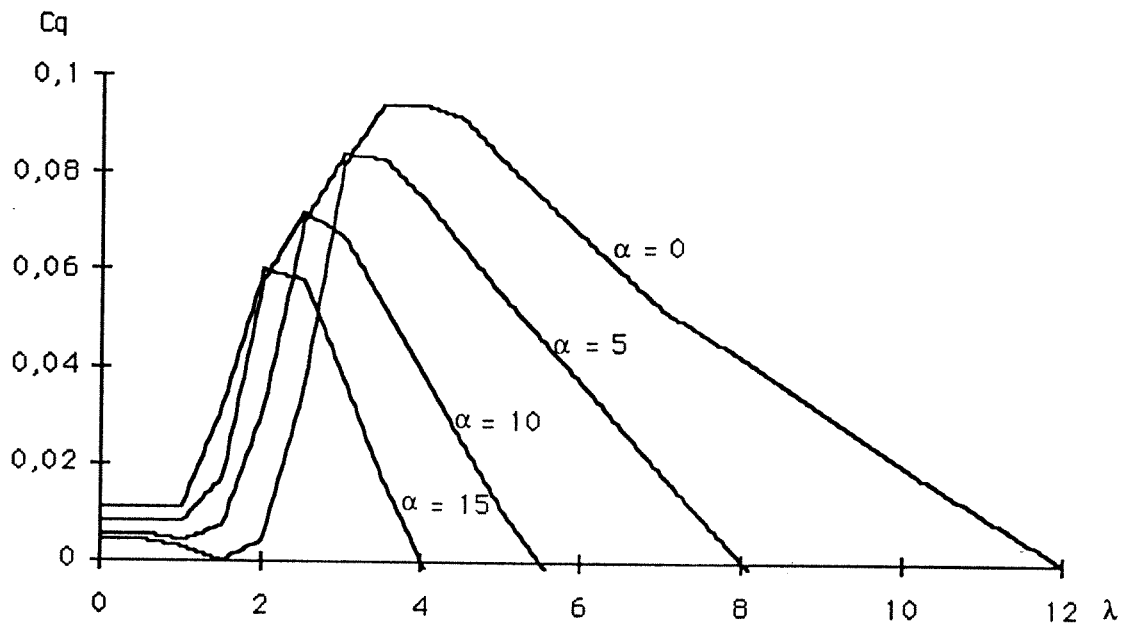


Fig. 5.5 - Curvas do coeficiente de binário em função de λ para vários valores de ângulo de pás

Caixa desmultiplicadora

A caixa desmultiplicadora é modelizada como um sistema ideal de conversão de velocidade de rotação, com inércia mas sem atritos ou folgas.

Devido ao pequeno comprimento dos veios primário (turbina) e secundário (alternador), não foram consideradas quaisquer torsões nos mesmos (i. e. rigidez infinita).

São pois desprezados, por não serem significativos, os elementos elásticos e de amortecimento da transmissão mecânica.

Assim sendo, a relação entre as velocidades de rotação nos veios primário e secundário é sempre dada por

$$\Omega_1 = \frac{\Omega_2}{N}, \quad (8)$$

onde N é a razão de transmissão.

A velocidade constante, a relação entre os binários nos veios primário e secundário é dada por

$$Q_1 = Q_2 \cdot N \quad (9)$$

Relativamente à caixa desmultiplicadora os parâmetros considerados foram os seguintes:

Razão de transmissão : $N = 10.6$

Coefficiente de inércia (referido ao veio primário) : $J_c = 0.05 \text{ kg m}^2$

Alternador

O alternador trifásico de magnetes permanentes é modelizado por um sistema mecânico rotativo, de parâmetros concentrados, com inércia mas sem atrito. Electricamente, é modelizado por um gerador ideal de tensão, trifásico, em estrela, cuja amplitude varia linearmente com a velocidade de rotação, em série com indutâncias de valor constante. As perdas no cobre e no ferro foram desprezadas, assim como os efeitos resultantes da saturação do circuito magnético.

Assim sendo, o valor eficaz da tensão simples do mesmo é dado por

$$E(\Omega_m) = K_1 \cdot \Omega_m \quad (10)$$

Dado o número de pólos do alternador, a relação entre a velocidade de rotação do mesmo e a frequência da onda sinusoidal de tensão é dada por

$$\Omega_e = 3 \cdot \Omega_m \quad (11)$$

A corrente e a tensão na carga são dadas por

$$I = \frac{E}{\sqrt{R^2 + X^2}} \quad (12)$$

$$X = \Omega_e \cdot L \quad (13)$$

$$\bar{V}(\Omega_m) = \bar{E}(\Omega_m) - j \cdot X \cdot \bar{I} \quad (14)$$

Os valores dos parâmetros necessários à modelização dos diferentes componentes foram obtidos de [4.2].

Relativamente ao alternador os parâmetros considerados foram os seguintes:

- Coeficiente de inércia : $J_a = 0.05 \text{ kg m}^2$
- Coeficiente de tensão : $K_1 = 0.93 \text{ Volt / rad / s}$
- Indutância : $L = 22.9 \text{ mHenry}$
- Binário nominal : 20 Nm
- Potência nominal : 2.5 kW
- Velocidade nominal : 1000 rpm

Carga resistiva de fracções comutáveis

As resistências de carga e os relés estáticos de comutação das mesmas são modelizados por três resistências variáveis por escalões, montadas em estrela e que variam simultaneamente e de forma idêntica nos três ramos.

Relativamente às resistências de carga, os valores considerados para as resistências elementares foram os seguintes:

RESISTÊNCIA	VALOR
R1	36 Ω
R2	18 Ω
R3	9 Ω

Tab.5.1 - Resistências de carga

Considerando as várias hipóteses de paralelos de resistências, a resistência de cada um dos ramos da estrela pode tomar os seguintes valores:

RESISTÊNCIA	VALOR
RL1	36 Ω
RL2	18 Ω
RL3	12 Ω
RL4	9 Ω
RL5	7.2 Ω
RL6	6 Ω
RL7	5.14 Ω

Tab.5.2 - Resistências aplicadas ao alternador

Normalmente, em cada passo da simulação, a saída do controlador de λ é utilizada, depois de truncada a parte decimal, como índice na tabela 5.2, a fim de obter o valor de resistência a aplicar ao alternador.

No entanto, no estado de sobrevelocidade, independentemente do valor da saída do controlador de λ , a resistência que é aplicada ao alternador é um valor constante.

Esta situação deve-se ao facto de o controlador de λ ter a sua acção inibida neste estado.

O valor da resistência aplicada no estado de sobrevelocidade é um parâmetro do modelo. Nas simulações efectuadas foi considerada uma resistência de 12 Ω , por ser o valor de resistência de carga que maximiza a potência do alternador para a velocidade limite considerada.

Os relés de estado sólido de comutação foram modelizados como simples interruptores ideais, dado que os tempos de comutação e os atrasos introduzidos são desprezáveis face às constantes de tempo do sistema, e as perdas energéticas nos mesmos são igualmente desprezáveis face às perdas que no sistema real se verificam por atritos ou por perdas no alternador.

Sistema de variação do ângulo das pás

O sistema de variação do ângulo das pás não foi efectivamente incluído no modelo global, tendo sido substituído por um bloco unitário.

A sua não inclusão pode justificar-se pelo facto de o mesmo apresentar uma função de transferência de primeira ordem, com ganho quase unitário e constante de tempo desprezável face aos valores das constantes de tempo da turbina.

O outro motivo que obrigou a esta simplificação foi a dimensão máxima do modelo imposta pelo pacote de software utilizado na simulação, que impediu a modelização completa do sistema.

Assim sendo, o valor da saída do controlador de ângulo de pás é, na simulação, simplesmente considerado como sendo o valor real desse mesmo ângulo.

Controlador de λ

O controlador de λ (velocidade específica), tem por função modular o valor da resistência de carga aplicada ao alternador, a fim de manter, em cada momento e a despeito das variações de velocidade de vento e de rotação, o valor real de λ idêntico ao seu valor de referência (λ_{opt}).

A modulação do valor da resistência é feita através de um controlador proporcional integral com limitação do valor do integral do erro. A saída deste controlador é convertida, por truncatura, num valor inteiro, com limitação do valor ao número de resistências distintas existentes na tabela 5.2. Esse valor é utilizado como índice, para seleccionar qual a combinação de resistências a serem colocadas em paralelo.

A fim de evitar uma comutação demasiado frequente de valor de resistência aplicada ao alternador, o valor que selecciona a resistência a aplicar é sujeito a um tratamento de "sample and hold", que só permite a comutação do valor de resistência de 0.5 em 0.5 segundos.

Controlador de ângulo de pás

O controlador de ângulo de pás é constituído por dois blocos que têm funções distintas:

- seleccionar o valor óptimo para o ângulo de pás, em função do valor de λ ,
- modular o ângulo de pás para limitar a velocidade de rotação.

A selecção do ângulo de pás é feita com base numa tabela que, para cada gama de valores de λ , define qual o valor de ângulo a utilizar. Devido às limitações impostas ao tamanho do modelo, a tabela (ver tab. 5.3) só dispõe dos quatro elementos seguintes.

λ	α
$0 \leq \lambda < 2$	15°
$2 \leq \lambda < 3$	10°
$3 \leq \lambda < 3.5$	5°
$\lambda \geq 3.5$	0°

Tab.5.3 - Ângulo das pás função de λ

Este bloco do controlador está activo durante as fases de arranque e funcionamento normal, e tem por função evitar que o binário motor da turbina seja muito reduzido por esta estar a funcionar com valores de λ muito inferiores ao valor óptimo.

Este bloco do controlador é inibido no estado de sobrevelocidade, pois o controlo do ângulo de pás, nesse estado de funcionamento, tem como objectivo limitar o binário motor da turbina a fim de manter a velocidade constante, independentemente do valor de velocidade específica.

A modulação do ângulo de pás é feita através de um controlador proporcional integral com limitação do valor do integral do erro.

A modulação contínua do valor de ângulo de pás é obtida por interpolação linear entre as curvas correspondentes a 0 e 15 graus. Esta aproximação, imposta pela dimensão do modelo, não introduz erros consideráveis, dada a evolução das curvas de binário em função de λ nas gamas de valores de λ em que este bloco está activo.

Este bloco do controlador só está activo desde que o sistema esteja no estado de sobrevelocidade.

CAPÍTULO 6: RESULTADOS

6 RESULTADOS

Depois de definido o modelo do sistema, já discutido no capítulo anterior, foram criados os ficheiros de simulação correspondentes às situações a analisar.

Dadas as características da variável de entrada, por vezes referida como a "perturbação necessária", o vento, e o tipo de modelo que foi possível obter para o sistema, colocou-se o problema da escolha do método de análise, tendo sido preferidos métodos de análise no domínio dos tempos.

Na bibliografia consultada foi, com efeito, possível constatar que a esmagadora maioria dos trabalhos de análise dinâmica e projecto de compensadores na área dos sistemas conversores de energia eólica utiliza métodos de resposta no domínio dos tempos. As excepções prendem-se com trabalhos de análise estrutural, como por exemplo determinação de frequências de ressonância do conjunto turbina-torre de suporte, em que se trabalha no domínio das frequências.

A fim de analisar o comportamento dinâmico do sistema, foram feitas simulações que permitem obter a evolução temporal do mesmo, através da das suas variáveis de estado mais significativas, quando sujeito a determinados estímulos.

O estímulo, ou variável de entrada ou de excitação, tipicamente utilizado nas várias simulações foi o degrau, pois trata-se da perturbação que mais facilmente permite caracterizar a dinâmica do sistema, permitindo inferir qual o seu comportamento quando sujeito a outro tipo de entradas.

Além disso o degrau é o mais severo dos sinais de teste típicos utilizados em análises baseadas na resposta no domínio dos tempos.

Os resultados que se seguem pretendem analisar, quer as características do sistema, quer o comportamento dinâmico e o desempenho do mesmo em situações tipo.

6.1 CARACTERÍSTICAS DO SISTEMA

6.1.1 Características de binário e de potência

Na figura 6.1 estão representadas as curvas de binário motor da turbina eólica (para velocidades de vento de 4, 6 e 8 m/s), assim como as curvas de binário resistente do alternador, referidas ao veio primário da caixa desmultiplicadora (para resistências de carga de 5.14, 12 e 36 ohm), em função da velocidade de rotação do alternador.

Os pontos de funcionamento possíveis, em regime permanente, são os pontos de intersecção das curvas de binário motor e resistente para uma dada velocidade de vento. Para um dado valor de velocidade de rotação, a diferença entre as curvas de binário aplicáveis, i.e. a curva de binário motor correspondente à velocidade de vento e a curva de binário resistente imposta pela carga, corresponde ao binário efectivo de aceleração ou desaceleração. Um determinado ponto de funcionamento pode ser estável ou instável, dependendo da forma como evoluem as curvas de binário motor e resistente em torno desse ponto. As zonas de instabilidade situam-se para a esquerda dos pontos de binário máximo, e as zonas de funcionamento estável para a direita desses pontos. Para cada ponto de funcionamento, é ainda facilmente obtido o valor de λ correspondente, dado serem conhecidas a velocidade do vento e a velocidade de rotação, sendo portanto possível avaliar a eficiência da extracção energética nesse ponto de funcionamento.

Para velocidades de vento moderadas (entre 4 e 6 m/s), e qualquer que seja a velocidade de rotação, é sempre possível obter um ponto de funcionamento estável a uma velocidade de rotação superior à que corresponde ao binário máximo, utilizando um valor de resistência (igual ou superior a 12 Ω) superior ao valor mínimo de resistência previsto no projecto. A utilização da resistência correspondente à carga máxima (5.14 Ω), permite obter um binário resistente mais elevado, mas só para baixas velocidades de rotação (inferiores a 110 rad/s). No entanto, a aplicação de um binário resistente mais elevado só será utilizável em termos dinâmicos, para provocar uma desaceleração mais rápida da turbina,

pois não proporciona, conforme se pode ver na figura, pontos de funcionamento estáveis.

Para velocidades de vento mais elevadas (por exemplo, 8 m/s), é possível encontrar um ponto de funcionamento estável utilizando um valor de resistência de carga intermédio (12 Ω), com uma velocidade de rotação inferior à velocidade máxima (200 rad/s), mas com um valor de λ superior ao valor de máximo rendimento aerodinâmico (λ_{opt}). A utilização da resistência correspondente à carga máxima (5.14 Ω), não permite encontrar pontos de funcionamento estáveis para velocidades de rotação superiores à velocidade de binário máximo excepto para valores de velocidade de rotação muito superiores aos valores máximos admissíveis.

Para velocidades de vento ainda mais elevadas não há, qualquer que seja a carga, pontos de funcionamento estáveis para velocidades de rotação compreendidas entre a velocidade correspondente ao binário máximo e a velocidade máxima, mantendo as pás na posição de projecto. A obtenção de um ponto de funcionamento estável nessa gama de velocidades de rotação só será possível reduzindo o binário motor da turbina por alteração do ângulo de pás, o que naturalmente penaliza o rendimento da extracção energética.

A utilização da resistência de carga de menor valor (5.14 Ω), se bem que interessante em termos dinâmicos para baixas velocidades de vento, é contraproducente para velocidades de vento elevadas, pois nesse caso o binário resistente é inferior ao que se obtém com valores mais elevados de resistência de carga (12 Ω).

Este facto deve-se à uma certa desadaptação entre as características do alternador e as da carga que foi escolhida. Como foi já previamente referido, tal desadaptação deve-se aos condicionalismos impostos à escolha dos componentes deste sistema.

Para ventos de velocidades moderadas (até 7 m/s) é possível obter pontos de funcionamento estáveis com um valor de λ igual ao de máximo rendimento aerodinâmico. Para velocidades de vento superiores, deixa porém de ser possível obter um ponto de funcionamento com λ_{opt} , pois o binário resistente é insuficiente.

Nessa situação, atendendo às curvas de binário do conjunto alternador/carga, é preferível deixar o sistema evoluir livremente, utilizando um valor intermédio de resistência de carga (12Ω), até ser atingido um ponto de funcionamento estável ou fazer entrar em acção o mecanismo de controlo do ângulo de pás por sobrevelocidade, pois a extracção de energia será sempre maior do que a que seria obtida utilizando a resistência mínima.

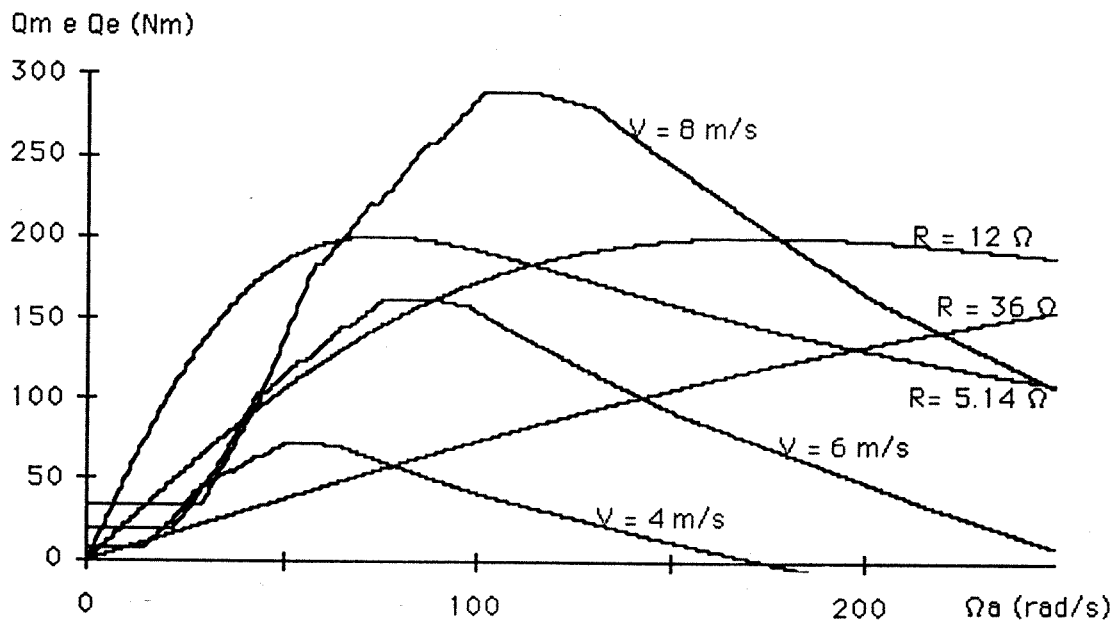


Fig. 6.1 - Curvas de binário motor da turbina e binário resistente do alternador em função da velocidade de rotação deste, para diferentes valores da velocidade de vento e da resistência de carga

Na figura 6.2, estão representadas as curvas de potência correspondentes às curvas de binário referidas. Pode ser observado que o declive das mesmas é, dentro da gama de velocidades de rotação considerada, sempre positivo.

Tal como seria lícito supôr na sequência da análise das curvas de binário, a potência eléctrica máxima é obtida para baixas velocidades de vento com a resistência de menor valor (5.14Ω). No entanto, para velocidades de rotação mais elevadas é possível extrair mais energia utilizando um valor de resistência intermédio (12Ω).

Esta primeira análise do equilíbrio de binários permite identificar as zonas de funcionamento estável em regime estacionário, e algumas restrições existentes relativamente ao funcionamento com máximo rendimento aerodinâmico.

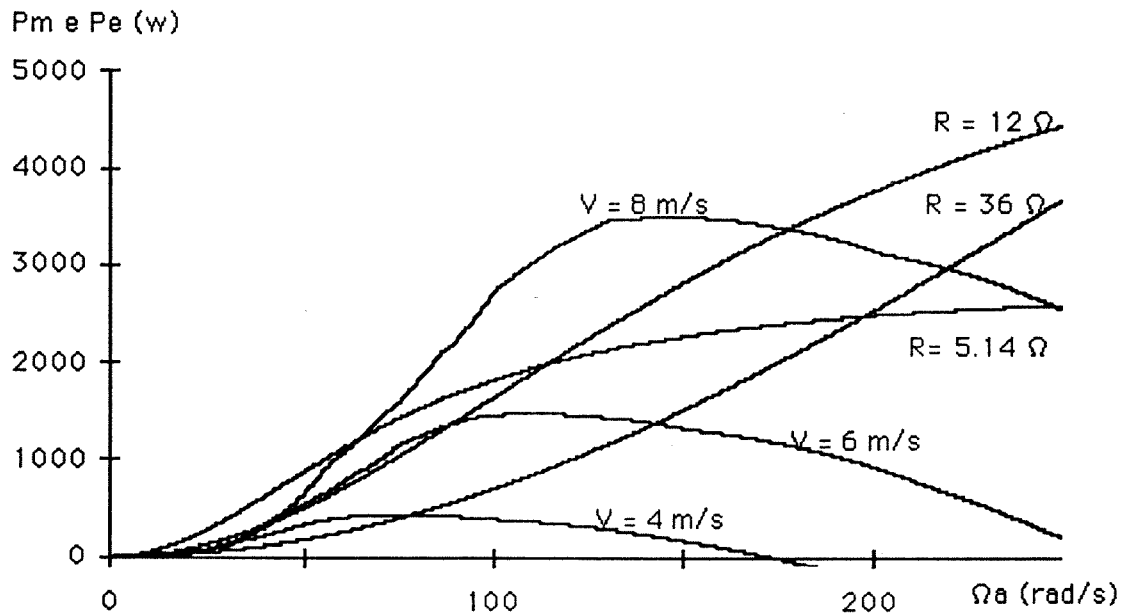


Fig. 6.2 - Curvas de potência mecânica da turbina e potência eléctrica do alternador em função da velocidade de rotação deste, para diferentes valores da velocidade de vento e da resistência de carga

6.1.2 Características estáticas

Na figura 6.3 estão representadas curvas que mostram a evolução da velocidade do vento, de λ e da potência eléctrica, quando o sistema eólico é excitado por uma entrada de vento em rampa, com um valor inicial de 3 m/s e uma aceleração de 0.12 m/s^2 , e assumindo uma velocidade de rotação inicial da turbina de 4.7 rad/s, a qual corresponde aproximadamente à situação de λ_{opt} .

Dado a variação de velocidade do vento ser lenta, as curvas obtidas representam praticamente as características estáticas do sistema.

Para velocidades de vento moderadas, i. e. inferiores a cerca de 8 m/s, o controlador de λ consegue manter a turbina numa situação de máximo rendimento aerodinâmico (λ_{opt}).

Para velocidades de vento superiores, o controlador entra em saturação, pelo que o valor de λ aumenta, afastando-se do valor óptimo e reduzindo o rendimento da turbina. Ao ser atingida a velocidade máxima tolerável para o conjunto turbina/alternador (200 rad/s), entra em funcionamento o controlador de ângulo de pás, mantendo a velocidade de rotação constante, o que leva à diminuição do valor de λ à medida que a velocidade do vento continua a aumentar.

A evolução da curva de potência eléctrica permite observar o aumento da potência extraída à medida que a velocidade de rotação aumenta, mesmo na situação em que o valor de λ se afasta do óptimo. A potência eléctrica continua a aumentar até que, para uma velocidade de vento próxima dos 9 m/s, o controlador de ângulo de pás inicia a sua actuação, embora o rendimento da turbina baixe. A partir desse ponto, dado que a velocidade de rotação se mantém constante, a potência eléctrica permanece também constante.

A evolução de duas das mais relevantes variáveis de saída do sistema, a velocidade específica λ e a potência eléctrica, ilustra claramente a acção dos controladores permitindo identificar o valor da velocidade do vento para o qual o controlador λ de satura e para o qual o controlador de ângulo de pás inicia a sua actuação.

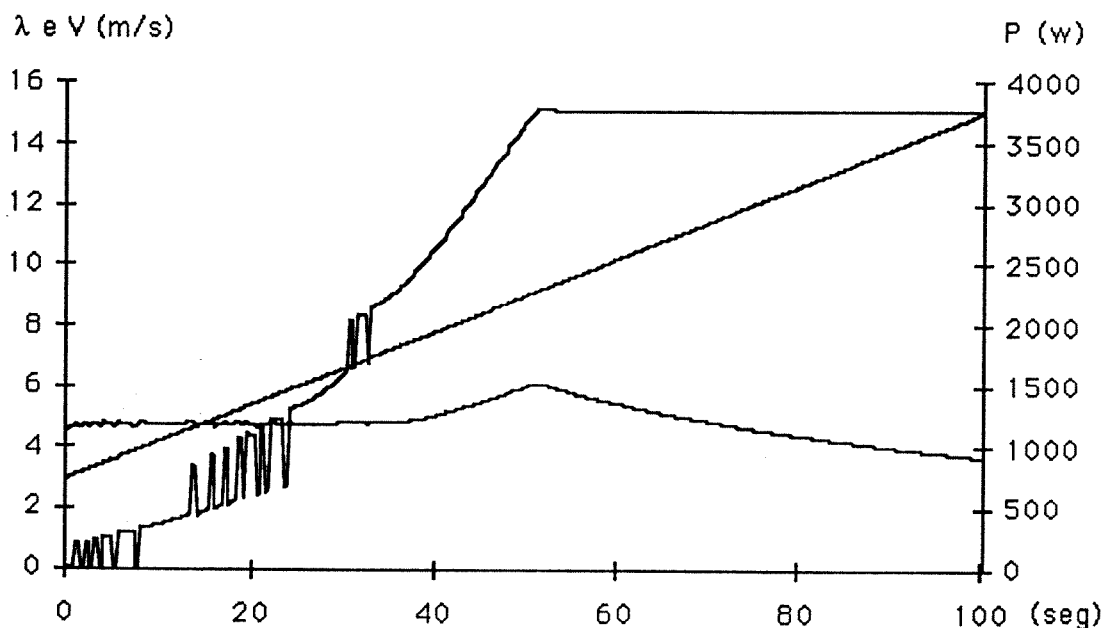


Fig. 6.3 - Determinação das características estáticas - resposta a uma entrada de vento em rampa

6.2 ARRANQUE DA TURBINA

6.2.1 Papel do controlador do ângulo de pás

Durante a fase de arranque da turbina, a actuação do controlador de ângulo de pás é essencial para que esta possa acelerar evoluindo do estado imóvel para um ponto de funcionamento estável, determinado pelo equilíbrio dos binários motor e resistente. Se o arranque fosse realizado com as pás na posição de projecto, a velocidade da turbina poderia estabilizar num ponto de binário motor praticamente nulo, pois a curva de binário da mesma apresenta uma zona de binário motor nulo para valores de λ entre 1.5 e 2, conforme se pode ver na figura 5.5.

No modelo utilizado para o controlador do ângulo de pás, a variação do ângulo de pás é feita com base numa tabela de valores que define, para cada gama de valores de λ , qual o ângulo de pás a utilizar. Na simulação efectuada, foram escolhidos três valores de ângulo de pás, de 15, 10 e 5 graus, para valores de λ

inferiores a 3.5, 3 e 2 respectivamente, considerados ilustrativos de uma situação de arranque.

Durante a fase de aceleração da turbina, dado o valor de λ ser inferior ao valor de referência do controlador de λ_{opt} , a carga aplicada ao alternador é nula, pelo que a turbina só tem que vencer os binários resistentes associados ao atrito. Esses binários foram desprezados pelo modelo utilizado na simulação.

6.2.2 Influência da velocidade do vento

Nas figuras 6.4 a 6.8, inclusivé, podem ser observadas as curvas de λ e da potência eléctrica durante a fase de arranque para ventos de 2, 4, 6, 8 e 10 m/s.

Devem ser notados, no caso ilustrado na figura 6.4, a lentidão do arranque da turbina e o baixo valor da energia extraída, mesmo na situação de máximo rendimento aerodinâmico. Esse valor de energia será numa situação real ainda bastante inferior, dado que no modelo utilizado foram desprezadas as perdas devidas ao atrito e as perdas no ferro e no cobre do alternador.

Efectivamente, para velocidades de vento inferiores a 3 m/s, é praticamente inútil ter o sistema em operação.

Pode ser verificado que, quanto maior for a velocidade do vento, maior será a aceleração da turbina e mais cedo será inserida carga no sistema. Pode igualmente ser verificado que o binário motor cresce rapidamente à medida que o valor de λ aumenta.

Embora do ponto de vista qualitativo estes sejam resultados esperados, e aparentemente sem grande impacto nas estratégias de controlo a implementar, a informação quantitativa associada (tempos de arranque, cargas possíveis, etc.) é decerto relevante em termos de exploração do sistema.

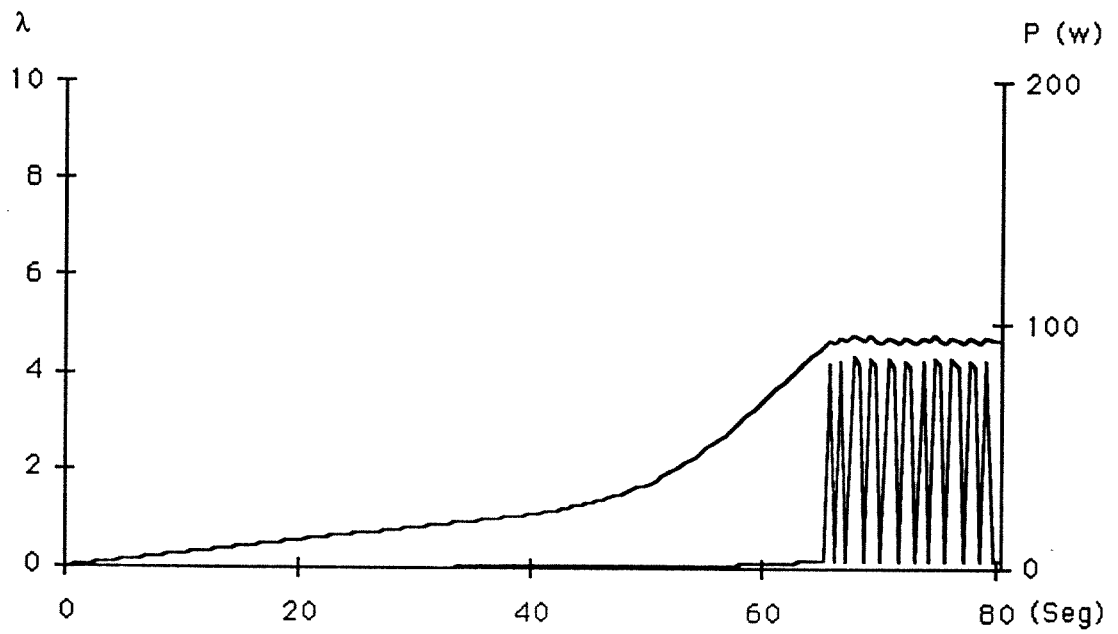


Fig. 6.4 - Arranque com vento de 2 m/s

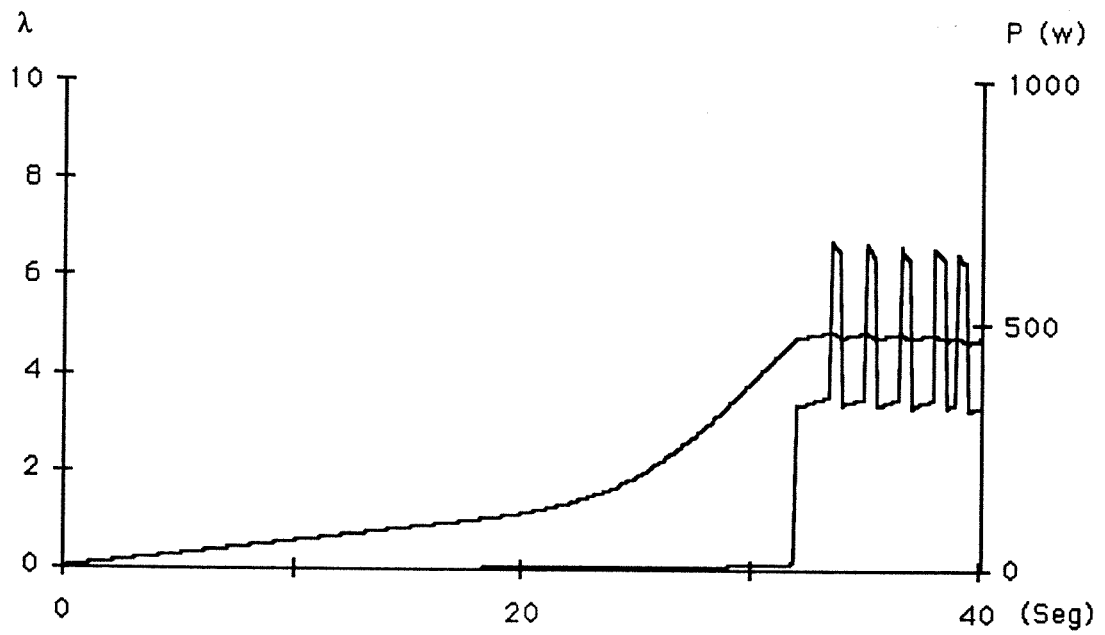
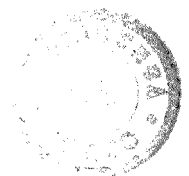


Fig. 6.5 - Arranque com vento de 4 m/s



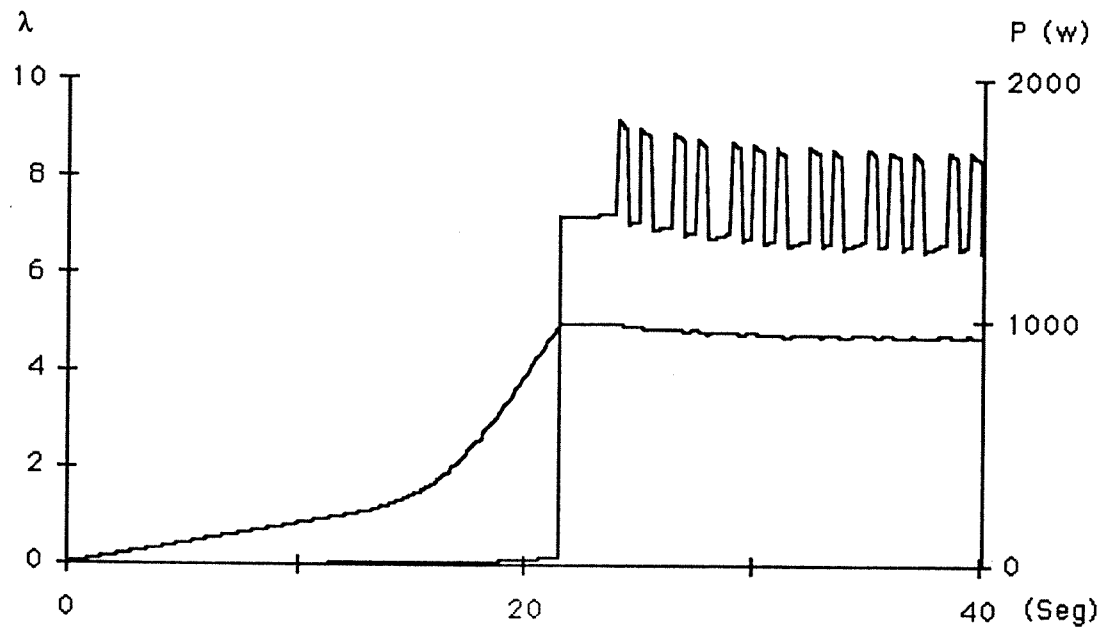


Fig. 6.6 - Arranque com vento de 6 m/s

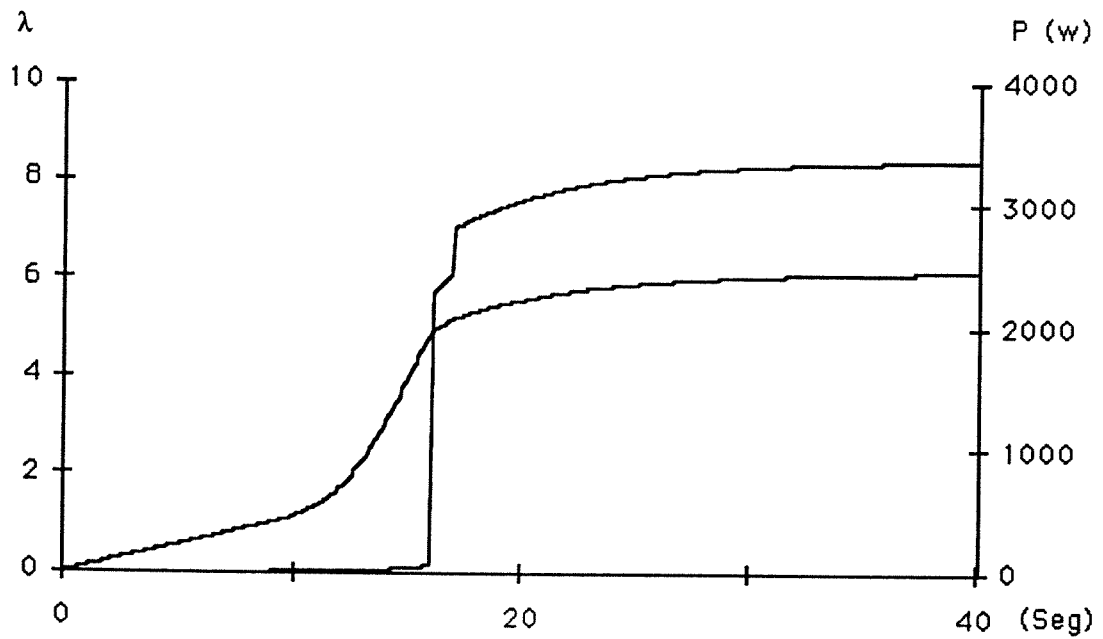


Fig. 6.7 - Arranque com vento de 8 m/s

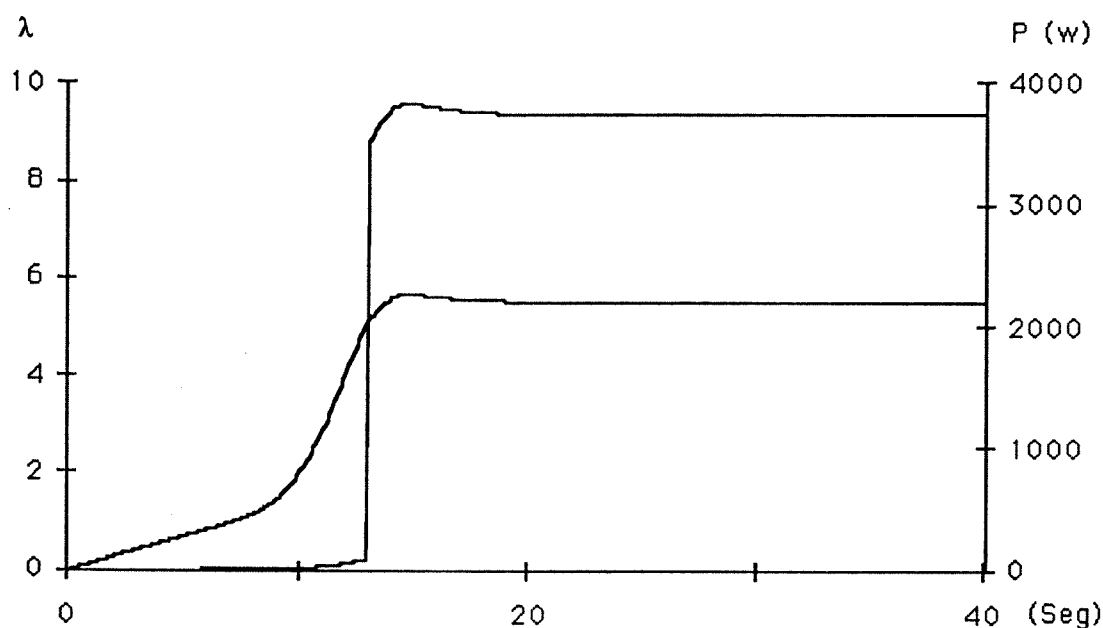


Fig. 6.8 - Arranque com vento de 10 m/s

Deve ser notado que no caso de arranque com vento de 10 m/s ilustrado através da figura 6.8, se verificam dois tipos de acções por parte do controlador de ângulo de pás. Numa primeira fase, o ângulo de pás é variado a fim de garantir valores elevados de binário durante o arranque da turbina. Essa variação verifica-se para valores de λ inferiores a 3.5 e corresponde a uma diminuição do valor do ângulo de pás à medida que λ aumenta.

No entanto, torna-se novamente necessária a variação do ângulo de pás a fim de limitar o binário motor por ser atingido um estado de sobrevelocidade. Ao ser atingida uma velocidade de rotação superior à máxima suportada pelo sistema, o valor do ângulo de pás é aumentado a fim de manter a velocidade de rotação constante e igual ao valor limite.

6.3 COMPORTAMENTO DINÂMICO EM REGIME NOMINAL

A análise que se segue tem como objectivo caracterizar o comportamento dinâmico do sistema aquando de perturbações da variável de entrada, a velocidade do vento.

6.3.1 Resposta a uma entrada em degrau positivo

Na figura 6.9 estão representadas as curvas de velocidade do vento, λ e potência eléctrica, quando o sistema é excitado por uma entrada de vento com um "degrau" de 5 para 6 m/s, assumindo uma situação estabilizada antes da perturbação. O "degrau" de entrada, que tem na realidade um tempo de subida de 0.5 segundos, é visto pelo sistema, cuja constante de tempo é superior a dez vezes este valor (ver fig. 6.13), como uma transição que ocorre num intervalo de tempo nulo.

No instante em que se verifica a alteração da velocidade do vento, o valor de λ varia inversamente dado que, devido à inércia, a velocidade da turbina segue com atraso o aumento da velocidade do vento. Devido ao aumento da velocidade do vento e à diminuição de λ , o binário motor da turbina aumenta, levando a mesma a acelerar naturalmente. Ao fim de um tempo de reacção imposto pela dinâmica do controlador de λ (neste caso cerca de 0.5 segundos), a carga do alternador é reduzida, o que leva a turbina a acelerar ainda mais. Ao ser atingido, cerca de dois segundos após a excitação, o novo ponto de funcionamento, o controlador volta a modular o binário resistente, a fim equilibrar o binário motor. De notar que a acção máxima que o controlador pode impôr é retirar toda a carga do alternador, o que faz com que a evolução do sistema seja, nesse caso, imposta exclusivamente pela inércia do mesmo.

De notar também que se o ponto de funcionamento antes da perturbação impuser já um binário resistente próximo do mínimo, a acção correctiva do controlador é muito reduzida. Isso verifica-se para velocidades de vento reduzidas, em que a carga do alternador tem um valor reduzido. Nessas situações a resposta do sistema evidencia uma constante de tempo praticamente idêntica à que o sistema teria se estivesse em malha aberta.

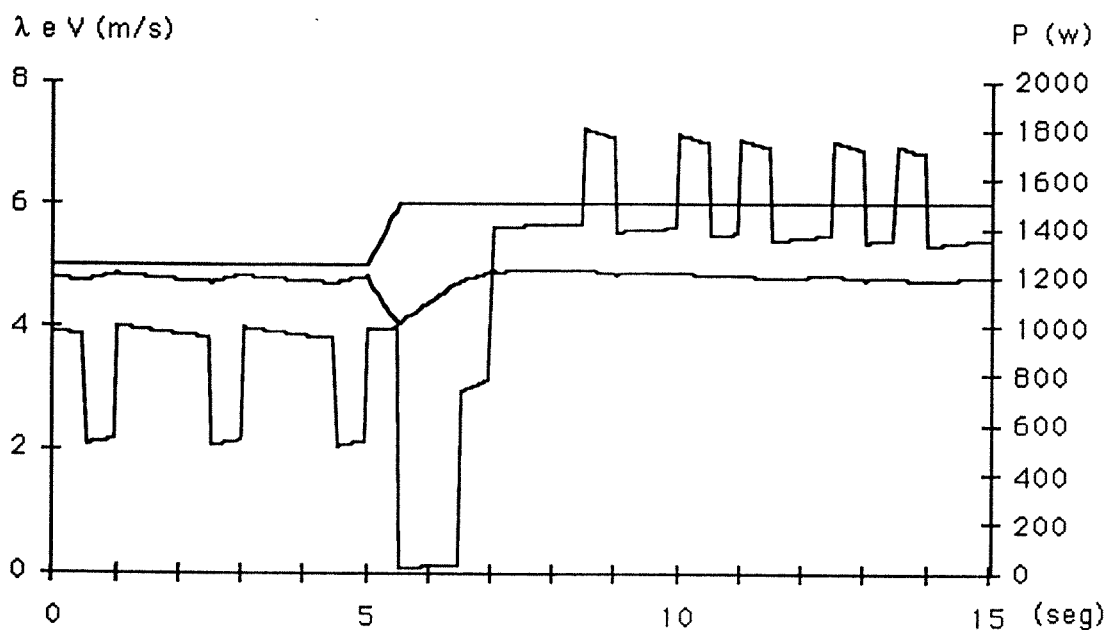


Fig. 6.9 - Degrau positivo de 5 para 6 m/s

6.3.2 Resposta a uma entrada em degrau negativo

Na figura 6.10 estão representadas as curvas de velocidade do vento, λ e potência eléctrica, quando o sistema é excitado por uma entrada de vento com um "degrau" de 5 para 4 m/s, assumindo uma situação estabilizada antes da perturbação. O "degrau" de entrada tem na realidade, e tal como no caso anterior, um tempo de descida de 0.5 segundos.

No instante em que se verifica a alteração da velocidade do vento, o valor de λ varia inversamente, pela razão inversa à que foi referida no ponto anterior. Devido à diminuição da velocidade do vento e ao aumento de λ , o binário motor da turbina diminui, levando a mesma a desacelerar naturalmente. Ao fim de um tempo de reacção imposto pela dinâmica do controlador de λ (idêntico ao da caso anterior), a carga do alternador é aumentada, o que leva a turbina a desacelerar ainda mais. Ao ser atingido o novo ponto de funcionamento, o controlador volta a modular o binário resistente, a fim equilibrar o binário motor. De notar que a acção máxima que o controlador pode impôr depende do ponto de funcionamento e da característica de binário do conjunto alternador/carga.

Se o ponto de funcionamento antes da perturbação impuser já um binário resistente próximo do máximo, a acção correctiva do controlador será muito reduzida. Isso verifica-se para velocidades de vento elevadas, em que a carga do alternador é alta. Nessas situações a resposta do sistema evidencia, tal como no caso anterior, uma constante de tempo praticamente idêntica à que o sistema teria se estivesse em malha aberta.

De observar que esse valor de constante de tempo do sistema em malha aberta seria naturalmente diferente do referido no caso anterior, dado que, estando num outro ponto de funcionamento, o sistema não linear apresenta parâmetros distintos.

Esta não linearidade explica também o facto de o "novo ponto de funcionamento" só ser atingido mais de três segundos após a perturbação, contra os cerca de dois segundos do caso anterior.

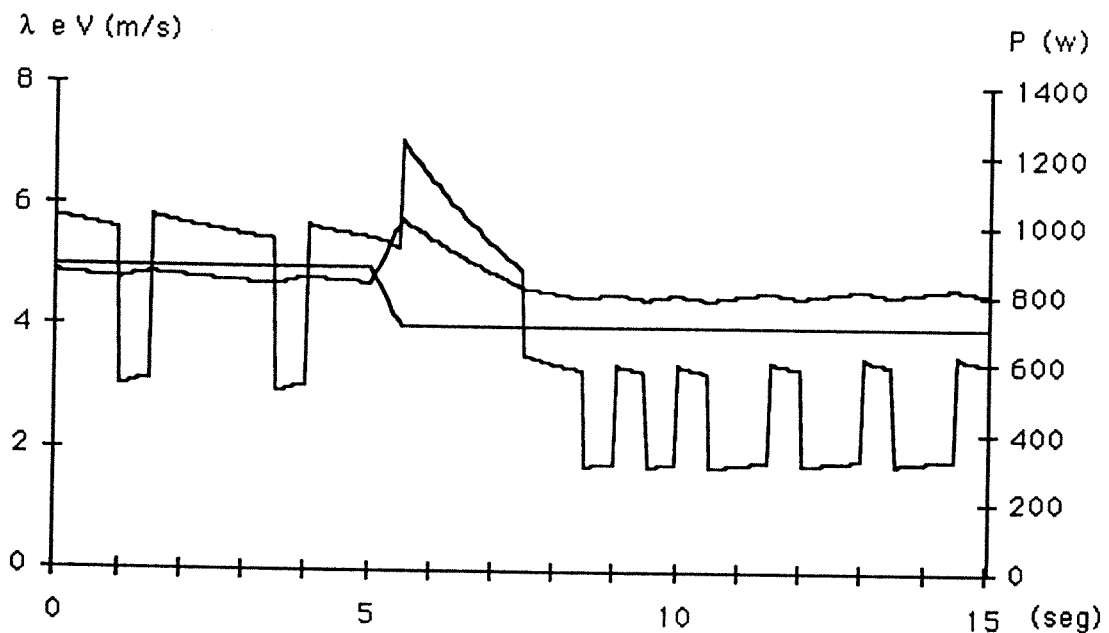


Fig. 6.10 - Degrau negativo de 5 para 4 m/s

6.3.3 Influência do ponto de funcionamento

Tal como foi referido no ponto anterior, a constante de tempo do sistema é afectada pelo ponto de funcionamento do mesmo.

Tal variação pode ser constatada nas figuras 6.11 e 6.12 que ilustram situações de entradas de vento em degrau, respectivamente positivo e negativo, com a mesma amplitude que nos dois casos anteriores (variação de 1m/s) mas partindo de situações iniciais distintas: 4 m/s para o degrau positivo e 6 m/s para o degrau negativo.

Em ambos os casos pode verificar-se que a resposta do sistema à perturbação é mais lenta.

No caso do degrau positivo, isso deve-se ao menor binário motor que advém da redução do valor da velocidade de vento, pois o binário resistente é, tal como no primeiro caso considerado (degrau de 5 para 6 m/s), integralmente retirado pela acção do controlador .

No caso do degrau negativo, a maior lentidão na resposta deve-se à incapacidade de o sistema dissipar rapidamente o excesso de energia cinética armazenada, sendo neste segundo caso essa energia maior do que no primeiro caso dado a velocidade de rotação inicial ser mais elevada (6 m/s em vez de 5 m/s).

O controlador de λ mantém, para qualquer dos casos considerados, o seu tempo de reacção sensivelmente constante.

Pode pois verificar-se que o sistema se comporta como um filtro passa-baixo com ganho e constante de tempo variáveis e dependentes do ponto de funcionamento, o que está de acordo com [3.5].

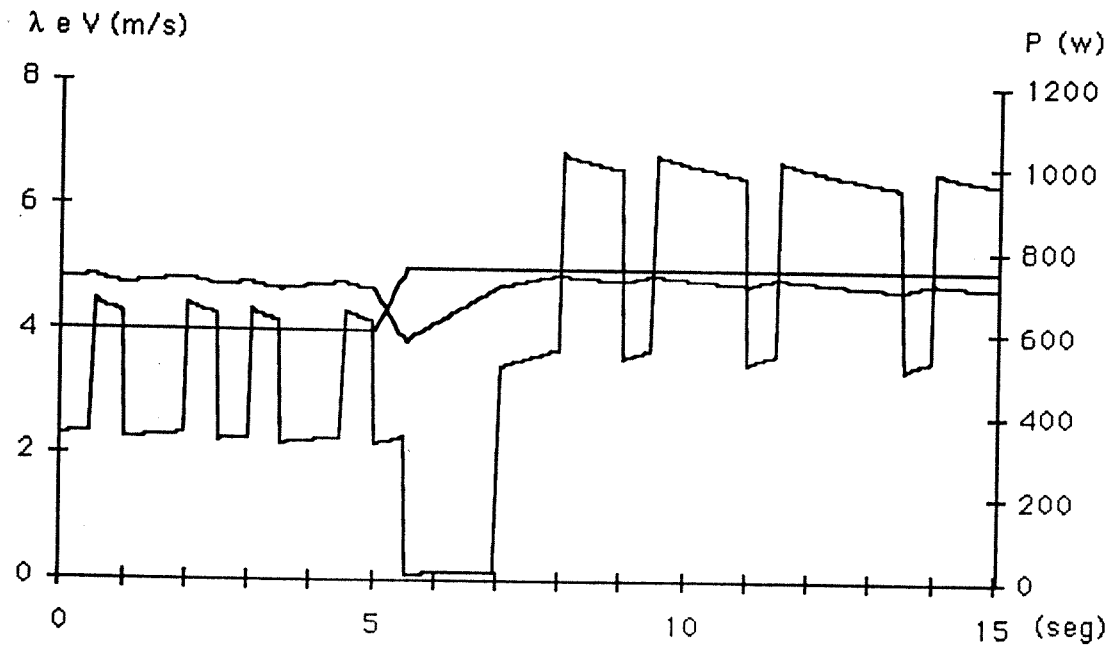


Fig. 6.11 - Degrau positivo de 4 para 5 m/s

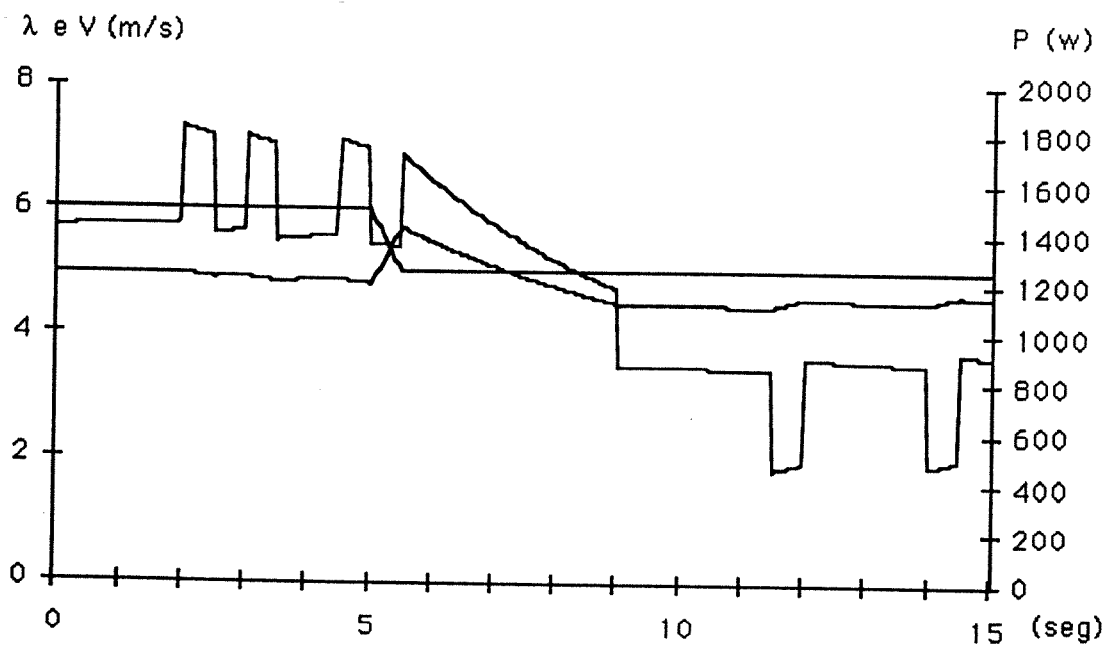


Fig. 6.12- Degrau negativo de 6 para 5 m/s

6.3.4 Resposta em malha aberta

A caracterização do comportamento dinâmico do sistema levada a cabo nos pontos anteriores, pode complementar-se com a análise qualitativa proporcionada pelo método de Ziegler-Nichols que, a partir da resposta ao degrau em malha aberta, permite obter uma função de transferência aproximada do sistema [5.2].

Na figura 6.13 está ilustrada a resposta do sistema em malha aberta, quando sujeito a uma transição em "degrau" da velocidade de vento de 5 para 6 m/s, com um tempo de subida de 0.5 seg., e a partir de uma situação estacionária.

A carga do alternador é uma resistência de 18 Ω , que impõe um valor de λ de cerca de 4,3 antes da perturbação

Pode constatar-se que o valor de λ evolui com uma constante de tempo de cerca de seis segundos (T_2).

O ganho K que liga a resposta λ à excitação V é cerca de 1,3.

Os valores de ganho e constante de tempo são no entanto dependentes, quer da velocidade de vento, antes da perturbação, quer da resistência de carga aplicada.

Pode igualmente constatar-se que o atraso T_1 , ou tempo morto, da resposta é praticamente nulo, mas tal é devido ao facto de não ser nulo o tempo de subida da perturbação imposta na velocidade de vento.

A função de transferência caracterizadora deste ponto de funcionamento seria pois dada por:

$$G(s) = \frac{K.e^{-T_1s}}{1+T_2s} = \frac{1,3}{1+6.s}$$

com T_1 praticamente nulo.

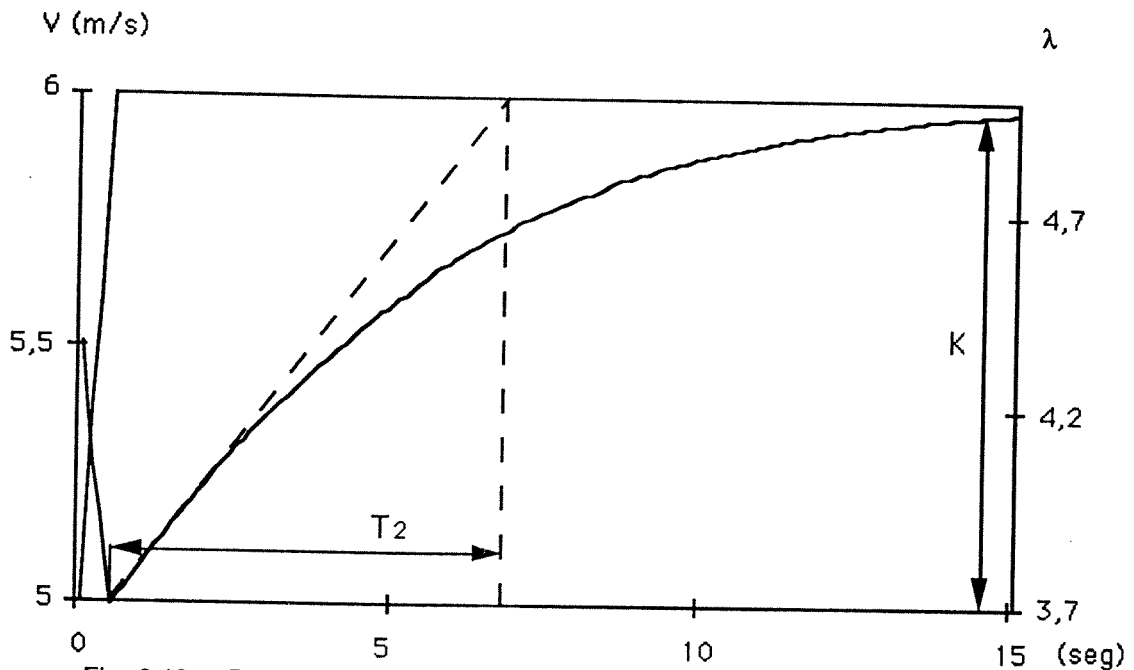


Fig. 6.13- Resposta em malha aberta a um degrau positivo de 5 para 6 m/s

6.4 COMPORTAMENTO DINÂMICO EM REGIME NOMINAL E NÃO NOMINAL

No ponto anterior foram considerados exclusivamente casos em que o sistema, dada a pequena amplitude das perturbações, não chegava a sair do denominado regime de funcionamento nominal, i. e. $\lambda = \lambda_{opt}$.

É porém do maior interesse analisar também as situações em que, na sequência da perturbação, o sistema muda de estado.

Nas figuras 6.14, 6.15 e 6.16 estão representadas as curvas de velocidade do vento, λ e potência eléctrica, quando o sistema, a partir de um estado de funcionamento nominal, é excitado por três entradas de vento em degrau com diferentes amplitudes:

- transição de 5 para 6 m/s seguida de retorno a 5 m/s,
- transição de 5 para 8 m/s seguida de retorno a 6 m/s,

- transição de 5 para 13 m/s seguida de retorno a 6 m/s.

Os tempos de subida e descida considerados foram de 0.5 segundos.

6.4.1 Regime nominal

No primeiro caso (figura 6.14), o sistema mantém-se no estado de funcionamento nominal, pois, após cada uma das transições, o controlador de λ repõe, após um período transitório de curta duração, a situação de rendimento máximo, com λ igual a λ_{opt} .

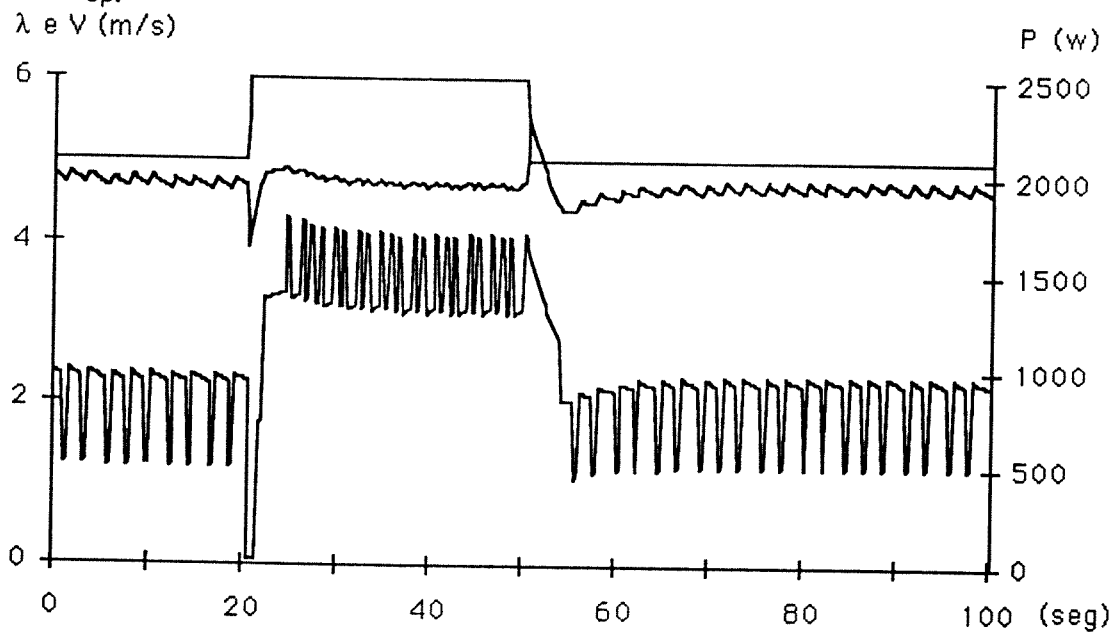


Fig. 6.14 - Permanência em regime nominal

6.4.2 Regime com λ não óptimo

No segundo caso (figura 6.15), no instante em que se verifica a transição de 5 para 8 m/s, com a conseqüente diminuição do valor de λ , o controlador retira a carga do alternador, o que faz com que a turbina acelere rapidamente. Quando o valor de λ ultrapassa o valor de referência, o controlador vai introduzindo carga progressivamente mas, dado que o binário motor ultrapassa o binário resistente máximo que o alternador pode apresentar, o controlador satura, indo a velocidade de rotação estabilizar num ponto de funcionamento estável, em que

se verifica o equilíbrio de binários, mas em que o rendimento aerodinâmico da turbina não é óptimo.

A transição de 8 para 6 m/s permite ao controlador de λ repôr a situação de máximo rendimento, embora o transitório tenha uma duração significativamente superior ao do caso anterior.

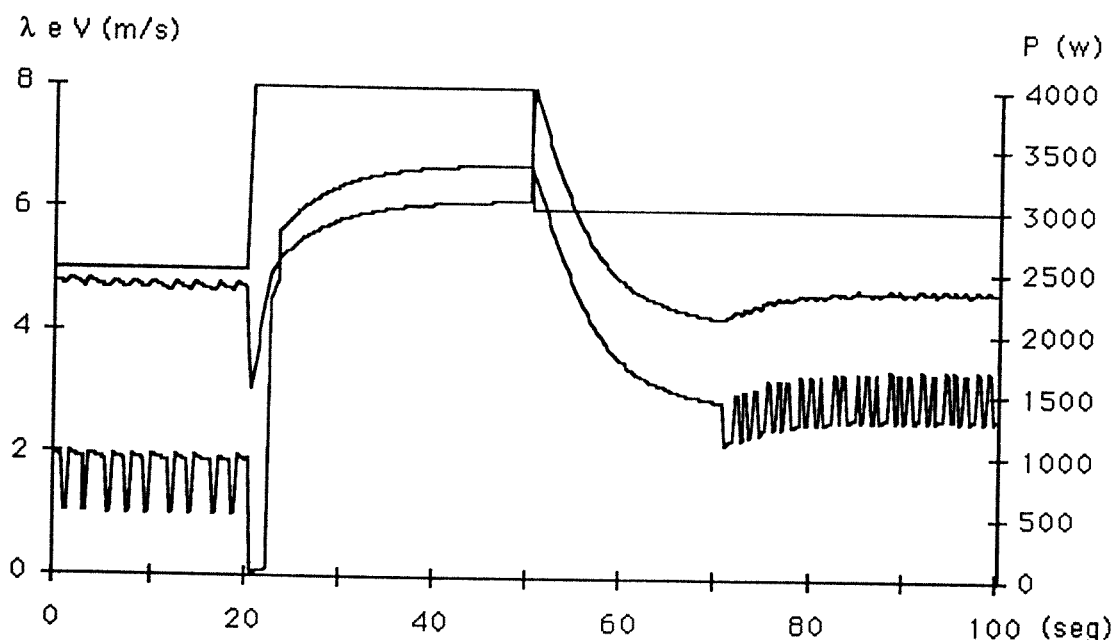


Fig. 6.15 - Transição para regime de funcionamento com λ não óptimo

6.4.3 Regime de sobrevelocidade

No terceiro caso (figura 6.16), a evolução inicial do sistema é idêntica à referida no caso anterior, mas o equilíbrio de binários, com as pás na posição de projecto, só se verificará para uma velocidade de rotação do conjunto turbina/alternador superior à velocidade máxima tolerável. Quando essa velocidade limite é ultrapassada, o controlador de ângulo de pás entra em acção, variando o ângulo de pás de forma a limitar o binário motor, pelo que o sistema estabiliza na velocidade máxima.

A transição inversa permite retomar o funcionamento com $\lambda = \lambda_{opt}$.

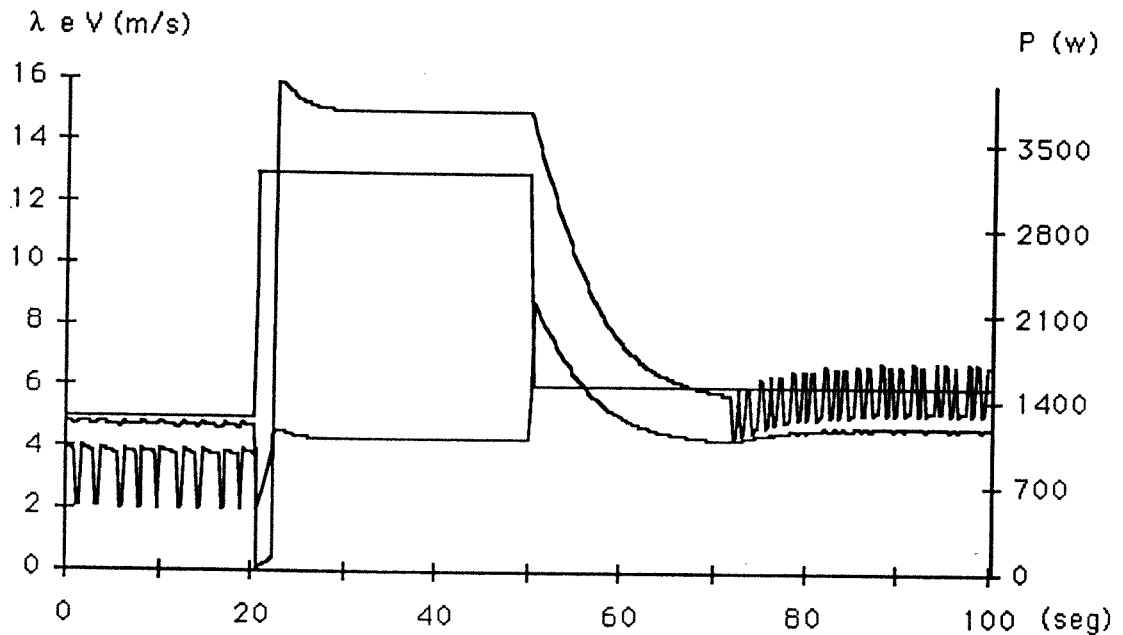


Fig. 6.16 - Transição para regime de sobrevelocidade

6.5 INFLUÊNCIA DOS PARÂMETROS DO CONTROLADOR DE VELOCIDADE

Selecionada a estrutura do controlador de λ (vêr ponto 5.3), é da maior relevância analisar a influência dos diferentes parâmetros no desempenho do sistema.

Nas figuras seguintes são apresentadas as curvas de resposta do sistema a uma variação da velocidade do vento de 4 para 6 m/s, com um tempo de subida de 0.5 segundos, para vários valores dos parâmetros do controlador de velocidade. Os parâmetros cuja variação foi analisada foram os valores do ganho proporcional e do ganho integral e o efeito da limitação do integral do erro. Passamos a analisar a influência dos mesmos.

Na figura 6.17 é apresentado um primeiro caso em que pode ser observada a reacção do sistema com um controlador proporcional integral, com limitação do integral do erro. Antes da perturbação, o controlador modula o valor da carga do alternador, fazendo a mesma variar entre dois escalões contíguos de resistência.

A cadência de comutação é limitada pelo facto de a saída do mesmo ser sujeita a um processo de amostragem ("sample and hold"). Após a transição da velocidade do vento, o controlador reage, retirando carga ao alternador, e permitindo assim uma aceleração mais rápida da turbina. À medida que o valor do erro diminui, o controlador aplica novamente carga no alternador e, passado o transitório, a carga volta a ser novamente modulada entre valores contíguos de resistência.

Verifica-se, para o conjunto de parâmetros considerados um ligeiro "overshoot", na evolução de λ durante o transitório.

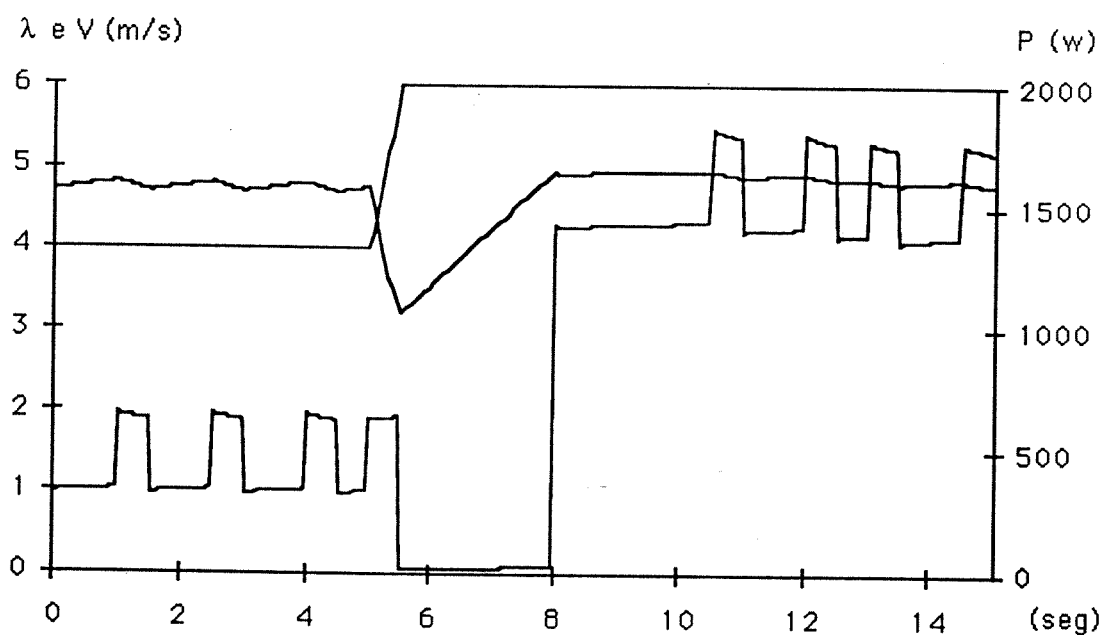


Fig. 6.17 - Controlador PI com limitação do integral do erro

O segundo caso considerado, apresentado na figura 6.18, foi o de um controlador proporcional com ganho reduzido.

Como era esperado, dada a inexistência de ganho integral, o erro em regime permanente não é nulo pelo que, mesmo antes da perturbação, o valor de velocidade específica do sistema deslizou para um valor superior ao valor de referência. Após o aumento da velocidade de vento, o controlador retira toda a carga ao alternador, o que permite que a turbina acelere rapidamente, dado o binário resistente ser nulo. No entanto, mal o valor do erro de velocidade específica diminui, o controlador volta a inserir carga, aumentando o binário resistente e diminuindo a aceleração da turbina. Atingido um novo valor de

velocidade específica superior ao valor de referência, o controlador volta a modular a carga entre escalões contíguos.

Pode ser notado que, comparativamente com o caso anterior, a aceleração da turbina é menor, dada a introdução prematura de carga, e é portanto superior a duração do período transitório, o que faz com que o sistema esteja a operar com menor rendimento aerodinâmico durante mais tempo.

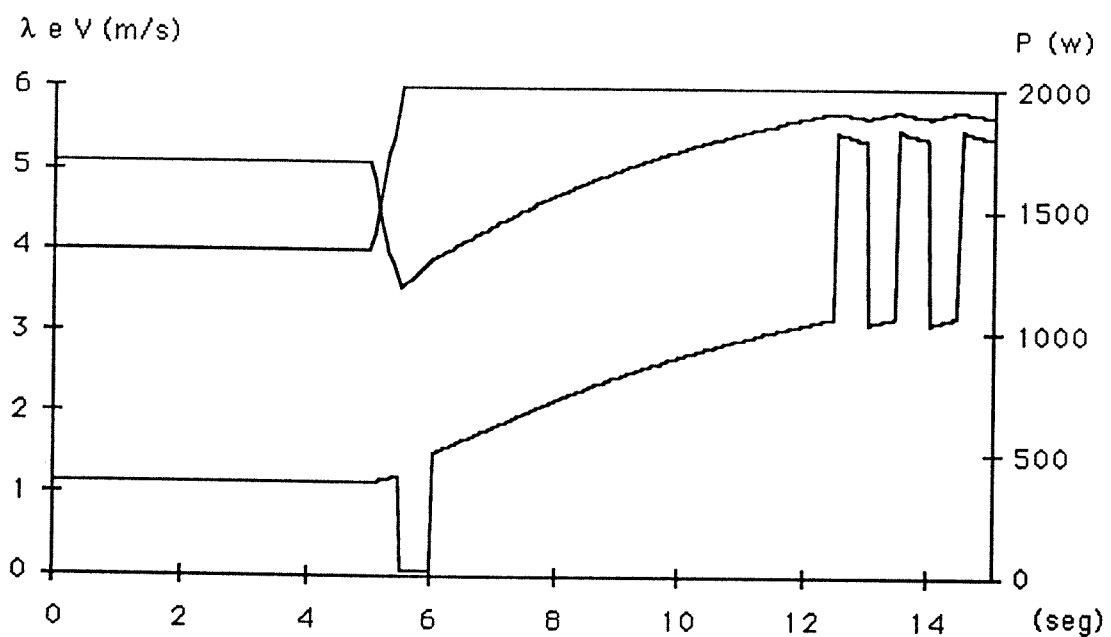


Fig. 6.18 - Controlador P com ganho proporcional baixo

O caso seguinte, ilustrado na figura 6.19, considera um controlador proporcional com ganho muito mais elevado.

Pode observar-se que o erro em regime estacionário é praticamente eliminado pelo aumento de ganho, mas o sistema torna-se oscilatório.

Embora o valor da velocidade específica antes da perturbação se situe muito mais próximo do valor de referência do que no caso anterior, verifica-se que a carga é modulada entre valores não contíguos de resistência, o que provoca variações bruscas e de intensidade apreciável no binário resistente. Tal facto pode afectar significativamente a fiabilidade do sistema, sobretudo no que diz respeito à caixa desmultiplicadora, devido aos esforços mecânicos provocados.

Essa situação poderia ser minimizada aumentando a cadência de comutação da carga, de forma a que o binário resistente fosse sentido como quasi-contínuo, mas essa cadência máxima seria sempre limitada pela rapidez de processamento do controlador e pelos atrasos, reduzidos mas não nulos, inerentes à actuação através de relés de estado sólido..

Do ponto de vista dinâmico, a reacção do sistema à perturbação aproxima-se bastante da observada no primeiro caso considerado (com um controlador proporcional integral).

A extracção energética é igualmente semelhante, pois a turbina é mantida sem binário resistente até ser atingido um valor de velocidade específica próximo do óptimo, o que minimiza o tempo em que a turbina está com um rendimento aerodinâmico baixo.

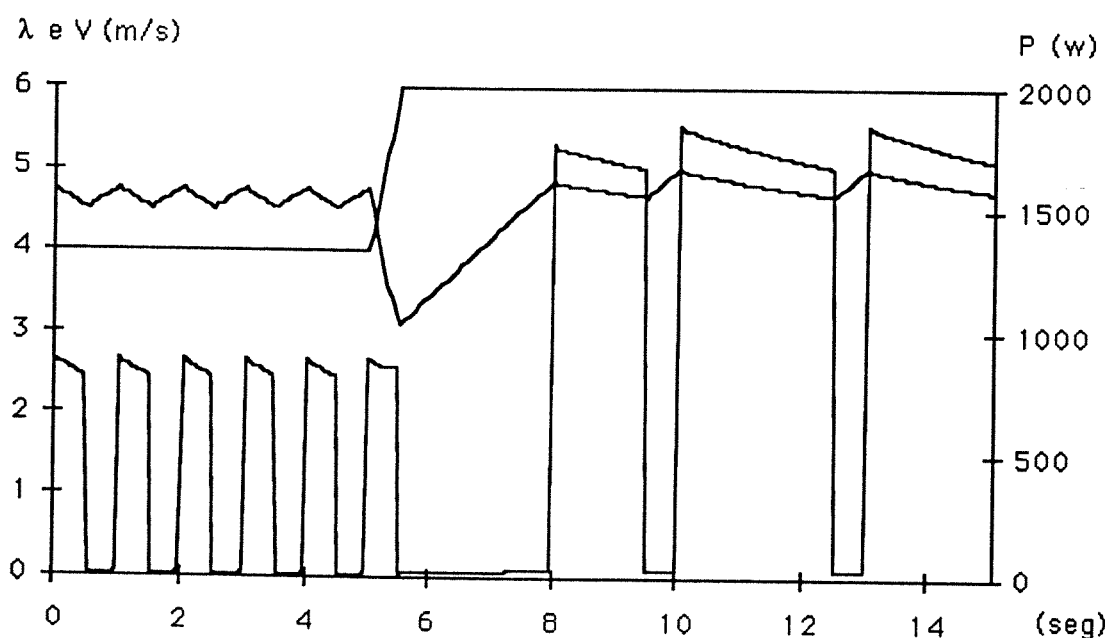


Fig. 6.19 - Controlador P com ganho proporcional elevado

Finalmente, o caso ilustrado na figura 6.20 considera um controlador proporcional integral, com ganho integral mais elevado do que o inicial, mas sem limitação do integral do erro.

Antes da perturbação o comportamento do sistema é idêntico ao do primeiro caso considerado.

No entanto, após a perturbação, dada a reduzida capacidade de actuação do controlador que retira toda a carga ao alternador, a aceleração da turbina é ainda lenta. O valor do integral do erro, acumulado durante a fase em que a velocidade específica da turbina é inferior ao valor de referência, vai provocar um "overshoot" muito mais elevado e um comportamento oscilatório amortecido.

Como pode ser observado, a duração do transitório é significativamente maior do que no primeiro caso, e a turbina mantém-se durante mais tempo a rodar com um rendimento aerodinâmico não óptimo, o que penaliza a extracção de energia.

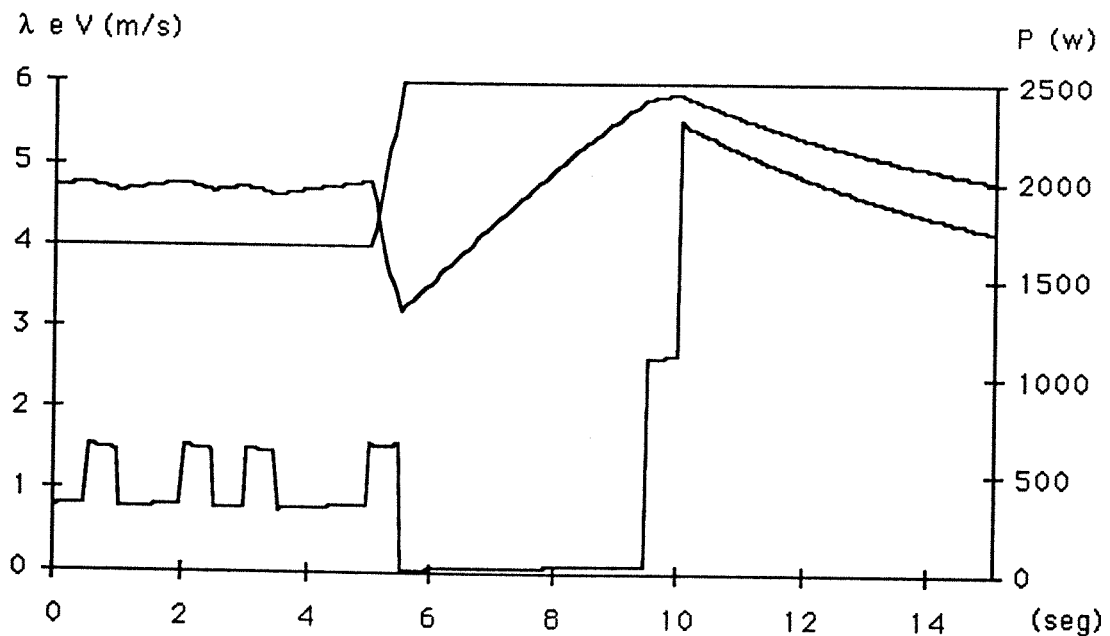


Fig. 6.20 - Controlador PI com ganho integral elevado, sem limitação do integral do erro

6.6 RESPOSTA ÀS RAJADAS

Dado a energia extraída do vento ser proporcional ao cubo da velocidade do mesmo, o conteúdo energético das rajadas pode ser significativo.

Passamos agora a analisar qual a resposta do sistema e qual a sua capacidade de extracção energética no caso da ocorrência de rajadas.

Foram simuladas várias situações distintas de ocorrência de rajadas, a partir de uma situação estabilizada com uma velocidade de vento de 4 m/s, com transições da velocidade de vento para 7 m/s seguidas de retorno a 4 m/s, com durações diversas, nomeadamente:

- rajada com uma duração de um segundo,
- rajada com uma duração de três segundos,
- rajada com uma duração de cinco segundos.

Para cada um dos casos foram considerados tempos de subida e descida da velocidade de vento de 0.5 segundo.

Deve ser notado que dadas as amplitudes de rajada consideradas, o sistema não chega a abandonar o estado de funcionamento em regime nominal.

A fim de permitir comparar a extracção energética, está igualmente representada nas figuras a curva da energia eléctrica extraída na ausência da rajada.

6.6.1 Rajada com uma duração de um segundo

Com uma rajada de tão curta duração, pode observar-se (figura 6.21) que, devido ao atraso imposto pelo controlador e à inércia do sistema, a perturbação termina antes que o controlador tenha repostado a turbina a funcionar num ponto de máximo rendimento aerodinâmico.

Durante a perturbação, o controlador retira a carga ao alternador, a fim de maximizar a aceleração da turbina, mas na realidade não chega a haver extracção de energia eléctrica durante a rajada. Toda a energia do vento extraída durante a rajada é acumulada sob a forma de energia cinética, dado o aumento de velocidade de rotação do sistema, só sendo convertida em energia eléctrica após o fim da rajada.

A energia total extraída sofre um aumento de cerca de 10% relativamente à que se obtém na ausência da rajada, embora a mesma só tenha uma duração de um segundo e o intervalo considerado para a simulação tenha sido de 40 segundos.

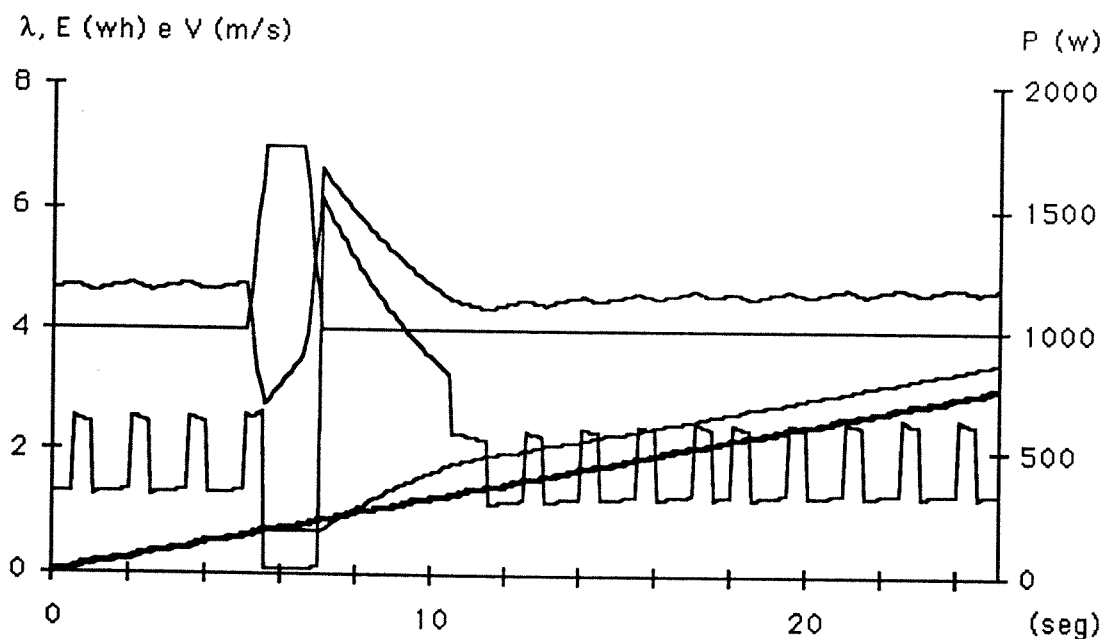


Fig. 6.21 - Rajada com um segundo de duração

6.6.2 Rajada com uma duração de três segundos

Com uma rajada com esta duração (figura 6.22), verifica-se que, antes da perturbação terminar, o sistema, devido à acção do controlador, está já novamente num ponto de funcionamento de máximo rendimento aerodinâmico.

Toda a energia associada à rajada é unicamente utilizada para aumentar a energia cinética do sistema, pois a energia extraída durante a rajada é nula. Essa energia só será efectivamente convertida em energia eléctrica, após o fim da perturbação.

A energia total extraída sofre um aumento de cerca de 50%, embora a rajada só tenha uma duração de 3 segundos e o intervalo considerado para a simulação tenha sido de 40 segundos.

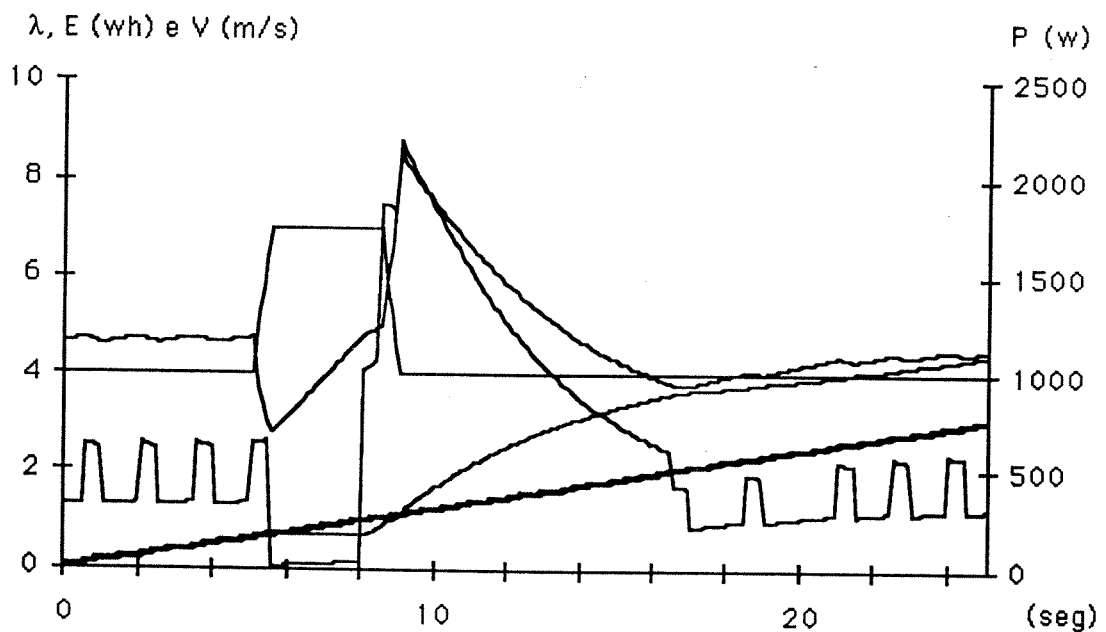


Fig. 6.22 - Rajada com três segundos de duração

6.6.3 Rajada com uma duração de cinco segundos

Neste caso, ilustrado na figura 6.23, pode observar-se que o período transitório termina bastante antes da perturbação, pelo que o sistema volta a funcionar em condições óptimas de rendimento, enquanto a rajada se mantém.

Além da energia cinética acumulada durante o período transitório em que a turbina acelera, há efectivamente extracção de energia eléctrica durante a

perturbação, dado o sistema ter atingido um estado estável, com a turbina a funcionar com rendimento aerodinâmico óptimo antes do fim da mesma.

Uma vez atingido o ponto de funcionamento de rendimento óptimo, dado que a potência total do vento varia com o cubo da velocidade do mesmo, a potência eléctrica obtida é significativamente maior do que antes da perturbação.

A energia total extraída sofre um aumento de quase 100%, embora a rajada só tenha uma duração de 5 segundos e o intervalo considerado para a simulação tenha sido de 40 segundos.

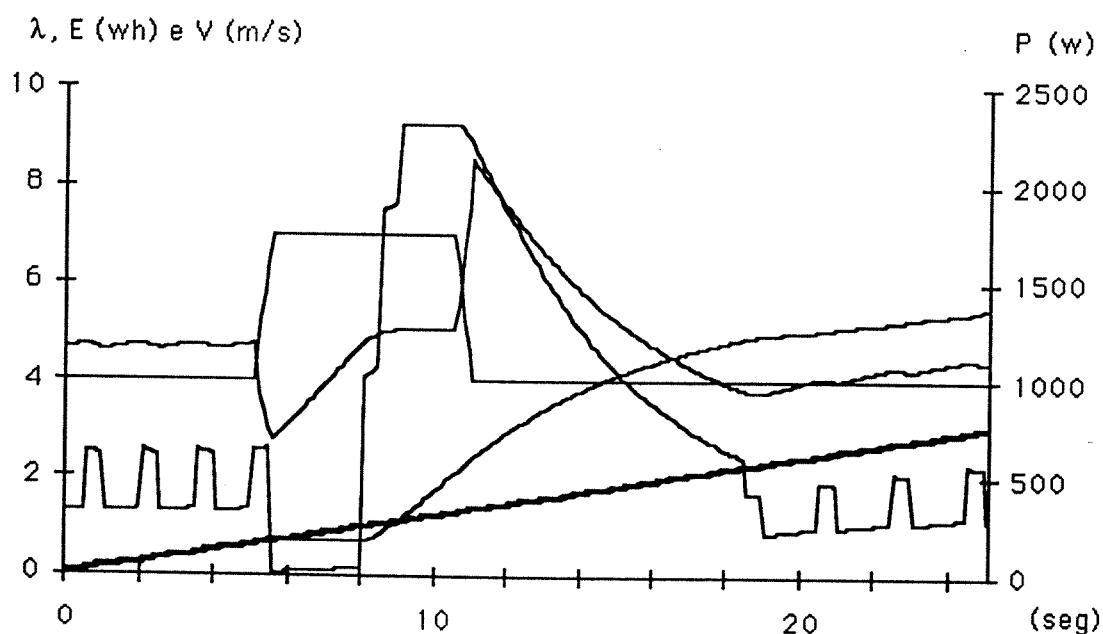


Fig. 6.23 - Rajada com cinco segundos de duração

Ficou claro que o sistema tem uma dinâmica que lhe permite, em funcionamento com velocidade variável, "seguir" rajadas mesmo de curta duração acumulando energia cinética em seguida convertida em energia eléctrica.

Ficou também demonstrada a importância, do ponto de vista energético, do aproveitamento das rajadas.

6.7 ACÇÃO SOBRE O ÂNGULO DAS PÁS PARA VALORES BAIXOS DE λ

A actuação sobre o ângulo das pás é crucial, não só na prevenção de situações de velocidade excessiva como ainda como parte da estratégia de exploração do sistema relativamente ao funcionamento com valores baixos de λ .

Nas figuras 6.24 e 6.25 estão representadas as curvas de velocidade do vento, λ e potência e energia eléctricas, quando o sistema eólico é sucessivamente excitado por uma entrada de vento com um degrau de 4 para 12 m/s seguido, 10 segundos depois, de um outro de 12 para 6 m/s, assumindo uma velocidade de rotação inicial da turbina de 6 rad/s com λ igual ao seu valor óptimo. Foram consideradas duas estratégias alternativas:

- variação do ângulo das pás para valores baixos de λ ,
- ângulo das pás constante.

Em qualquer dos casos, a rajada de vento leva o valor de λ a descer rapidamente para um valor inferior a dois dado que, devido à inércia do sistema, este não consegue seguir o aumento da velocidade de vento.

No primeiro caso considerado (figura 6.24), a acção do controlador do ângulo de pás permite que a turbina, após a rajada, tenha um binário motor apreciável, mesmo para esse reduzido valor de λ . Esse facto, conjugado com a ausência de binário resistente resultante da actuação do controlador de λ e o reduzido valor da constante de tempo da turbina no novo ponto de funcionamento, leva esta a acelerar rapidamente. Em menos de dois segundos a turbina acelera para valores de velocidade de rotação de rendimento elevado e, neste caso, leva mesmo à actuação do controlador de ângulo de pás, para limitar a velocidade de rotação.

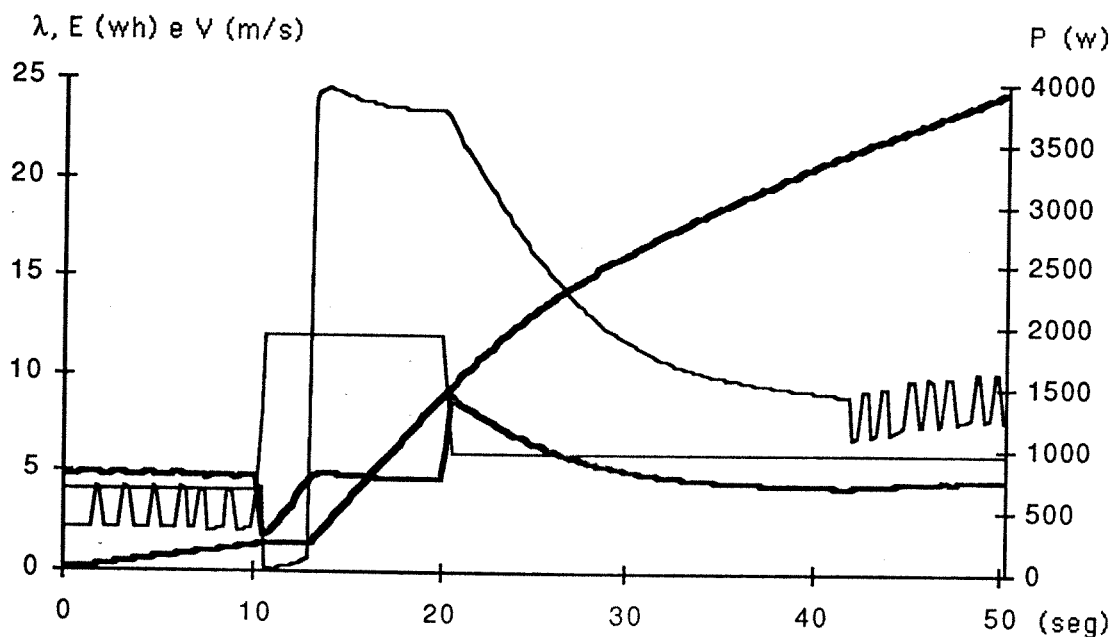


Fig. 6.24 - Resposta a rajada com ângulo de pás variável

No segundo caso (figura 6.25), não havendo intervenção sobre o ângulo de pás, a turbina fica, após a rajada, num ponto de funcionamento de muito baixo rendimento aerodinâmico, logo com binário motor reduzido mesmo com uma velocidade de vento elevada. Embora toda a carga do alternador seja retirada, reduzindo ao mínimo o binário resistente, dado o elevado valor da constante de tempo da turbina nesse ponto de funcionamento a aceleração é muito lenta, pelo que toda a energia do vento associada à rajada é perdida, apesar da duração razoável da mesma. A turbina só acelera realmente quando a velocidade do vento cai para 6 m/s, aumentando o valor de λ e colocando a turbina num ponto de funcionamento de rendimento aerodinâmico elevado.

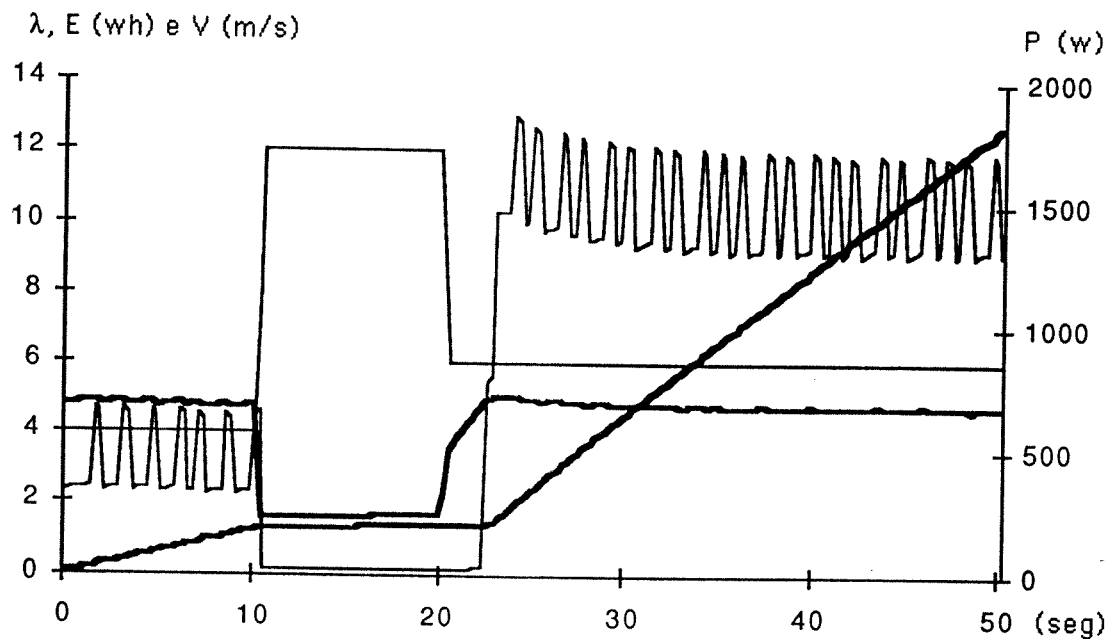


Fig. 6.25 - Resposta a rajada com ângulo de pás fixo

Como pode ser observado nas figuras, a energia obtida no primeiro caso é praticamente dupla da do segundo, para um mesmo intervalo de tempo da simulação. Tal facto deve-se quer à energia eléctrica extraída durante a rajada, quer à energia cinética acumulada devido à velocidade atingida pela turbina.

Deve ser notado que, no primeiro caso considerado, a energia eléctrica extraída durante a rajada é limitada pela actuação do controlador do ângulo de pás ao ser atingido o estado de sobrevelocidade. Caso o alternador fosse dimensionado para estas velocidades de vento, a energia extraída seria ainda maior.

A acção combinada dos dois controladores demonstrou ser um elemento crucial do ponto de vista de comportamento dinâmico do sistema face a perturbações de vento.

Efectivamente o controlador de λ , actuando sobre a carga, proporciona os binários de aceleração ou desaceleração convenientes enquanto que o controlador de ângulo de pás ajuda a colocar o sistema em pontos de funcionamento caracterizados por ganho elevado e constante de tempo o mais reduzida possível.

**CAPÍTULO 7: CONCLUSÕES E
PERSPECTIVAS DE
DESENVOLVIMENTOS
FUTUROS**

7 CONCLUSÕES E PERSPECTIVAS DE DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

A fechar apresentam-se algumas conclusões do trabalho realizado e alinham-se breves considerações sobre futuros desenvolvimentos na sequência do mesmo.

7.1 CONCLUSÕES

O trabalho realizado cumpriu os seus objectivos, pois permitiu, através das simulações efectuadas, analisar o comportamento do sistema conversor de energia eólica proposto e estudar alguns aspectos do sistema de controlo que podem condicionar fortemente o desempenho do sistema real. Adicionalmente, permitiu igualmente constatar e analisar algumas situações relacionadas com o projecto e com a exploração do sistema que passamos a descrever.

1. Adaptação alternador/turbina

Em função das características do alternador e da turbina, constata-se que há uma certa desadaptação entre os dois elementos, pois só é possível encontrar pontos de funcionamento, i.e. de equilíbrio de binários, com a turbina a rodar à velocidade de maior rendimento para ventos relativamente moderados. Para valores de velocidade de vento mais elevados, mas ainda dentro da gama suportada pelo conjunto, não é possível manter a turbina no seu ponto de funcionamento de maior rendimento (λ_{opt}), o que tem como consequência uma perda significativa de energia nessas condições.

A explicação dessa desadaptação pode encontrar-se nas restrições e problemas práticos envolvendo a especificação dos diferentes componentes do sistema. Por outro lado, é sabido que as turbinas eólicas de pequena dimensão, e sobretudo com quociente W/m^2 (potência/área varrida pelo rotor) da ordem de grandeza do desta, têm uma gama apertada de funcionamento com uma estratégia de λ_{opt} . Com efeito, para valores crescentes de velocidade de vento, os valores de velocidade de rotação da turbina necessários para manter o máximo rendimento aerodinâmico provocariam esforços centrífugos intoleráveis.

2. Características de binário e potência da turbina

Dada a característica de potência da turbina, que apresenta uma curva de coeficiente de potência em função de λ relativamente plana para valores à volta do valor de λ_{opt} , conclui-se que a extracção energética não é muito afectada pelo facto de, durante períodos transitórios, o valor da velocidade específica não ser idêntico ao valor correspondente à máxima extracção de energia, desde que se mantenha na gama de valores de λ de elevado rendimento.

3. Comportamento dinâmico

Pode concluir-se, em função dos resultados obtidos, que quer nas respostas a perturbações em degrau de pequena amplitude quer nas respostas a rajadas, o comportamento dinâmico do sistema é satisfatório. Dentro das limitações atrás referidas, no que diz respeito à gama de velocidades de vento em que o sistema se consegue manter no ponto de funcionamento pretendido, o sistema reage sem atraso significativo às perturbações a que é sujeito, não apresentando nunca comportamentos instáveis.

Pode igualmente concluir-se que o desempenho do sistema, sob o ponto de vista do comportamento dinâmico, depende dos parâmetros dos controladores, sendo obtidos resultados bastante satisfatórios com a utilização de controladores proporcionais integrais, com limitação do erro integral, quer para o controlo do ângulo de pás quer para o controlo da velocidade específica.

4. Resposta às rajadas

Dado a potência contida no vento variar com o cubo da velocidade do mesmo, é importante que o sistema aproveite convenientemente as rajadas de vento a que é sujeito. Pôde ser constatado que, mesmo para rajadas de vento de curta duração, o sistema reage suficientemente depressa para voltar a um ponto de funcionamento em que a turbina tenha um bom rendimento aerodinâmico, possibilitando assim, quer a acumulação de energia durante a rajada, sob a forma de energia cinética, devido ao aumento de velocidade de rotação da turbina, quer a extracção efectiva de energia eléctrica durante a rajada.

5. Actuação sobre o ângulo de pás

A necessidade de actuação sobre o ângulo de pás, a fim de garantir binários de arranque razoáveis e limitar o binário motor em situações de velocidades de vento elevadas, é por demais conhecida.

Concluiu-se no entanto, que a actuação sobre o ângulo das pás não deve limitar-se a esses casos específicos, pois tem igualmente um papel relevante no comportamento dinâmico do sistema, nomeadamente na resposta do mesmo a rajadas. Deve igualmente ser notada a interacção entre o controlador de velocidade específica e o controlador de ângulo de pás.

6. Dimensionamento de um sistema conversor de energia eólica

O tipo de sistema conversor de energia eólica e a metodologia de controlo utilizada na sua exploração condicionam o dimensionamento de alguns dos seus componentes, nomeadamente o do alternador.

Um sistema de frequência fixa, em que a turbina roda sempre à mesma velocidade, não consegue manter sempre a turbina no ponto de funcionamento de maior rendimento aerodinâmico, pois essa situação só é obtida para um valor da velocidade de vento. Tipicamente, a turbina é projectada para ter o rendimento máximo para determinados valores de velocidade de vento, que se pretende tenham uma frequência de ocorrência máxima, a fim de garantir uma boa extracção de energia nesses casos. Para velocidades de vento superiores a esses valores "de projecto", a turbina estará portanto com um rendimento aerodinâmico menor, e consequentemente, a potência utilizável, embora aumentando devido à maior velocidade do vento, ficará aquém do máximo possível.

Num sistema de frequência variável, pelo contrário, a turbina estará normalmente a funcionar com o máximo rendimento aerodinâmico, pelo que a potência utilizável varia, em cada instante, com o cubo da velocidade do vento. A fim de poder extrair o máximo de energia, é necessário que o alternador seja dimensionado para os valores de potência que se obtêm com velocidades de

vento elevadas, e não para os valores correspondentes aos ventos médios do local.

O dimensionamento do alternador para essas situações tem o inconveniente de provocar um agravamento do custo do sistema. Numa aplicação real de um sistema deste tipo será necessário fazer um estudo económico para determinar quais as características do alternador a utilizar.

7. Dimensionamento da carga resistiva

O dimensionamento da carga resistiva aplicada ao alternador, não está particularmente adaptado às características do mesmo. Constata-se que das várias resistências que se podem obter por combinação em paralelo das resistências elementares, só algumas são realmente eficazes. As outras combinações, ao contrário do que seria esperado, levam à redução do rendimento energético do sistema.

7.2 SUGESTÕES PARA TRABALHO FUTURO

Como foi por várias vezes referido, o modelo utilizado foi sujeito a algumas simplificações, essencialmente impostas pelo pacote de software utilizado nas simulações.

A obtenção de um modelo mais completo do sistema poderia permitir obter resultados de simulação mais próximos dos do sistema real.

Embora o desempenho do sistema utilizando controladores PID se tenha mostrado bastante satisfatório, poderiam ser utilizadas outros algoritmos de controlo (deadbeat, Kalman, etc.).

Uma análise comparativa dos vários tipos de algoritmos com o mesmo modelo poderia eventualmente trazer resultados interessantes.

Como foi várias vezes referido, verifica-se uma certa desadaptação entre a turbina e o alternador. A análise dos critérios de selecção das características do alternador a utilizar pode igualmente ser relevante.

Além da desadaptação turbina/alternador, verificou-se também que a carga resistiva aplicada ao mesmo não era a óptima.

A execução de novas simulações com uma carga redimensionada, ou mesmo com uma carga de outro tipo (carga DC) poderiam também revelar aspectos relevantes quer no que diz respeito ao dimensionamento da carga quer quanto ao tipo da mesma.

REFERÊNCIAS

REFERÊNCIAS

- [I.1] Brederode, V.
Aproveitamento de energia eólica
Seminário Avançado Tecnologias das Fontes de Energia Eléctrica
Descentralizadas
- [I.2] Almeida, A. T. (1978)
A integração da energia eólica no sistema electro-produtor português
Congresso da Ordem dos Engenheiros, Novembro 22-29, Porto
- [I.3] Almeida, A. T. , Teles, M. I. (1980)
O uso conjunto das energia seólicas e solar-voltaica para o
abastecimento de energia eléctrica a povoações isoladas
Congresso da Ordem dos Engenheiros, Março 23-29, Coimbra
- [I.4] Mendonça, J. M., Pinho, F., Restivo, A. (1988)
Desenvolvimento de uma interface electromecânica para regulação de
pano de turbinas eólicas de eixo horizontal.
4º Congresso Ibérico e 2º Congresso Ibero Americano de Energia Solar
Porto
- [I.5] Rodrigues, A. H., Pinho, F. T., Restivo, A. (1988)
Wind Tunnel testing of low Reynolds number airfoils for wind turbine
blades
1988 European Wind Energy Conference and Exhibition, Herning
(Dinamarca)
- [I.6] Rodrigues, A. H., Restivo, A. (1989)
Computer Controlled Test Bench for Axial Turbines and Propellers (1989)
13th International Congress on Aerospace Simulation Facilities
Göttingen (RFA)
- [I.7] Rodrigues A. H., Restivo A. (1989)
Wind Tunnel Study of the Conversion Efficiency of a Wind Turbine

1989 European Wind Energy Conference and Exhibition, Glasgow
(Reino Unido)

- [1.1] Gipe, Paul B. (1985)
An overview of the US wind industry.
Wind energy conversion 1985, Proceedings of the Seventh BWEA wind energy conference, Março 27-29, Oxford (Reino Unido)

- [1.2] Madsen, B. T. (1985)
The industrial development of windpower industry in Denmark
Wind energy conversion 1985, Proceedings of the Seventh BWEA wind energy conference, Março 27-29, Oxford (Reino Unido)

- [1.3] Sherwin, R. W. (1989)
United Nations International Workshop on Wind Energy , Agosto, Roskilde (Dinamarca)

- [1.4] Madsen, B. T. (1989)
The development of the Danish windpower industry 1980-88
United Nations International Workshop on Wind Energy , Agosto, Roskilde (Dinamarca)

- [1.5] Freris, L. L. (1990)
Principles of Wind Energy Conversion Systems
Prentice Hall

- [1.6] Engstrom, S (1985)
The wind programme in Sweden
Wind energy conversion 1985, Proceedings of the Seventh BWEA wind energy conference, Março 27-29, Oxford (Reino Unido)

- [1.7] (1989)
Catalogue of danish wind turbines
Sun Media

- [1.8] Chappell, M. S., Templin, R. J. (1985)
‘And the cold wind shall blow...’
Wind energy research and development in Canada - Spring 1985
Wind energy conversion 1985, Proceedings of the Seventh BWEA wind energy conference, Março 27-29, Oxford (Reino Unido)
- [1.9] (1989)
Proceedings of the United nations international workshop on wind energy ,
Agosto, Roskilde (Dinamarca)
- [2.1] Mendonça, J. M. A. B. (1986)
Microcomputer on-line control of wind energy conversion systems
PhD Thesis, University of London (Reino Unido)
- [2.2] Leithead, W. E., Wilkie, J., Anderson, C. G.
Simulation of wind turbines by simple models
- [2.3] Swansborough, R. H., Ballard, L. J. (1981)
Rotational dynamics of wind turbine generators
IEE, 3rd. Int. Conference on Future Energy Concepts
- [2.4] Johnson, C. C. , Smith, R. T. (1976)
Dynamics of wind generators on electric utility networks
IEEE Trans. Aerospace and Electronic Systems, Julho
- [2.5] Watson, R. (1988)
The development of a control system for a fixed pitch wind turbine
operating in stand alone mode
European Community Wind Conference, Junho, Herning (Dinamarca)
- [2.6] Bolton, H. R., Nicodemou, V. C. (1979)
Permanent magnet alternators for small wind systems
1st BWEA workshop, Abril

- [3.1] Cooper, B. J., Law, H. (1987)
A review of control system options for W. E. C. S.
6th. BWEA Workshop, Reading (Reino Unido)
- [3.2] Buehring, I. K., Freris, L. L. (1980)
Some aspects of small aerogenerator design and testing
3rd International Symposium on Wind Energy Systems, Agosto 26-29
- [3.3] Casanova, Alacalde V. H., Freris, L. L. (1982)
Control policies for maximizing energy extraction from wind turbines
4th. International Symposium on Energy Systems, Setembro 21-24
- [3.4] Casanova, Alacalde V. H., Freris, L. L. (1984)
Dynamics and control of wind energy conversion systems
5º Congresso Brasileiro de Automática, Campina Grande (Brasil)
- [3.5] Buehring, I. K. , Freris, L. L. (1981)
Control Policies for Wind Energy Conversion Systems
IEEE PROC., Vol 1228, Pt C, No. 5, Setembro
- [3.6] Herapath, R. G., Shi, F. K. C. (1981)
Dynamics and Control of an Experimental 5m Diameter Variable Pitch
Wind Powered Generator
- [4.1] Contrato de Desenvolvimento Industrial nº CDI-U-040/85.
Relatório Final, FEUP, Maio de 1990
- [4.2] Silva, A. M. (1990)
Particularidades do Tratamento Analítico-experimental de Máquinas
Síncronas de Ímanes Permanentes
Caderno de estudos de máquinas eléctricas, nº 2, FEUP, Novembro
- [4.3] TUTSIM for IBM's PC
Meerman Automatisering

- [5.1] Jansen, W. A. M., Smulders, P. T. (1977)
Rotor Design for Horizontal Axis Windmills
SWD 77-1, Maio (Holanda)

- [5.2] Leigh, J. R. (1985)
Applied Digital Control
Prentice Hall

ANEXO

DIAGRAMA DE BLOCOS DETALHADO DO MODELO

