



**GRUPO IV
GRUPO DE ESTUDO DE ANÁLISE E TÉCNICAS DE SISTEMAS DE POTÊNCIA - GAT**

MÉTODO PARA UMA FERRAMENTA DE AUXÍLIO À RECOMPOSIÇÃO DE SISTEMAS ELÉTRICOS DE POTÊNCIA

Luiz Cláudio A. Ferreira¹ **A.C. Zambroni Souza** **Nelson Martins** **Edimar J. Oliveira** **José Luiz R. Pereira**
ONS **UNIFEI** **CEPEL** **UFJF** **UFJF**

RESUMO

A experiência acumulada na operação do sistema elétrico brasileiro vem comprovando que o processo de recomposição do sistema é, muitas vezes, de difícil previsão.

As incertezas com relação à configuração da rede, da carga atendida e da geração recomposta em tempo real acabam por impor, na fase de planejamento, exigências conservativas que freqüentemente requerem ajustes em uma rede fragilizada, com poucos recursos e sujeita a riscos de violação de seus limites.

Esperando servir como auxílio às equipes de operação, este artigo propõe um método para o fechamento de anéis, levando em conta aspectos estáticos e dinâmicos, durante o processo de restabelecimento de um sistema elétrico de grande porte.

PALAVRAS-CHAVE

Recomposição, Fluxo de Potência Ótimo, Pontos Interiores, Estabilidade, Operação em Tempo Real.

1.0 - INTRODUÇÃO

Durante o processo de recomposição de um sistema elétrico de potência ocorrem, com freqüência, diferenças angulares significativas entre os ângulos das tensões dos pólos abertos de disjuntores que efetuarão o fechamento de anéis. Fechar um anel com uma grande diferença angular nas tensões pode causar torques elétricos transitórios excessivos no eixo dos geradores, trazendo danos permanentes a estes equipamentos [1], ou levar o sistema a um ponto de operação instável.

Durante a fase de recomposição em tempo real, a redução das diferenças angulares é obtida principalmente através do redespacho de potência ativa e reativa nos geradores já recompostos. Nesta fase, manobras nos poucos equipamentos shunt de controle de tensão disponíveis podem provocar grande impacto no sistema por estes dispositivos estarem dimensionados para este controle em rede completa. Além disso, dispositivos shunt de controle de tensão exigem tempo para manobra, ainda que inferior aos tempos necessários para atuação em LTC de transformadores da transmissão.

A atuação das equipes de operação em dispositivos de controle, com o objetivo de reduzir as diferenças angulares e permitir o fechamento seguro de anéis é dificultada tanto pela escassez de recursos, como também pela baixa sensibilidade, com relação às influências destes dispositivos, em rede alterada. Estas dificuldades, somadas às severas restrições impostas, como as de tensão, culminam muitas vezes na necessidade de corte de parte da carga recomposta, realimentando o risco de violações.

A determinação dos máximos valores permitidos entre os pólos do disjuntor responsável pelo religamento seguro de um anel durante o processo de recomposição do sistema, vem sendo tratada no ambiente do planejamento da operação, através da combinação de ferramentas de regime permanente e dinâmico.

Até meados da década de setenta, quando era identificado o problema de diferença angular superior àquelas recomendadas em simulações da operação do sistema, buscava-se reduzir esta diferença através de um processo de tentativa e erro para o redespacho da geração de potência ativa, utilizando-se o modelo DC de fluxo de carga. Uma característica destes procedimentos era o tempo elevado para se alcançar um despacho satisfatório [2].

Melhorias nos modelos matemáticos foram sugeridas [3], a fim de diminuir o tempo de recomposição do sistema, mas pouco foi feito em relação aos estudos da redução do ângulo de fase [4].

Em 1998, foi proposto [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. No ano seguinte foi proposto um modelo [6], também baseado em fatores de sensibilidade, que expressava a diferença angular incremental entre duas barras especificadas, como uma combinação linear da variação da potência ativa dos geradores.

Em 2003 [7] o problema foi tratado de maneira mais rigorosa, através do uso de um programa de Fluxo de Potência Ótimo (FPO), determinando os mínimos desvios necessários das gerações de potência ativa, para uma Máxima Diferença Angular (MDA) pré-especificada, respeitando condições e restrições do sistema.

Apesar de preencher uma importante lacuna ao apontar e minimizar ações de controle, a referência [7] ainda dependia da determinação das MDA, estabelecidas em estudos de planejamento da operação, ambiente em que as incertezas acabavam por impor uma grande quantidade de ajustes no sistema, de forma a se obter diferenças angulares conservativas, quando do fechamento de anéis.

2.0 - MÉTODO PROPOSTO

O método proposto neste artigo está centrado na busca de ajustes mínimos do sistema que permitam o fechamento seguro de um anel, em um local pré-especificado.

A Figura 1 resume a rotina utilizada pelo método.

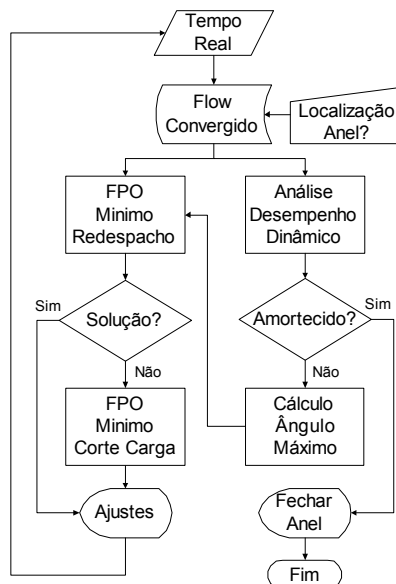


Figura 1: Rotina do Método Proposto

Em uma primeira fase, um programa de Fluxo de Potência Ótimo (FPO) é utilizado para avaliar o ponto de operação, sugerindo ajustes para corrigir possíveis violações, através de mínimo redespacho de potência ativa e reajustes na potência reativa dos geradores do sistema recomposto.

Corrigidas as violações, o desempenho dinâmico do sistema é então avaliado para o fechamento de anel em um ponto da rede especificada pelo operador. Caso os critérios pré-estabelecidos para o desempenho dinâmico do sistema não sejam satisfeitos [8], o método calcula o ângulo máximo para o fechamento seguro do anel, fornecendo-o como restrição adicional ao programa de fluxo de potência ótimo.

Não havendo solução para o atendimento das restrições impostas ao FPO, uma segunda rotina poderá sugerir ao operador um mínimo corte de carga necessário para a solução.

O processo termina quando não existem violações dos limites de regime permanente e estão satisfeitos os critérios para o desempenho dinâmico do sistema.

3.0 - FORMULAÇÃO MATEMÁTICA

3.1 Adequação do FPO

A formulação matemática do método proposto é iniciada pela adequação do problema de fluxo de potência ótimo para o estudo de fechamento de anel.

Tradicionalmente, o problema de FPO vem sendo formulado como:

$$\text{Min } f(X) \quad (1)$$

$$\text{s.a } h(X) = 0 \quad (1.1)$$

$$l \leq X \leq u \quad (1.2)$$

Onde:

X Vetor das variáveis de otimização tais como magnitude das tensões, despacho de potência ativa e reativa, tapas de transformadores, compensação série, etc.

f(X) Função objetivo;

h(X) Restrições de igualdade que incluem equações de balanço de potência ativa e reativa;

l, u Limites inferiores e superiores de X.

O problema do religamento seguro de uma linha de transmissão consiste em se determinar a Máxima Diferença Angular (MDA) entre os pólos abertos do disjuntor responsável pelo fechamento do anel. Este problema pode ser resolvido adicionando-se ao sistema de restrições originais do problema de fluxo de potência ótimo (1), a inequação:

$$\theta_{ij} \leq \bar{\theta}_{ij} \quad (2)$$

Onde:

θ_{ij} Diferença angular entre as barras i e j;

$\bar{\theta}_{ij}$ Máxima diferença angular permitida para recomposição da LT entre as barras i e j.

A inequação (2) pode ser substituída por uma equação de igualdade da forma:

$$Y_{Rij} - \theta_{ij} = 0 \quad (3)$$

Onde Y_{Rij} é uma variável de folga com limites pré-especificados, ou:

$$0 \leq Y_{Rij} \leq \bar{\theta}_{ij} \quad (4)$$

A MDA ($\bar{\theta}_{ij}$) deve idealmente ser atingida através de um mínimo desvio de potência ativa (PG^0) para o ponto de operação inicial.

Para atingir tal objetivo, a equação de mínimo desvio de potência ativa gerada é incluída na função objetivo do problema de otimização:

$$\text{FOB} = \frac{1}{2} \sum_{i \in I_G} \rho (PG_i - PG_i^0)^2 \quad (5)$$

Onde:

FOB Função objetivo de mínimo desvio de potência ativa;

I_G Representa o conjunto de geradores de potência ativa controláveis;

ρ Penalidade para a variação de potência ativa;

PG_i Potência ativa no gerador i, redespachada para permitir o fechamento do anel.

PG_i^0 Potência ativa no gerador i para o ponto de operação inicial, com o anel aberto;

Assim o problema de FPO, adequado para estudos de fechamento de anel, fica descrito por:

$$\text{FOB} = \frac{1}{2} \sum_{i \in I_G} \rho (PG_i - PG_i^0)^2 \quad (6)$$

$$\text{s.a } h(X) = 0 \quad (6.1)$$

$$Y_{Rij} - \theta_{ij} = 0 \quad (6.2)$$

$$l \leq X \leq u \quad (6.3)$$

$$0 \leq Y_{Rij} \leq \bar{\theta}_{ij} \quad (6.4)$$

Não existindo solução para o problema, a função objetivo (6) é modificada para a de mínimo corte de carga, ou:

$$\text{Min} \left(\sum_{i \in I_L} \rho_1 (PL_i^0 - PL_i) \right) \quad (7)$$

$$\text{s.a} \quad h(X) = 0 \quad (7.1)$$

$$Y_{Rij} - \theta_{ij} = 0 \quad (7.2)$$

$$l \leq X \leq u \quad (7.3)$$

$$0 \leq Y_{Rij} \leq \theta_{ij} \quad (7.4)$$

Onde:

I_L Representa o conjunto de barras de carga;

ρ_1 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 inicial, de carga ativa da barra i .

Neste artigo, a técnica de pontos interiores associada à teoria primal-dual para a atualização do parâmetro barreira [9][10], foi utilizada para a solução dos problemas (6) e (7).

3.2 Cálculo da Máxima Diferença Angular (MDA)

O cálculo da máxima diferença angular segura – MDA ($\bar{\theta}_{ij}$), no fechamento do anel em um dado ponto do sistema, é de fundamental importância para o método proposto, visando sua incorporação como restrição adicional no FPO e futura determinação do mínimo redespacho nas unidades geradoras do sistema necessário para este fim.

Testes realizados no fechamento de anéis utilizando diferentes regiões do sistema elétrico brasileiro indicam um comportamento próximo do linear entre a maior potência acelerante do gerador do sistema e a diferença angular entre os pólos do disjuntor responsável pelo fechamento do anel (θ_{ij}). Assim, sugere-se para o cálculo da MDA, a equação empírica:

$$\bar{\theta}_{ij} = K \frac{P_n}{P_a} \theta_{ij} \quad (8)$$

Onde:

$\bar{\theta}_{ij}$ Máxima diferença angular permitida para recomposição da linha entre as barras i e j ;

K Constante de segurança; neste artigo, adotou-se $K=0,2$;

P_a Maior potência acelerante verificada (MW);

P_n Potência nominal do gerador com maior potência acelerante (MW);

θ_{ij} Diferença angular entre as barras i e j .

4.0 - APLICAÇÃO

A Figura 2 mostra um diagrama esquemático das fases fluente e coordenada de recomposição de três grandes áreas do sistema elétrico brasileiro – Rio de Janeiro, São Paulo e Minas Gerais. Neste artigo, o método proposto foi aplicado no estudo do fechamento do anel através da LT Adrianópolis (AD) – Itutinga (IT) em 345 kV, destacada pela linha pontilhada. O sistema, neste estágio de recomposição, possui 112 barras, 156 linhas de transmissão e 8 usinas atendendo cerca de 2000 MW de carga. Instruções de Operação (IO), baseadas em estudos prévios de recomposição, liberam o fechamento deste anel após o fechamento do paralelo entre as áreas, através da transformação 500/345 kV de Poços de Caldas (PC), ambos na fase coordenada [11].

As condições e restrições reais na recomposição das áreas foram respeitadas, com o objetivo de reproduzir de forma realista, as dificuldades enfrentadas pelos operadores do sistema. Estas condições incluem, além da configuração da rede ilustrada na Figura 2, a consideração do número mínimo de unidade geradoras e suas faixas permitidas de geração de potência ativa e reativa nas usinas e o respeito aos limites de tensão em barras de transmissão e de carga do sistema, todos definidos em instrução de operação específica [7][11].

De forma a obter maiores defasagens angulares e, assim, testar a efetividade e robustez do método proposto em condições adversas, intencionalmente, considerou-se, em alguns pontos do sistema, valores recompostos de carga e geração ligeiramente diferentes dos previstos [7][11], elaboradas a partir de estudos na fase de planejamento do sistema.

Na prática, sabe-se que é difícil a previsão dos montantes da carga que serão recompostos, tanto pela incerteza do período de carga em que a interrupção ocorrerá, como também pela dificuldade de um controle rigoroso, por parte das equipes de tempo real, do processo de tomada de carga pelas empresas de distribuição.

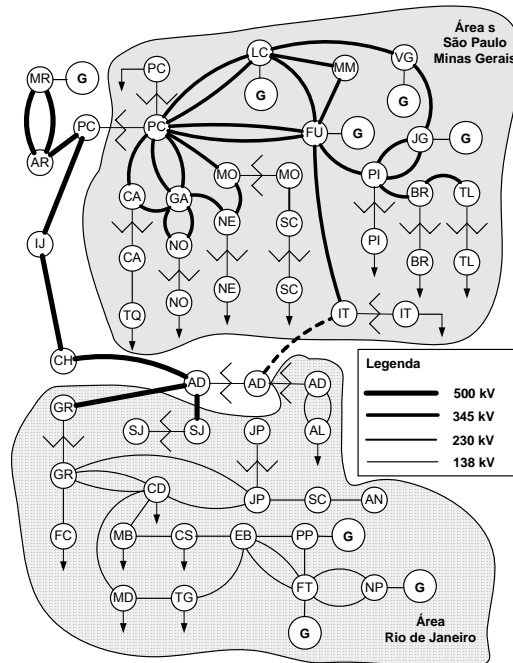


Figura 2: Recomposição das Áreas Rio de Janeiro, São Paulo e Minas Gerais.

A Tabela 1 contém os dados sobre a condição operativa inicial, antes da aplicação do método proposto. Em destaque, a diferença de cerca de 33° entre os ângulos das barras AD e IT, antes do fechamento do anel do sistema, através da LT 345 kV Adrianópolis/Itutinga.

Tabela 1: Condição operativa inicial

Barra	Ângulo (Graus)	Geração	
		(MW)	(Mvar)
IT345	-14,3	-	-
AD345	-47,7	-	-
LC	-3,7	750	-280
FU	-3,5	750	-73
JG	-4,5	75	29
VG	-4,8	70	27
MR	-23,0	110	-257
NP	-50,4	20	26
FT	-50,8	10	30
PP	-49,3	15	18

A Figura 3 mostra que o desempenho dinâmico do sistema é pouco amortecido, após o fechamento, em Adrianópolis, da LT 345 kV Adrianópolis/Itutinga, com a diferença angular de 33° do caso inicial. Nesta condição, a Figura 4 mostra que a relação entre a potência acelerante e nominal na UHE Marimbondo é superior a 20% ($K=0,2$ na equação 8), valor limite para aquela relação, proposto como seguro.

Para um fechamento seguro, o método sugere, com a equação (8), uma Máxima Diferença Angular (MDA) de 26 graus entre os pólos do disjuntor de Adrianópolis, responsável pelo fechamento do anel, ou:

$$\bar{\theta}_{ij} = 0,20 \cdot \frac{1}{0,255} \cdot 33 \cong 26 \quad (9)$$

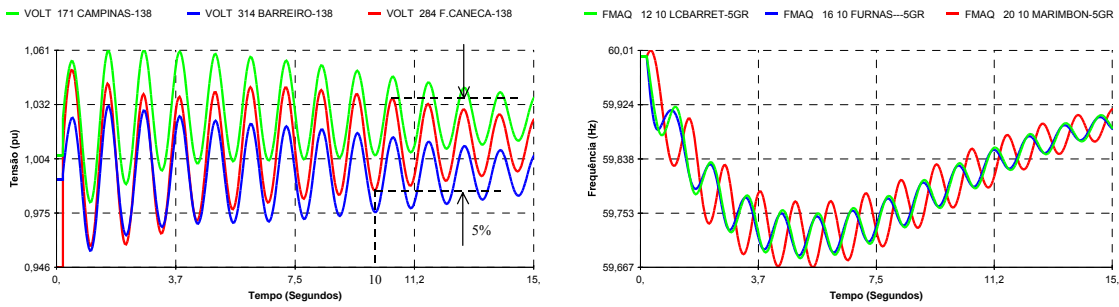


Figura 3: Fechamento Anel a 33° – Comportamento das tensões em 138 kV nas SE Campinas (CA), Barreiro (BR), F.Caneca (FC) e da freqüência das UG LCBarroto (LC), Furnas (FU) e Marimbondo (MR)

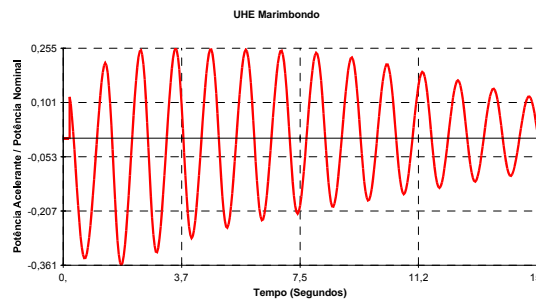


Figura 4: Fechamento Anel a 33° – Relação Potência Acelerante / Potência Nominal na UHE Marimbondo (MR)

A título ilustrativo, a Figura 5 comprova o comportamento próximo do linear entre a maior potência acelerante do gerador do sistema (MR) e a diferença angular (θ_{ij}). Esta figura foi obtida através da solução da Equação (6) e posterior análise dinâmica. A partir da condição operativa inicial (Tabela 1), especificou-se, para o módulo de FPO, defasagens angulares máximas de 18 e 12 graus para o fechamento do anel, além dos 26 graus, determinado como seguro.

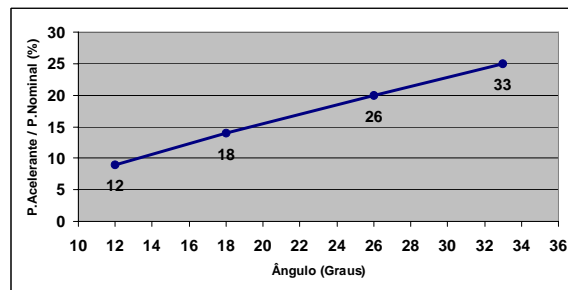


Figura 5: Relação entre a Potência Acelerante da UHE Marimbondo (MR) e diferentes defasagens angulares para fechamento do anel em Adrianópolis (AD)

A Figura 6 comprova a segurança do sistema quando do religamento da LT 345 kV Adrianópolis/Itutinga com a MDA de 26°, calculada pelo método proposto.

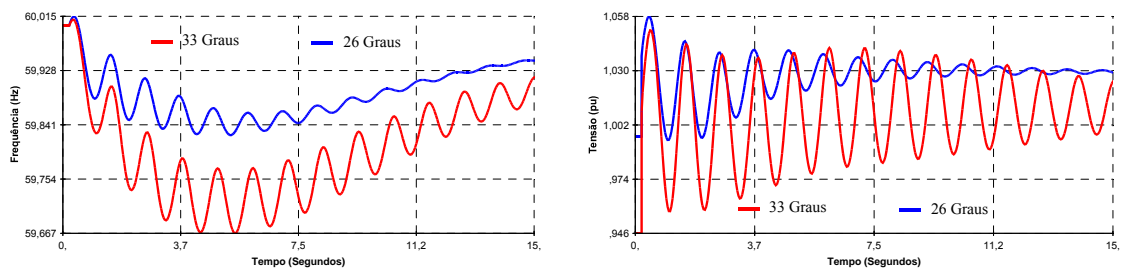


Figura 6: Comparação Fechamento Anel – Freqüência das UG Marimbondo (MR) e tensão em 138 kV na SE F.Caneca (FC)

Nas Figuras 7 e 8, a condição inicial operativa é comparada com a solução de mínimo redespacho sugerida pelo método proposto, visando à redução da diferença angular para o valor seguro de 26° . Nestas figuras, estão também assinalados os resultados para um religamento a 18° , com o objetivo de comparar o esforço necessário para o reajuste do sistema quando da especificação de defasagens angulares conservativas.

Para uma melhor visualização da necessidade de sincronização de unidades geradoras adicionais para cada otimização, as Figuras 7 e 8 também mostram os limites de geração máxima, de acordo com o número de unidades geradoras, já sincronizadas para a condição operativa inicial (33°).

A Figura 9, elaborada a partir das informações das Figuras 7 e 8, comprova a importância de se estabelecer uma defasagem máxima angular segura, mas ao mesmo tempo próxima da condição inicial operativa, para agilizar o processo de restabelecimento do sistema. Nesta figura é fácil observar que a determinação conservativa de uma defasagem angular máxima de 18° , atrasaria desnecessariamente o processo de recomposição ao exigir a sincronização de mais 4 unidades geradoras: duas nas usinas de Fontes e P.Passos, para aumento da margem de geração de potência ativa (Figura 7); duas nas usinas de Volta Grande e Marimbondo, para aumento da margem de geração de potência reativa (Figura 8).

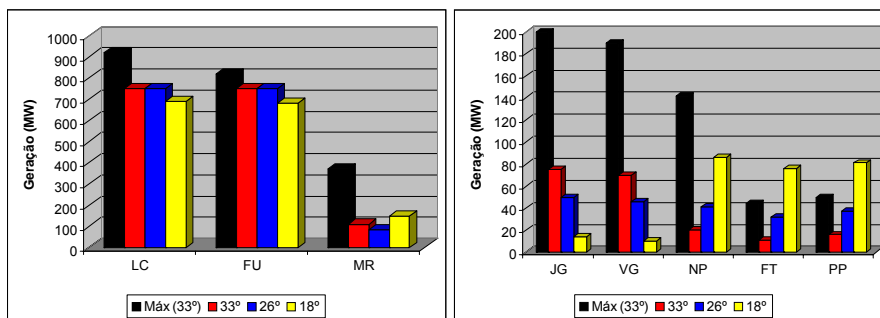


Figura 7: Comparação dos ajustes nas potências ativas das usinas do sistema

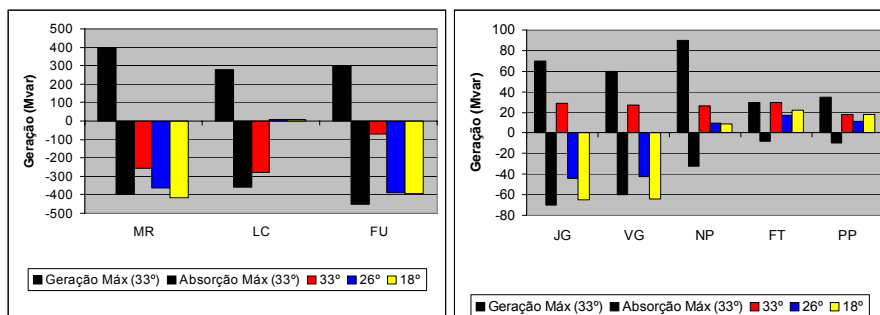


Figura 8: Comparação dos ajustes nas potências reativas das usinas do sistema

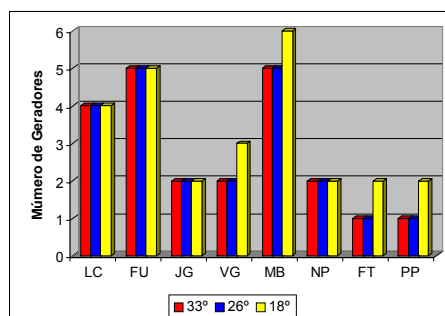


Figura 9: Comparação dos números de unidades geradoras necessárias

5.0 - CONCLUSÃO

Este artigo apresentou um método para o fechamento de anéis, levando em conta aspectos estáticos e dinâmicos, durante o processo de restabelecimento de um sistema elétrico de grande porte.

Estudos *off-line*, apesar de terem importância crucial para um plano de recomposição, não esgotam as situações enfrentadas durante estes processos. O número de combinações de indisponibilidades de equipamentos importantes à recomposição é muito elevado e muitas vezes dependente da própria perturbação que originou o desligamento em cascata do sistema. Estas incertezas, somadas às dificuldades de previsão e controle da carga atendida, bem como da geração recomposta em tempo real, colaboram para a tendência de estabelecimento de regras rígidas e diferenças angulares reduzidas, quando de fechamento de anéis, durante o planejamento da recomposição de sistemas elétricos de grande porte.

Neste contexto, este artigo, através de um exemplo prático, discutiu as dificuldades de ajustes em uma rede sob processo de recomposição, mostrando que as atuações em dispositivos do sistema, para o atendimento de exigências conservativas, atrasam desnecessariamente o restabelecimento do sistema.

Desta maneira, a metodologia proposta neste artigo foi centrada no cálculo da máxima diferença angular para o fechamento de um anel, explorando o comportamento próximo do linear deste ângulo com a maior potência acelerante do gerador do sistema.

Combinando ferramentas de fluxo de potência ótimo e de análise dinâmica, o método proposto mostrou que pode contribuir para estabelecimento de diferenças angulares seguras para fechamento de anéis, mesmo em um sistema elétrico de grande porte como o brasileiro. Acredita-se que uma ferramenta incorporando o método proposto poderá ser útil à operação em tempo real, ao identificar de forma clara, o mínimo redespacho de geração e demais ajustes nos recursos do sistema, impedindo cortes de carga desnecessários e agilizando todo o processo de recomposição.

6.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] M. Adibi e R. Kafka, "Power System Restoration Issues," *IEEE Power System Restoration – Methodologies and Implementation*. pp 31-36, 2000.
- [2] A. Ketabi e 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, e R. Yokoama, "Power System Restoration By Joint Usage Expert System And Mathematical Programming Approach," *IEEE*, Vol. 10, No.3, pp. 1473-1479, 1995.
- [4] S. Wunderlich, M. Adibi et al, "An Approach To Standing Phase Angle Reduction," *IEEE (PAS)*, Vol 9, No. 1, pp 470-476, 1994.
- [5] D. Hazarika e A. K. Sinhá, "An Algorithm For Standing Phase Angle Reduction For Power System Restoration," *IEE Proc.-Gener. Transm. Distrib.* Vol 145, No. 1, January, 1998.
- [6] D. Hazarika e A. K. Sinhá, "Standing Phase Angle Reduction For Power System Restoration," *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol.14, No.4, Novembro, 1999.
- [7] Erick S. Delvizio, Nelson Martins, Luiz Cláudio de A. Ferreira, Edimar J. Oliveira, José Luiz R. Pereira, "Recomposição de Sistemas Elétricos: Estudos para fechamento de anel via método de pontos interiores" , XVII SNPTEE, Outubro/2003.
- [8] Procedimentos de Rede, Módulo 23, Operador Nacional do Sistema Elétrico, <http://www.ons.org.br>.
- [9] N.K. Karmakar, "Computational Results of an Interior Point Algorithm or Large Scale Linear Programming," *Mathematical Programming*, 52, pages 555-586, 1991.
- [10] S. Granville, J. C. 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.
- [11] Procedimentos de Rede, Módulo 10, Operador Nacional do Sistema Elétrico, <http://www.ons.org.br>.