



**IX SEPOPE**

23 a 27 de maio de 2004  
May, 23<sup>rd</sup> to 27<sup>th</sup> - 2004  
Rio de Janeiro (R.J.) - Brasil

**IX SIMPÓSIO DE ESPECIALISTAS EM PLANEJAMENTO  
DA OPERAÇÃO E EXPANSÃO ELÉTRICA**

**IX SYMPOSIUM OF SPECIALISTS IN ELECTRIC  
OPERATIONAL AND EXPANSION PLANNING**

**SP-085**

## **ANÁLISE DE FECHAMENTO DE ANEL VIA FLUXO DE POTÊNCIA ÓTIMO E ESTABILIDADE DINÂMICA**

Edimar J. de Oliveira\*    Nelson Martins    J. L. Rezende Pereira    Erick S. Delvizio    Luiz Cláudio A. Ferreira  
UFJF    CEPEL    UFJF    FCT    ONS

### **BRASIL**

**Resumo:** Este artigo apresenta uma metodologia para determinar a máxima abertura angular permitida entre os pólos do disjuntor para fechamento de anel em um sistema de potência. Para tanto, a metodologia proposta combina simulações em um programa de Fluxo de Potência Ótimo (FPO) com simulações em um programa de Estabilidade Dinâmica (ED). Através destas simulações, obtém-se uma curva de sensibilidade resultante das comparações do comportamento dinâmico do sistema e a abertura angular no pólo do disjuntor. A partir da análise da curva de sensibilidade, torna-se possível estabelecer a diferença angular máxima que proporciona o fechamento do anel com segurança. A formulação proposta é apresentada através de um sistema em anel de quatro barras e através do sistema equivalente da região sudeste do Brasil.

**Palavras-chave:** Fechamento de anel, Fluxo de Potência Ótimo, Análise de Estabilidade Dinâmica.

### **1. INTRODUÇÃO**

Durante o processo de recomposição de um sistema elétrico de potência ocorre, ocasionalmente, uma diferença excessiva entre os ângulos das tensões dos pólos do disjuntor que efetuará o fechamento de um anel. Fechar um anel com uma grande diferença angular das tensões pode causar torques eletromecânicos excessivos no eixo dos geradores, trazendo danos permanentes [1].

Até meados da década de setenta, quando era identificado o problema de diferença angular superior àquelas recomendadas em simulações da operação do sistema, tentava-se reduzir esta diferença através de um processo de tentativa e erro para o redespacho da geração ativa, utilizando-se o modelo DC de fluxo de potência. Uma característica destes procedimentos é o tempo elevado para se alcançar um despacho

satisfatório [2]. Melhorias nos modelos matemáticos foram sugeridas em [3] a fim de diminuir o tempo para a coordenação da restauração de um sistema, mas pouco foi feito em relação aos estudos para a redução da diferença angular [4].

Em 1998, foi proposto na referência [5] um modelo baseado em fatores de sensibilidade entre os ângulos das barras de interesse e a potência ativa gerada, utilizando-se fluxo de potência CA. Já em 1999, o modelo proposto em [6], expressa a diferença angular entre duas barras especificadas, em termos de uma combinação linear da mudança da potência ativa dos geradores, baseando-se na sensibilidade das barras geradoras. Em 2003, foi apresentado na referência [7] um novo modelo para estudos de fechamento de anel via fluxo de potência ótimo baseado na metodologia primal-dual de pontos interiores [8-9]. Neste caso, a diferença angular entre os pólos do disjuntor deve ser especificada e é incorporada ao FPO através de restrições funcionais.

No presente trabalho, uma extensão do trabalho apresentado em [7], é realizada. Ou seja, o objetivo é estabelecer o valor da diferença angular entre as barras onde ocorrerá o fechamento de anel. Para tanto, a metodologia proposta combina simulações em um programa de Fluxo de Potência Ótimo (FPO) com simulações em um programa de Estabilidade Dinâmica (ED).

A formulação proposta é apresentada de forma tutorial através de um sistema em anel de quatro barras. O artigo também mostra os resultados obtidos através da análise de grandes áreas do sistema elétrico brasileiro (Rio de Janeiro, São Paulo e Minas Gerais), interligadas em anel. Os resultados encontrados mostram que a metodologia proposta é eficaz para implementação em estudos off-line.

\* Rua Américo Lobo, 2385/301 - CEP: 36050-000 - Juiz de Fora - Minas Gerais -Brasil.  
e-mail: edimar@lacee.ufjf.br

## 2. DESCRIÇÃO DA METODOLOGIA

A metodologia proposta neste artigo tem por objetivo encontrar (i) a abertura angular entre os pólos do disjuntor para permitir o fechamento do anel com segurança e (ii) o ponto de operação do sistema antes do fechamento do anel, conforme mostrado no fluxograma da Figura 1. A seguir será descrita cada uma das etapas do fluxograma apresentado.

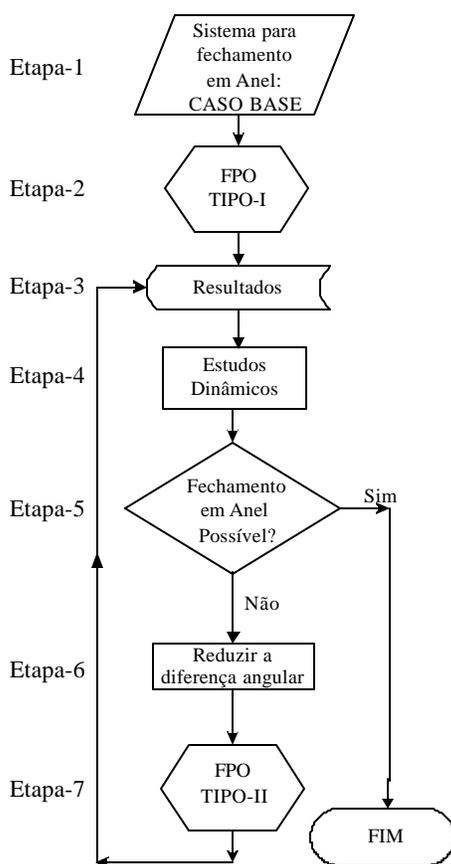


Figura 1 – Fluxograma da Metodologia.

### Etapa-1: Caso Base

Ponto de operação atual do sistema. Normalmente neste ponto de operação não é possível fechar o anel devido a grande diferença angular encontrada entre os pólos do disjuntor.

### Etapa-2: FPO Tipo-I

Nesta etapa utiliza-se o programa de FPO onde o objetivo é encontrar a mínima diferença angular entre as barras do sistema ( $i-j$ ) onde se pretende fechar o anel. O problema é escrito como:

$$\text{Min} \left( \frac{1}{2} \sum (\hat{\theta}_i - \hat{\theta}_j)^2 \right) \quad (1)$$

s.a/

$$\mathbf{g}(\mathbf{X}) = 0 \quad (1.1)$$

$$\mathbf{l} \leq \mathbf{X} \leq \mathbf{u} \quad (1.2)$$

Onde:

- $\theta_i$  Ângulo de fase da barra- $i$ ;
- $\theta_j$  Ângulo de fase da barra- $j$ ;
- $\rho$  Peso associado à diferença angular entre as barras  $i-j$ .
- $\mathbf{X}$  Vetor das variáveis de otimização tais como magnitude das tensões, ângulos de fase, despacho de potência ativa e reativa, tap's de transformadores, compensação série etc;
- $\mathbf{g}(\mathbf{X})$  Restrições de igualdade que incluem equações de balanço de potência ativa e reativa;
- $\mathbf{l}, \mathbf{u}$  Limites inferiores e superiores de  $\mathbf{X}$ .

A solução do FPO Tipo-I fornece a mínima diferença angular ( $\theta_{ij}^{\min}$ ) entre as barras onde vai ocorrer o fechamento do anel (barras  $i$  e  $j$ ). Destaca-se que nesta etapa de estudo não é permitido corte de carga. Esta técnica será usada em etapas subsequentes.

### Etapa-3: Resultados

Nesta etapa, os resultados do FPO Tipo I são preparados para a entrada de dados do programa de estabilidade dinâmica.

Para esta análise dinâmica foram utilizados os programas: (i) ANATEM [10], para estudos de estabilidade de sistemas elétricos de potência à frequência fundamental e (ii) PLOT CEPEL [11], para visualização das curvas de resultados gerados pelo ANATEM.

### Etapa-4: Estudos Dinâmicos

Realiza-se nesta etapa a simulação do fechamento da linha  $i-j$  tendo como ponto de operação os valores definidos na Etapa-3.

A partir desta simulação dinâmica verifica-se a ocorrência de excesso de potência acelerante em algum gerador, além de 50% do valor nominal, conforme recomendação do ONS [12].

### Etapa-5: Fechamento de anel possível?

De acordo com os resultados da análise dinâmica descrita na etapa anterior, verifica-se a viabilidade do fechamento do anel.

Se a potência acelerante de algum dos geradores existentes no sistema não ultrapassou o limite de 50% da potência nominal, o processo iterativo é encerrado e os resultados encontrados são considerados satisfatórios. Ou seja, os resultados do FPO Tipo I obtidos na Etapa-2 satisfazem os critérios de

estabilidade. Caso contrário, o algoritmo passa para a Etapa-6.

#### Etapa-6: Reduzir a diferença angular

Nesta etapa, o valor de  $\theta_{ij}^{\min}$  encontrado na Etapa-2 deve ser reduzido até um novo valor,  $\bar{\theta}_{ij}$ , para que o fechamento do anel torne-se possível (Etapa-5). Portanto, o problema resume-se em encontrar o valor adequado para  $\bar{\theta}_{ij}$ .

A escolha de  $\bar{\theta}_{ij}$  proposta neste artigo é feita através da análise de sensibilidade entre  $\bar{\theta}_{ij}$  e a maior potência elétrica acelerante das máquinas do sistema. De acordo com os testes realizados em vários sistemas, verificou-se que esta sensibilidade apresenta-se próximo de um comportamento linear.

A partir desta aproximação para o comportamento da sensibilidade, obtém-se o gráfico da Figura 2. O ponto 1 é obtido através dos resultados da Etapa-4 para o gerador com maior oscilação.

Partindo de um ponto na ordenada do gráfico que corresponde a máxima potência elétrica acelerante ( $P_{ELE}$ ), obtém-se, na abscissa, o valor da diferença angular  $\bar{\theta}_{ij}$  desejada.

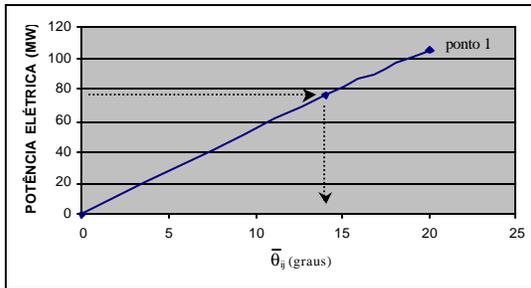


Figura 2 - Curva de Sensibilidade.

#### Etapa-7: FPO Tipo-II

Com o valor de  $\bar{\theta}_{ij}$  determinado na Etapa anterior, deve-se realizar uma nova simulação utilizando-se o FPO. Neste caso, a função objetivo é modificada para mínimo corte de carga e a restrição de mínimo valor da diferença angular entre as barras onde ocorrerá o fechamento do anel é adicionada ao problema, tal como realizado em [7].

O problema de FPO Tipo II é então escrito da seguinte forma:

$$\text{Min} \left( \sum_{i \in I_L} \rho_i \cdot (PL_i^0 - PL_i) \right) \quad (2)$$

s. a/

$$\mathbf{g}(\mathbf{x}) = 0$$

$$\theta_{ij} \leq \bar{\theta}_{ij}$$

$$\mathbf{l} \leq \mathbf{X} \leq \mathbf{u}$$

Onde:

- $I_L$  Representa o conjunto de barras de carga;
- $\rho_i$  Representa o peso associado ao corte de carga;
- $PL_i$  Representa a carga ativa restante, valor final, na barra  $i$ ;
- $PL_i^0$  Representa o valor base, valor inicial, de carga ativa da barra  $i$ .

Seguindo, retorna-se à Etapa-3 para preparação dos resultados do FPO e subsequente análise dinâmica.

A cada simulação da Etapa-7, o cálculo do valor da máxima diferença angular torna-se mais preciso. Os resultados obtidos mostram que normalmente são necessárias duas interações entre os programas de estabilidade dinâmica e de otimização.

### 3. ESTUDO DE CASOS

Esta seção apresenta um exemplo de quatro barras para ilustrar o problema de fechamento de anel associado a metodologia proposta. A análise é também realizada para um caso real de recomposição de grandes áreas no sistema elétrico brasileiro.

#### 3.1 Sistema Teste

O sistema apresentado na Figura 3 possui quatro barras interligadas em anel por quatro linhas de transmissão (LT). As barras 1, 2 e 3 são barras de geração e a barra 4 concentra a carga do sistema (77,15 Mw), possuindo também um Compensador Síncrono (CS). Pode-se notar na Figura 3 que o anel estará fechado quando as barras 1 e 4 forem conectadas através da LT<sub>1-4</sub>. Os dados das linhas deste sistema são apresentados na Tabela 1 na base de 100 MVA. As tensões devem ser mantidas entre 1,00 e 1,01 pu.

Tabela 1: Dados das linhas de transmissão

Linha	STATUS	R(%)	X(%)
LT <sub>1-2</sub>	LIGADA	0.0	90.0
LT <sub>2-3</sub>	LIGADA	0.0	70.0
LT <sub>3-4</sub>	LIGADA	0.0	40.0
LT <sub>1-4</sub>	DESLIGADA	0.0	25.0

A Figura 3 mostra as condições de funcionamento do sistema antes do fechamento do anel, ou seja, antes do fechamento da linha 1-4.

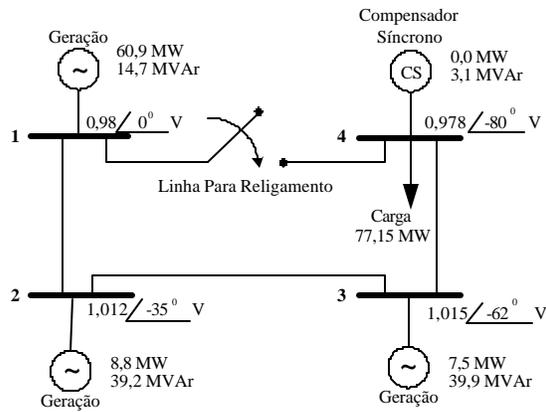


Figura 3 - Sistema de 4 barras (Caso Base-CB).

Através da análise dinâmica deste sistema, para estas condições iniciais, verificou-se grandes oscilações da potência elétrica do Gerador-1, tornando o sistema instável. Portanto, deve-se reduzir a diferença angular para que o anel seja fechado com segurança. Para tanto, o FPO Tipo-I é executado para obtenção da mínima diferença angular entre as barras 1 e 4, sem corte de carga. Neste caso, o ângulo foi reduzido de  $80^\circ$  para  $57^\circ$ .

Uma nova análise dinâmica é realizada para este sistema com os dados correspondentes a diferença angular de  $57^\circ$ . O resultado da análise mostra que o sistema ainda é instável e que a  $P_{ELE}$  do Gerador-1 é maior que o valor recomendado pelo ONS.

A partir daí, a Etapa-6 do algoritmo é executada para a construção da sensibilidade entre  $\dot{A}P_{ELE}$  do Gerador-1 e a diferença angular  $\delta_{1-4}$ . A Figura-4 mostra esta sensibilidade. Pode-se determinar através da potência nominal do gerador e da recomendação do ONS que  $\Delta P_{ELE}$  deve ser no máximo 45 Mw. Em consequência, tem-se da Figura-4 que  $\delta_{1-4}$  deve assumir o valor máximo de  $28^\circ$ .

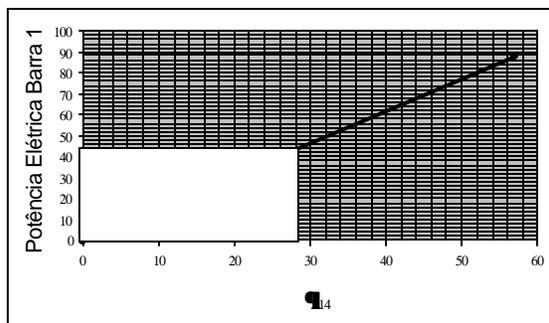


Figura 4- Curva de Sensibilidade entre  $\Delta P_{ELE}$  e  $\delta_{1-4}$ .

Com a informação da máxima abertura angular permitida para fechamento do anel, o FPO Tipo-II é

executado para determinar o mínimo corte de carga necessário para garantir esta diferença angular. Destaca-se que foi necessário um corte de carga de 40,51Mw na barra 4.

O comportamento dinâmico do Gerador-1 para fechamento do anel com diferença angular de  $28^\circ$  é apresentado na Figura-5. A análise da figura mostra que o comportamento dinâmico do Gerador-1 encontra-se adequado. Neste sentido, a análise é finalizada conhecendo-se o estado ótimo do sistema que proporcione o fechamento do anel com segurança.

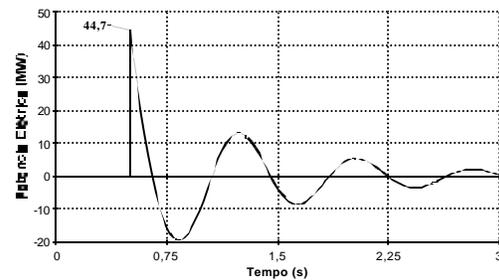


Figura 5 - Oscilações de  $\dot{A}P_{ELE}$  do Gerador 1.

### 3.2 Sistema Equivalente Brasileiro

A Figura 6 apresenta o diagrama esquemático de três grandes áreas do sistema elétrico brasileiro – Rio de Janeiro, São Paulo e Minas Gerais. O sistema em análise possui 112 barras, 156 linhas de transmissão e 8 usinas atendendo 2000 Mw de carga. Neste exemplo, o método proposto será aplicado no estudo do fechamento do anel através da LT Adrianópolis (AD) – Itutinga (IT) em 345 kV, destacada pela linha pontilhada. As condições reais na recomposição das áreas foram respeitadas, tais como: limites de tensão, de tap's etc.

Durante a fase de recomposição do sistema foram provocadas, intencionalmente, ligeiras violações nas recomendações operativas para valores de carga e geração, de forma a obter maiores defasagens angulares e, assim, testar a efetividade e robustez do método proposto em condições adversas. Outra diferença incorporada em relação ao caso original foi o aumento de carga na barra de AD (barra 140) de 145MW.

A Tabela 2 mostra os principais resultados obtidos através da simulação de cada Etapa do algoritmo proposto. Destaca-se que as maiores oscilações ocorrem nas máquinas situadas na usina de Jaguará (JG). Para o caso base, a diferença entre os ângulos das barras de Adrianópolis(AD) e Itutinga(IT) ( $\delta_{IT-AD}$ ) foi  $112^\circ$ , impondo uma variação de 95,5 Mw na potência elétrica de Jaguará(JG).

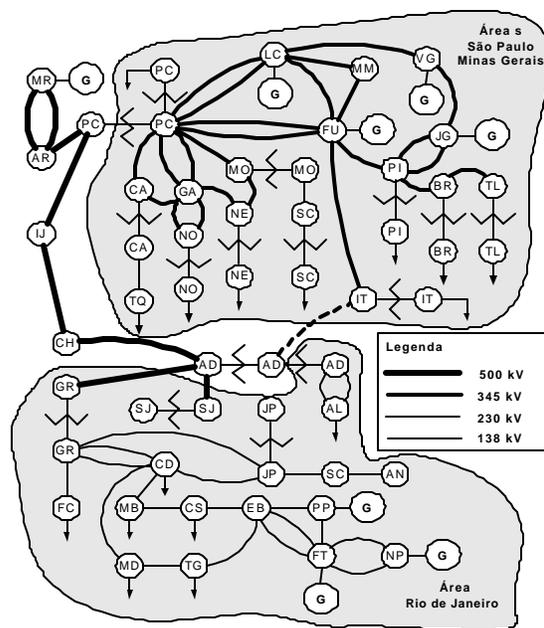


Figura 6 - Recomposição das Áreas Rio de Janeiro, São Paulo e Minas Gerais.

Tabela 2: Resultados para o Sistema Brasileiro

Descrição	CB	FPO-I	FPO-II
$\bar{\epsilon}_{IT-AD}$	112°	79°	70°
Corte de Carga (Mw)	0	0	168,6
$\Delta P_{EFE JG}$ (Mw)	95,5	56,3	39,4

O fechamento do anel com um ângulo de 79°, sem corte de carga, ainda provoca uma grande variação inaceitável na potência elétrica de Jaguará. A partir destes resultados realiza-se a análise de sensibilidade linear. Finalmente, após duas interações entre os programas de FPO e ED, determinou-se a redução desta diferença angular para 70° com um corte de carga total de 168,8 Mw a fim de permitir o fechamento do anel com oscilações dentro de limites recomendados pelo ONS. Verifica-se neste caso que a potência elétrica de Jaguará(JG) permaneceu abaixo do limite de 40Mw.

#### 4. CONCLUSÃO

Este artigo mostrou uma metodologia para análise de fechamento de anel baseada na simulação combinada de fluxo de potência ótimo e estabilidade dinâmica.

A sensibilidade entre as grandezas: (i) defasagem angular do ramo de fechamento do anel, obtida na simulação do FPO e (ii) variação na potência elétrica, obtida através de análise dinâmica foi considerada linear. Os resultados obtidos através desta simplificação podem ser considerados satisfatórios porque o comportamento real entre estas grandezas encontra-se próximo de uma reta. Ou seja, a

metodologia necessita de poucas interações entre os programas.

Através dos estudos realizados pode-se concluir que a metodologia proposta apresenta uma alternativa para o tratamento de um importante problema de operação de sistemas elétricos de potência.

#### REFERÊNCIAS

- [1] M. Adibi; R. Kafka.; "Power System Restoration Issues," *IEEE Power System Restoration – Methodologies and Implementation*, vol.4, No.2, pp. 31-36, 2000;
- [2] A. Ketabi; A. Ranjbar; "New Approach To Standing Phase Angle Reduction For Power System Restoration," *IEEE Electric Power Engineering, PowerTech Budapest 99*. International Conference, 1999;
- [3] T. Nagata; H. Sasaki; R. Yokoama; "Power System Restoration By Joint Usage Expert System And Mathematical Programming Approach" *IEEE Transaction on Power System*, Vol. 10, No.3, pp. 1473-1479, 1995;
- [4] S. Wunderlich; M.M. Adibi; R. Fischl; C.O.D. Nwankpa; "An Approach To Standing Phase Angle", *IEEE Transaction on Power System*, vol. 9, No.1, pp. 470-476, 1994;
- [5] D. Hazarika; A.K. Sinhá; "Standing Phase Angle Reduction For Power System Restoration" *IEE Proceedings on Generation, Transmission and Distribution*, vol.145, No. 1, pp. 82-88, January, 1998;
- [6] D. Hazarika; A.K. Sinhá; "An Algorithm For Standing Phase Angle Reduction For Power System Restoration" *IEEE Transaction on Power System*, vol.14, No.4, pp. 1213-1218, Novembro, 1999;
- [7] E. Delvizio; N. Martins; E. Oliveira; J.L.R. Pereira; L.C.A. Ferreira; 2003. "Recomposição de Sistemas Elétricos: Estudos para Fechamento de Anel Via Método de Pontos Interiores". *XVII SNPTEE* – 19 a 24 de Outubro.
- [8] N.K. Karmakar, "Computational Results of an Interior Point Algorithm or Large Scale Linear Programming," *Mathematical Programming*, 52, pages 555-586, 1991.
- [9] S. Granville, J.C.O Melo, A.C.G. Melo, "Application of Interior Point Methods to Power Flow Unsolvability" *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol.11, No.2, May, 1996. P: 1096-1103.

- [10] Ricardo Diniz Rangel, Sergio Gomes Jr., Carlos Henrique C. Guimarães, Nelson Martins, Alex de Castro, Herminio J. C. P. Pinto, Antônio R. C. D. Carvalho, "Recent Developments in ANATEM – a Comprehensive Program for the Analysis of Electromechanical Stability of Large Power Systems", *VII SEPOPE 2000*, Curitiba, PR, Brazil.
- [11] A. de Castro, P.E.M. Quintão, S. Gomes Jr., N. Martins, H.J.C.P. Pinto, "An Integrated Plotting Tool for Power System Analysis Software". *XVII SEPOPE – 23 a 27 de Maio de 2004*, Rio de Janeiro (RJ) Brasil.
- [12] Comitê de Estudos 38 do Cigré – Brasil; "Seminário Sobre Recomposição de Sistemas de Potência". 17 a 19 de Novembro, 1997;