



de cabo subterrâneo. A demanda de potência reativa de geradores de indução à potência nominal é de 10.5 MVar. Isto conduz a um déficit de 4.2 MVar que, a não ser que seja suprido por um STATCOM, será obtido da rede.

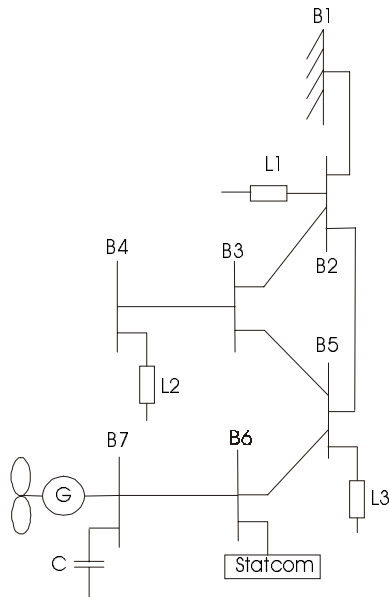


FIGURA 1. Representação da rede e fazenda eólica

#### 4.0 CONTROLE DE POTÊNCIA REATIVA EM REGIME PERMANENTE

Uma estratégia de fator de potência unitário (FPU) foi escolhido para o único STATCOM instalado em uma fazenda eólica até o presente momento [2]. Estratégias baseadas em FPU significa fator de potência da fazenda eólica no ponto de conexão à rede igual a um, resultando em um fluxo de potência reativa igual a zero entre a rede de distribuição e fazenda eólica a qualquer instante.

##### 4.1 Estratégia de controle FPU e perdas na rede

Para analisar o desempenho da estratégia de controle FPU foi desenvolvido um modelo de simulação de fluxo de potência simples. O procedimento é baseado em iterações sucessivas entre o fluxo de potência AC e um algoritmo simples o qual determina a tensão do STATCOM ( $V_{STATCOM}$ ) que produz um fluxo de potência reativa igual a zero entre a fazenda eólica e o sistema de distribuição, para um dado ponto de operação. Após obter-se a nova tensão do STATCOM, um fluxo de potência é simulado e um novo ponto de operação para o sistema é determinado. O processo iterativo entre estes dois algoritmos converge quando a tensão  $V_{STATCOM}$  resulta em uma solução de fluxo de potência com fluxo de potência reativa nulo entre a fazenda eólica e rede de distribuição.

A estratégia de controle FPU não leva em consideração as perdas da rede de forma explícita. Portanto, um Fluxo de Potência Ótimo (FPO) que minimiza as perdas foi desenvolvido e implementado. Considerando-se que a minimização das perdas é um problema não linear, o problema do FPO foi resolvido através da técnica de programação linear sucessiva [11], que consiste numa iteração entre os algoritmos de fluxo de potência e programação linear. O processo converge quando não é mais

possível obter qualquer redução de potência ativa: as perdas são minimizadas ajustando-se a tensão  $V_{STATCOM}$ , levando-se em consideração sua capacidade de potência reativa

O controle baseado no FPU e o modelo de FPO são comparados utilizando-se o sistema teste da Figura 1 e vários níveis de geração eólica. Como esperado, os resultados das simulações, ilustrados na Figura 2 – (a), indicam que o controle FPU produz perdas maiores de potência que o controle baseado na minimização das perdas (FPO). Entretanto, a diferença máxima de 51 kW obtida para o ponto de operação com geração eólica máxima não é muito significativa. Minimizando-se o fluxo de potência reativa entre a fazenda eólica e rede de distribuição, as perdas na rede podem ficar próximas do mínimo, particularmente se não há carga conectada próxima à fazenda eólica. Entretanto, a pequena melhoria do nível de perdas requer um aumento significativo da capacidade do STATCOM (um adicional de 5 MVar), como mostrado na Figura 2-(b), o que seria difícil de justificar comercialmente.

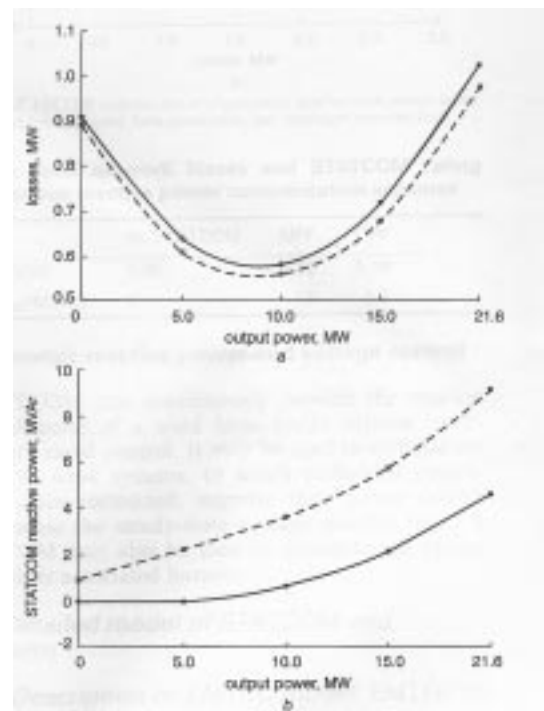


FIGURA 2. Comparação entre FPU e FPO

(linha tracejada: FPO / linha cheia: FPU)

##### 4.2 Estratégia de controle FPU e nível de penetração de geração eólica

Frequentemente, o nível de geração que pode ser injetado em uma dada localidade em sistemas de distribuição é limitado pelo efeito da elevação de tensão. Neste caso, o uso de STATCOMs no ponto de conexão pode aumentar o nível de injeção de potência ativa controlando-se a magnitude da elevação de tensão através de uma importação apropriada de tensão reativa.

A situação crítica surge quando ventos de alta velocidade coincide com a condição de carga leve do sistema. Assumindo-se que as máximas oscilações de tensão permitidas são de +/- 5%, a estratégia de controle de potência reativa baseada em FPU é inapropriada, além

de amplificar o efeito da elevação de tensão. Por outro lado, este efeito pode ser controlado importando-se potência reativa do sistema, isto é, o STATCOM atuando como um consumidor de potência reativa. Assim, ao invés de atuar como uma fonte de reativos, como a estratégia de controle FPU sugere, o STATCOM importaria reativos da rede e manteria o perfil de tensão dentro dos limites permissíveis, como mostrado na Tabela I.

**TABELA 1 . Efeitos de vários esquemas de compensação reativa no perfil de tensão da rede para um dado nível de geração eólica**

TENSÃO NO BARRAMENTO DO STATCOM			
Barramento	Sem STATCOM	FPU	FPO
B2	1.030	1.030	1.030
B3	1.051	1.067	1.038
B4	1.051	1.067	1.038
B5	1.054	1.067	1.038
B6	1.077	1.108	1.050
B7	1.067	1.099	1.040

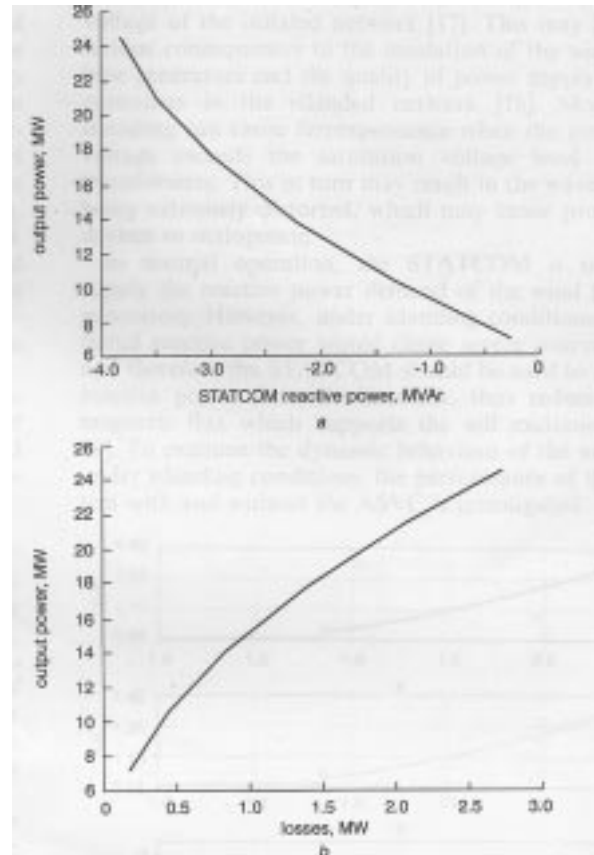
Utilizando-se o FPO, a capacidade mínima de importação de potência reativa do STATCOM foi determinada para vários níveis de geração de potência ativa (Figura 3 - (a)). Entretanto, o sucesso no controle de tensão foi conseguido às custas de um aumento nas perdas da rede de distribuição. Isto é mostrado na Tabela 2 e Figura 3 - (b). Como esta condição ocorre apenas ocasionalmente, o aumento das perdas seria provavelmente tolerável. A solução alternativa de corte de geração acarretaria custos totais maiores.

## 5.0 CONTROLE DINÂMICO DE POTÊNCIA REATIVA E TENSÃO

Um STATCOM pode prover continuamente a demanda de potência reativa de uma fazenda eólica sob várias condições de vento com um controle rápido. Isto pode ser utilizado para estabilizar a tensão em sistemas fracos, aos quais geralmente uma fazenda eólica é conectada, melhorar a qualidade de potência e aumentar o limite de estabilidade. Um STATCOM pode também ser usado para eliminar o problema de auto-excitação e os danos associados a este problema.

### 5.1 Modelo de STATCOM e fazenda eólica

**5.1.1 Descrição do modelo EMTDC:** O EMTDC [9] foi usado para modelar a rede, a fazenda eólica e o STATCOM. O STATCOM é um design de três níveis [8] com capacidade



**FIGURA 3.** Demanda de pot. Reativa do STATCOM e perdas na rede para diferentes níveis de geração eólica e condição de carga mínima

**TABELA 2 . Perdas totais na rede e capacidade do STATCOM para vários esquemas de compensação de potência reativa**

	S/ STATCOM	FPU	FPO
Perdas (MW)	1.90	1.72	2.19
$Q_{\text{STATCOM}}$ (MVar)	0	+4.5	-3.5

de +4.5/-3.5 MVar e é conectado à barra B6 através de um transformador trifásico delta-estrela. Ele é operado no modo SHEM (Selective Harmonic Elimination Modulation) para manter a distorção harmônica dentro de limites aceitáveis. Um filtro passivo de 500 kVAr é usado para limitar harmônicas de ordem mais elevada. Os equipamentos semicondutores são representados por chaves ideais.

Duas técnicas de controle para STATCOM, baseadas nas várias estratégias de controle estabelecidas disponíveis na literatura [12-15], foram implementadas. A técnica FPU utiliza a potência reativa absorvida pela fazenda eólica como a variável de controle para a potência de saída do STATCOM. O STATCOM fornece continuamente os VARs para balançar a demanda de potência reativa da fazenda eólica até atingir sua capacidade máxima, acima da qual um valor constante de 4.5 MVar é mantido. Alternativamente, uma técnica de controle de tensão mantém a tensão na barra de conexão da fazenda eólica ao sistema de distribuição em um valor referência

injetando-se ou absorvendo-se potência reativa. A tensão referência da fazenda eólica é mantida usando um esquema de controle proporcional e integral.

O modelo da fazenda eólica consiste de geradores de indução, os transformadores elevadores locais e capacitores para correção de fator de potência. Linhas aéreas e cabos foram representados por impedâncias série, enquanto que as cargas dos consumidores representadas por impedâncias shunt.

**5.1.2 Desempenho de estabilidade de tensão em regime permanente:** Em redes rurais fracas, onde a impedância de curto circuito pode ser alta, a tensão pode cair com a absorção de potência reativa pela fazenda eólica. Em particular, quando a potência ativa produzida por um gerador de indução excede seu valor nominal, existe a possibilidade de instabilidade de tensão uma vez que são absorvidas quantidades elevadas de potência reativa [16]. Esta situação deve ser considerada em fazendas eólicas tendo-se em vista que o controle de potência das turbinas eólicas é geralmente impreciso.

Usando o modelo EMTDC, o torque da máquina foi aumentado do valor de 1 pu e a tensão no barramento de 33kV da fazenda eólica foi medido. A Figura 4 ilustra a variação de tensão nesta barra com a variação da potência de saída da fazenda eólica, para a condição de carga leve da rede. Esta Figura indica claramente a melhoria do limite de estabilidade de tensão em regime permanente quando o STATCOM gera 4.5 MVar. Um benefício similar teria sido obtido aumentando-se a capacidade dos capacitores de correção de fator de potência, embora isto teria aumentado a velocidade e magnitude da elevação de tensão numa condição de ilhamento.

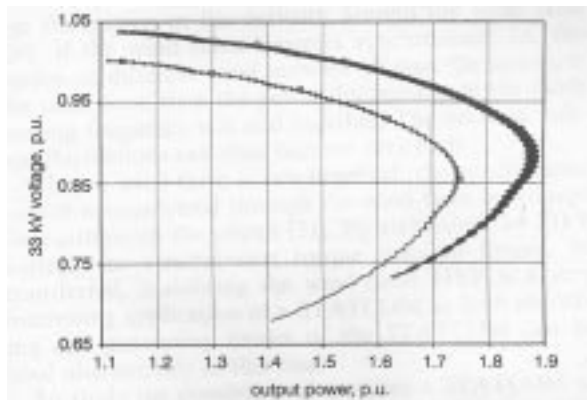


FIGURA 4. Tensão na barra 33kV da fazenda eólica versus potência de saída, com e sem STATCOM

## 5.2 Controle de tensão dinâmico

**5.2.1 Desempenho em condição de ilhamento:** Uma fazenda eólica pode ficar isolada da rede de distribuição como resultado de um chaveamento pós-falta na rede. Isto é geralmente referido como um ilhamento, o qual pode causar auto-excitação das turbinas geradoras devido à presença de capacitores, e desta forma elevar os valores de tensão na rede isolada [17]. Isto pode acarretar sérias consequências ao isolamento das turbinas geradoras e à qualidade do suprimento de energia aos consumidores na rede isolada [18].

Além disso, pode também causar ferroressonância quando a tensão do gerador excede o nível de tensão de saturação dos transformadores. Isto resulta, como consequência, em formas de ondas bastante distorcidas que podem causar má operação dos equipamentos de proteção.

Em condições normais de operação, o STATCOM é usado para suprir a demanda de potência reativa das turbinas eólicas. Entretanto, sob condição de ilhamento, o STATCOM seria usado para absorver potência reativa da rede, reduzindo-se assim o fluxo magnético que alimenta a auto-excitação [16,19]. Para examinar o comportamento dinâmico da rede sob condições de ilhamento, o desempenho do sistema com e sem o STATCOM foi investigado.

Neste estudo, uma condição de ilhamento foi analisada desligando-se a fazenda eólica da rede no barramento de 33kV (B6). Quando realizando simulações com máquinas de indução sob condições de auto-excitação, a tensão na fazenda eólica aumenta e por isto torna-se necessário adicionar os efeitos da saturação nos modelos da máquina.

Figura 5 mostra as tensões em B6 e a potência reativa requerida pela fazenda eólica quando ela é desligada do sistema de 33 kV sem o STATCOM em serviço. Claramente as turbinas eólicas estão auto-excitadas e a tensão do barramento B6 começa a aumentar.

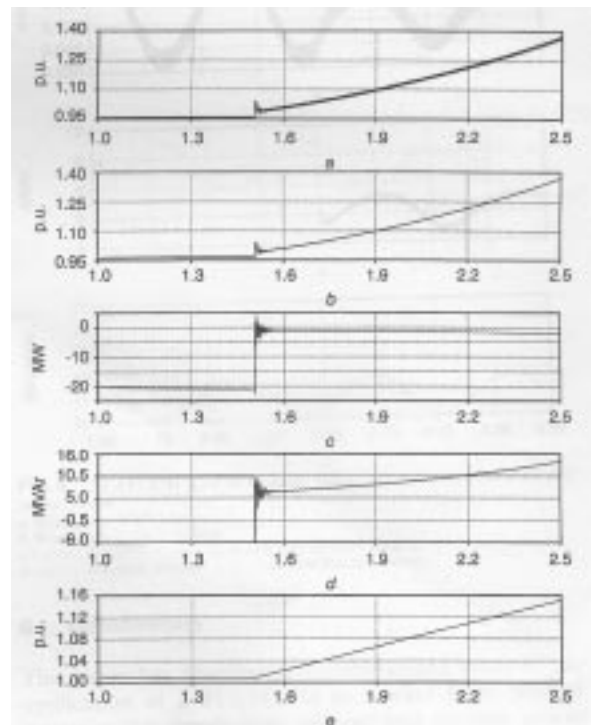


FIGURA 5. Ilhamento da fazenda eólica sem STATCOM

- (a) Tensão na Barra B5
- (b) Tensão 33Kv da fazenda eólica
- (c) Potência de saída da fazenda eólica
- (d) Demanda de potência reativa
- (e) Velocidade da turbina

O STATCOM, operando com controle de tensão, foi utilizado para estabilizar a tensão neste barramento sob esta condição de operação e a Figura 6 mostra os resultados obtidos com o STATCOM. A tensão de 33kV é mantida próximo ao valor referência de 0.99 pu, embora exista um tensão transitória no instante do ilhamento causada pela presença de uma função integral no sistema de controle do STATCOM.

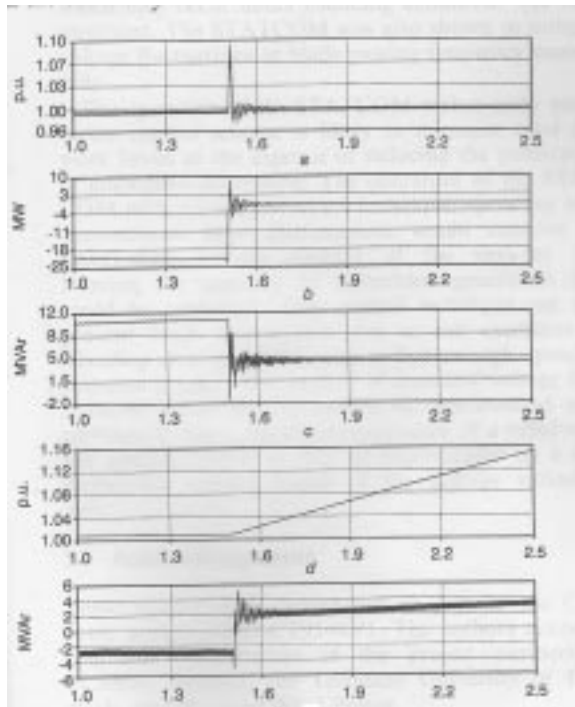


FIGURA 6. Ilhamento da fazenda eólica com STATCOM

- (f) Tensão na Barra B5
- (g) Tensão 33Kv da fazenda eólica
- (h) Potência de saída da fazenda eólica
- (i) Demanda de potência reativa
- (j) Velocidade da turbina

**5.2.2 Desempenho do STATCOM para mitigar flutuações devido ao torque pulsante:** Quando uma pá da turbina eólica passa pela torre, isto provoca um torque pulsante nos geradores de indução, até 20% da capacidade nominal, trazendo como consequência flutuações de tensão nos barramentos vizinhos à fazenda eólica [20]. Se a fazenda eólica entrar em sincronismo, isto é, as pás das diferentes turbinas eólicas passando todas pelas suas respectivas torres ao mesmo tempo, então as flutuações de potência nesta frequência serão todas somadas. As flutuações de tensão da rede podem tornar-se significativas.

Quando a fazenda eólica está sincronizada, o torque síncrono é transferido através da fazenda eólica pelas flutuações de tensão no circuito [21]. Estabilizando-se a tensão de 33kV, o torque síncrono não pode mais ser transferido. Estabilizar a tensão de 33kV da fazenda eólica é uma aplicação interessante para um STATCOM - os dois modos, absorção e geração do STATCOM podem ser usados alternativamente neste caso.

Para estudar a possibilidade da aplicação de um STATCOM para mitigar as flutuações de tensão na frequência de passagem das pás pelas torres, um torque

pulsante com variação de magnitude de +/-20% e frequência de 1.6 Hz foi aplicado ao torque de entrada dos geradores eólicos. O STATCOM foi conectado ao circuito usando-se a técnica de controle de tensão descrita na Seção 5. Os resultados obtidos com e sem o STATCOM são mostrados na Figura 7.

Analisando a Figura 7, está claro que o STATCOM pode mitigar flutuações de tensão no barramento de 33kV de forma efetiva. Devido às variações de potência ativa dentro da fazenda eólica, a tensão no barramento de 690V flutua mesmo estando o STATCOM em operação.

## 6. CONCLUSÕES

Este artigo descreveu um estudo detalhado de uma aplicação de um STATCOM conectado a uma fazenda eólica. Várias estratégias de controle de tensão e fluxo de potência reativa (regime permanente) de uma fazenda eólica equipada com um STATCOM foram investigadas. A estratégia de fator de potência unitário para controlar o fluxo de reativos de uma fazenda eólica provavelmente produz valores de perdas mínimos em redes de distribuição reais. Entretanto, ela pode conduzir a um uso ineficiente dos compensadores para regulação de tensão em sistemas de distribuição em circunstâncias extremas, isto é, em condições de carga leve e pesada. O fator de potência unitário pode limitar a potência ativa gerada de uma fazenda eólica, particularmente aquelas fazendas conectadas em sistemas de distribuição fracos.

O uso da técnica de controle de fator de potência unitário e o esquema de controle de tensão para o STATCOM foram também examinadas através de simulações eletromagnéticas. O STATCOM foi capaz de suprir a demanda de reativos sob várias condições de operação, controlar a tensão da rede efetivamente e portanto aumentar a capacidade permitida para a fazenda eólica, e melhorar o limite de estabilidade da rede. Sua aplicação para eliminar sobretensões que podem ocorrer em condições de ilhamento foi demonstrado. O STATCOM também mostrou-se capaz de mitigar flutuações de tensão devido à natureza pulsante dos torques das turbinas eólicas.

A operação do STATCOM com o esquema de controle de fator de potência unitário provavelmente minimiza as perdas totais do sistema, mas as custas de uma redução na penetração da geração eólica. A operação do STATCOM com a técnica de controle de tensão operando na curva característica convencional melhoraria a estabilidade de tensão em regime permanente da rede e aumentaria a capacidade de geração que poderia ser conectada. Esta técnica de controle também pode eliminar sobretensões decorrentes da auto-excitação em condições de ilhamento se for utilizado um controle com resposta rápida. O controle de variações transitórias de tensão, que podem ocorrer quando as turbinas eólicas entram em sincronismo, é também uma consequência natural de um esquema rápido de controle de tensão, ou pode ser implementado por um sinal de controle complementar de variações de tensão apenas.

## 8.0 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

GARDNER, P. Technical and commercial aspects of the connection of wind turbines to electricity supply

Europe (American Wind Energy Association Conference, March, 1996)

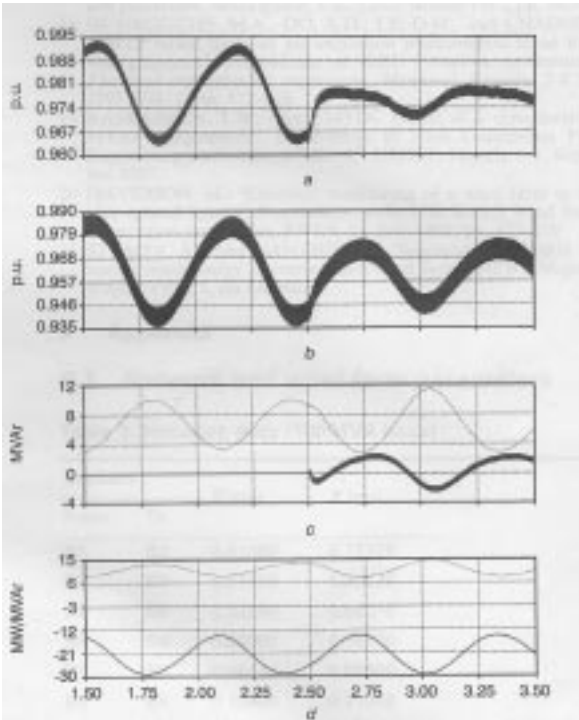


FIGURA 7. STATCOM usado para mitigar flutuações de tensão decorrentes do torque pulsante.

- (a) Tensão 33 kV da fazenda eólica
  - (b) Tensão 0,69 kV
  - (c) Potência reativa STATCOM Q no lado de 33kV (tracejada)
  - (d) Potência de saída da máquina/ potência reativa (tracejada)
- (2) BERGMANN, K. Application of GTO-based SVCs for improved use of the Rejby Hede wind farm (9<sup>th</sup> National Power Systems Conference) Kanpur, India, 19-21 Dezembro 1996)
  - (3) SOBRINK, K., SCHETTLER, F., BERGAMAN, K., STOBER, R., JENKINS, N., SAAD-SAOUD, Z., EKANAYAKE, J., LISBOA, M.L., STRBAC, G. Power Quality improvements of wind farms. (Dinamarca, ISBN 87-90707-05-2, Junho 1998)
  - (4) HILL, J.E. A practical example of the use of distribution static compensator (D-STATCOM) to reduce voltage fluctuations ( IEE colloquim on Power electronics for renewable energy) London, Junho 1997.
  - (5) EKANAYAKE, J.B., JENKINS, N., and COOPER, C.B. Experimental investigation of an advanced Static VAR compensator (Proc. IEE Gener. Transm. Distrib., Março 1995, 142, (2), pags.202-210)
  - (6) EKANAYAKE, J.B. and JENKINS, N. Mathematical models of a three-level advanced static VAR compensator (Proc. IEE Gener. Transm. Distrib., Março 1997, 44, (2), pags.201-206)
  - (7) EKANAYAKE, J.B., JENKINS, N. A three-level advanced static VAR compensator (IEEE Trans., Janeiro 1996, PD-11, (1), pag.540-545).
  - (8) EKANAYAKE, J.B., and JENKINS, N. Performance of three-level advanced static VAR compensator. (International Symposium on the Electric Power Engineering, Stockholm Power Tech, Junho 1995, pags 163-141).
  - (9) Manitoba HVDC Research Centre, EMTDC: electromagnetic transients programs including DC systems, 1994.
  - (10) EL-HAWARY, M.E. Optimal power flow: solution techniques, requirements and challenges. (IEEE Power Engineering Society, 1996-96 TP 111-0)
  - (11) RISTNOVIC, P. Successive linear programming based OPF solution (IEEE tutorial course, IEEE Power Engineering Society, 1996, pags. 1-9 / 96 TP 111-0).
  - (12) TYLL, H. and BERGMANN, K. Use of static VAR compensator (SVCs) in high voltage systems. ( Les

Compensateurs Statiques de Puissance Reactive, Bruxelles/Bélgica, 22 Março 1990).

- (13) AINSWORTH, J.D. Phase-locked oscillator control system for thyristor controlled reactors. (Proc. IEE C, Março 1988, 135, (2), pags 146-156).
- (14) CIGRE WG38-01 task force 2, Static VAR compensators, 1986.
- (15) AINSWORTH, J.D. The phase locked oscillator- a new control for controlled static converter. (IEEE Trans. 1968, PAS-87, pags 859-865).
- (16) SAAD-SAOUD, Z. and JENKINS, N. The use of advanced static Var compensators to improve the power quality of wind farms. (Proceeding 19<sup>th</sup> British Wind Energy association Conference, BWEA, 19 Julho 1997).
- (17) SALMAN, S.K. Detection of embedded generator islanding condition using elliptical trajectory technique. (Proceedings 6<sup>th</sup> International Conference on Developments in power system protection, Nottingham, Reino Unido, Março de 1997, pags. 103-106).
- (18) OUHROUCHE, M.A., DO, X.D., LE, Q.M., and CHAINE, R. EMTTP based study of self-excitation phenomenon in an induction generator. (Proceedings of IEEE Canadian conference on Electrical and computer engineering, Montreal, Canada, Setembro de 1995, Vol.1, pags. 172-176).
- (19) RASMUSSEN, T.W. An EMTDC model of a three-level four MVar compensator. (Proceedings of 32<sup>nd</sup> Universities Power Engineering conference, UPEC 97, UMIST, Manchester, Setembro 1997).
- (20) DAVIDSON, M. Electrical monitoring of a wind farm in complex upland terrain. (proceeding of the 17<sup>th</sup> British Wind Energy association Conference, BWEA, 19 Julho 1997).
- (21) STAMPA, A. and SANTJER, F. Synchronism of grid connected wind energy converters in a wind farm. (DEWI Magazine, Agosto 1997, 7, em alemão)

## 9.0 APÊNDICE

### 9.1 Parâmetros da rede e da fazenda eólica

TABELA 3. Dados da rede (base 1000 MVA)

De	Para	R(pu)	X(pu)
B1	B2	0.01869	0.17726
B2	B3	0.31000	0.40174
B2	B5	0.33290	0.58310
B3	B4	0.09000	0.15770
B3	B5	0.06446	0.08600
B5	B6	0.13900	0.31040
B6	B7	0.04762	0.25132

TABELA 4. Dados de carga leve

Cargas	Barra	MW	MVar
L1	B2	31.50	6.31
L2	B4	12.00	2.40
L3	B5	9.20	1.85

TABELA 5. Parâmetros das turbinas eólicas de 600 Kva (base 100MVA)

Volt (V)	Rs (pu)	Rr (pu)	Xm (pu)	Xs (pu)	Xr (pu)	H (s)
690	0.888	1.379	604.91	13.791	19.953	2.9

TABELA 6. Dados de capacitores e transformadores

Capacitor (kVAR)	Transformadores locais	
	Capacidade (kVA)	Reatância (%)
175	630	5.8