

## PROJECTO NATO SFS PO-MISTRAL: ESTADO ACTUAL DE DESENVOLVIMENTO

Rui M.G. Castro <sup>1)</sup>

Ana I.L. Estanqueiro <sup>2)</sup>

Jorge A.G. Saraiva <sup>3)</sup>

Luís Gomes <sup>4a)</sup>, Luís Oliveira <sup>4b)</sup>

J.M. Ferreira de Jesus <sup>2)</sup>

<sup>1)</sup> IST & INTERG - Instituto Superior Técnico & Instituto da Energia

Av. Rovisco Pais, 1096 Lisboa Codex, Portugal

Tel: 351-1-8408257, Fax: 351-1-8417421, e-mail: d2375@hertz.ist.utl.pt

<sup>2)</sup> INETI / ITE - Instituto Nacional de Engenharia e Tecnologia Industrial / Instituto das Tecnologias Energéticas

Azinhaga dos Lameiros Estrada do Paço do Lumiar, 1699 Lisboa Codex, Portugal

<sup>3)</sup> LNEC - Laboratório Nacional de Engenharia Civil

Av do Brasil, 101, 1799 Lisboa Codex, Portugal

<sup>4a)</sup> EDA / DRED - Electricidade dos Açores / Departamento de Estudos e Desenvolvimento

Rua Eng. José Cordeiro, 6, 9500 Ponta Delgada, Açores, Portugal

<sup>4b)</sup> EDA / São Jorge - Electricidade dos Açores / São Jorge

Caminho Novo, Urzelina, 9820 Velas, São Jorge, Açores, Portugal

### Resumo

O acentuado desenvolvimento tecnológico verificado nos conversores eólicos, a par de uma razoável descida nos custos associados, tem vindo a afirmar a energia eólica como uma importante forma alternativa e não poluente de produzir energia eléctrica. A expansão verificada tem-se efectuado sem sobressaltos quando se trata da integração das unidades numa grande rede interligada e forte; contudo, o mesmo não é válido no contexto de uma rede isolada ou de um local caracterizado por uma baixa potência de curto-circuito, onde o carácter intermitente do vento pode dificultar a penetração da energia eólica no conjunto da produção eléctrica. Neste artigo, descreve-se o estado actual de desenvolvimento do Projecto NATO Sfs Po-MISTRAL, desenhado para dar uma contribuição positiva na resolução dos problemas ainda em aberto relacionados com a integração dos parques eólicos na rede eléctrica. Após uma descrição sumária das principais realizações conseguidas em cada uma das tarefas que compõem o projecto, particular realce é dado tarefa de validação experimental dos modelos desenvolvidos, apresentando-se os primeiros resultados recolhidos na campanha de medidas actualmente a decorrer no parque eólico de São Jorge, nos Açores.

### Introdução

A maior parte dos países da União Europeia estabeleceu objectivos ambiciosos para a instalação de Sistemas de Conversão de Energia Eólica (SCEE) até ao ano 2000. Pode afirmar-se que, até ao momento, a taxa de execução global desses objectivos é superior ao previsto. Na penúltima Conferência de Energia Eólica da União Europeia, realizada em 1994 em Salónica, Grécia, apontava-se para um número de cerca de 2 000 MW instalados até 1996, mas os dados publicados na última Conferência (*1996 European Union Wind Energy Conference*) realizada em Goteborg, Suécia, em Maio passado indicam que, no final de 1995, esse número já ultrapassava os 2 500 MW. A Tabela I mostra a potência eólica instalada na Europa, por país, no final de 1995.

Tabela I: Potência eólica instalada na Europa no final de 1995.

País	MW	País	MW
Alemanha	1 136	Portugal	9
Dinamarca	592	Irlanda	7
Holanda	250	Bélgica	7
Reino Unido	200	Finlândia	4
Espanha	141	Noruega	4
Suécia	67	França	4
Grécia	41	Rep. Checa	7
Itália	25	Outros	10
<b>TOTAL</b>		<b>2 504 MW</b>	

Estes valores indicam que nos últimos dois anos a capacidade eólica instalada na Europa aumentou 160%; a continuar esta evolução, a meta de 4 000 MW instalados no ano 2000 estabelecida em 1991 pela Associação Europeia de Energia Eólica (*European Wind Energy Association*) será largamente ultrapassada.

Os progressos verificados ao nível da penetração da energia eólica na produção de energia eléctrica, que actualmente na Europa já é capaz de satisfazer os consumos domésticos de mais de 4 milhões de pessoas, tiveram implicações importantes ao nível técnico, económico e até social. De entre estes merecem particular realce as seguintes realizações:

- Aperfeiçoamento das turbinas eólicas com potências unitárias da ordem do megawatt, já em fase pré-comercial.
- Redução nos custos associados, que em termos médios se situam actualmente em 180 contos / kW e em 11 escudos / kWh.
- Aumento do investimento em energia eólica por parte dos bancos e das empresas de energia eléctrica.
- Criação de mais de 20 000 empregos em actividades relacionadas com a energia eólica.

Cenários recentes avançados pela Comissão das Comunidades Europeias apontam para um aumento persistente da penetração da energia eólica na produção de electricidade nos próximos anos, como forma de diversificar o aprovisionamento energético em face da previsível escassez do gás natural e do petróleo, e dos problemas ambientais associados ao carvão.

É um conhecimento adquirido que a energia eólica possui especificidades que a distinguem singularmente das restantes formas de energia. Na verdade, embora os conversores eólicos sejam capazes de garantir o fornecimento de energia numa base anual, não são capazes de o fazer numa base diária, o que significa que a energia eólica é não-despachável pelos centros de controlo da rede. Acresce que a energia eólica tem um carácter intermitente o que pode ter um impacto não desprezável na qualidade da energia, especialmente nos casos em que a penetração eólica é significativa: e mesmo que a penetração global seja modesta, há que estudar as implicações a nível local, dado que os SCEE estão normalmente ligados ao sistema de distribuição e não ao sistema de transmissão de energia eléctrica.

A experiência de operação já existente tem mostrado que a integração dos SCEE no Sistema de Energia Eléctrica (SEE) se tem realizado de uma forma geralmente pacífica. Mesmo considerando que a potência eólica flutua num espectro amplo de frequências, não são de esperar dificuldades especiais na integração de conversores eólicos dispersos e de pequena potência quando comparada com a potência de curto-circuito de uma grande rede interligada, e elas não se têm, efectivamente, verificado. A situação muda radicalmente de figura quando se trata de redes isoladas e fracas, como é o caso das ilhas, ou, no caso das redes fortes, de locais remotos onde a potência de curto-circuito é baixa. A integração de SCEE nestes locais tem de ser feita cuidadosamente, por

forma a não afectar a qualidade da energia fornecida aos consumidores pelas empresas concessionárias da distribuição.

As características da energia eólica são geralmente pouco apreciadas pelas empresas de energia eléctrica que receiam o impacto negativo que os conversores podem ter, tanto no despacho das centrais convencionais, como na qualidade da energia fornecida aos consumidores. Alguns autores estimam que as empresas de energia eléctrica têm flexibilidade para absorver até 20% de energia de origem eólica. Este número é normalmente citado apenas no contexto de uma grande rede interligada, porque falta experiência que permita definir a flexibilidade no contexto de sistemas isolados. Em face da falta de ferramentas adequadas capazes de estudar devidamente o impacto dos parques eólicos no SEE isolado pré-existente, as empresas de energia eléctrica têm, naturalmente, uma atitude muito reservada em relação à ligação de parques eólicos nas suas redes.

Por outro lado, mas pela mesma razão, os produtores independentes vêm-se confrontados com a impossibilidade de demonstrar que os seus parques eólicos podem ter condições de se ligarem à rede sem perturbar inaceitavelmente o seu funcionamento. Acresce que, devido à falta de instrumentos de análise adequados, os produtores independentes e as empresas de energia eléctrica têm um conhecimento insuficiente do funcionamento interno do parque, nomeadamente, no que diz respeito às oscilações transitórias entre as turbinas eólicas, motivadas pela incidência de condições de vento distintas em cada um dos conversores eólicos que compõem o parque.

Pode, então, concluir-se que, por exemplo, no caso das ilhas, o aproveitamento de um recurso energético renovável e habitualmente abundante, o vento, pode ficar comprometido devido ao impacto que esta forma de energia pode ter no SEE.

## O Projecto NATO-SfS Po-MISTRAL

Por forma a dar uma contribuição para a resolução dos problemas que ainda continuam em aberto, designadamente no que diz respeito à integração dos parques eólicos no sistema eléctrico, uma equipa de trabalho envolvendo uma instituição de investigação, o INTERG - Instituto da Energia, dois laboratórios oficiais, o INETI - Instituto Nacional de Engenharia e Tecnologia Industrial e o LNEC - Laboratório Nacional de Engenharia Civil, e duas empresas de energia eléctrica, a EDA - Electricidade dos Açores e a EDP - Electricidade de Portugal, foi formada em 1994 e tem vindo a trabalhar nesta área com o apoio das instituições citadas e do Programa NATO - Ciência para a Estabilidade (*NATO Science for Stability Programme III*).

O objectivo principal do Projecto NATO SfS Po-MISTRAL “Modelling Machine Interaction in a Wind Park With Regard to Stability and Regulation” é o desenvolvimento e validação experimental de ferramentas computacionais adequadas para auxiliar no projecto de parques eólicos e no planeamento das redes de energia eléctrica em presença destas novas unidades de produção. A construção destes instrumentos de análise está a ser baseada em modelos capazes de simular o comportamento dos parques eólicos, nomeadamente, em situações de regime transitório. Em termos genéricos, estão em desenvolvimento três tipos de modelos:

- Modelos de vento capazes de gerar sequências sintéticas de velocidades de vento em qualquer ponto do parque, mantendo as mesmas características probabilísticas dos dados experimentais, e tendo em conta o efeito da configuração espacial das turbinas no parque.
- Modelos capazes de simular o comportamento transitório de cada um dos sistemas de conversão de energia eólica que compõem o parque, assim como o comportamento transitório do parque relativamente ao sistema de energia eléctrica, modelos estes designados por modelos detalhados do parque eólico.
- Modelos capazes de simular a dinâmica relevante do parque relativamente ao sistema de energia eléctrica, modelos estes designados por modelos de ordem reduzida do parque eólico.

Estes modelos visam a análise de problemas distintos, contudo, a sua utilização nas tarefas do projecto de parques e planeamento de redes é complementar. Enquanto os modelos detalhados darão uma contribuição para o desenho da configuração dos parques eólicos, os modelos de ordem reduzida têm um papel a desempenhar na análise dos problemas postos pela interligação dos parques eólicos e do sistema de energia eléctrica, designadamente, ao nível do sistema de distribuição.

Com vista a facilitar o cumprimento dos objectivos propostos, o Projecto Po-MISTRAL foi dividido nas 5 tarefas que se indicam na Tabela II.

Tabela II: Estrutura do Projecto Po-MISTRAL.

Tarefa	Título
1	Um Novo Modelo de Vento para Parques Eólicos
2	Modelos Lineares e Não-Lineares de Parques Eólicos Interação das Máquinas no Interior do Parque
3	Equivalentes Dinâmicos de Parques Eólicos
4	Influência da Energia Eólica na Regulação do Sistema de Energia Eléctrica O Caso Especial dos Sistemas Fracos
5	Validação dos Modelos de Parques Eólicos

Este artigo pretende descrever, sumariamente, os principais desenvolvimentos conseguidos até ao momento no âmbito do Projecto NATO Sfs Po-MISTRAL, com particular realce para a apresentação dos primeiros resultados experimentais obtidos no parque eólico de São Jorge - Açores.

## Estado Actual de Desenvolvimento do Projecto Po-MISTRAL

Os modelos detalhados desenvolvidos no âmbito do Projecto Po-MISTRAL foram implementados digitalmente num programa a que se deu o nome de INPark. Esta ferramenta computacional permite simular um conjunto de situações que podem acontecer num parque eólico, tanto que diz respeito ao regime permanente como ao regime transitório, o que o torna particularmente adequado para estudar a integração dos parques eólicos na rede. Trata-se de um modelo no domínio do tempo que inclui a modelação do rotor eólico, do sistema de transmissão mecânica, do efeito de sombra da torre, do gerador de indução e respectivo sistema de compensação de potência reactiva, dos transformadores e cabos de ligação dentro do parque e ainda da rede de interligação com a rede, a qual pode incluir cargas locais.

### *Um novo modelo de vento para parques eólicos*

O modelo desenvolvido [1] baseia-se no chamado método de *Shinozuka*. Foi assumido que a turbulência podia ser representada por uma função PSD (*Power Spectrum Density*), sendo as séries sintéticas de velocidade do vento geradas a partir do espectro local de vento através da IFFT (*Inverse Fast Fourier Transform*). Para simular o eventual amortecimento das flutuações da potência devido à turbulência do vento, o modelo inclui o efeito de correlação-cruzada associado à distância entre as turbinas eólicas, tanto no sentido longitudinal como transversal.

### *Modelos lineares e não-lineares de parques eólicos Interação das máquinas no interior do parque*

O modelo desenvolvido para a turbina eólica [1], [2], [3] aplica-se genericamente a turbinas de eixo horizontal, quer com controlo do passo das pás, quer com controlo por entrada em perda, equipadas com geradores de indução de características standard. A entrada numérica do modelo é a velocidade do vento incidente, e a saída é o binário mecânico, a velocidade do rotor e as grandezas eléctricas relevantes.

No que respeita aos rotores eólicos o novo modelo desenvolvido segue o mesmo tipo de abordagem já aplicado no modelo de corpos rígidos anteriormente desenvolvido [4], isto é, baseia-se na teoria proposta por *Glauert* para estudar os propulsores dos aviões como forma de determinar as forças aerodinâmicas nas pás. Contudo, o novo modelo acrescenta o método de caracterização de turbinas flexíveis seguido pelos autores do modelo DUWECS [5], que lhe confere dois graus de liberdade no encastramento das pás ao cubo do veio: movimento de “flap” e “lead-lag”.

### *Equivalentes dinâmicos de parques eólicos*

Após a realização de vários ensaios com as metodologias habitualmente empregues para reduzir a ordem dos sistemas eléctricos [6], optou-se por desenvolver um modelo de ordem reduzida de um parque eólico baseado na técnica das perturbações singulares [7], [8]. A principal razão que suportou a escolha deste método para construir o equivalente dinâmico residiu no facto de ele conter em si próprio metodologias que permitem melhorar, de forma sistemática, a resposta em regime transitório. Após a obtenção de um modelo simplificado que corresponde a aproximação quase-estacionária, introduz-se, numa escala de tempo adequada aos fenómenos rápidos, uma correcção nas condições fronteira que permite recuperar a dinâmica previamente ignorada. Como esta análise é realizada num período de tempo muito curto, ela não implica um aumento proibitivo dos custos computacionais. Pelo contrário, regista-se uma economia de 50%, em média, relativamente ao modelo detalhado completo.

Com o propósito de obter uma redução ainda maior da ordem do sistema, está de momento em desenvolvimento um modelo agregado singularmente perturbado, com base na técnica habitualmente utilizada em sistemas de energia eléctrica para representar as centrais eléctricas convencionais a partir de uma máquina equivalente que reúne as características do grupo de geradores.

### *Influência da energia eólica na regulação do sistema de energia eléctrica O caso especial dos sistemas fracos*

Nesta tarefa desenvolveu-se uma interface [9] que permite a comunicação entre o EMTP - ElectroMagnetic Transients Program e o programa INPark. O programa EMTP é reconhecido como uma ferramenta adequada para simular os transitórios que habitualmente ocorrem no SEE, sendo composto por uma biblioteca de modelos de componentes da rede que, uma vez ligados entre si, permitem a modelação de qualquer tipo de rede. Esta interface foi realizada usando uma nova ferramenta, MODELS, recentemente incluída no EMTP, que permite o estabelecimento de um protocolo de comunicação entre um programa externo e o EMTP.

A interface desenvolvida foi testada usando uma rede de teste, que tinha em conta algumas das principais características típicas das redes isoladas das ilhas Portuguesas da Madeira e dos Açores. De momento está em desenvolvimento a aplicação da nova ferramenta na modelação da rede da ilha de São Jorge - Açores.

### *Validação dos modelos de parques eólicos*

Para efectuar a validação experimental dos modelos desenvolvidos foi seleccionado o parque eólico de São Jorge - Açores pertencente EDA - Electricidade dos Açores. O parque de São Jorge é composto por cinco unidades (4x100+1x150) num total de 550 kW. Cada um dos SCEE está equipado com um gerador de indução com o respectivo sistema de compensação de potência reactiva. Compensação adicional é fornecida por um banco de condensadores variável instalado na sub-estação de saída do parque.

A campanha de medições em São Jorge [10] foi iniciada com a instalação de um anemómetro de copos com o objectivo de recolher informação sobre a direcção do vento, a qual não tinha sido medida quando o parque foi montado. Esta informação foi posteriormente usada para decidir o local de instalação exacto (junto ao SCEE #2 - 100 kW) de uma torre de 30 metros equipada com um anemómetro ultra-sónico de alta frequência, instalado altura da nacelle, e dois anemómetros de copos, instalados a 30 e a 10 metros de altura. Vale a pena mencionar que todo este equipamento foi previamente calibrado em túnel de vento.

O Sistema de Aquisição de Dados (SAD) e a maioria dos transdutores foram igualmente instalados e já estão em operação, faltando, de momento, apenas instalar os transdutores de binário e de velocidade do rotor. O SAD permite a gravação sincronizada de dados, acesso remoto através de modem e a conversão para unidades de engenharia [11].

Uma das turbinas de 100 kW (SCEE #2), a turbina de 150 kW (SCEE #5), o barramento de saída do parque e o anemómetro ultra-sónico estão a ser monitorizados. As grandezas medidas são indicadas na Tabela III.

Tabela III: Grandezas medidas pelo SAD.

	SCEE #2	SCEE #5	Barramento	Anemómetro
1	tensão	tensão	tensão	veloc. vento x
2	corrente na linha	corrente na linha	potência activa	veloc. vento y
3	corrente na linha	corrente na linha	potência reactiva	veloc. vento z
4	potência activa	potência activa	corrente na linha	
5	potência reactiva	potência reactiva	frequência	
6		binário mecânico		
7		veloc. do rotor		

Uma selecção dos primeiros resultados da campanha experimental presentemente a decorrer em São Jorge é apresentada nas figuras seguintes. A frequência de amostragem escolhida foi de 40 Hz, com uma frequência de corte do filtro de 20 Hz.

A figura 1 representa a velocidade do vento resultante medida pelo anemómetro ultra-sónico.

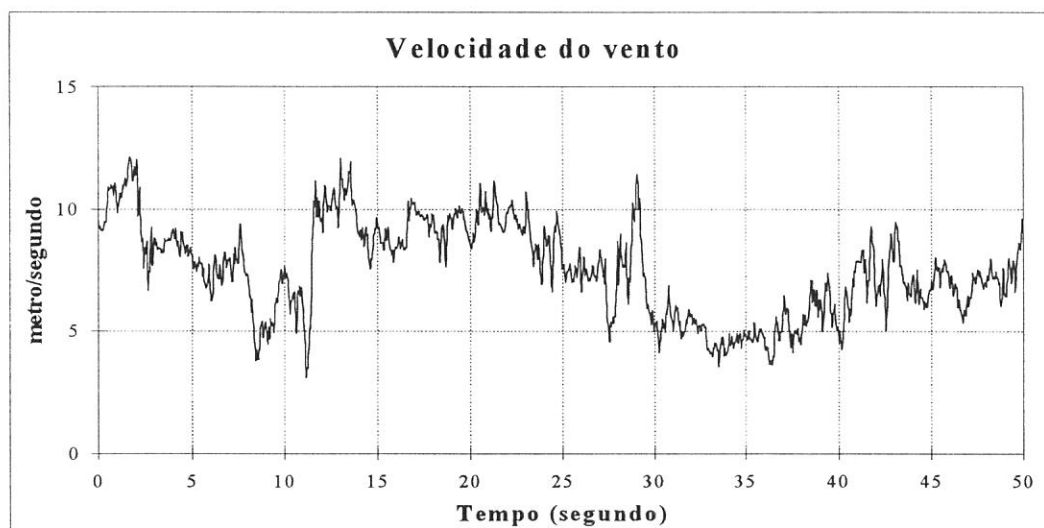


Figura 1: Velocidade do vento.

A saída do parque faz-se através de uma sub-estação de 15 kV / 400 V. As figuras 2 e 3 mostram, na situação de vento indicada na figura 1, a corrente na linha e a tensão no barramento de saída, ambas no lado da alta tensão, e as potências activa e reactiva de saída do parque, respectivamente.

A principal evidência mostrada por estes resultados é o efeito de amortecimento visível na potência de saída do parque. Na realidade, verifica-se que as turbinas eólicas actuam como um filtro que atenua a variação de alta frequência característica da velocidade do vento.

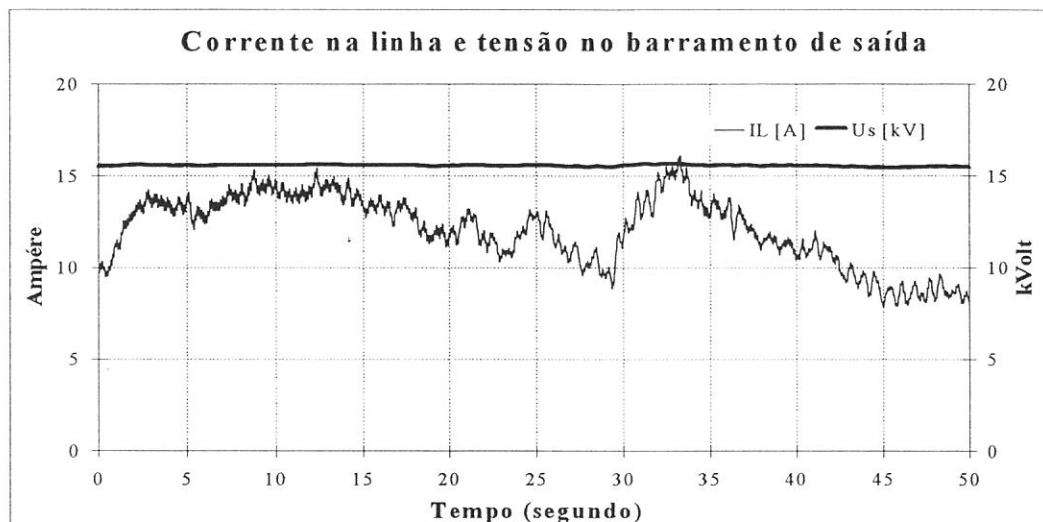


Figura 2: Corrente na linha e tensão no barramento de saída a 15 kV.

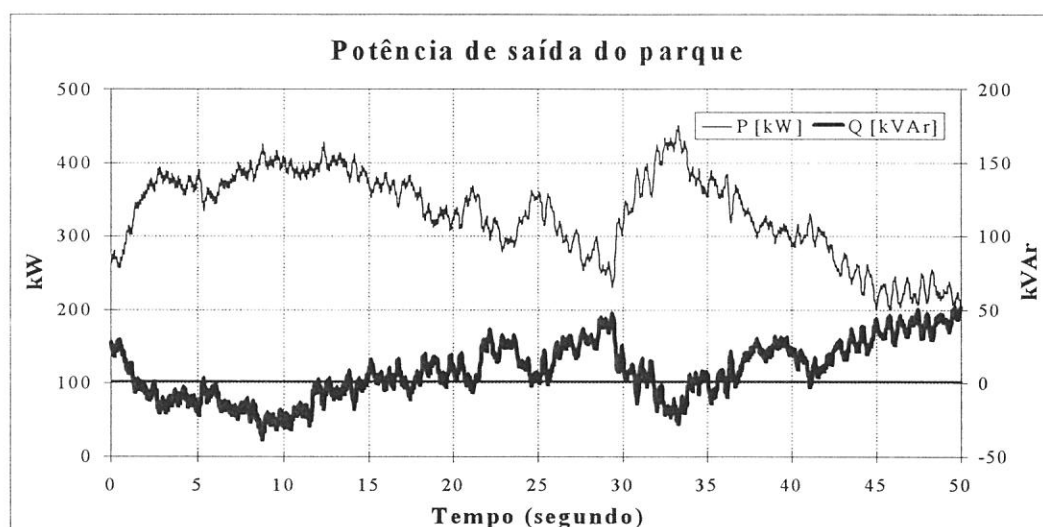


Figura 3: Potência activa e reactiva de saída do parque.

## Conclusões

Neste artigo apresentou-se o estado actual de desenvolvimento do Projecto Po-MISTRAL “Modelling Machine Interaction in a Wind Park With Regard to Stability and Regulation” financiado pela NATO e pelas instituições que compõem o consórcio que se formou para o realizar. O objectivo principal do projecto é o estabelecimento de ferramentas adequadas que permitam estudar a interacção entre os parques eólicos e a rede eléctrica, nomeadamente, as redes fracas. Esta interacção consiste, quer nas implicações para a rede decorrentes da ligação dos parques eólicos, quer do comportamento interno do parque em face da presença da rede.

Descreveram-se, sucintamente, os modelos detalhados desenvolvidos para caracterizar o comportamento interno do parque eólico. Referiu-se, em particular, o desenvolvimento de um novo modelo de vento que permite caracterizar as condições de incidência em cada um dos SCEE, bem como o novo modelo de turbina eólica que segue o método de caracterização de turbinas flexíveis.

Abordou-se, igualmente, a questão da construção dos equivalentes dinâmicos de parques eólicos, tendo-se referido o desenvolvimento de um modelo baseado na técnica das perturbações singulares. Este modelo tem aplicação directa no estudo do impacto da inserção dos parques eólicos no SEE.

Finalmente, o maior destaque foi dado à apresentação de uma selecção dos primeiros resultados experimentais obtidos no parque eólico de São Jorge, Açores, com vista à validação dos modelos desenvolvidos.

## Bibliografia

- [1] Ana I.L. Estanqueiro, J.M. Ferreira de Jesus, Jorge A.G. Saraiva, "A Wind Park Grid Integration Model for Power Quality Assessment", Proc. 1996 European Union Wind Energy Conference (EUWEC'96), Göteborg, May 1996.
- [2] Ana I.L. Estanqueiro, Rui M.G. Castro, J.M. Ferreira de Jesus, Jorge A.G. Saraiva, "Modelling the Integration of Wind Parks onto Weak Grids", Proc. 1995 British Wind Energy Annual Conference (BWEA'17), Warwick, July 1995.
- [3] Ana I.L. Estanqueiro, Jorge A.G. Saraiva, Rui M.G. Castro, J.M. Ferreira de Jesus, "The Use of Stiff and Flexible Rotor Models With Regard to Wind Turbines Power Quality Assessment", Proc. 1994 British Wind Energy Annual Conference (BWEA'16), Stirling, June 1994.
- [4] Ana I.L. Estanqueiro, Ricardo Aguiar, Jorge A.G. Saraiva, Rui M.G. Castro, J.M. Ferreira de Jesus, "The Development and Application of a Model for Power Output Fluctuations in a Wind Park", Proc. 1993 European Community Wind Energy Conference ECWEC'93, Lubbeck, Mar. 1993.
- [5] Peter Bongers, Gregor Van Baars, Sjoerd Dijkstra, Okko Bosgra, "Dynamic Models for Wind Turbines", Delft University of Technology, MEMT-28, 1993.
- [6] Rui M.G. Castro, J.M. Ferreira de Jesus, "A Wind Park Linearized Model", Proc. 1993 British Wind Energy Association Conference (BWEA'15), York, Oct. 1993.
- [7] Petar V. Kokotovic, "A Control Engineer's Introduction to Singular Perturbations", 1972 Joint Automatic Control Conference on Singular Perturbations: Order Reduction in Control System Design, ASME, New York, 1972.
- [8] Rui M.G. Castro, J.M. Ferreira de Jesus, "A Wind Park Reduced-Order Model Using Singular Perturbations Theory", 1996 IEEE Winter Meeting, Baltimore, January 1996 (a aparecer em IEEE Trans. on Energy Conversion).
- [9] Francisco A.G.S. Reis, Ana I.L. Estanqueiro Rui M.G. Castro, J.M. Ferreira de Jesus, "Including a Wind Energy Conversion System Model in ElectroMagnetic Transients Programs", International Conference on Power Systems Transients (IPST'95), Lisbon, Oct. 1995.
- [10] Rui M.G. Castro, Ana I.L. Estanqueiro, Jorge A.G. Saraiva, Luís Gomes, J.M. Ferreira de Jesus, "NATO SfS Project Po-Mistral: Status of the Experimental Validation Phase", Proc. 1996 European Union Wind Energy Conference (EUWEC'96), Göteborg, May 1996.
- [11] Garrad Hassan & Partners, Configuration Report: Po-MISTRAL Monitoring System, May 1996.
- [12] Rui M.G. Castro, Ana I.L. Estanqueiro, Jorge A.G. Saraiva, Luís Gomes, J.M. Ferreira de Jesus, "Modelling Machine Interaction in a Wind Park With Regard to Stability and Regulation: Present Status of NATO SfS Project Po-MISTRAL", Proc. 4<sup>as</sup> Jornadas Luso-Espanholas de Engenharia Electrotécnica, Porto, July 1995