

Estudo de Perfil de Tensão dos Sistemas de Distribuição e Transmissão de Energia Elétrica via Análise de Sensibilidade

William M. da Rosa, Priscila Rossoni, Julio C. Teixeira e Edmarcio A. Belati

*Universidade Federal do ABC, Santo André, SP
Brasil (Tel: 303-555-5555; e-mail: julio.teixeira@ufabc.edu.br).*

Resumo: Este artigo apresenta os resultados obtidos através do estudo de nível de tensão dos sistemas de distribuição e transmissão de energia elétrica para operação em tempo real utilizando Análise de Sensibilidade (AS). O estudo é baseado em uma solução conhecida do Fluxo de Carga (FC) considerada como caso base, novos pontos de operação são calculados de forma direta após realizar perturbações nas cargas do sistema, onde pode-se estimar soluções de futuros cenários de operação. Diferente dos algoritmos de FC, a técnica de AS não requer um processo iterativo, resultando em uma metodologia rápida de grande precisão. A AS foi aplicada em sistemas de energia elétrica com a finalidade de obedecer à resolução nº 555 da ANEEL que determina que os níveis de tensão entregues pelas concessionárias devem estar entre os intervalos de 0,95 a 1,1 pu, garantindo assim a qualidade e disponibilidade de energia. Os resultados demonstram a eficiência da metodologia, que pode ajustar o perfil de tensões para cumprir as normas exigidas pela ANEEL.

Keywords: Fluxo de Carga, Sistema de Distribuição e Transmissão de Energia Elétrica, Análise de Sensibilidade.

1. INTRODUÇÃO

O consumo de energia elétrica vem aumentando intensamente nos últimos anos e a tendência é crescer ainda mais, devido à grande dependência da energia elétrica, seja por conforto, alimentação industrial, e pela grande quantidade de equipamentos eletroeletrônicos cada vez mais frequentes no dia a dia. A energia elétrica proporciona benefícios à sociedade e está ligada diretamente à qualidade de vida dos indivíduos e produtividade industrial.

Com a expansão do consumo de energia elétrica no Brasil surgiram dificuldades em suprir as cargas do sistema. Com esse aumento, o Sistema Integrado Nacional (SIN) opera perto de seus limites de carregamento, sendo necessário um controle de potência reativa, o que oferece uma melhora na qualidade de transmissão de energia, diminuindo as perdas ativas, quedas de tensão e tensões não regulamentadas. Devido ao aumento da carga no sistema elétrico uma das grandes dificuldades dos operadores do sistema é manter o perfil de tensão.

Isto torna a área de Sistemas Elétricos de Potência (SEP's) muito importante, pois não imaginamos nossa vida sem os benefícios da energia elétrica, já que ela é utilizada desde as atividades mais simples até as mais complexas, e grande parte dos avanços tecnológicos que alcançamos se deve à disponibilidade da energia elétrica. Os SEP's têm a função principal de gerar, transmitir e distribuir energia elétrica às indústrias e domicílios, seja eles grandes ou pequenos. Também deve manter a qualidade adequada do fornecimento no instante em que for solicitado, ou seja, um conjunto de equipamentos que atuam de maneira coordenada com a finalidade de fornecer energia elétrica aos

consumidores, dentro de certos padrões de qualidade como confiabilidade, disponibilidade, segurança e custos, com o mínimo impacto ambiental.

Visto sua importância, surge a necessidade de estudar e aprimorar técnicas para dar suporte na operação e planejamento dos SEP's e também na implementação das redes inteligentes de energia elétrica ou *Smart Grids*, são um novo modelo de distribuição de energia que se utilizam das novas ferramentas tecnológicas atuais, para que haja um consumo mais consciente de energia sem ignorar as questões sociais, econômicas e ambientais.

A eficácia dessas redes dependerá da capacidade do operador do sistema em utilizar algoritmos apropriados para dar resposta em tempo real para problemas na operação ou que possam vir a surgir nos sistemas elétricos.

Para tanto, os Sistemas Elétricos de Potência (SEP's) necessitarão de ferramentas rápidas de Análise para auxiliar os agentes nas tomadas de decisões. A análise de sensibilidade (AS) pode ser utilizada neste contexto para promover ganhos na operação dos sistemas.

A AS é parte integrante de muitas metodologias de solução e pode ser definida com uma técnica que permite avaliar impactos associados às mudanças dos valores das variáveis de entrada em relação aos parâmetros de saída do sistema.

Em programação matemática, técnicas de sensibilidade têm sido usadas para obter condições de otimalidade, resultados duais, solução de algoritmos, taxa de convergência e aceleração de convergência de algoritmos, em adição a sua mais óbvia e imediata aplicação que é estimar soluções considerando diferentes parâmetros de entrada.

A AS é de grande importância nos estudos da operação dos SEP's, pois ela ajuda no entendimento da relação causa-efeito entre os parâmetros do sistema e pode ser usada em algumas aplicações na operação em tempo real, devido à obtenção de uma relação direta entre as variáveis de controle e controladas, aspecto importante no contexto das *Smart Grids* (Gungor et al., 2011).

Na operação dos SEP's têm-se dois tipos de relações de sensibilidade predominantes: (a) a sensibilidade de uma variável elétrica em relação à outra variável do sistema, e (b) a sensibilidade de uma variável em relação à função objetivo do sistema (Peschon et al., 1968). A técnica de AS desenvolvida neste trabalho é voltada para o primeiro tipo de sensibilidade e pode ser utilizada para avaliar o comportamento das variáveis e dos parâmetros do sistema, como exemplos: limites de tensão; perdas de potência ativa; fluxos de potência nos ramos; e etc. Assim, é possível calcular a sensibilidade de uma variável elétrica, como a tensão V_i no nó i , em relação à injeção de potência ativa P_j no nó j , como exemplo.

A metodologia apresentada neste trabalho consiste em aplicar uma perturbação no ponto de operação obtido na solução do fluxo de carga (FC) (Monticelli, 1983), considerado esta solução como a do caso base, e através da AS estimar o novo ponto de operação para a rede após ocorrerem perturbações nas variáveis de entrada. A metodologia pode ser dividida em duas partes: a primeira parte está relacionada à aplicação do FC para obter a solução do caso base; e a segunda parte na aplicação da técnica de AS à solução do caso base para estimar novas soluções.

A obtenção da solução do FC, em um SEP, consiste na resolução de um sistema de equações não lineares através de métodos numéricos. Os métodos evoluíram seguindo os avanços técnicos que permitem, através da utilização do computador, elaborar algoritmos sofisticados para a solução do problema. Um dos métodos mais utilizados para resolução do problema de FC para sistemas de transmissão foi proposto por (Tinney e Hart, 1967), que utiliza o método de Newton-Raphson (NR) no processo de solução. Devido às diferenças entre os sistemas de transmissão e distribuição, como a relação X/R e disposição das linhas, o método de NR perde eficiência quando aplicado à sistemas de transmissão quando comparado com algoritmos desenvolvidos exclusivamente para sistemas de transmissão (Koto et al., 2012).

Em relação às técnicas de AS, elas foram utilizadas pela primeira vez em um SEP no final da década de 60 por Peschon e Tinney (Peschon et al., 1968). Da década de 60 até o presente momento vários trabalhos foram publicados utilizando AS em sistemas de transmissão e distribuição, como exemplo: Belati e Costa desenvolveram uma metodologia de AS utilizando fatores de sensibilidade de segunda ordem com objetivo de determinar novas soluções do problema de Fluxo de Potência Ótimo (Belati et al., 2005) para sistemas de transmissão; e Huang e Yao propuseram um estudo que utiliza AS para resolver o problema de FC em tempo real (Huang e Yao, 2012).

O objetivo principal deste trabalho é apresentar uma metodologia de estudo de perfil de tensão nos sistemas de distribuição e transmissão de energia elétrica quando há adição de potência reativa. Para escolha dos pontos onde

devemos inserir essa carga, foram escolhidos pontos dos sistemas em estudo que o perfil de tensão estão abaixo ou muito próximo aos limites estipulados pela ANEEL, resolução nº 555 que estipula que os níveis de tensão no sistema elétrico Brasileiro devem estar dentro de um intervalo de 0,9 à 1,1 pu de tensão. Foram escolhidos para os dois sistemas em estudo, as duas barras com as piores magnitudes de tensões, sendo adicionadas nas barras potências reativas a fim de obedecer à norma.

Este artigo está dividido da seguinte forma: na seção 2 são apresentados aspectos gerais do FC; na seção 3 é desenvolvida a técnica de AS utilizada; na seção 4 são realizados testes para demonstrar a aplicabilidade da técnica de AS; e finalmente na seção 5 as conclusões do trabalho são apresentadas.

2. METODOLOGIA

A metodologia utilizada neste trabalho está dividida em duas partes: a primeira consiste na obtenção do estado da rede do caso base através do FC e a segunda na aplicação da técnica de AS desenvolvida.

2.1 Fluxo de Carga

O cálculo do FC em um sistema de energia elétrica consiste na obtenção do estado do sistema para uma dada condição de carga, geração e topologia de rede. A formulação básica do problema pode ser encontrada em (Monticelli, 1983), sendo que para as barras do sistema associam-se quatro variáveis:

- V_k – magnitude de tensão na barra k ;
- θ_k – ângulo de fase da barra k ;
- P_k – injeção de potência ativa na barra k ;
- Q_k – injeção de potência reativa na barra k .

2.2 Expressões Gerais dos Fluxos

As injeções de potência ativa e reativa são obtidas impondo-se a Lei de Kirchhoff das correntes em cada barra e podem ser calculadas na forma polar através da Eq. (1) e Eq. (2), respectivamente.

$$P_k(V, \theta) = V_k \sum_{m \in k} V_m (G_{km} \cos \theta_{km} + B_{km} \sin \theta_{km}) \quad (1)$$

$$Q_k(V, \theta) = V_k \sum_{m \in k} V_m (G_{km} \sin \theta_{km} - B_{km} \cos \theta_{km}) \quad (2)$$

em que:

- G_{km} – elemento real da matriz Y_{BARRA} relacionado com as barras k e m ;
- B_{km} – elemento imaginário da matriz Y_{BARRA} relacionado com as barras k e m ;
- $m \in k$ – conjunto de todas as barras m que possuem ligação com a barra k .

A solução do problema de FC consiste em resolver as equações de balanço de potência ativa e reativa dadas, respectivamente, pelas Eq. (3) e Eq. (4).

$$\Delta P_k = P_k^{esp} - P_k^{calc}(V, \theta) = 0 \quad (3)$$

$$\Delta Q_k = Q_k^{esp} - Q_k^{calc}(V, \theta) = 0 \quad (4)$$

O sobrescrito *esp* representa os valores especificados de injeção de potência nas barras que são considerados constantes (modelo de carga de potência constante). O sobrescrito *calc* representa os valores calculados das injeções das potências obtidos a partir dos vetores das variáveis de estado (V, θ) e dos parâmetros do sistema.

Para resolver o problema de FC foi desenvolvido o método de NR como apresentado em (Tinney e Hart, 1967).

3. TÉCNICA DE ANÁLISE DE SENSEBILIDADE

Como descrito a AS é de grande importância nos estudos de operação dos SEP's. Ela auxilia no entendimento da relação causa-efeito existente entre os parâmetros do sistema e pode ser usada em aplicações na operação em tempo real.

Vamos considerar dois tipos de variáveis: as variáveis operacionais denotadas pelo vetor \mathbf{u} ; e as variáveis controladas denotadas pelo vetor \mathbf{x} . Nesse estudo, temos:

\mathbf{x} – vetor de variáveis de estado do problema (V, θ);

\mathbf{u} – vetor de injeção das potências ativas e reativas nas barras (P_{inj}, Q_{inj}).

As equações de fluxo de potência ativa e reativa, Eq. (3) e Eq. (4), podem ser expressas em notação vetorial como sendo:

$$g(\mathbf{x}, \mathbf{u}) = 0 \quad (5)$$

Supondo que $\mathbf{x} = \mathbf{x}^*$ é a solução para o vetor de controle especificado $\mathbf{u} = \mathbf{u}^*$ que satisfaz a Eq. (5), então:

$$g(\mathbf{x}^*, \mathbf{u}^*) = 0 \quad (6)$$

Sabendo que uma mudança $\Delta \mathbf{u}$ em \mathbf{u}^* , causa uma mudança $\Delta \mathbf{x}$ de \mathbf{x}^* , aplica-se a expansão da série de Taylor na Eq. (6), obtendo-se:

$$g(\mathbf{x}^* + \Delta \mathbf{x}, \mathbf{u}^* + \Delta \mathbf{u}) = g(\mathbf{x}^*, \mathbf{u}^*) + S_x \Delta \mathbf{x} + S_u \Delta \mathbf{u} = 0 \quad (7)$$

A matriz S_x é idêntica a matriz Jacobiana, sendo assim ela pode ser escrita da seguinte forma:

$$S_x = J = \begin{bmatrix} \frac{\partial \Delta P}{\partial V} & \frac{\partial \Delta P}{\partial \theta} \\ \frac{\partial \Delta Q}{\partial V} & \frac{\partial \Delta Q}{\partial \theta} \end{bmatrix} \quad (8)$$

A matriz S_u é obtida como segue:

$$S_u = \begin{bmatrix} \frac{\partial \Delta P}{\partial P} & \frac{\partial \Delta P}{\partial Q} \\ \frac{\partial \Delta Q}{\partial P} & \frac{\partial \Delta Q}{\partial Q} \end{bmatrix} \quad (9)$$

A solução da matriz S_u resulta em uma matriz identidade, quando for considerado o modelo de injeções de potência constante.

Combinando-se as equações (6) e (7) tem-se:

$$S_x \Delta \mathbf{x} + S_u \Delta \mathbf{u} = 0 \quad (10)$$

Reorganizando tem-se:

$$\Delta \mathbf{x} = -S_x^{-1} S_u \Delta \mathbf{u} = 0 \quad (11)$$

Para simplificar a expressão (11):

$$S = -S_x^{-1} S_u \quad (12)$$

A S_u sendo uma matriz identidade a S fica idêntica a J^{-1} , utilizada na última iteração do FC Assim, temos a expressão para correção do vetor $\Delta \mathbf{x}$.

$$\Delta \mathbf{x} = J^{-1} \Delta \mathbf{u} \quad (13)$$

A Eq. (13) pode ser escrita na forma matricial como (14), em que NPQ é o número de barras de carga do sistema de distribuição:

$$\begin{bmatrix} \Delta x_1 \\ \Delta x_2 \\ \vdots \\ \Delta x_{(2NPQ)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial \Delta P}{\partial \theta} & \frac{\partial \Delta P}{\partial V} \\ \frac{\partial \Delta Q}{\partial \theta} & \frac{\partial \Delta Q}{\partial V} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \Delta u_1 \\ \Delta u_2 \\ \vdots \\ \Delta u_{(2NPQ)} \end{bmatrix} \quad (14)$$

O equacionamento apresentado foi desenvolvido para sistemas de distribuição com uma barra sendo a subestação e as demais barras de carga.

Como mencionado, o vetor \mathbf{u} consiste de variáveis independentes que são as injeções de potência ativa e reativa nas barras. O vetor \mathbf{x} consiste de variáveis controladas que são as magnitudes das tensões e os ângulos de fase nas barras. Desta forma, o sistema matricial (14) pode ser reescrito como:

$$\begin{bmatrix} \Delta \theta_1 \\ \Delta \theta_2 \\ \vdots \\ \Delta \theta_{(NPQ)} \\ \Delta V_1 \\ \Delta V_2 \\ \vdots \\ \Delta V_{(NPQ)} \end{bmatrix} = [J]^{-1} \begin{bmatrix} P_{inj_1} \\ P_{inj_1} \\ \vdots \\ P_{inj_{(NPQ)}} \\ Q_{inj_1} \\ Q_{inj_1} \\ \vdots \\ Q_{inj_{(NPQ)}} \end{bmatrix} \quad (15)$$

O sistema matricial, dado por (15) é composto pelo vetor perturbação no lado direito do sistema matricial, em que são consideradas as perturbações nas injeções de potência ativa e reativa; a inversa da matriz J ; e o vetor de correção das variáveis de estado no lado esquerdo da igualdade.

Com o sistema da matricial, Eq. (14), novas soluções podem ser obtidas quando perturbações são realizadas nas injeções de potência nas barras através do vetor \mathbf{x}_{new} , Eq. (16).

$$\mathbf{x}_{new} = \Delta \mathbf{x} + \mathbf{x}^* \quad (16)$$

Com tudo para realizarmos controle nas magnitudes de tensão, a potência reativa deve ser inserida no sistema para se obter uma melhoria. Devido a isso a Eq. (17) é uma modificação da Eq.(15), que leva-se em conta a adição de carga reativa.

$$\begin{bmatrix} \Delta V_1 \\ \Delta V_2 \\ \vdots \\ \Delta V_{(NPQ)} \end{bmatrix} = [J]^{-1} \begin{bmatrix} Q_{inj_1} \\ Q_{inj_1} \\ \vdots \\ Q_{inj(NPQ)} \end{bmatrix} \quad (17)$$

3.1 Passos do Algoritmo

Os passos para obtenção do x_{new} com a técnica de AS apresentada são os seguintes:

- i. Entrar com os dados do sistema;
- ii. Obter o estado do sistema via Fluxo de Carga;
- iii. Entrar com o vetor perturbação, Δu (adição de potência reativa);
- iv. Utilizar a Eq. (14) para calcular Δx (atualizar as magnitudes de tensão);
- v. Utilizar a Eq. (16) para obter o vetor x_{new} ;
- vi. Se desejar realizar uma nova perturbação voltar ao passo (iii); Caso contrário – Fim.

Na aplicação da técnica de análise de sensibilidade, é resolvido apenas um FC, cuja solução é armazenada juntamente com os valores da Matriz Jacobiana, obtida na solução do fluxo de carga (caso base). Assim, o processo é direto na obtenção da solução, despendendo pouco recurso computacional.

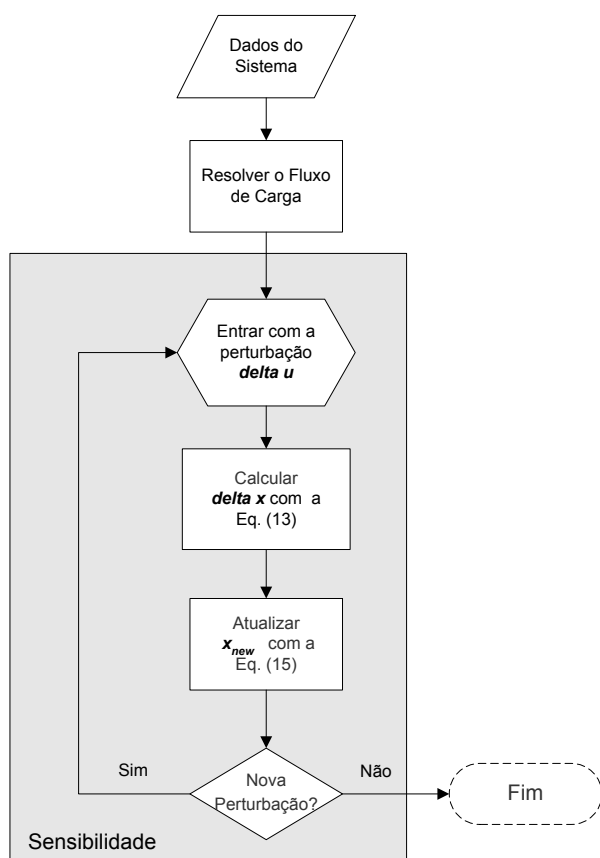


Figura 1. Fluxograma da metodologia.

4. RESULTADOS E TESTES COMPUTACIONAIS

Nesta seção serão apresentados dois testes um com o sistema de distribuição de 476 barras e um com o sistema de transmissão de 57 barras.

4.1 Testes em Sistema de Distribuição de Energia Elétrica

Foram realizados dois testes para cada um dos sistemas sendo o primeiro para validar a metodologia AS, inicia-se com o caso base, as potências ativas e reativas nas barras de carga foram aumentadas em 2, 4, 6%, até o valor máximo de 50%, em todas as barras de carga de forma simultânea mantendo o fator de potência constante. Para cada 2% de perturbação, a técnica de AS foi aplicada e o novo estado do sistema foi estimado. A figura 2 apresenta o gráfico comparativo entre as perdas ativas obtidas pela técnica de AS e pelo método de FC. O sistema de 476 barras é um sistema de grande porte, os valores das perdas estimadas para perturbações menores que 20% pela metodologia AS ficaram próximos dos obtidos pelo FC. Comparando as curvas verifica-se que a metodologia pode ser aplicada para os sistemas em estudos com as perdas ativas.

Neste teste foi utilizado o sistema de 476 barras de distribuição para ilustrar a aplicabilidade da metodologia em redes de distribuição de energia elétrica. O teste consiste em adicionar potência reativa em um conjunto de barras com a finalidade de se obter uma melhora no perfil de tensão no sistema estudado. Os dados do sistema podem ser encontrados em (Gomes et al., 2005).

Para o sistema de 476 barras as barras que irão sofrer adição de carga são as barras que estão em uma zona onde o perfil de tensão do sistema está muito abaixo do estipulado pela ANEEL, a Fig. 2 mostra a comparação do comportamento do perfil da tensão para todo o sistema sem a adição das potências reativas, e a com a adição em algumas barras, sendo o primeiro teste em dois pares de barras sendo elas 195 e 205 e o segundo par 195 e 210, essas barras foram escolhidas por terem as mais baixas magnitudes de tensão, ou seja, essas barras não estão atendendo a norma estipulada pela agência regulatória. Pode se notar que não apenas as magnitudes de tensão sofreram melhoria como as perdas ativas e reativas do sistema tiveram uma redução significativa.

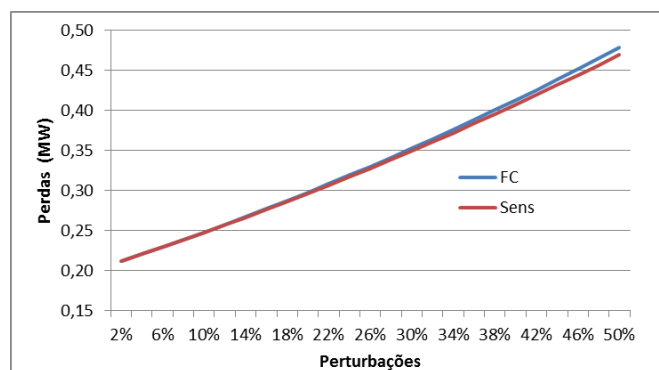


Figura 2: Comparação das Perdas Ativas do Sistema de 476 Barras - FC x SENS.

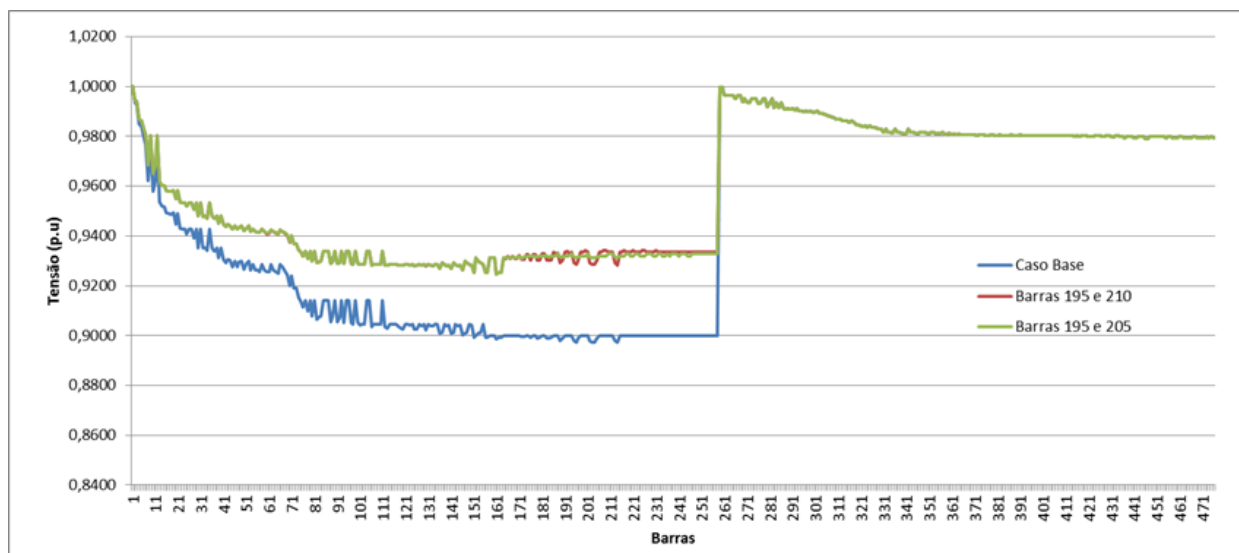


Figura 3: Comparação dos Níveis de Tensão do Sistema de 476 Barras com adição de duas cargas reativas.

Tabela I – comparação das perdas entre as barras 195 e 205 e as barras 195 e 210 do sistema de 57 barras - quando adicionado potência reativa.

476 Barras			
	Caso Base	195 e 205	195 e 210
Perdas Ativas	0,7181677900	0,6449686680	0,6515572470
Perdas Reativas	1,2633803840	1,1266545120	1,1292715650

A Tabela I mostra um comparativo referente às perdas ativas e reativas para o sistema de 476 barras, comparando o caso base com os casos em que é acrescida potência reativa nas barras que tem possuem os piores perfis de tensão para este sistema.

4.2 Teste em Sistema de Transmissão de Energia Elétrica

Foram realizados dois testes para cada um dos sistemas sendo o primeiro para validar a metodologia AS, inicia-se com o caso base, as potências ativas e reativas nas barras de carga foram aumentadas em 2, 4, 6%, até o valor máximo de 50%, em todas as barras de carga de forma simultânea mantendo o fator de potência constante. Para cada 2% de perturbação, a técnica de AS foi aplicada e o novo estado do sistema foi estimado. A figura 4 apresenta o gráfico comparativo entre as perdas ativas obtidas pela técnica de AS e pelo método de FC. O sistema de 57 barras é um sistema de transmissão de energia elétrica, os valores das perdas estimadas para perturbações menores que 30% pela metodologia AS ficaram próximos dos obtidos pelo FC. Comparando as curvas verifica-se que a metodologia pode ser aplicada tanto para os sistemas de distribuição como para os de transmissão.

Neste teste foi utilizado o sistema de transmissão de 57 barras. O teste consiste em adicionar potência reativa em um conjunto de barras com a finalidade de se obter uma melhora no perfil de tensão no sistema estudado. Os dados do sistema podem ser encontrados em (University of Washington).

Para o sistema de 57 barras as barras que irão sofrer adição de carga são as barras que estão em uma zona onde o perfil

de tensão do sistema está muito abaixo do estipulado pela ANEEL, a Fig.2 mostra a comparação do comportamento do perfil da tensão para todo o sistema sem a adição das potências reativas, e a com a adição em algumas barras, sendo o primeiro teste 2 pares de barras são elas 26 e 31 e o segundo par 31 e 33, essas barras foram escolhidas por terem as mais baixas magnitudes de tensões, ou seja, essas barras não estão atendendo a norma estipulada pela agência regulatória . Pode-se notar que não apenas as magnitudes de tensão sofreram melhoria como as perdas ativas e reativas do sistema tiveram uma redução significativa.

Tabela II – comparação das perdas entre as barras 26 e 31 e as barras 31 e 33 do sistema de 57 barras - quando adicionado potência reativa

57 Barras			
	Caso Base	26 e 31	31 e 33
Perdas Ativas	27,86318505	27,763604498	27,728981491
Perdas Reativas	6,316061103	5,883469772	5,795867062

A Tabela II mostra um comparativo referente às perdas ativas e reativas para o sistema de 57 barras, comparando o caso base com os casos em que é acrescida potência reativa nas barras que tem possuem os piores perfis de tensão para este sistema.

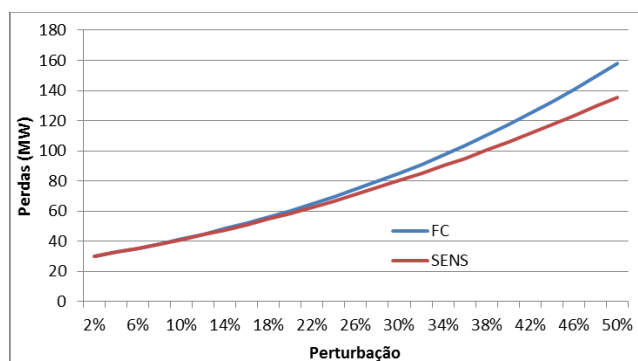


Figura 4: Comparação das Perdas Ativas do Sistema de 57 Barras - FC x SENS.

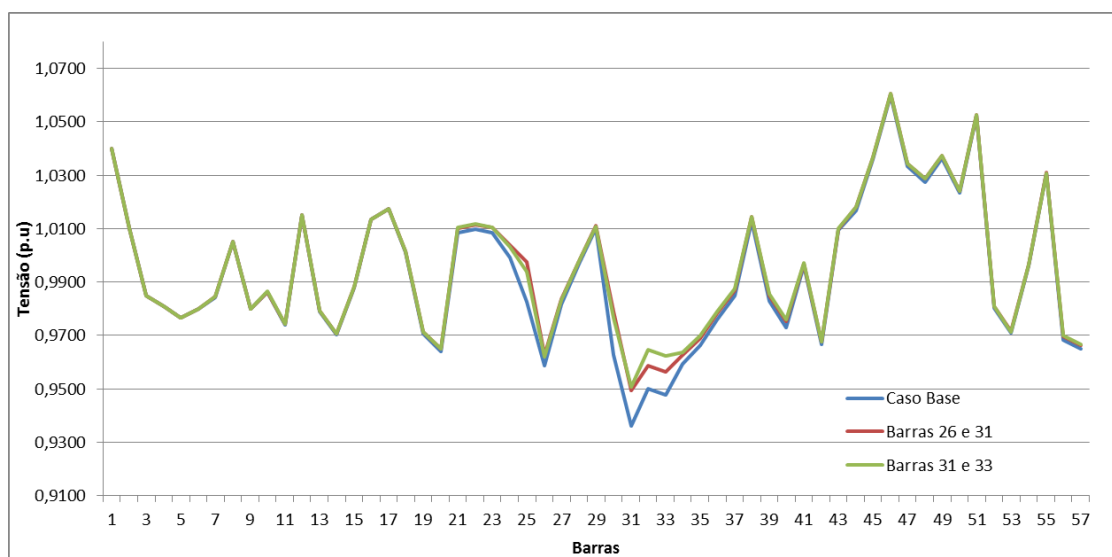


Figura 5: Comparação dos Níveis de Tensão do Sistema de 57 Barras com adição de duas cargas reativas.

5. CONCLUSÕES

O FC é uma importante ferramenta utilizada no planejamento e operação de SEP's. O objetivo da aplicação do FC é obter os ângulos e as magnitudes de tensão para as barras da rede. Este artigo relata um estudo sobre o funcionamento de um SEP com AS. A metodologia utilizada consiste em aplicar potência reativa nas duas piores barras em relação à magnitude de tensão com a finalidade de fazer com que a tensão nestas barras tivesse uma melhoria para que assim atendam a resolução nº 555 da ANEEL, como pode se notar ao acrescentarmos potência reativa as tensões das barras que estavam fora do intervalo estipulado pela norma, ao terem potência reativa inserida atenderam à especificação da Resolução 505, portanto essa metodologia apresentada neste trabalho pode ser utilizada no planejamento do sistema, pode-se evitar ou adiar investimentos em outras estratégias para manter a magnitude das tensões dentro dos limites pré-estabelecidos, como por exemplo, a implementação de banco de capacitores ou de transformadores, ou até mesmo a substituição de linhas.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a Universidade Federal do ABC pelas bolsas de estudo de William Moreti da Rosa e de Priscila Rossoni.

REFERÊNCIAS

- Baran, M. E.; Wu, F. F. (1989). "Optimal capacitor placement on radial distribution systems". *Power Delivery*, IEEE Transactions on, v. 4, n. 1, p. 725-734 ISSN 0885-8977.
- Belati, E. A.; Baptista, E. C.; Da Costa, G. R. M. (2005). "Optimal operation studies of the power system via sensitivity analysis". *Electric Power Systems Research*, v. 75, n. 1, p. 79-84 ISSN 0378-7796.
- Chis, M.; Salama, M. M. A.; Jayaram, S. (1997). "Capacitor placement in distribution systems using heuristic search strategies". *Generation, Transmission and Distribution*, IEE Proceedings-, v. 144, n. 3, p. 225-230 ISSN 1350-2360.
- Gomes, F. V.; Carneiro, S., Jr.; Pereira, J. L. R.; Vinagre, M. P.; Garcia, P. a. N.; Araujo, L. R. (2005). "A New Heuristic Reconfiguration Algorithm for Large Distribution Systems". *Power Systems*, IEEE Transactions on, v. 20, n. 3, p. 1373-1378 ISSN 0885-8950.
- Gungor, V. C.; Sahin, D.; Kocak, T.; Ergut, S.; Buccella, C.; Cecati, C.; Hancke, G. P. (2011). "Smart Grid Technologies: Communication Technologies and Standards". *Industrial Informatics*, IEEE Transactions on, v. 7, n. 4, p. 529-539 ISSN 1551-3203.
- Huang, W. T.; Yao, K. C. (2012). "New network sensitivity-based approach for real-time complex power flow calculation". *Generation, Transmission & Distribution*, IET, v. 6, n. 2, p. 109-120 ISSN 1751-8687.
- Koto, S. M.; Nascimento, C. F.; Dietrich, A. B.; Belati, E. A.; Goedel, A.; Negrete, L. P. G. (2012). "Fluxo de carga especializado para redes de transmissão considerando a presença de aerogeradores". XIX Congresso Brasileiro de Automática - CBA 2012, Campina Grande/PBS - Brasil. p.4204 - 4210.
- Monticelli, A. (1983). "Fluxo de Carga em Redes de Energia Elétrica". Edgard Blucher, São Paulo.
- Peschon, J.; Piercy, D. S.; Tinney, W. F.; Tveit, O. J. (1968). "Sensitivity in Power Systems". *Power Apparatus and Systems*, IEEE Transactions on, v. PAS-87, n. 8, p. 1687-1696 ISSN 0018-9510.
- Tinney, W. F.; Hart, C. E. (1967). "Power Flow Solution by Newton's Method". *Power Apparatus and Systems*, IEEE Transactions on, v. PAS-86, n. 11, p. 1449-1460 ISSN 0018-9510.