

Análise Técnica e Econômica do Suporte de Potência Reativa a Partir de Geradores Eólicos como Prestadores de Serviços Ancilares

Flávio S. Souza*, Thales Sousa**, Edmarcio A. Belati***

Centro de Engenharia, Modelagem e Ciências Sociais Aplicadas (CECS)

Universidade Federal do ABC (UFABC)

Santo André, Brasil

*flavio.santos@ufabc.edu.br, **thales.sousa@ufabc.edu.br, ***edmarcio.belati@ufabc.edu.br

Resumo—O presente trabalho propõe a utilização de geradores eólicos para o provimento do serviço ancilar de suporte de potência reativa, considerando a capacidade dos mesmos operarem com fator de potência variável. Para tanto, foi considerado a análise de um conjunto de geradores DFIG (*Doubly Fed Induction Generator*) com fator de potência podendo variar até o limite de 0,95 em comparação com um conjunto de geradores DFIG sem capacidade de suporte de potência reativa. Nesse sentido, foi utilizada a formulação de um fluxo de potência ótimo com o objetivo de analisar a colaboração do provimento deste serviço ancilar para a diminuição das perdas ativas e reativas nas redes elétricas.

Palavras-chaves—Fluxo de Potência Ótimo, Fontes Renováveis, Serviços Ancilares, Suporte de Potência Reativa.

I. INTRODUÇÃO

O aumento da demanda por energia elétrica tem causado uma grande preocupação em todo o mundo, principalmente devido ao esgotamento de fontes tradicionais e aos impactos ambientais causados pelo seu uso indiscriminado. Esses fatores de preocupação causam uma ameaça à segurança energética dos países, justificando grandes investimentos em pesquisas para o desenvolvimento de tecnologias que utilizam fontes renováveis de produção de energia elétrica.

Entre as tecnologias alternativas para produção de energia elétrica a geração eólica tem-se destacado, principalmente por ter o custo por kW instalado cada vez mais competitivo. O desenvolvimento tecnológico tem permitido à geração eólica suprir grandes demandas quando conectadas ao sistema elétrico de transmissão ou quando instaladas em sistemas de geração distribuída, próximas às unidades consumidoras, diminuindo os custos de transmissão.

Ademais, geradores eólicos quando acompanhados de sistemas de controle que permitam separar da dinâmica de operação dos mesmos em relação ao sistema a que estão associados, tornam-se candidatos para a provisão de suporte de potência reativa como prestadores de serviços ancilares [1], [2].

Atualmente, o aumento da capacidade de geração dos geradores eólicos e a aplicação dos mesmos integrados à rede elétrica, bem como o aumento da sua impotência para a qualidade da energia entregue aos consumidores, têm feito

com que modernos geradores eólicos contribuam não somente com a geração de potência ativa, mas também com o suporte de potência reativa e a estabilidade do sistema elétrico [3].

Assim, o presente trabalho propõe a utilização de geradores eólicos para o provimento do serviço ancilar de suporte de potência reativa, considerando a capacidade que alguns geradores eólicos possuem de operarem com fator de potência variável.

Para tanto, foi considerado a análise de um conjunto de geradores DFIG (*Doubly Fed Induction Generator*) com fator de potência podendo variar até o limite de 0,95, em comparação com um conjunto de geradores DFIG sem capacidade de suporte de potência reativa.

Nesse sentido, foi utilizada a formulação de um fluxo de potência ótimo com o objetivo de analisar a colaboração do provimento deste serviço ancilar para a diminuição das perdas na transmissão.

II. SERVIÇOS ANCILARES

A. Conceitos Gerais

Um sistema elétrico precisa atender importantes parâmetros relativos à confiabilidade, qualidade e estabilidade operativa. Para que tais requisitos sejam garantidos, além dos serviços básicos de geração, transmissão e distribuição da energia gerada são necessários outros serviços complementares. Esses serviços são definidos como serviços ancilares.

Os serviços ancilares são amplos e variam de um país para outro, obedecendo às particularidades de cada sistema elétrico, no que diz respeito aos requisitos operativos, dimensionais e topológicos.

Entre os diversos tipos de serviços ancilares, destacam-se: balanço energético, reservas de potência ativa, controle de frequência, controle de tensão ou suporte de potência reativa, programação e despacho e auto-restabelecimento.

A seguir são apresentadas algumas características do serviço ancilar de suporte de potência reativa, objeto do presente trabalho.

B. Suporte de Potência Reativa

Os valores de tensão e potência reativa gerada ou consumida no sistema elétrico estão diretamente relacionados. Para manter os valores de tensão dentro dos limites pré-estabelecidos e prevenir possíveis colapsos no sistema é prevista a provisão do serviço ancilar de suporte de potência reativa.

Para efetuar o controle dos níveis de tensão no sistema elétricos são utilizados vários recursos, tais como: bancos de capacitores chaveados ligados ao barramento das subestações; reatores ligados em paralelo com os barramentos, no terciário dos transformadores ou nos extremos de linhas de transmissão; transformadores com *tap* variável; reguladores de tensão; e dispositivos FACTS (*Flexible Alternating Current Transmission Systems*).

Outro recurso bastante utilizado no controle dos níveis de tensão e objeto do presente trabalho é o suporte de potência reativa a partir de geradores síncronos conectados à rede, quando os mesmos, a partir da variação da corrente de excitação do campo eletromagnético, estão operando sobreexcitados ou subexcitados [4-6].

III. GERAÇÃO EÓLICA

A geração eólica tem-se destacado como uma fonte renovável de energia elétrica principalmente por ter o custo por kW instalado cada vez mais competitivo e por ser capaz de suprir grandes demandas quando conectadas ao sistema elétrico de transmissão ou quando instaladas em sistemas de geração distribuída, próximas às unidades consumidoras, diminuindo os custos de transmissão.

Atualmente, o aumento da capacidade de geração dos geradores eólicos e a aplicação dos mesmos integrados à rede elétrica têm feito com que modernos geradores eólicos contribuam não somente com a geração de potência ativa, mas também com o suporte de potência reativa e a estabilidade do sistema elétrico.

Nesse sentido, a escolha da tecnologia do gerador eólico a ser empregado possibilitará o controle da potência reativa fornecida à rede [7]. Determinados geradores são consumidores de potência reativa e de modo geral para o controle do fator de potência precisam ter dispositivos de compensação associados. São exemplos desses dispositivos: os dispositivos FACTS, os bancos de capacitores chaveados ou transformadores com *tap* variável instalados nas barras.

A seguir são apresentadas algumas características dos geradores eólicos.

A. Características Técnicas

Uma característica fundamental na classificação dos geradores eólicos está relacionada à tecnologia utilizada para converter a energia mecânica extraída dos ventos em energia elétrica.

Nesse sentido, é de grande importância a definição se a operação se dará em velocidade constante ou variável, sendo que a operação em velocidade variável proporciona vantagens tais como menor emissão de ruídos, menor *stress* mecânico e a

capacidade de fornecer potência reativa, em alguns tipos de geradores.

Pelo fato de serem mais robustos, os geradores mais utilizados são as máquinas de indução, podendo ser com rotor bobinado ou com a configuração em gaiola de esquilo. Fig. 1 ilustra o esquema de um gerador síncrono de indução de velocidade fixa com acoplamento direto à rede.

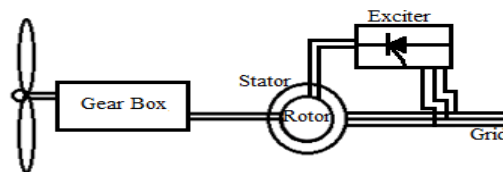


Figura 1: Gerador de indução de velocidade fixa com acoplamento direto à rede.

Esta configuração possui a vantagem de ter uma estrutura simples além de ser possível o controle da potência reativa. O controle da potência reativa é proporcionado pelo conversor eletrônico que realiza o acoplamento da rede elétrica ao rotor do gerador, tornando-se dispensável o uso de bancos de capacitores. Por outro lado, possui a desvantagem de ser mais instável à oscilação da velocidade do vento.

O gerador assíncrono com rotor gaiola de esquilo utiliza uma caixa multiplicadora de velocidade e faz uso de um banco de capacitores para correção do fator de potência, como mostrado na Figura 2. As correntes geradas por estes geradores são produzidas com diferentes frequências e para efetuar o acoplamento entre o gerador e a rede faz-se uso de inversores.

Este sistema reduz consideravelmente as cargas dinâmicas, e permite o melhor aproveitamento das propriedades aerodinâmicas do rotor eólico se comparado com o sistema que opera em velocidade constante.

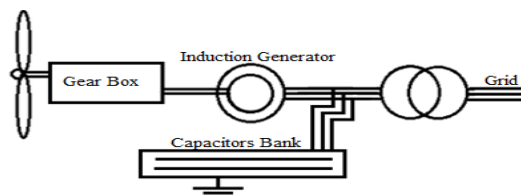


Figura 2: Gerador de indução com acoplamento direto.

Com o avanço da eletrônica de potência, os geradores com velocidade variável têm sido cada vez mais empregados, podendo ser implantados em geradores síncronos e assíncronos. Fig. 3 ilustra um gerador de velocidade variável com uso de conversores e caixa multiplicadora.

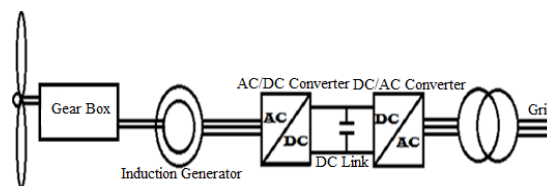


Figura 3: Gerador de velocidade variável com uso de conversores e caixa multiplicadora.

Geradores síncronos com rotor bobinado ou de ímã permanente são também muito utilizados. Para diminuir as perdas mecânicas, os mesmos podem ainda ser do tipo multipolar, permitindo a retirada da caixa amplificadora de velocidade.

Uma das vantagens do gerador de rotor bobinado é a possibilidade do controle da potência ativa e reativa injetada na rede. As desvantagens desse modelo de gerador são: a necessidade de mais um conversor para alimentação do campo; a necessidade do uso de escovas e; as maiores perdas elétricas pelo fato do rotor ser bobinado [8]. Fig. 4 ilustra um gerador multipolar de rotor bobinado.

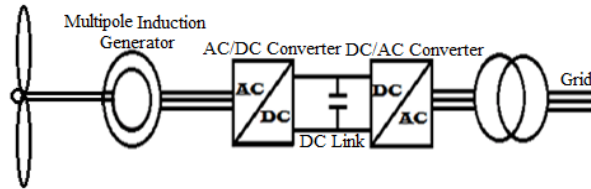


Figura 4: Gerador eólico síncrono multipolar de rotor bobinado.

Os geradores eólicos mais atuais utilizam a tecnologia DFIG (*Doubly Fed Induction Generator*) que possuem a capacidade de operação em velocidade variável com uso de *Gear Box*. Os geradores DFIG têm seu estator conectado ao rotor através de um conversor de potência.

O fluxo de potência no conversor é controlado pelo RSC (*Rotor Side Converter*) e pelo GSC (*Grid Side Converter*) que podem ser comandados por um PWM (*Pulse Width Modulation*). O RSC e o GSC controlam as potências ativa e reativa do lado do estator e do lado do rotor de forma independente, proporcionando ao gerador uma capacidade de operar com fator de potência indutivo ou capacitivo.

Fig. 5 ilustra o esquema de um sistema DFIG, considerando os blocos de controle e o sistema de proteção *Crow-Bar*. O sistema de proteção *Crow-Bar* opera quando há sobretensão ou sobrecorrente de excitação do rotor, proporcionado por alguma falha na rede.

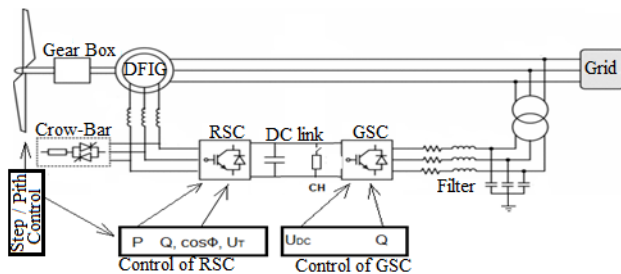


Figura 5: Configuração de um gerador DFIG [9].

Devido à facilidade de controle, de operação em diferentes velocidades de vento e a capacidade de fornecimento de potência reativa de forma dinâmica, o presente trabalho considera o uso de geradores DFIG.

B. Limites Operacionais

No gerador DFIG os conversores RSC e GSC podem operar temporariamente sobrecarregados contribuindo de forma significativa para o suporte de tensão.

Em função da corrente máxima nos conversores de potência, para que não ocorram sobreaquecimentos, o gerador DFIG pode operar com fator de potência até 0,95 indutivo ou capacitivo [6], [9]. Dessa forma é possível determinar o limite de contribuição do gerador DFIG no provimento de suporte de potência reativa.

Outra limitação do gerador DFIG está relacionada à velocidade do vento, pois abaixo de certa velocidade torna-se inviável a operação com fator de potência diferente do unitário.

Para o estudo proposto foi considerado que o gerador estará desligado para ventos com velocidade abaixo de 6 m/s. Após o vento atingir a velocidade de 6 m/s, o gerador irá operar com fator de potência igual a 1,0, sendo que sua capacidade de suporte de potência reativa para o sistema só foi possível quando o vento atingiu velocidades superiores ou iguais a 9 m/s [9]. Para ventos acima de 14 m/s, o funcionamento do aerogerador, o que inclui sua capacidade de geração, dependerá do projeto da turbina eólica a qual será conectado.

A curva de capacidade do gerador eólico utilizado no presente trabalho é ilustrada na Figura (6).

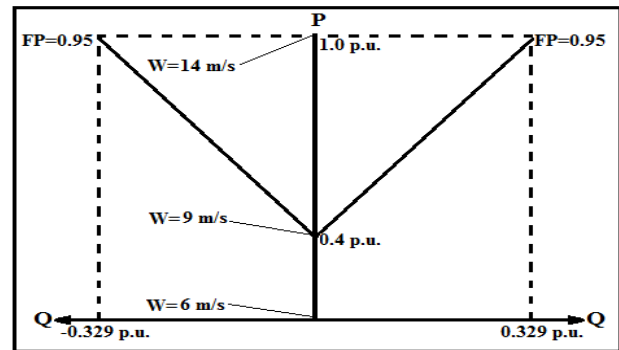


Figura 6: Curva de capacidade do gerador DFIG considerado.

A Tabela I apresenta os limites de geração de potência ativa e reativa considerando distintas velocidades do vento.

TABELA I: CAPACIDADES DO GERADOR DFIG EM FUNÇÃO DO VENTO [9].

Vento (m/s)	P (MW)	Q (MVar)	S (MVA)	FP
6	16,30	0,00	16,30	1,00
7	23,75	0,00	23,75	1,00
8	33,85	0,00	33,85	1,00
9	64,36	21,33	67,85	0,95
10	80,00	26,34	84,22	0,95
11	98,55	32,50	103,77	0,95
12	124,24	40,93	130,80	0,95
13	157,32	51,76	165,61	0,95
14	164,64	54,11	173,30	0,95

IV. METODOLOGIA

De maneira a avaliar a colaboração de geradores eólicos no suporte de potência reativa como prestadores de serviço ancilar foi modelado um algoritmo de FPO (Fluxo de Potência Ótimo) com objetivo de minimizar as perdas técnicas de potência ativa e de potência reativa, atendendo as restrições impostas ao sistema. O algoritmo de FPO foi modelado utilizando-se o *software* matemático AMPL (*Modeling Language for Mathematical Programming*) em conjunto com o *solver* Knitro.

A formulação matemática básica do FPO é apresentada em (1).

$$\begin{aligned} \text{Minimizar} \quad & f(x, u) \\ \text{Sujeito a:} \quad & h(x, u) = 0 \\ & g(x, u) \leq 0 \end{aligned} \quad (1)$$

Onde $f(x, u)$ é a função objetivo, em que x é um vetor de n_1 variáveis de estado, u é um vetor de n_2 variáveis de controle, $h(x, u) = 0$ representa um vetor de n_3 restrições de igualdade e $g(x, u) \leq 0$ representa um vetor de n_4 restrições de desigualdade.

Para a formulação proposta, a função objetivo é representada pela somatória das equações (2-3), relativas à minimização das perdas ativas e reativas, respectivamente.

$$f'(x, u) = \sum_{k=1}^{NL} (G_{km} (V_k^2 + V_m^2 - 2V_k V_m \cos \theta_{km})) \quad (2)$$

$$f''(x, u) = \sum_{k=1}^{NL} (-B_{Gkm} (V_k^2 + V_m^2 - 2V_k V_m \cos \theta_{km})) \quad (3)$$

As restrições de igualdade $h(x, u) = 0$ são representadas pelas equações (4-5) de balanço de potência ativa e reativa, respectivamente. As equações (4-5) foram consideradas para as barras onde não foram conectados geradores eólicos.

$$P_k(x) = P_{Gk} - P_{Lk} = V_k \sum_{m \in k} V_m (G_{km} \cos \theta_{km} + B_{km} \sin \theta_{km}) \quad (4)$$

$$Q_k(x) = Q_{Gk} - Q_{Lk} = V_k \sum_{m \in k} V_m (G_{km} \sin \theta_{km} - B_{km} \cos \theta_{km}) \quad (5)$$

A Equação (6) representa a função de geração de potência ativa do gerador eólico considerado. Essa função foi determinada a partir dos valores de potência ativa do gerador DFIG e das velocidades de vento ilustradas na Tabela 1 [9].

$$P_{eolica}(ven) = 0,76ven^2 + 5ven - 46 \quad (6)$$

Para as barras onde foram consideradas a conexão de geradores eólicos, as restrições de igualdade de balanço de potência ativa e reativa são representadas pelas equações (7-8), respectivamente.

$$P_{defig}(x) = (0,76 * ven^2 + 5 * ven - 46) / 100 - P_{Lk} = V_k \sum_{m \in k} V_m (G_{km} \cos \theta_{km} + B_{km} \sin \theta_{km}) \quad (7)$$

$$Q_{defig}(x) = Q_{Gdfig} - Q_{Lk} = V_k \sum_{m \in k} V_m (G_{km} \sin \theta_{km} - B_{km} \cos \theta_{km}) \quad (8)$$

Onde ven : velocidade do vento, em m/s;

$k=1, \dots, N$, sendo N o número de barras;

NL: o número de linhas da rede elétrica;

P_k e Q_k : injeções de potência ativa e reativa na barra k ;

P_{Gk} e Q_{Gk} : gerações de potência ativa e reativa na barra k ;

P_{Lk} e Q_{Lk} : cargas ativa e reativa na barra k ;

Q_k^{sh} : injeção de potência reativa devido ao elemento *shunt* da barra k ;

G_{km} : parte real do elemento da matriz de admitância, correspondente a linha k e a coluna m ;

B_{km} : parte imaginária do elemento da matriz de admitância, correspondente a linha k e a coluna m ;

P_{defig} e Q_{defig} : injeção de potência ativa e reativa na barra com geração eólica.

As restrições de desigualdade $g(x, u) \leq 0$ apresentadas em (1) são representadas: pelo limite de geração de potência reativa, Equação (9); pelos limites de tensão nas barras, Equação (10) e; pelos limites dos *taps* dos transformadores, Equação (11).

$$Q_{G_{\min}} \leq Q_{Gi} \leq Q_{G_{\max}} \quad (9)$$

$Q_{G_{\min}}$ e $Q_{G_{\max}}$ estão limitados pelo fator de potência do gerador DFIG e pela velocidade do vento.

$$V_{k_{\min}} \leq V_k \leq V_{k_{\max}} \quad (10)$$

$$Tap_{k_{\min}} \leq Tap_k \leq Tap_{k_{\max}} \quad (11)$$

Para validar a modelagem anterior foram realizadas simulações considerando os sistemas IEEE de 30 barras [10] e velocidades de vento de 10 m/s e 14 m/s. Os geradores eólicos foram inseridos na barra com maior demanda.

Para cada simulação foram avaliados os ganhos para o sistema no que diz respeito à minimização das perdas de potência ativa e reativa e ao fornecimento de potência reativa a partir dos geradores eólicos.

V. TESTES E RESULTADOS

A. Sistema IEEE 30 Barras

Para o sistema IEEE 30 Barras ilustrado na Figura 7 a geração eólica foi conectada junto à Barra 6.

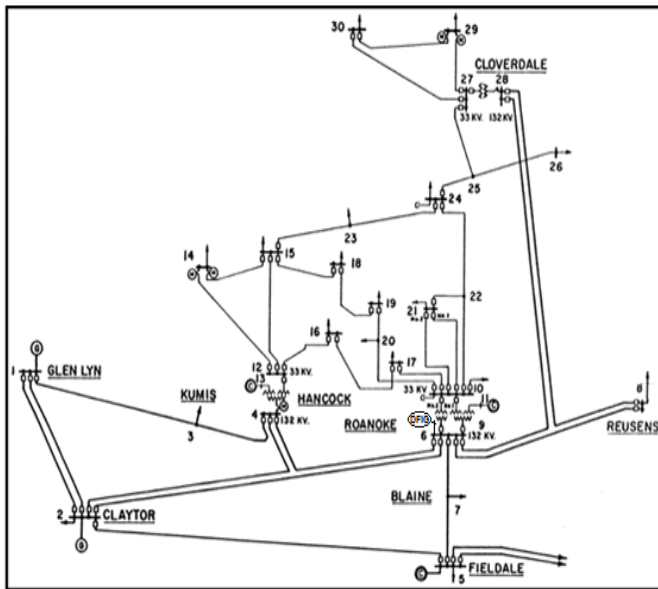


Figura 7: Sistema IEEE 30 Barras [10].

O Caso 1 realizado para o sistema de 30 Barras considerou a incapacidade de suporte de potência reativa por parte do gerador eólico. Para este caso foi considerada uma velocidade de vento igual a 10 m/s. Os resultados da simulação são apresentados na Tabela II.

No Caso 1 as perdas ativas e reativas foram iguais a 7,81 MW e 2,02 MVar, respectivamente. A geração eólica correspondeu a 30,63% da produção de potência ativa total no sistema.

No Caso 2 realizado para o sistema de 30 Barras a simulação foi realizada considerando geradores DFIG com capacidade de operar com fator de potência até 0,95 indutivo ou capacitivo e com velocidade do vento igual a 10 m/s. Essas características representam um ponto de operação intermediário à curva de capacidade ilustrada na Figura 6.

Os resultados obtidos para a simulação proposta são mostrados na Tabela III.

No Caso 2 as perdas ativas e reativas foram iguais a 7,66 MW e 0,83 MVar, respectivamente. A geração eólica foi responsável por 30,64% da produção de potência ativa e por 23,00% da produção de potência reativa total no sistema.

Considerando as simulações anteriores pode-se observar que no Caso 2, em relação ao Caso 1, houve diminuição de 1,85% das perdas de potência ativa e de 58,71% em relação às perdas de potência reativa.

Em seguida foi proposto um terceiro cenário, Caso 3, onde foi considerada a incapacidade de suporte de potência reativa por parte do gerador eólico e velocidade de vento igual a 14 m/s.

TABELA II: RESULTADOS DE SIMULAÇÃO PARA O SISTEMA IEEE 30 BARRAS (VENTO = 10M/S, FP = 1,0)

Barra	V [pu]	Angulo [°]	P Gerado [MW]	Q Gerado [MVar]
1	1,050	0,000	141,21	0,00
2	1,040	-2,979	40,00	31,72
3	1,027	-3,949	0,00	0,00
4	1,021	-4,819	0,00	0,00
5	1,010	-10,054	0,00	35,52
6	1,018	-5,182	80,00	0,00
7	1,007	-7,699	0,00	0,00
8	1,019	-5,282	0,00	0,00
9	1,013	-8,621	0,00	0,00
10	0,992	-10,487	0,00	0,00
11	1,050	-8,621	0,00	18,58
12	1,011	-10,469	0,00	0,00
13	1,043	-10,469	0,00	24,00
14	0,994	-11,344	0,00	0,00
15	0,989	-11,314	0,00	0,00
16	0,996	-10,750	0,00	0,00
17	0,988	-10,813	0,00	0,00
18	0,997	-11,971	0,00	0,00
19	0,974	-11,863	0,00	0,00
20	0,978	-11,581	0,00	0,00
21	0,979	-10,968	0,00	0,00
22	0,980	-10,948	0,00	0,00
23	0,976	-11,475	0,00	0,00
24	0,967	-11,303	0,00	0,00
25	0,973	-10,772	0,00	0,00
26	0,954	-11,231	0,00	0,00
27	0,986	-10,152	0,00	0,00
28	1,014	-5,672	0,00	0,00
29	0,965	-11,479	0,00	0,00
30	0,953	-12,434	0,00	0,00
Total			261,21	109,82
P Lose [MW]				7,809
Q Lose [MVar]				2,023

No Caso 3 as perdas ativas e reativas foram iguais a 4,97 MW e 9,47 MVar, respectivamente. Para o Caso 3, a geração eólica correspondeu a 66,94% da potência ativa produzida no sistema.

No caso 4, a simulação foi realizada considerando geradores DFIG com capacidade de operar com fator de potência até 0,95 indutivo ou capacitivo e com velocidade do vento igual a 14 m/s. No caso 4, as perdas ativas e reativas foram iguais a 4,78 MW e 10,30 MVar, respectivamente. A geração eólica correspondeu a 66,99% da produção de potência ativa e a 35,88% da produção de potência reativa total no sistema.

Considerando as simulações anteriores pode-se observar que no Caso 4, em relação ao Caso 3, houve diminuição de 3,80% das perdas de potência ativa e um aumento de 8,77 % em relação às perdas de potência reativa.

Ainda em relação aos resultados obtidos, observou-se uma significativa diminuição das perdas de potência ativa do sistema contribuindo economicamente para a operação da rede elétrica. Essa economia foi alcançada quando comparada a possibilidade de suporte de potência reativa por parte dos geradores eólicos em relação à falta de capacidade dos mesmos.

TABELA III: RESULTADOS DE SIMULAÇÃO PARA O SISTEMA IEEE 30
BARRAS (VENTO = 10M/S, FP = 0,95)

Barra	V [pu]	Angulo [°]	P Gerado [MW]	Q Gerado [MVar]
1	1,050	0,000	141,07	0,00
2	1,041	-2,981	40,00	21,86
3	1,033	-4,040	0,00	0,00
4	1,029	-4,932	0,00	0,00
5	1,013	-10,007	0,00	31,21
6	1,031	-5,366	80,00	26,29
7	1,016	-7,778	0,00	0,00
8	1,031	-5,465	0,00	0,00
9	1,019	-8,743	0,00	0,00
10	0,999	-10,585	0,00	0,00
11	1,050	-8,743	0,00	15,51
12	1,013	-10,488	0,00	0,00
13	1,039	-10,488	0,00	19,43
14	0,997	-11,362	0,00	0,00
15	0,992	-11,350	0,00	0,00
16	0,999	-10,809	0,00	0,00
17	0,993	-10,893	0,00	0,00
18	0,950	-10,842	0,00	0,00
19	0,979	-11,924	0,00	0,00
20	0,983	-11,651	0,00	0,00
21	0,985	-11,057	0,00	0,00
22	0,986	-11,037	0,00	0,00
23	0,980	-11,526	0,00	0,00
24	0,973	-11,379	0,00	0,00
25	0,982	-10,877	0,00	0,00
26	0,963	-11,328	0,00	0,00
27	0,996	-10,279	0,00	0,00
28	1,025	-5,847	0,00	0,00
29	0,975	-11,579	0,00	0,00
30	0,964	-12,514	0,00	0,00
Total			261,07	114,30
Perdas P [MW]				7,665
Perdas Q [MVar]				0,834

VI. CONCLUSÕES

O presente trabalho apresentou a formulação de um fluxo de potência ótimo com o objetivo de analisar a capacidade de suprimento de potência reativa a partir de um conjunto de geradores eólicos, verificando a colaboração a colaboração do provimento deste serviço ancilar para a diminuição das perdas ativas e reativas nas redes elétricas.

Para tanto foi considerado a análise de um conjunto de geradores eólicos DFIG (*Doubly Fed Induction Generator*) com fator de potência podendo variar até o limite de 0,95 indutivo ou capacitivo em comparação com um conjunto de geradores eólicos DFIG sem capacidade de suporte de potência reativa.

Em todos os casos simulados é possível verificar o atendimento às restrições técnicas impostas aos sistemas elétricos e a diminuição das perdas de potência ativa quando considerada a possibilidade de provimento de potência reativa a partir dos geradores eólicos. Ademais, a diminuição das perdas de potência ativa do sistema contribui economicamente para a operação da rede elétrica.

Nesse sentido, a partir dos resultados apresentados, verifica-se a viabilidade técnica e econômica do suporte de potência reativa a partir de geradores eólicos como prestadores de serviços ancilares.

REFERÊNCIAS

- [1] F. Alsokhry, G. P. Adam, K. L. Lo, "Contribution of Distributed Generation to Ancillary Services," *Universities Power Engineering Conference (UPEC)*, London, United Kingdom, Set, 2012.
- [2] F. Alsokhry, K. L. Lo, "Provision of Reactive Power Support Ancillary Services from Distributed Generation based on Renewable Energy," *Renewable Energy Research and Applications (ICRERA)*, IEEE, Madrid, Spain, Out, 2013.
- [3] N.R.Ullah, "Wind Farms as Reactive Power Ancillary Service Providers Technical and economic issues," *IEEE Transactions on Energy Conversion*, Vol. 24, Set. 2009.
- [4] D. F. Olipa, A. M. Zeynu, I. A. Hiskens, "Wind Farm Reactive Support and Voltage Control," *Symposium – Bulk Power System Dynamics and Control – VIII (IREP)*, Buzios, Rio de Janeiro, Brasil, Ago., 2010.
- [5] I. Erlich, M. Wilch, C. Feltes, "Reactive power generation by DFIG based wind farms with AC grid connection," *IEEE, Power Electronics and Applications, European Conference, Aalborg, Set, 2007*.
- [6] L. Xie, H. D. Chiang, S. H. Li, "Optimal power flow calculation of power system with wind farms," *Power and Energy Society General Meeting 2011, IEEE*, 2011.
- [7] W. Li, C. Abbey, G. Joos, "Control and Performance of Wind Turbine Generators based on Permanent Magnet Synchronous Machines Feeding a Diode Rectifier," *Power Electronics Specialists Conference, 37th IEEE, Jeju*, 2006.
- [8] X. Lie, P. Cartwright, "Direct active and reactive power control of DFIG for wind energy generation," *Energy Conversion, International Journal of Innovative Research in Electrical Electronics, Instrumentation and Control Engineering*, Vol. 3, Issue 5, May 2015.
- [9] E. A. Belati, A. J. Sguarezi, M. B. C. Salles, "Analysis of Reactive Power Capability for Doubly-Fed Induction Generator of Wind Energy Systems Using an Optimal Reactive Power flow," *Material and processes for energy: Communicating current research and technological developments*, 2013.
- [10] University of Washington Electrical Engineering "Power Systems Test Case Archive" [Online]. Available: <https://www.ee.washington.edu/research/pstca/>