



ANÁLISE DE SISTEMAS ELÉTRICOS CONSIDERANDO GERADORES EÓLICOS E DISPOSITIVOS SVC VIA FLUXO DE POTÊNCIA ÓTIMO

Paula Andrea Osorio Molina
paula.andrea@ufabc.edu.br

Luis Miguel Monroy
miguel.monroy@ufabc.edu.br

Edmarcio Antonio Belati
edmarcio.belati@ufabc.edu.br

Joel David Melo Trujillo
joel.melo@ufabc.edu.br

Universidade Federal do ABC
Avenida dos Estados, 5001 - CEP: 09210-580 - Santo André / SP - Brasil

RESUMO

Este artigo apresenta uma metodologia de Fluxo de Potência Ótimo (FPO) para sistemas de transmissão com geradores eólicos do tipo DFIG (*Doubly-Fed Induction Generator*) e dispositivos SVC (*Static VAR Compensator*) para a injeção ou compensação de potência reativa. O FPO desenvolvido e implementado realiza o despacho ótimo da potência reativa das unidades de geração e o controle ótimo dos taps dos transformadores com o objetivo de minimizar o desvio da tensão nas barras do sistema. O modelo é aplicado no sistema teste IEEE de 118 barras modificado pela instalação de um parque eólico e SVC. Foi utilizada uma análise de sensibilidade para escolha dos locais de instalações dos SVC e do parque. Os resultados comprovam a eficácia da modelagem e as vantagens de otimizar a rede utilizando DFIG e SVC. A modelagem é realizada em ambiente de programação AMPL (*Modeling Language for Mathematical Programming*) e o pacote de otimização *Knitro*.

PALAVRAS CHAVE. Fluxo de potência ótimo, geradores eólicos, SVC.
Tópicos. EN - PO na área de energia.

ABSTRACT

This paper presents an Optimal Power Flow (OPF) methodology for transmission systems with DFIG (Doubly-Fed Induction Generator) wind generators and SVC (Static VAR Compensator) devices for injection or compensation of reactive power. A developed and implemented FPO carries out the optimal dispatch of the reactive power of the generation units and the taps' optimal control in transformers in order to minimize the voltage deviation in the buses of the system. The model is applied to the IEEE test system of 118 bars modified by the installation of a wind farm and SVC. A sensitivity analysis was implemented to select the site locations of the SVC and the wind farm. The results reveal the effectiveness of the modeling and the advantages of optimizing the network by using DFIG and SVC. The modeling is carried out in the AMPL (Modeling Language for Mathematical Programming) programming environment and the Knitro optimization package.

KEYWORDS. Optimal power flow, wind turbines, SVC.
Paper topics. EN - OR in energy.



1. Introdução

O crescimento da demanda aliada à capacidade de geração e transmissão cada vez mais limitada faz com que os problemas na operação e expansão dos sistemas elétricos se tornem cada vez mais complexos. Um desses problemas é o gerenciamento da potência reativa para manutenção do perfil de tensão. Outro problema é a alta penetração de fontes intermitentes na rede, como a eólica, que trazem novos desafios no despacho de unidades de geração para o fornecimento da demanda elétrica. Em situação de contingência, a não resolução dos problemas supracitados de uma forma adequada pode levar a um colapso do sistema elétrico.

Desta forma, o controle da potência reativa em sistema com fontes eólicas é de fundamental importância para a manutenção da tensão. Esse controle pode ser realizado pelos dispositivos SVC (*Static VAR Compensator*) [Abdulrazzaq et al. 2014]. Para que esses benefícios sejam maximizados, técnicas de otimização podem ser utilizadas, como, por exemplo, o Fluxo de Potência Ótimo (FPO) que determina o ponto de operação ótimo dos sistemas elétricos, considerando as restrições rede.

Nos últimos anos, a geração de energia utilizando fontes renováveis intermitentes têm aumentado consideravelmente, sendo a energia eólica uma das quais tem ganhado maior presença [ANNEL 2016]. No entanto, a sua utilização tem um problema fundamental a intermitência do vento, que provoca alterações na potência gerada pelos sistemas eólicos, podendo comprometer o perfil da tensão da rede devido às limitações de geração de potência reativa em determinadas condições de operação da rede, como exemplo em situações de carga elevada.

Em geral, uma unidade de geração eólica moderna tem a capacidade para produzir entre um e três MW de potência ativa, empregando turbina eólica com eixo horizontal [Heier 2006]. Diversas dessas unidades operando de forma conjunta constituem um parque eólico, podendo alcançar mais de 100 MW de potência instalada.

Alguns estudos [Lie e Cartwright 2006], [Sguarezi et al. 2011] apresentam técnicas de controle de potência ativa e reativa para o DFIG (*Doubly-Fed Induction Generator*) o que possibilita a operação com fator de potência diferente de um, contribuindo para a manutenção do perfil de tensão devido a disponibilidade de potência reativa do gerador. Os trabalhos [Lund et al. 2007], [Engelhardt et al. 2011] apresentam estudos relacionados à capacidade de aerogeradores operarem com fator de potência diferente da unidade, neste caso com fator de potência de 0,9, limitado devido à potência suportada pelo conversor conectado ao DFIG. Essa limitação de potência reativa, agravada em situações de ventos com baixa velocidade, ou diferentes níveis de carga, pode ser superada com controladores FACTS (*Flexible AC Transmission Systems*) conectados ao sistema e com auxílio de ferramentas computacionais dedicadas à operação Sistemas Elétricos de Potência (SEP's).

O dispositivo SVC (do inglês *Static VAR Compensator*) se comporta como uma reatância variável conectada em paralelo, com o objetivo principal de absorver ou injetar potência reativa e controlar o perfil da tensão [Acha et al. 2002]. O SVC é um conjunto de dispositivos elétricos e eletrônicos que garantam a disponibilidade de potência reativa nas redes dos sistemas elétricos.

O fluxo de potência ótimo (FPO) [Baptista et al 2006] é uma das ferramentas para análises de SEP's, que encontra um ponto de operação ótima, a partir de uma função específica e satisfazendo as restrições operacionais e físicas da rede elétrica. Os modelos matemáticos para resolver o problema de FPO envolvem não linearidades e não convexidades, restrições, variáveis discretas e/ou inteiras, tornando-se em um problema de difícil solução que tem chamado atenção de diversos pesquisadores. A solução do FPO não é trivial, demandando conhecimento em Programação Não Linear (PNL) associada aos métodos de solução, como, por exemplo, métodos de Pontos Interiores e Métodos de Penalidade.

Deste modo a grande contribuição deste trabalho é centrada na operação otimizada da rede, implementando um FPO reativo descrito no item 3, com função de minimização do desvio da tensão. A fim de mostrar da utilidade da proposta, um sistema será analisando, considerando uma condição de carga pesada que garanta a operação em condições difíceis de máximo carregamento. Nas análises desse sistema, considerou-se diferentes cenários para a alocação de



dispositivos SVC, com o intuito de atingir os limites ou restrições operacionais do sistema, mitigando os desvios da tensão e disponibilizando potência reativa no sistema para condições de alto carregamento.

A metodologia proposta é testada no sistema IEEE de 118 Barras e a modelagem é realizada em ambiente de programação AMPL (*Modeling Language for Mathematical Programming*) e utiliza o solucionador Knitro.

2. Fluxo de potência ótimo

O FPO calcula um conjunto de variáveis ótimas de estado da rede, a partir de dados de carga e dos parâmetros do sistema. O problema de FPO encontra um ponto de operação ótimo para uma função objetivo de interesse, satisfazendo as restrições dos elementos rede elétrica correspondentes às restrições de igualdade e desigualdade [Baptista et al 2006], [Oliveira et al 2015]. As restrições de igualdade representam os balanços de potência nas barras do sistema e as restrições de desigualdade, as restrições de operação dos sistemas de transmissão.

No conjunto de equações (1), apresenta-se a formulação matemática geral do FPO.

Minimizar $f(x, u)$

sujeito a:

$$g_i(x, u) = 0 \quad i = 1, \dots, m \quad (1)$$

$$h_j(x, u) = 0 \quad j = 1, \dots, r$$

$$x^{min} \leq x \leq x^{max}$$

Em que:

$f(x, u)$ função objetivo que representa o desempenho do sistema;

$g_i(x, u)$ vetor das equações do fluxo de potência;

$h_i(x, u)$ vetor das restrições funcionais do fluxo de potência;

x^{min} e x^{max} limites inferiores e superiores das variáveis x respectivamente;

$x \in \mathbb{R}^n$ vetor de n variáveis de estado;

$u \in \mathbb{R}^m$ vetor de m variáveis de controle.

Na formulação proposta, as variáveis de controle são aquelas cujos valores podem ser ajustados, como a potência reativa nas barras de tensão controlada e dispositivos SVC e posições dos taps dos transformadores; por outro lado as variáveis de estado são aquelas que descrevem as variações pela participação das variáveis de controle, e dependem das limitações físicas dos equipamentos ou da operação do sistema, como a potência reativa nas barras de tensão controlada, potência ativa e reativa na barra slack, entre outros.

3. Aplicação da metodologia

A fim de garantir a operação econômica do sistema, neste trabalho utiliza-se o FPO reativo, que é um caso particular do problema de FPO. Nele as variáveis relacionadas à potência ativa são fixadas e a otimização é realizada considerando as variáveis relacionadas à potência reativa. Assim, determina-se a função de minimização do desvio da tensão. A equação geral para descrever a função é definida na equação (2), a seguir:



$$f(x) = \sum_{k=1}^N (V_k - V_o)^2 \quad (2)$$

Em que:

- V_k magnitude da tensão da barra k ;
- V_o tensão de referência;
- N número de barras do sistema.

O procedimento consiste na otimização e operação confiável dos sistemas elétricos de potência, com a ajuda de ferramentas computacionais adequadas para a análise dos sistemas. Assim, procura-se encontrar a operação ótima do sistema incluindo geração eólica e o dispositivo SVC. A seguir é explicada a modelagem matemática das características operacionais com seus respectivos parâmetros que foram inseridos no FPO proposto.

3.1. Gerador eólico DFIG

Para a modelagem das características do gerador eólico DFIG é importante conhecer alguns de seus parâmetros e características técnicas.

Com base na modelagem feita da curva do vento de um aerogerador DFIG por [López et al 2014], procedeu-se a implementá-la, levando em conta que consiste numa aproximação da função de injeção de potência ativa, representada na equação (3)

$$P_{GW} = -0,0146591v^6 + 0,82061v^5 - 18,725v^4 + 222,48v^3 - 1447v^2 + 4883v - 6673,3 \quad (3)$$

Em que:

- P_{GW} potência ativa gerada pelo gerador eólico;
- v velocidade do vento na faixa de operação.

Consequentemente, o polinômio de disponibilidade de potência reativa tem a relação apresentada na equação (4),

$$Q_{GW} = P_{GW} \operatorname{tg}[\cos^{-1}(fp)] \quad (4)$$

Em que:

- Q_{GW} potência reativa fornecida pelo gerador eólico;
- P_{GW} potência ativa gerada pelo gerador eólico;
- fp fator de potência.

Portanto, o polinômio para a disponibilidade de potências reativas com fp de 0,95 é o correspondente à equação (5),

$$Q_{GW} = 0.328684 (-0.014659v^6 + 0.82061v^5 - 18.725v^4 + 222.48v^3 - 1447v^2 + 4883v - 6673.3) \quad (5)$$



Assim, os polinômios das equações (3) e (5) são utilizados na modelagem computacional do FPO.

3.2. Dispositivo SVC

O SVC é um dispositivo de regulação de tensão que gera ou absorve potência reativa podendo ser modelado como uma susceptância equivalente variável. Na prática, o SVC é considerado como uma reatância ajustável com valores-limite do ângulo de disparo ou limites na reatância.

A susceptância total do SVC será determinada pelas susceptâncias equivalentes paralelas dos módulos controlados separadamente. Dessa forma o SVC pode ser modelado como uma susceptância variável conectado em paralelo com o sistema. Essa susceptância terá um limite inferior (B_{SVCmin}) e um limite máximo (B_{SVCmax}). Nas equações de fluxo de potência este é contabilizado através da inclusão da potência reativa.

Potência fornecida pelo SVC para o sistema:

$$Q_{SVC} = V_k^2 \times B_{SVC} \quad (6)$$

Em que:

- Q_{SVC} potência reativa fornecida pelo SVC para o sistema;
- V_k tensão na barra de conexão do SVC;
- B_{SVC} susceptância equivalente do SVC.

3.3. Restrições de igualdade do FPO

As restrições de igualdade $g(x)$ do FPO consistem nas equações de balanço de carga e geração da rede elétrica, para as potências ativas e reativas em cada nó da rede.

A equação que representa o balanço de potência ativa em termos da potência gerada e a potência da carga, é dada por (7)

$$P_k(x) = (P_{Gk} + P_{GW}) - P_{Lk} = V_k \sum_{m \in K} V_m (G_{km} \cos \theta_{km} + B_{km} \sin \theta_{km}) \quad (7)$$

Em que:

- P_k injeção líquida da potência ativa na barra k ;
- P_{Gk} geração de potência ativa na barra k ;
- P_{GW} geração de potência ativa do gerador eólico;
- P_{Lk} carga ativa na barra k ;
- G_{km} condutância da linha entre as barras k e m ;
- B_{km} susceptância da linha entre as barras k e m ;
- K conjunto de todas as barras m adjacentes à barra k , incluindo a própria barra k .

A equação que representa o balanço de potência reativa em termos da potência gerada e a potência da carga é dada por (8)



$$Q_k(x) = (Q_{Gk} + Q_{GW}) - Q_{Lk} + Q_k^{sh} = V_k \sum_{m \in K} V_m (G_{km} \sin \theta_{km} - B_{km} \cos \theta_{km}) \quad (8)$$

Em que:

- Q_k injeção líquida da potência reativa na barra k ;
- Q_{Gk} geração de potência reativa na barra k ;
- Q_{Lk} carga reativa na barra k ;
- Q_k^{sh} injeção de potência reativa devido ao elemento *shunt* da barra k .

3.4. Restrições de desigualdade do FPO

As restrições de desigualdade $h(x)$ representam os limites das variáveis do sistema, relacionadas com as capacidades dos componentes, limites operacionais, segurança de operação da rede elétrica ou restrições de operação.

Módulo da tensão: define os limites mínimos e máximos das tensões às quais o sistema deverá operar.

$$V_{kmin} \leq V_k \leq V_{kmax} \quad (9)$$

Potência reativa gerada: estabelece a quantidade máxima de potências reativas geradas pelos geradores das barras PV e a barra Slack.

$$Q_{Gkmin} \leq Q_{Gk} \leq Q_{Gkmax} \quad (10)$$

Limites do dispositivo SVC: define o limite inferior e o limite máximo da susceptância fornecida pelo equipamento SVC ao sistema de potência.

$$B_{SVCmin} \leq B_{SVC} \leq B_{SVCmax} \quad (11)$$

Limites de injeção de potência reativa nas barras com geração eólica: são os limites inferior e superior da potência reativa disponível no aerogerador para cada velocidade do vento, os quais devem ser satisfeitos na solução do FPO.

$$Q_{Gwmin} \leq Q_{Gw} \leq Q_{Gwmax} \quad (12)$$

4. Modelagem Computacional

A *Modeling Language for Mathematical Programming* (AMPL) [Ampl 2016] oferece um ambiente com linguagem de programação simples para configurar e solucionar problemas de programação matemática. A interface flexível e amigável permite a utilização dos mais diversos *solvers*, disponibilizando todos de uma vez, através de uma mesma programação, para que o usuário possa alternar entre eles e selecionar as opções que podem melhorar o desempenho do programa.

O *Knitro* [Artelys 2016] é uma biblioteca de programas (pacote de solucionadores – *solvers*) de otimização para encontrar soluções tanto para modelos de otimização contínua (com ou sem restrições), bem como modelos de otimização discreta com inteiros ou variáveis binárias. O *Knitro* é projetado principalmente para encontrar soluções locais de grande escala em problemas não lineares, objetivo desta pesquisa.



O pacote utiliza três métodos na solução dos problemas: dois algoritmos do tipo ponto interior, o algoritmo de CG (Gradiente Conjugado) e o algoritmo *Direct*; e um do tipo conjunto ativo (*Active-Set*), entre os quais se adapta para cada necessidade de programação na solução.

Assim, para o caso do trabalho, a escolha do método de solução do FPO é feita automaticamente pelo programa computacional, sabendo que ele testa todas as possibilidades para determinar a solução ótima.

5. Testes e resultados

A aplicação da metodologia foi feita no sistema IEEE de 118 barras [UWEE. 1993] com diferentes condições de operação. Para o FPO, foram estabelecidos os limites de tensão entre 0,95 e 1,05 [p.u], a tensão de referência para o desvio da tensão, V_o , foi definido em 1,0 [p.u].

Nos resultados obtidos, garantiram-se o despacho ótimo da potência reativa das unidades de geração e o controle ótimo dos taps dos transformadores, segundo as especificações da metodologia.

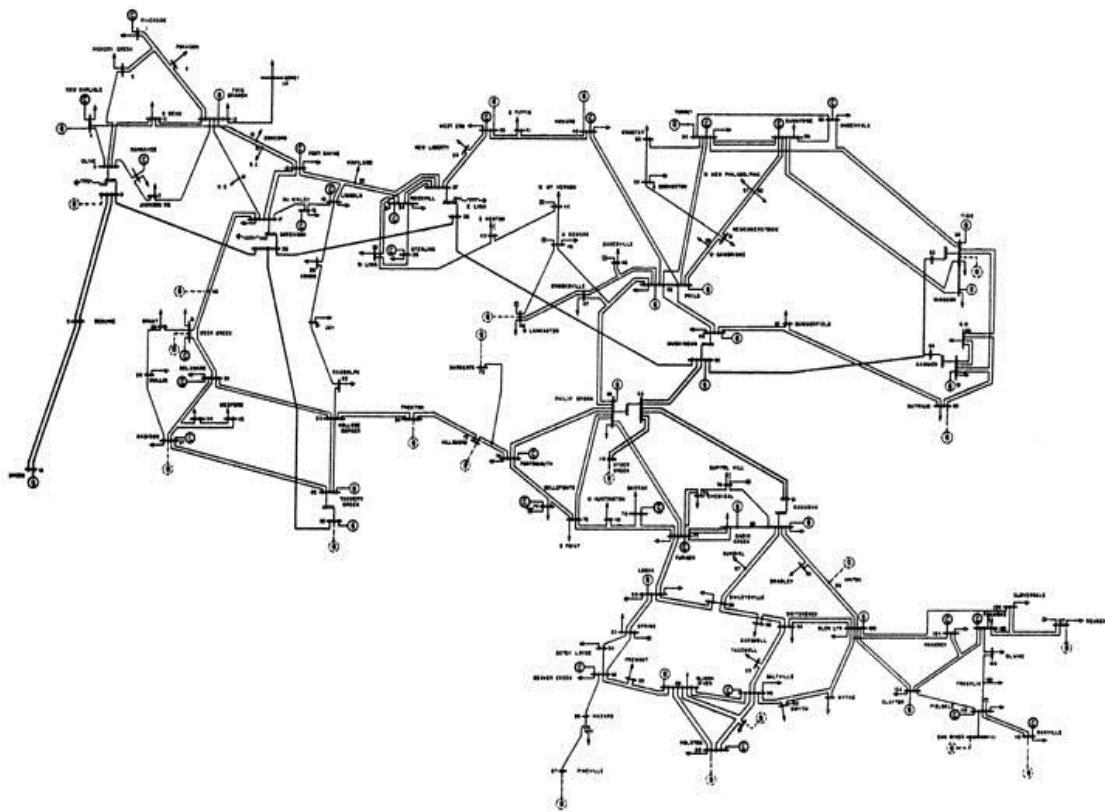


Figura 1. Sistema teste IEEE 118 barras

Nos sistemas elétricos de potência apresentam-se diferentes condições de operação. Para a análise da aplicação foi considerada uma situação de carga pesada no sistema teste, com o intuito de determinar as grandes vantagens da utilização dos dispositivos para garantir a operação ótima mesmo em condições de carregamento máximo. Assim a carga foi determinada em 127% da carga nominal do sistema. Este é o carregamento máximo que o sistema suporta sem a inclusão do parque eólico e dos dispositivos SVC.



Para garantir a operação adequada do sistema propõe-se comparar o funcionamento ótimo do sistema com gerador eólico DFIG e com gerador eólico DFIG mais dispositivo SVC; porém analisou-se também a barra com melhores condições para a alocação do parque eólico, levando em conta que a alocação não é o foco do trabalho, mas sim, um bom indicador para ter o ponto base para a análise. Segundo [Belati 2010], é possível utilizar as informações dos multiplicadores de Lagrange representados pela letra lambda (λ) para realizar a alocação baseado nas perdas de potência do sistema, assim a barra com o menor valor do multiplicador de Lagrange foi escolhida para a alocação do parque eólico. Assim, na Tabela 1 apresentam-se os menores valores dos multiplicadores de Lagrange obtidos para o sistema inicial, considerando a função objetivo proposta, apontando para a barra 118.

Tabela 1. Multiplicadores de Lagrange obtidos para a alocação do parque eólico.

λ (P)	Barra
-1,04482169	118
-0,78925903	76
-0,54382378	75
-0,30168990	71
-0,28041348	74

Assim, com o parque eólico instalado na barra 118 (inserindo na modelagem do programa as características descritas no item 3.1), analisou-se o comportamento do sistema para uma velocidade média de 10 m/s considerando a faixa de operação do DFIG modelado que estão entre 6 m/s e 14 m/s.

Os resultados do desvio de tensão para os dois cenários apresentados são mostrados na Figura 2.

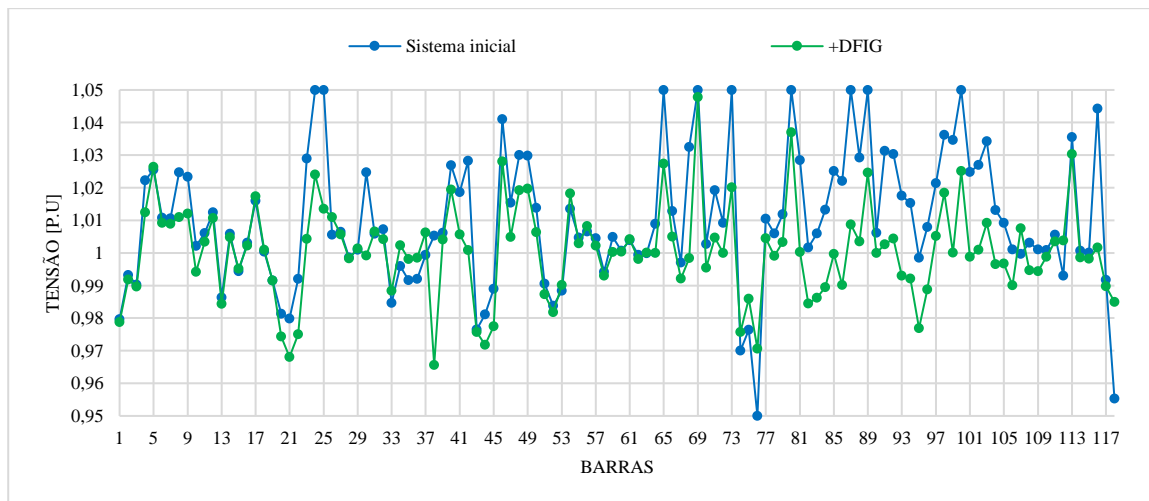


Figura 2. Resultados do FPO para o desvio de tensão alocação do gerador eólico.

O sistema inicial considera a configuração de máximo carregamento do sistema teste. Já o sistema + DFIG considera a mesma configuração mais o gerador eólico na barra 118. A curva do desvio da tensão para o sistema inicial e o sistema + DFIG são representadas por cores azul e verde, respectivamente. Nessa figura, observa-se a melhora do perfil de tensão quando é inserido o parque eólico no sistema, ficando mais longe dos limites de tensão, evidenciando a eficácia da modelagem. Antes de ser inserido o parque eólico muitas tensões estavam no limite superior.



No entanto, o perfil de tensão obtido com o parque eólico pode ser melhorado com a inclusão de mais potência reativa no sistema, visto que o gerador DFIG é limitado na geração desta potência. Assim, é proposto a utilização de dispositivos SVC.

Para determinar a possível alocação dos dispositivos SVC, utilizou-se a mesma metodologia de sensibilidade empregada para a alocação do parque eólico, mas agora considerando os multiplicadores de Lagrange que relacionam a potência reativa, por conseguinte são consideradas unicamente as barras de carga. Realizou-se a análise inicialmente para um dispositivo SVC, obtendo os resultados da Tabela 2.a, que mostram como mais indicada a barra 21.

Posteriormente, com o primeiro SVC já conectado na rede, decidiu-se alocar mais um dispositivo SVC no sistema fazendo a análise novamente e obtendo agora os resultados da Tabela 2.b que dão como barra indicada a barra 44.

Tabela 2. Multiplicadores de Lagrange obtidos para a alocação dos dispositivos SVC

λ (Q)	Barra
-0,01977583	21
-0,01670710	20
-0,01637500	22
-0,01465024	44
-0,01416840	43

a. Primeiro dispositivo SVC

λ (Q)	Barra
-0,01461246	44
-0,01387325	43
-0,00906813	45
-0,00609719	52
-0,00571243	75

b. Segundo dispositivo SVC

Para cada um desses casos, foi obtido o FPO com o intuito de comparar a influência de cada dispositivo no sistema. A implementação é feita utilizando os limites mínimos e máximos da susceptância do SVC; esses valores são projetados segundo as necessidades do sistema. Analisando dispositivos SVC instalados atualmente em diversos países do mundo como no caso do sistema brasileiro na subestação Extremoz localizada em Natal/RN que conta com limites de -75 e +150 MVar [ABB 2013] ou o sistema peruano na subestação cerro verde localizada em Arequipa com limites de -105 e +350 MVar [Siemens 2013], foi escolhido o valor mínimo igual a -5,0 [p.u] e o valor máximo igual a 5,0 [p.u], e dessa forma garante-se o objetivo de disponibilidade de potência reativa no sistema.

Outra possibilidade para instalação dos dispositivos SVC é utilizar as informações relacionadas com as barras que tem compensadores estáticos instalados. No sistema teste encontram-se 14 barras com injeção de potência reativa através de compensadores estáticos alocados nelas; as barras nas quais estão alocados os compensadores são as barras 5, 34, 37, 44, 45, 46, 48, 74, 79, 82, 83, 105, 107 e 110. Assim, com o intuito de ter maior controle e disponibilidade de potência reativa são substituídos os compensadores do sistema, pelos dispositivos SVC. A implementação é feita substituindo os compensadores estáticos por dispositivos SVC com a mesma capacidade dos dispositivos anteriores, dessa forma garante-se o objetivo de disponibilidade de potência reativa no sistema completo.

Na Figura 3, mostra-se a comparação do perfil dos desvios de tensão para o sistema com o gerador eólico funcionando à velocidade de 10 m/s mais: um dispositivo SVC, dois dispositivos SVC e todos os dispositivos que substituíram os compensadores estáticos.

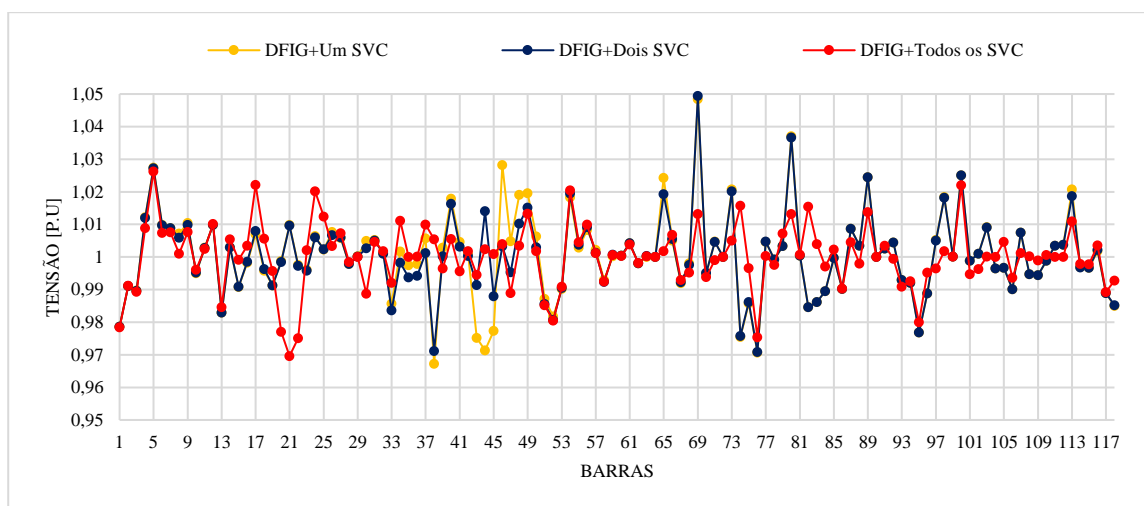


Figura 3. Resultados do FPO para o desvio de tensão alocação de SVC

Quanto maiores disponibilidades de reativos, melhores as condições de operação do sistema e consequentemente seu perfil de tensão melhora consideravelmente, como é possível observar nos resultados do FPO modelado mostrados na Figura 3.

Finalmente, para a análise dos resultados, confrontam-se os desvios de tensão para o sistema inicial, o sistema com DFIG e o sistema com DFIG mais todos os dispositivos SVC definidos.

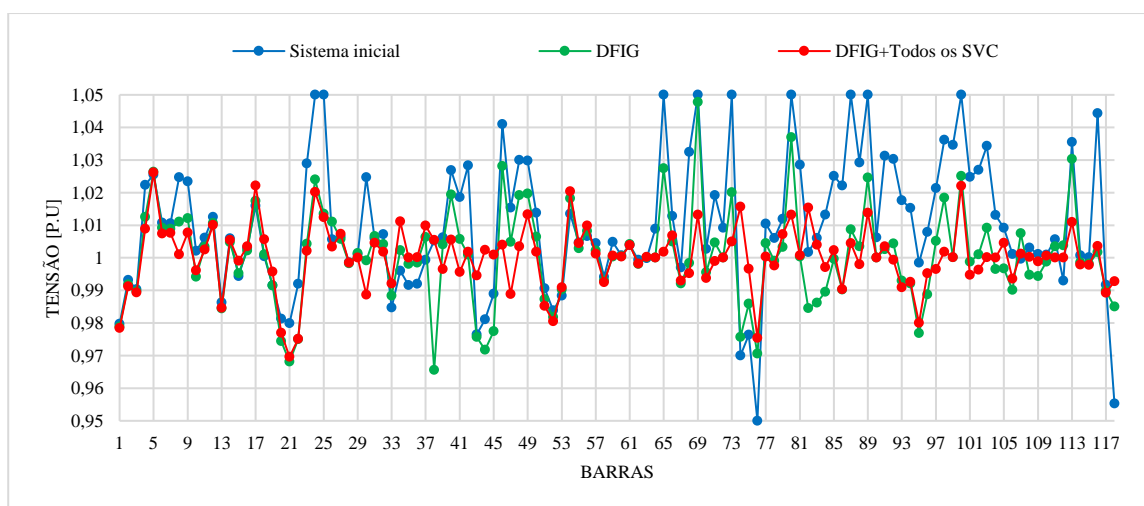


Figura 4. Resultados do FPO para o desvio de tensão final

O perfil de tensão para a configuração do sistema com o DFIG+SVC apresenta uma melhoria considerável em relação ao sistema com o DFIG unicamente, comprovando assim a melhoria no perfil da tensão para os sistemas elétricos em relação à utilização dos dispositivos SVC em conjunto com os geradores eólicos neste estudo do tipo DFIG.



6. Conclusões

Neste trabalho foi apresentada a modelagem do fluxo de potência ótimo reativo, considerando uma função de minimização do desvio de tensão. Para o teste dessa modelagem, utilizou-se um sistema teste IEEE 118 barras. Os resultados mostram que o fluxo de potência proposto obtém respostas ótimas para o ponto de operação do sistema.

Na modelagem desenvolvida, foi utilizado um polinômio para caracterizar a curva de potência ativa e reativa do gerador DFIG, fazendo com que o algoritmo responda para qualquer entrada de vento em sua faixa de operação. Neste estudo somente a velocidade do vento de 10 m/s foi analisada.

A instalação de dispositivos de controle de potência reativa como o dispositivo SVC, em sistemas com presença de geradores eólicos, aporta uma melhora importante na operação do sistema, garantindo a disponibilidade de potência reativa no sistema com diferentes condições de operação.

A utilização do fluxo de potência ótimo mostra eficientes resultados na otimização do problema, considerando que é importante levar em conta o controle da tensão.

A metodologia empregada cumpre com as especificações necessárias para a operação dos sistemas e ajuda a impulsionar a evolução na melhora dos sistemas com energias alternativas como no caso a energia eólica.

Agradecimentos

Os autores agradecem à Universidade Federal do ABC (UFABC) ao CNPq (Processo: 432423/2016-8) e à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP).

Referências

ABB. (2013). SVC for integration of wind power into a 230 kV grid. Web page. <http://new.abb.com/facts/references/reference-extremoz>. Acessado: 2017-06-16.

Abdulrazzaq, A. A., Eremia, M., and Toma, L. (2014). Power System Performance Improvement by using an SVC Device. International Symposium on Fundamentals of Electrical Engineering.

Acha, E., Agelidis, V. G., Anaya-Lara, O., and T. Miller. (2002). Power Electronic Control in Electrical Systems, 1st ed. London, England: Newnes.

Ampl.com. (2016). AMPL - streamlined modeling for real optimization. Web page. <http://ampl.com/>. Acessado: 2017-03-16.

ANEEL. (2016). Energia Eólica. Web page. [http://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/atlas/pdf/06-energia_eolica\(3\).pdf](http://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/atlas/pdf/06-energia_eolica(3).pdf). Acessado: 2017-03-16.

Artelys.com. (2016). Optimization solutions - Artelys Knitro - Nonlinear optimization solver. Web page. <https://www.artelys.com/en/optimization-tools/knitro>. Acessado: 2017-03-16.

Baptista, E. C., Belati, E. A., Sousa, V. A., and Da Costa, G. R. M. (2006). Primal-Dual Logarithmic Barrier and Augmented Lagrangian Function to the Loss Minimization in Power Systems. *Electric Power Components and Systems*, vol. 34, pp. 775-784, 2006/06/01.



Belati, E. A., de Souza, A. M., and da Costa, G. R. M. (2010). Influence of the Operational Constraint in the Active Transmission Losses Allocation Via Lagrange Multipliers. *IEEE Latin America Transactions*, 8(1), 58–64.

Engelhardt, S., Erlich, I., Feltes, C., Kretschmann, J., and Shewarega, F. (2011). Reactive Power Capability of Wind Turbines Based on Doubly Fed Induction Generators. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 26, pp. 364-372.

Heier, S. (2006). *Grid Integration of Wind Energy Conversion Systems* 2ed. Wiley.

Lie, X., and Cartwright, P. (2006). Direct active and reactive power control of DFIG for wind energy generation. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 21, pp. 750-758.

Lopez, G. A., Belati, E. A., Sguarezi Filho, A. J. (2014). Flujo de potência óptimo multiobjetivo para el análisis de sistemas de potencia con generación eólica. *Revista Energética*; núm. 44, pp 41-47.

Lund, T., Sørensen, P., and Eek, J. (2007). Reactive power capability of a wind turbine with doubly fed induction generator. *Wind Energy*, vol. 10, pp. 379-394.

Oliveira, E. J., Oliveira, L. W., Pereira, J. L. R., Honório, L. M., Silva, I. C., & Marcato, A. L. M. (2015). An optimal power flow based on safety barrier interior point method. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 64, 977–985.

Sguarezi Filho, A. J., de Oliveira Filho, M. E., and Filho, E. R. (2011). A Predictive Power Control for Wind Energy. *IEEE Transactions on Sustainable Energy* vol. 2, pp. 97-105.

Siemens. (2013). Sistemas de transmisión en alta tensión estables y confiables basados en soluciones FACTS de Siemens. Web page. <https://www.energy.siemens.com/co/pool/co/publicaciones/energia-en-movimiento/mayo%202013/6-Facts-en-Peru.pdf>. Acessado: 2017-06-16.

UWEE. (1993). Power Systems Test Case Archive. Web page. <http://www2.ee.washington.edu/research/pstca/>. Acessado: 2017-04-04.