

# AVALIAÇÃO DA REGIÃO DE SEGURANÇA ESTÁTICA DE SISTEMAS ELÉTRICOS DE POTÊNCIA: UMA ABORDAGEM UTILIZANDO LINEARIZAÇÕES SUCESSIVAS

TAMIRIS GOMES MOREIRA\*, JOÃO ALBERTO PASSOS FILHO\*, JOSÉ LUIZ REZENDE PEREIRA\*, IGOR DELGADO DE MELO\*

\*Universidade Federal de Juiz de Fora - Rua José Lourenço Kelmer, s/nº  
Faculdade de Engenharia - Juiz de Fora - MG - CEP 36.036-330

Emails: tamiris.moreira@engenharia.ufjf.br, joao.passos@ufjf.edu.br, jluiz@ieee.org, igor.delgado2008@engenharia.ufjf.br

**Abstract**— This paper presents a novel methodology for power systems static security regions assessment. The proposed method is based on the maximum active power transfer calculation among electrical energy exporting and importing regions, using an optimal power flow for adjusting the control variables automatically in order to maximize the power transfer between these regions. Constraints are specified considering upper and lower bound limits for voltage magnitudes and phase angles, active and reactive powers at each generation bus. The optimal power flow is solved using the sequential linear approach with the purpose of determining the security regions in advantageous computational time. Comparisons were being made between the results obtained from Anarede software from CEPEL and the proposed methodology, to validate it and highlight their advantages. Computational simulations are carried out using a 9-bus test system, for plotting graphics known as nomograms in which limits are established for determining secure regions.

**Keywords**— Static security region, Optimal Power flow, Sequential Linear Programming, Power Systems.

**Resumo**— Este artigo apresenta uma nova metodologia para a avaliação das regiões de segurança estática de sistemas elétricos de potência. O método proposto é baseado no cálculo da máxima transferência de potência ativa entre regiões importadoras e exportadoras de energia elétrica, utilizando um fluxo de potência ótimo para ajuste automático das variáveis de controle que maximizam o intercâmbio entre essas regiões. Restrições são especificadas considerando limites máximos e mínimos de magnitude de tensão, abertura angular entre barramentos do sistema, potências ativas e reativas em cada barra de geração. Como diferencial, o fluxo de potência ótimo é resolvido usando linearizações sucessivas, com o objetivo de determinar as regiões de segurança em um tempo computacional vantajoso. Serão realizadas comparações entre os resultados obtidos pelo programa Anarede e a metodologia proposta, a fim de validar a mesma e destacar suas vantagens. Simulações computacionais serão conduzidas usando um sistema teste de 9 barras para a construção de gráficos denominados nomogramas em que limites são estabelecidos para a determinação de regiões seguras de operação.

**Palavras-chave**— Região de Segurança Estática, Fluxo de Potência Ótimo, Linearizações Sucessivas, Sistemas de Potência.

## 1 Introdução

Com a crescente demanda de energia, os sistemas de potência operam cada vez mais próximos a seus limites operacionais, necessitando de ferramentas analíticas que permitam monitorar de maneira efetiva o estado operativo das redes elétricas e sua segurança para permitir que ações preventivas sejam tomadas em tempo hábil, evitando perdas econômicas relacionadas à indisponibilidade de energia (Sousa and Torres, 2010).

O Brasil é um país de vasta extensão territorial abrangendo regiões interligadas entre si através do Sistema Interligado Nacional (SIN). O sistema de transmissão é, portanto, robusto e complexo, havendo regiões de importação e exportação de energia. Uma vez que a matriz energética brasileira é em sua grande totalidade hidroelétrica e sujeita à sazonalidade, é de extrema importância gerenciar a transferência de potência entre regiões distintas, a fim de maximizá-la sem comprometer a segurança física e operacional do sistema.

A avaliação da segurança e confiabilidade de um sistema elétrico de potência tem sido instrumento de vários estudos realizados pelo ONS

(Operador Nacional do Sistema Elétrico) com o objetivo de manter o sistema de potência sob condições seguras, evitando possíveis *blackouts* e instabilidade de tensão (Affonso et al., 2008).

A análise realizada através da avaliação da segurança de tensão permite ao operador analisar a condição de segurança de um sistema para operações normais e casos de possíveis contingências, além de calcular os limites de segurança do sistema sob diversos cenários de geração e obter a capacidade total de transferência de potência ativa (TPA) de regiões exportadoras para importadoras em um sistema elétrico. A TPA é um indicador de pontos fracos do sistema de transmissão relacionados à segurança e estabilidade (Almeida et al., 2013).

Geralmente, o método de determinação de limites de transferência de potência consiste em um procedimento em que, a partir de um caso base, aumenta-se progressivamente a potência transferida de uma região exportadora para outra importadora de energia elétrica, até que uma ou mais restrições atinjam seus valores máximos e mínimos especificados (Almeida et al., 2013; Pareto, 2016). Tais restrições englobam limites de

tensão (magnitude/fase), potências ativa e reativa especificadas para cada barramento e limites térmicos. Tal procedimento não é eficiente para aplicações em tempo real, uma vez que demandam um esforço computacional intenso, culminando na necessidade da criação de um método com tempo computacional reduzido.

Para a realização do processo de transferência de potência, é necessário definir previamente regiões de importação e exportação de energia. A partir disso, pode-se obter a denominada região de segurança estática (RSE), que permite avaliar se um dado ponto de operação encontra-se em uma região de operação segura ou não (Almeida et al., 2013). Através dos gráficos denominados nomogramas, limites são estabelecidos para a determinação da RSE e através desses pode-se estabelecer o quão distante das margens se encontra um dado ponto de operação (Sarmiento et al., 2009), (Pareto, 2016), (Abrantes et al., 2013).

Este artigo apresenta os resultados iniciais de uma nova metodologia baseada no cálculo da máxima transferência de potência ativa entre regiões importadoras e exportadoras de energia elétrica, através de um fluxo de potência ótimo (FPO). Restrições são consideradas a partir de limites máximos e mínimos para magnitude de tensão, ângulo da tensão nodal, potências ativa e reativa geradas. Ou seja, o cálculo da máxima transferência é feito satisfazendo as restrições especificadas. Como diferencial, a resolução do problema de otimização é feita usando linearizações sucessivas (LS) com a qual obtém-se um compromisso entre a confiabilidade na determinação dos nomogramas e o tempo computacional vantajoso.

Em 1990, os autores (Alsac et al., 1990) apresentaram o uso de linearizações sucessivas como uma poderosa ferramenta para a resolução do problema de fluxo de potência, atrelando flexibilidade e elevado desempenho. Uma revisão dos métodos de fluxo de potência ótimo é apresentado em (Wood and Wollenberg, 2012)

No Brasil a obtenção das RSEs é realizada por meio dos programas Anarede/Anatem e Organon, conforme descrito em (Pareto, 2016). Para validar o método proposto, uma comparação é realizada utilizando o programa Anarede, o qual é amplamente utilizado pelo setor elétrico.

Os nomogramas são gráficos em que se pode avaliar a relação entre dois grupos geradores. Percebe-se que o nomograma traz informações sobre os limites de MW, definindo regiões limitadas por curvas plotadas no plano cartesiano que indicam se dado ponto operativo é seguro ou não.

No Anarede a visualização dos nomogramas gerados pela avaliação de RSE se dá através do programa *VisorChart*, distribuído em conjunto com o programa Anarede. Também é necessária a prévia instalação do software Java. Os arquivos

históricos com os pontos de operação obtidos ao longo de cada direção de transferência de geração são armazenados. Os limites encontrados são armazenados em arquivo de texto e organizados em um arquivo denominado *vs\_a\_mapa.xml*, arquivo de entrada para o *VisorChart*. Esse mesmo arquivo é utilizado para construir os nomogramas da metodologia proposta.

A construção das RSEs por meio do programa Anarede é abordada com detalhes na referência (Almeida et al., 2013).

Estudos referentes a esta linha de pesquisa já foram abordados por diversos autores (Jardim et al., 2006), (Savulescu, 2009), (Neto et al., 2010). Em (Jardim et al., 2006), (Neto et al., 2010) são descritas as aplicações de avaliação de segurança de tensão utilizadas no Brasil pelo Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS).

Este artigo é dividido em 5 seções, incluindo esta introdutória. A segunda é dedicada a apresentar a metodologia proposta, a terceira apresenta testes computacionais e resultados. Na última, as conclusões são evidenciadas destacando as principais vantagens do método proposto.

## 2 Metodologia Proposta

Nesta seção será apresentada a formulação do problema de otimização, a forma de construção dos nomogramas, bem como o algoritmo para a resolução do problema.

### 2.1 Formulação do problema de otimização

O presente artigo visa obter graficamente os nomogramas em que regiões estáticas de segurança são definidas para determinar se um ponto operativo está dentro de seus limites de segurança. Para isso, um problema de otimização é modelado por meio de um FPO com restrições, cuja solução é obtida por linearizações sucessivas.

A função objetivo (1) corresponde a máxima transferência um custo de geração unitário negativo é atribuído às potências ativas dos geradores compreendidos na região exportadora de energia elétrica. Já para os geradores da região importadora, um custo de geração unitário positivo é dado às respectivas potências geradas. Tais escolhas devem-se ao fato de que uma vez que se deseja maximizar a potência transferida da região exportadora para importadora e o gerador compreendido na região de exportação deverá sofrer acréscimos de geração de potência ativa, o custo tenderá a um valor mínimo. A minimização da função objetivo é sujeita à restrições de igualdade e desigualdade como apresentado de (2) até (12). As equações (13) e (14) definem os ângulos de trajetória de transferência.

As equações (2) e (3) referem-se às restrições de igualdade do balanço de potências ativa e re-

ativa, respectivamente. Note que são calculadas em função das variáveis de estado  $x$  (magnitudes e ângulos de tensão nos barramentos do sistema) e das variáveis de controle  $u$  (as potências ativa e reativa geradas).

As restrições de geração devido aos limites físicos dos geradores são expressas em (4) e (5) para os geradores na região de exportação e em (6) e (7) para os geradores na região de importação.

A restrição de desigualdade (8) refere-se às limitações máximas e mínimas da magnitude de tensão nos barramentos do sistema. As restrições de ângulo no barramento e referência angular do sistema são apresentadas em (9) e (10), respectivamente. As restrições operacionais impostas para fazer o controle de tensão nas barras de geração é dada pela equação (11), fixando o valor de tensão controlada nas mesmas em um valor determinado. A equação (12) refere-se aos fatores de participação por grupo de geração (FPG's) e estabelece a relação entre a potência ativa fornecida pela região exportadora e a potência ativa consumida pela região importadora. O entendimento do cálculo deste fator torna-se mais claro com a explicação dada através da figura 1, na subseção 2.2. Os ângulos que definem as trajetórias de transferência de potência são determinados pelas equações (13) e (14).

$$\min \left( \sum_{j=1}^{n_{imp}} (1)P_{g_j} + \sum_{i=1}^{n_{exp}} (-1)P_{g_i} \right) \quad (1)$$

sujeito a:

$$g_{P_k}(u, x) = P_{g_k} - P_{d_k} - P_k(V, \theta) = 0 \quad (2)$$

$$g_{Q_k}(u, x) = Q_{g_k} - Q_{d_k} - Q_k(V, \theta) = 0 \quad (3)$$

$$P_{g_i}^{min} \leq P_{g_i} \leq P_{g_i}^{max} \quad (4)$$

$$Q_{g_i}^{min} \leq Q_{g_i} \leq Q_{g_i}^{max} \quad (5)$$

$$P_{g_j}^{min} \leq P_{g_j} \leq P_{g_j}^{max} \quad (6)$$

$$Q_{g_j}^{min} \leq Q_{g_j} \leq Q_{g_j}^{max} \quad (7)$$

$$V_k^{min} \leq V_k \leq V_k^{max} \quad (8)$$

$$\theta_k^{min} \leq \theta_k \leq \theta_k^{max} \quad (9)$$

$$\theta^{V\theta} = \theta_{ref} \quad (10)$$

$$V^{PV} = V_{esp}^{PV} \quad (11)$$

$$P_{g_3} \mp \tan \phi \cdot P_{g_2} = -P_{g_3}^0 \mp \tan \phi \cdot P_{g_2}^0 \quad (12)$$

$$\phi = \phi_0 + d \cdot \alpha \quad (13)$$

$$\alpha = 360^\circ / N_d \quad (14)$$

$$\begin{aligned} i &= 1, \dots, n_{exp} \\ j &= 1, \dots, n_{imp} \\ k &= 1, \dots, n_b \end{aligned} \quad (15)$$

em que:

- $n_{imp}$  e  $n_{exp}$  são o número de geradores na região importadora e exportadora, respectivamente;
- $P_{g_j}$  e  $P_{g_i}$  são as potências geradas da região importadora e exportadora, respectivamente;
- $g_{P_k}$  e  $g_{Q_k}$  são as equações de balanço de potência ativa e reativa, respectivamente;
- $V_k$  é a magnitude de tensão com valores mínimos  $V_k^{min}$  e máximos  $V_k^{max}$ ;
- $\theta_k$  é o ângulo da tensão nodal da barra  $k$ , com valores mínimos  $\theta_k^{min}$  e máximos  $\theta_k^{max}$ ;
- $V_{PV}$  é a tensão fixada das barras de geração, igual a um valor especificado  $V_{esp}^{PV}$ ;
- $n_b$  é o número total de barras do sistema;
- $P_{g_j}^{min}$ ,  $P_{g_j}^{max}$  são os valores de potência ativa mínimos e máximos dos geradores pertencentes a região de importação, respectivamente;
- $P_{g_i}^{min}$ ,  $P_{g_i}^{max}$  são os valores de potência ativa mínimos e máximos dos geradores pertencentes a região de exportação, respectivamente;
- $Q_{g_j}^{min}$ ,  $Q_{g_j}^{max}$  são os valores de potência reativa mínimos e máximos dos geradores pertencentes a região de importação, respectivamente;
- $Q_{g_j}^{min}$ ,  $Q_{g_j}^{max}$  são os valores de potência reativa mínimos e máximos dos geradores pertencentes a região de exportação, respectivamente;
- $\phi$  é o ângulo de transferência;
- $\phi_0$  é o ângulo de referência padronizado em  $45^\circ$ ;
- $d = 0, 1, 2, \dots, N_d$ ;
- $N_d$  é o número de direções;
- $\alpha$  define os ângulos entre as direções.

Pelo método de LS, conforme (Rau, 2003; Wood and Wollenberg, 2012), a linearização é realizada por meio do cálculo da diferencial das equações (2) e (3), conforme o sistema matricial (16):

$$\begin{bmatrix} \frac{\partial g_{P_{i,j}}}{\partial u} & \frac{\partial g_{P_{i,j}}}{\partial x} \\ \frac{\partial g_{Q_{i,j}}}{\partial u} & \frac{\partial g_{Q_{i,j}}}{\partial x} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \Delta u \\ \Delta x \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (16)$$

Posteriormente, calcula-se cada derivada em função de um estado operativo obtido previamente de um fluxo de potência convencional, segundo a equação (17). À matriz resultante do cálculo da linearização em torno do ponto de operação,  $\begin{bmatrix} u_0 \\ x_0 \end{bmatrix}$ , lado direito do sistema matricial (17), dá-se o nome de matriz de sensibilidade.

$$\begin{bmatrix} \frac{\partial g_{P_{i,j}}}{\partial u} & \frac{\partial g_{P_{i,j}}}{\partial x} \\ \frac{\partial g_{Q_{i,j}}}{\partial u} & \frac{\partial g_{Q_{i,j}}}{\partial x} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} u \\ x \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial g_{P_{i,j}}}{\partial u} & \frac{\partial g_{P_{i,j}}}{\partial x} \\ \frac{\partial g_{Q_{i,j}}}{\partial u} & \frac{\partial g_{Q_{i,j}}}{\partial x} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} u_0 \\ x_0 \end{bmatrix} \quad (17)$$

As equações (18), (19), (20) e (21) apresentam os critérios de parada especificados:

$$|P_{g_{j,i}}^{h-1} - P_{g_{j,i}}^h| \leq tol \quad (18)$$

$$P_{g_{j,i}}^h = P_{g_{j,i}}^{min} \quad (19)$$

$$P_{g_{j,i}}^h = P_{g_{j,i}}^{max} \quad (20)$$

$$n_{iter} \geq n_{iter}^{max} \quad (21)$$

O processo iterativo é realizado até que o critério de parada correspondente ao módulo da diferença entre as potências ativas geradas por alguma unidade geradora, em iterações consecutivas ( $h-1$  e  $h$ ), seja menor que uma tolerância especificada, adotada neste trabalho igual a  $10^{-6}$ , segundo equação (18). O algoritmo também converge caso haja o esgotamento de potência ativa entre os geradores (representado pelas equações (19) e (20)), ou ainda caso o número máximo de iterações ( $n_{iter}^{max} = 100$ ) seja atingido, como especificado na equação (21).

Nos casos em que existe solução viável uma consideração referente ao máximo desvio de potência ativa em iterações sucessivas é realizado. Esse passo é fundamental para que se alcance a convergência e evite problemas de oscilação entre valores de potência ativa ajustadas. Isso é feito acrescentando restrições de desigualdade lineares, conforma apresentado na equação (22):

$$P_{g_i}^h - \Delta P \leq P_{g_i}^{h+1} \leq P_{g_i}^h + \Delta P \quad (22)$$

em que:

- $\Delta P$  corresponde ao máximo desvio de potência ativa entre duas iterações.

Em (Simões et al., 2007) um ajuste para cada tipo de sistema a ser otimizado é definido e segundo o autor a escolha para este valor de desvio é algo que influencia no processo de convergência do FPO, além disso, o valor a ser escolhido depende da experiência do usuário com o sistema. Para este trabalho, considerou-se inicialmente  $\Delta P = 0,5$  e ao longo do processo iterativo este valor é gradualmente atualizado e reduzido em 90% em relação ao  $\Delta P$  armazenado na iteração anterior.

Neste trabalho, o problema de otimização linearizado é resolvido utilizando a *toolbox* do ambiente MatLab denominada *linprog*.

## 2.2 Determinação dos geradores pertencentes à região importadora e exportadora

A construção da RSE é realizada através da junção de diversos pontos, pertencentes ao mesmo critério de segurança, obtidos por cada direção retilínea, escolhida a partir do caso base. No exemplo a seguir, no programa Anarede são escolhidas quatro direções, assim como no MatLab.

Para cada direção acréscimos/decrécimos de geração são realizados para cada unidade geradora. Esta explicação torna-se mais clara a partir da análise da Figura 1 que representa o nomograma dos planos G2 x G3. Entretanto, vale ressaltar que a construção completa da RSE é dada pela análise conjunta dos três planos: G1 x G2, G2 x G3 e G1 x G3.

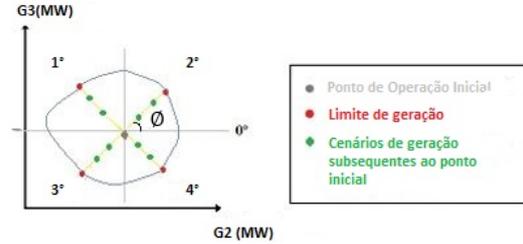


Figura 1: Representação esquemática de um nomograma.

Os pontos em verde representam cada cenário de geração, ou seja, redespacho a partir do caso base (ponto central em cinza) e a distância de um ponto a outro é definida através do passo de transferência pré-estabelecido nos métodos convencionais. O ponto onde o limite de segurança é atingido (ponto em vermelho) é armazenado, para posteriormente ser ligado ao próximo ponto correspondente a uma nova direção, originando a curva obtida.

No algoritmo proposto via MatLab esses passos de transferência não são estipulados e o problema é resolvido através de otimização por linearizações sucessivas, chegando-se a mesma resposta obtida pelo programa Anarede.

A vantagem da metodologia implementada consiste em obter a mesma resposta evitando-se passar por muitos pontos operacionais, pois não há um passo fixo de geração a ser acrescido a cada iteração para se alcançar o limite de segurança sendo o procedimento realizado por otimização. Como será apresentado na seção de resultados, esse processo produz impactos significativos na redução do tempo computacional.

Por exemplo, considera-se que os pontos em vermelho representem o critério de segurança referente ao limite de MW. Para o primeiro quadrante a potência dos geradores G2 e G3 sofrerão acréscimos (sentido de crescimento dos eixos da abscissa e ordenada), portanto, tais unidades geradoras serão enquadradas na denominada região

exportadora e obrigatoriamente o gerador G1 deverá pertencer a região importadora para fechar o balanço de potência.

No segundo quadrante, a unidade geradora G3 será classificada na região exportadora, enquanto a unidade G2 estará enquadrada no grupo pertencente à região importadora (sentido de decréscimo do eixo das abscissas). A participação de G1 dependerá da potência ativa final obtida para aquele cenário e isso será dado de acordo com o ângulo escolhido para o traçado da direção, portanto este gerador é classificado na região de folga.

A Tabela 1 enfatiza os possíveis cenários de geração a partir de quatro direções escolhidas, segundo o qual baseia-se esse artigo. A forma de se determinar tais regiões é apresentada com grandes detalhes em (Almeida et al., 2013) não sendo o objeto deste trabalho.

Tabela 1: Classificação dos Grupos Geradores quanto à Região

Quadrante	Ângulo	Exportadora	Importadora
1°	45°	G2+G3	G1
2°	135°	G3	G2
3°	225°	G1	G2+G3
4°	315°	G2	G3

Todo esse processo é realizado para todos os critérios de segurança definidos. Portanto, para o exemplo descrito anteriormente, um ponto dentro da curva traçada poderia ser considerado seguro para o critério de limite de MW. Caso fossem avaliados outros critérios de segurança, novas curvas seriam traçadas, como veremos na seção referente aos resultados.

Como observado na Tabela 1, os geradores G2 e G3 dividem a participação no processo de exportação de potência no primeiro quadrante, devendo ao final do processo de máxima transferência totalizar 100% da potência total gerada dentro da região a qual pertencem. Tomando o plano G2xG3 para uma análise da participação de cada grupo gerador, uma relação de tangente pode ser claramente observada analisando a figura 1. Consequentemente, a equação (23) é obtida.

$$\tan \phi = \Delta P_{g_3} / \Delta P_{g_2} \quad (23)$$

onde:

- $\Delta P_{g_3}$  é a variação de potência ativa do grupo gerador 3 (diferença entre a geração atual e a geração no ponto de operação inicial);
- $\Delta P_{g_2}$  é a variação de potência ativa do grupo gerador 2 (diferença entre a geração atual e a geração no ponto de operação inicial);
- $\tan \phi$  representa o fator de participação por grupo de geração indicado na equação (12);

Por meio de manipulação matemática desta última equação foi definida a equação de igualdade

(12), onde o sinal negativo ou positivo que acompanha a tangente dependerá exclusivamente do quadrante analisado. Para cada direção, a equação (12) entra no problema como uma restrição de igualdade.

### 2.3 Fluxograma da metodologia

A Figura 2 apresenta o fluxograma da metodologia proposta, a fim de detalhar cada passo do algoritmo.

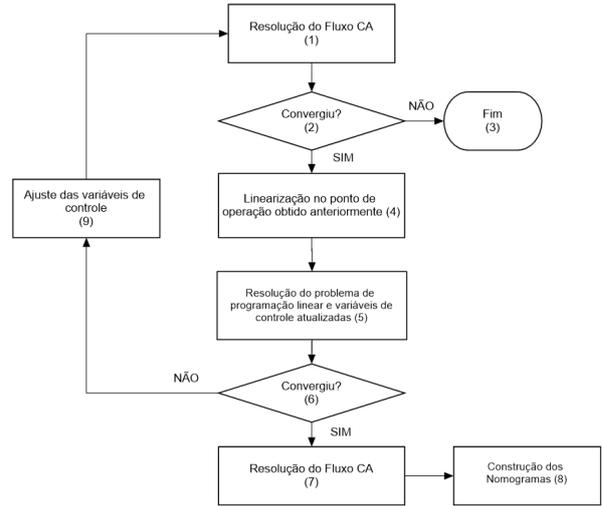


Figura 2: Fluxograma do FPO via LS.

No passo-1, um fluxo de potência convencional via Newton-Raphson para obtenção de um ponto de operação do sistema é executado.

No passo-2, é testada a convergência do fluxo de potência convencional. Caso a solução seja viável e factível (fluxo de potência convergido), parte-se para o passo-4. Caso contrário, o processo é finalizado, conforme indicado no passo-3.

No passo-4, são realizadas as linearizações das equações de potência em torno do ponto de operação. Esse passo consiste em calcular a Matriz Jacobiana e a Matriz de Sensibilidade no ponto de operação fornecido pelo passo-1 e preparar as variáveis necessárias para fornecer à *toolbox linprog*.

No passo-5, o valor da função objetivo é calculado, bem como são obtidas as variáveis de controle (potência ativa e reativa) através da otimização realizada pela *toolbox*.

No passo-6, é testada a convergência do FPO via linearizações sucessivas, cujos critérios de parada foram dados pelas equações (18), (19), (20) e (21).

Se um dos critérios anteriores for obtido, a partir das novas variáveis de controle, o fluxo de potência CA é simulado e os valores das variáveis de estado são atualizados, segundo o passo-7. O processo de máxima transferência de potência é finalizado e os valores das potências geradas para

cada gerador, em cada direção, são obtidos e armazenados, encerrando o processo de otimização no passo-8.

Caso o passo-6 não apresente convergência, as variáveis de controle são atualizadas (passo-9) e em seguida, retorna-se para o passo-1, onde os novos valores serão utilizados para a obtenção de um novo ponto de operação através do fluxo de potência convencional.

Com os valores limítrofes de potência ativa armazenados para cada gerador em cada uma das direções (passo-8) são finalmente construídos os nomogramas ligando-se os pontos pertencentes a um mesmo critério de segurança. A construção gráfica é realizada usando a ferramenta VisioChart.

### 3 Resultados

Os resultados obtidos pela metodologia são validados através de uma comparação quantitativa (resultados tabelados) e qualitativa (gráficos) com aqueles obtidos através do *software* Anarede.

#### 3.1 Sistema de 9 barras

Será utilizado um sistema tutorial composto por 9 barras dentre as quais três são do tipo PV (barras 1, 2 e 3) e seis do tipo PQ (barras 4 a 9), conforme ilustrado pela Figura 3. Limites mínimos e máximos de magnitude de tensão adotados são 0,90 e 1,10 pu, respectivamente. Para os ângulos das barras, valores mínimo e máximos de -90 graus e +90 graus são estipulados. Os dados do sistema são apresentados na referência (Anderson and Fouad, 2008).

Vale ressaltar que o intercâmbio do sistema é realizado entre áreas, agrupando os geradores em sistemas equivalentes. O sistema deve conter três equivalentes com no mínimo uma unidade geradora em cada. Nesse caso, em específico, o sistema apresenta apenas três geradores, portanto as próprias unidades geradoras individuais representam estes sistemas equivalentes.

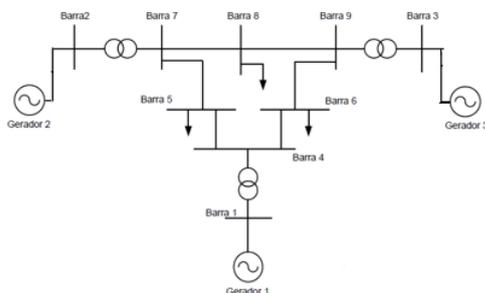


Figura 3: Sistema de 9 barras.

As potências iniciais geradas nas barras PV para o caso base são apresentadas na Tabela 2.

A Tabela 3 expõem os limites mínimos e máximos de potência ativa para as barras de geração e barra  $V\theta$ .

Tabela 2: Potências ativas geradas (Caso-base)

Barra	Tipo	$P_G$ (MW) – Caso Base
Barra 1	$V\theta$	142,50
Barra 2	PV	90,00
Barra 3	PV	85,00

Tabela 3: Limites de potência ativa

Barra	Tipo	$P_G^{MIN}$ (MW)	$P_G^{MAX}$ (MW)
Barra 1	$V\theta$	0,00	210,40
Barra 2	PV	0,00	163,20
Barra 3	PV	0,00	108,80

A Tabela 4 apresenta os resultados obtidos para a potência ativa máxima injetada por cada máquina geradora considerando limite de potência ativa, limite de Mvar e limite de tensão para cada uma das quatro direções, tanto pela metodologia proposta, quanto pelo Anarede, possibilitando desta forma uma análise quantitativa. Os valores máximos de potência ativa gerada são os mesmos para os três limites. Ambos os programas finalizam quando a máxima transferência de potência é alcançada.

Tabela 4: Máxima geração de potência ativa (MW) de cada unidade geradora para quatro direções.

Ângulo	Anarede			FPO via PLS		
	$P_{G1}$	$P_{G2}$	$P_{G3}$	$P_{G1}$	$P_{G2}$	$P_{G3}$
45°	95,7	113,8	108,8	95,7	113,8	108,8
135°	142,6	66,2	108,8	142,5	66,3	108,8
225°	210,3	56,4	51,4	210,4	56,3	51,3
315°	143,1	163,1	11,9	142,5	163,2	12,5

Os nomogramas, apresentados a seguir, possuem a seguinte interpretação:

- Região verde: Região segura de operação, isto é, a solução do caso base não apresenta nenhuma violação das grandezas monitoradas;
- Região vermelha: região onde uma ou mais grandezas, possuem os limites violados;
- Limite de Tensão (curva verde): Esta curva simboliza os pontos, a partir dos quais, a solução do fluxo de potência violou o limite de tensão em pelo menos uma barra do sistema;
- Limite Mvar (curva amarela): Esta curva informa os pontos a partir dos quais há violação do limite de suporte de potência reativa em pelo menos um gerador;
- Limite de MW (curva laranja): compreende os pontos que, no caso base, atingiram a capacidade máxima de transferência de potência ativa.

As Figuras 4, 5 e 6 representam os nomogramas dos planos  $G1 \times G2$ ,  $G1 \times G3$  e  $G2 \times G3$ , respectivamente, para a simulação realizada via Anarede. As curvas referentes ao limite de MVar, limite de tensão e limite de MW não podem ser distinguidas entre si, uma vez que os pontos limítrofes para cada um dos limites considerados foram os mesmos e portanto se sobrepõem.

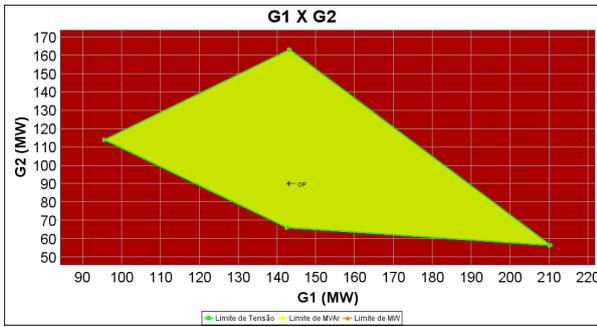


Figura 4: Nomograma dos planos G1 x G2 via Anarede.

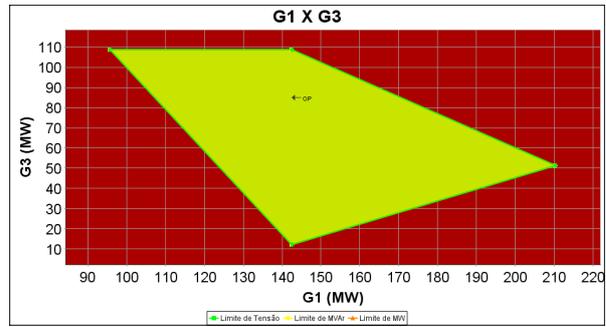


Figura 8: Nomograma dos planos G1 x G3 pelo FPO via LS.

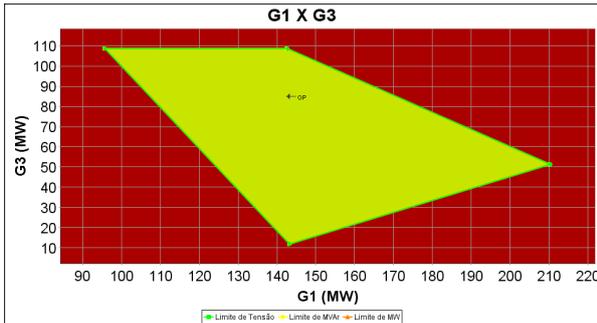


Figura 5: Nomograma dos planos G1 x G3 via Anarede.

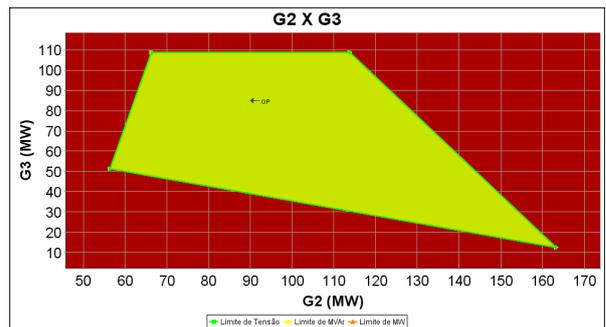


Figura 9: Nomograma dos planos G2 x G3 pelo FPO via LS.

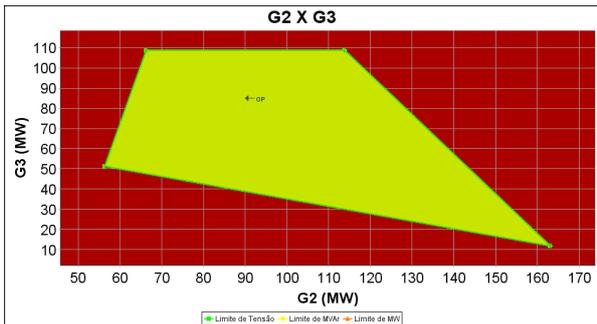


Figura 6: Nomograma dos planos G2 x G3 via Anarede.

Percebe-se que os nomogramas plotados pelo Anarede (Figuras 4, 5 e 6) são iguais aos obtidos pelo método proposto (Figuras 7, 8 e 9), demonstrando a eficiência da metodologia.

As Figuras 7, 8 e 9 ilustram os nomogramas dos planos G1 x G2, G1 x G3 e G2 x G3, respectivamente, para a simulação realizada pela metodologia proposta.

Os dois programas foram executados em um computador com processador Intel Core i7, 2,93GHz e 16,00GB de Memória RAM. Apesar dos desenvolvimentos dos programas em diferentes plataformas computacionais realizou-se uma comparação entre os tempos computacionais de forma grosseira para se obter uma primeira estimativa das diferentes performances computacionais. Avalia-se que a condução deste testes em uma mesma base e tendo-se as mesmas premissas e com a utilização de sistemas de grande porte será de fundamental importância na continuidade deste trabalho de pesquisa. A construção dos nomogramas via Anarede dá-se em 6,6s, enquanto que a otimização via FPO por LS utilizando o Matlab ocorre em 0,53s. É importante destacar que a execução do programa Anarede considera aspectos adicionais como, por exemplo, a impressão de arquivos durante sua execução. Contudo, avalia-se de forma positiva a diferença entre os tempos para a continuidade do trabalho, que pode trazer ganhos de tempo computacional visando principalmente sua utilização em ambientes de tempo real.

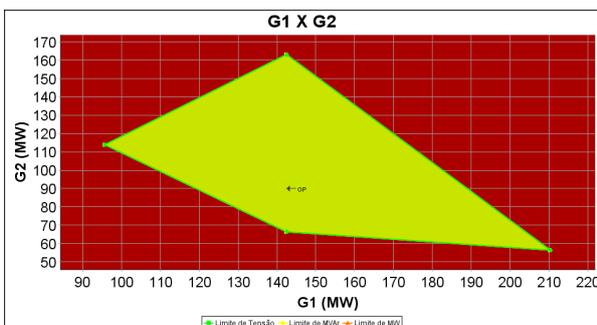


Figura 7: Nomograma dos planos G1 x G2 pelo FPO via LS.

## 4 Conclusões

Neste artigo, foi formulado um fluxo de potência ótimo resolvido por linearizações sucessivas, para a plotagem de nomogramas que informam regiões de segurança relativos ao ponto de operação do sistema elétrico de potência considerando intercâmbio de potência ativa gerada de regiões exportadoras para importadoras.

Um sistema tutorial de 9 barras foi utilizado para o estudo de caso.

Tanto através da análise quantitativa, quanto por meio dos resultados da análise gráfica (nomogramas) fica claro que a metodologia proposta cumpre com seu objetivo de forma eficiente e fidedigna.

Em relação a tempo computacional, a metodologia de FPO via LS mostra-se superior ao programa Anarede, reduzindo o tempo computacional em 91,97%.

Para trabalhos futuros, novos sistemas deverão ser testados, assim como se pretende fazer uma análise para um número maior de direções.

## Agradecimentos

Os autores agradecem ao CNPq, à CAPES, à FAPEMIG e ao INERGE pelo apoio financeiro. Também agradecem ao CEPEL pelo uso da versão acadêmica do programa Anarede.

## Referências

Abrantes, A. L. et al. (2013). Análise estática de estabilidade de tensão em sistemas elétricos de potência via nomogramas e computação paralela. Trabalho de Conclusão de Curso, USP (Universidade de São Paulo).

Affonso, C. d. M., Silva, L. J. d. and da Silva, L. C. (2008). Avaliação da estabilidade de tensão do sistema brasileiro: um caso de estudo, *Sba: Controle & Automação Sociedade Brasileira de Automatica de Automatica* **19**(3): 327–336.

Almeida, F. C., Passos Filho, J. A., Pereira, J. L., Henriques, R. M. and Marcato, A. L. (2013). Assessment of load modeling in power system security analysis based on static security regions, *Journal of Control, Automation and Electrical Systems* **24**(1-2): 148–161.

Alsac, O., Bright, J., Prais, M. and Stott, B. (1990). Further developments in lp-based optimal power flow, *IEEE Transactions on Power Systems* **5**(3): 697–711.

Anderson, P. M. and Fouad, A. A. (2008). *Power system control and stability*, John Wiley & Sons.

Jardim, J., Neto, C. and Dos Santos, M. G. (2006). Brazilian system operator online security assessment system, *Power Systems Conference and Exposition, 2006. PSCE'06. 2006 IEEE PES*, IEEE, pp. 7–12.

Neto, C. S., Quadros, M. A., Santos, M. G. and Jardim, J. (2010). Brazilian system operator online security assessment system, *Power and Energy Society General Meeting, 2010 IEEE*, IEEE, pp. 1–7.

Pareto, R. P. (2016). *Construção da região de segurança estática de sistemas elétricos de potência utilizando direções de transferência de geração ramificadas*, Master's thesis, Universidade Federal do Rio de Janeiro.

Rau, N. S. (2003). *Optimization principles: practical applications to the operation and markets of the electric power industry*, Vol. 16, John Wiley & Sons.

Sarmiento, H., Pampin, G., Barajas, R., Castellanos, R., Villa, G. and Mirabal, M. (2009). Nomograms for assistance in voltage security visualization, *Power Systems Conference and Exposition, 2009. PSCE'09. IEEE/PES*, IEEE, pp. 1–6.

Savulescu, S. C. (2009). *Real-time stability assessment in modern power system control centers*, Vol. 42, John Wiley & Sons.

Simões, J. A. A. et al. (2007). Modelo de optimal power flow utilizando sequential linear programming.

Sousa, A. A. and Torres, G. L. (2010). Robust optimal power flow by byrd-omojukun trust region method, *Sba: Controle & Automação Sociedade Brasileira de Automatica* **21**(3): 283–293.

Wood, A. J. and Wollenberg, B. F. (2012). *Power generation, operation, and control*, John Wiley & Sons.