
DEDUÇÃO DE FUNÇÕES DE ALÍVIO PARA ESTIMAR A INFLUÊNCIA DE MEDIDAS DE CHAVEAMENTO NA ELIMINAÇÃO DE SOBRECARGAS A PARTIR DA TÉCNICA DE INJEÇÃO REVERSA

Manoel Firmino de Medeiros Júnior*
firmino@dca.ufrn.br

Arrhenius Vinicius da Costa Oliveira†
arrhenius@ct.ufrn.br

*Departamento de Engenharia de Computação e Automação,
Universidade Federal do Rio Grande do Norte
Campus Universitário, S/N, Bairro Lagoa Nova, CEP 59078-900, Natal/RN

†Departamento de Engenharia Elétrica, Centro de Tecnologia,
Universidade Federal do Rio Grande do Norte
Campus Universitário, S/N, Bairro Lagoa Nova, CEP 59078-900, Natal/RN

ABSTRACT

Derivation and Tests of Relief Functions to Estimate the Influence of Switching Measures in the Elimination of Overloads by Using Backward Injection

Eventually, violations of voltage limits at buses or admissible loadings of transmission lines and/or power transformers may occur by the power system operation. If violations are detected in the supervision process, corrective measures may be carried out in order to eliminate them or to reduce their intensity. Loading restriction is an extreme solution and should only be adopted as the last control action. Previous researches have shown that it is possible to control constraints in electrical systems by changing the network topology, using the technique named Corrective Switching, which requires no additional costs. In previous works, the proposed calculations for verifying the ability of a switching variant in eliminating an overload in a specific branch were based on network reduction or heuristic analysis. The purpose of this work is to develop analytical derivation of linear equations to estimate current changes in overloaded branches (due to switching measures) by means of few calculations. For bus-bar coupling, derivations will be based on Short-circuit the-

ory and Relief Function methodology. For bus-bar splitting, a Relief Function will be derived based on a technique of equivalent circuit. Although systems of linear equations are used to substantiate deductions, its formal solution for each variant in real time does not become necessary. A priority list of promising variants is then assigned for final check by an exact load flow calculation. At last, results obtained by simulation in a real network will be presented.

KEYWORDS: Backward Injection, Bus-bar Coupling, Bus-bar Splitting, Corrective Switching, Relief Functions.

RESUMO

Na operação de sistemas elétricos verificam-se, eventualmente, violações em limites de tensões em barramentos das subestações, ou de carregamentos de linhas de transmissão ou transformadores de potência em subestações. Caso o monitoramento dessas grandezas indique possíveis problemas, é necessário adotar medidas corretivas para eliminá-los ou atenuar sua intensidade, devendo a restrição de carga ser utilizada como último recurso. Uma medida de controle bastante eficaz é a técnica intitulada Chaveamentos Corretivos, capaz de influenciar o fluxo de potência de redes malhadas a partir de alterações em suas topologias, sem, entretanto, produzir qualquer custo operacional adicional. Em trabalhos anteri-

Artigo submetido em 18/01/2011 (Id.: 1252)

Revisado em 05/05/2011, 02/08/2011, 22/09/2011

Aceito sob recomendação do Editor Associado Prof. Arturo Bretas

ores, o cálculo desenvolvido para verificar a capacidade de uma determinada variante de chaveamento em eliminar a sobrecarga em um ramo específico era realizado através de redução de redes ou através de análises heurísticas. O presente trabalho objetiva a dedução analítica de equações para estimar a alteração de corrente em ramos sobrecarregados, após a realização de chaveamentos em subestações, mediante o emprego de poucos cálculos, decorrentes de aproximações lineares. Para o acoplamento de barras de subestações, as deduções serão baseadas na teoria de Curto-circuito e na metodologia da Função de Alívio. Já para a abertura de barras de subestações, será deduzida uma nova Função de Alívio, fundamentada na técnica de circuito equivalente. Embora sistemas de equações lineares sejam utilizados para fundamentar as deduções, sua solução formal para cada variante, em tempo real, não é necessária. A partir das estimativas realizadas, elabora-se uma lista de variantes prioritárias para teste final através de um cálculo exato de fluxo de carga. Por fim, apresentam-se resultados obtidos através de simulações em uma rede real.

PALAVRAS-CHAVE: Abertura de barras, Acoplamento de barras, Chaveamentos Corretivos, Funções de Alívio, Injeção Reversa.

1 INTRODUÇÃO

Na operação de sistemas elétricos verificam-se, eventualmente, violações em limites de tensão em barramentos das subestações, ou de carregamentos de linhas de transmissão ou transformadores de potência em subestações. Caso o monitoramento dessas grandezas indique iminentes violações, é necessário adotar procedimentos para evitá-las ou atenuar sua intensidade. No atual contexto do setor elétrico nacional, em que as metas de qualidade e continuidade do fornecimento de energia elétrica, impostas pelo órgão regulador, são cada vez mais desafiadoras, a restrição de carga é uma solução extrema e somente deve ser utilizada como último recurso. Para evitar esse tipo de solução, é possível adotar medidas de controle, tais como: o re-despacho de potências ativa ou reativa, ajuste de *taps* de transformadores defasadores, ou redistribuição de carga. Essas medidas estão associadas, em geral, a um aumento de custos. Outra maneira de controlar eventuais restrições operativas em sistemas elétricos pode ocorrer pela mudança da topologia da rede, através da técnica intitulada Chaveamentos Corretivos.

A técnica de Chaveamentos Corretivos teve o início do seu desenvolvimento no final da década de 70 e se constitui em uma ferramenta eficiente de controle do fluxo de carga, para a operação de sistemas elétricos. Através dessa metodologia, usando como mecanismos de controle o chaveamento de linhas de transmissão, barramentos de subestações ou elementos *shunt*, é possível alterar o estado de sistemas elétricos,

afetando a distribuição do fluxo de potência, as perdas técnicas no sistema de transmissão, o nível de curto-circuito, o nível de tensão nos barramentos das subestações, bem como a estabilidade transitória. Uma das principais vantagens desse método de controle, comparativamente aos anteriormente citados, é a economia, haja vista que sua implementação depende da operação de elementos já existentes no sistema.

Ao longo dos últimos 30 anos, propuseram-se alguns algoritmos para implementação de Chaveamentos Corretivos, objetivando diferentes aplicações: Koglin and Müller (1980), Koglin and Medeiros Júnior (1983), Rossier and Germond (1983), Koglin and Medeiros Júnior (1985), Mazi et al. (1986), Koglin and Medeiros Júnior (1987), Medeiros Júnior (1987), Schnyder and Glavitsch (1988), Wrubel et al. (1996) e Shao and Vittal (2005) objetivavam eliminar sobrecargas em linhas de transmissão; problemas relativos à tensão nos barramentos de subestações foram considerados nas proposições de Koglin and Medeiros Júnior (1987), Medeiros Júnior (1987) e Shao and Vittal (2005). Já o objetivo de Bacher and Glavitsch (1986) e Schnyder and Glavitsch (1988) era aumentar a segurança de sistemas elétricos. Em 1998, Rolim and Machado (1999) apresentou uma revisão acerca das publicações que empregavam a técnica de Chaveamentos Corretivos para aliviar sobrecargas em ramos e para solucionar problemas relativos à tensão. Ademais, esses algoritmos também diferiam entre si no que concerne às diversas variantes de chaveamento aplicadas à resolução dos problemas: chaveamento de linhas de transmissão e/ou transformadores foi proposto por Koglin and Müller (1980); chaveamento de elementos *shunt* (capacitores ou reatores); chaveamento de barramentos de subestações, alterando a interconexão de linhas e cargas em uma subestação foi explorado por Koglin and Medeiros Júnior (1983), Rossier and Germond (1983), Koglin and Medeiros Júnior (1985), Mazi et al. (1986), Koglin and Medeiros Júnior (1987), Medeiros Júnior (1987), Schnyder and Glavitsch (1988), Wrubel et al. (1996) e Shao and Vittal (2005).

Considerando que os N ramos de um sistema podem sofrer alterações na sua condição operativa (ligado ou desligado), o número de possíveis arranjos desse sistema, adotando apenas essas opções, seria 2^N . Considerando ainda a possibilidade de alteração da interconexão desses ramos a partir da mudança de configuração dos barramentos nas subestações, o espaço de busca a ser pesquisado com a finalidade de obter uma solução razoável seria bastante amplo, caracterizando o chaveamento de linhas de transmissão e barramentos de subestações como um problema de programação multi-variável e discreto, tornando-o de difícil solução. Assim, a maioria dos algoritmos desenvolvidos ao longo dos anos considera limitações para reduzir o espaço busca. Koglin and Müller (1980) propôs chaveamentos apenas em subestações ou linhas eletricamente próximas do elemento em sobrecarga. Já

o objetivo de Koglin and Medeiros Júnior (1983), Koglin and Medeiros Júnior (1985), Koglin and Medeiros Júnior (1987) e Medeiros Júnior (1987) era elaborar uma lista com as configurações efetivas mais prováveis para eliminar a sobrecarga de um determinado ramo. Por fim, a ideia de Bacher and Glavitsch (1986), Mazi et al. (1986) e Wrubel et al. (1996) era baseada em uma lista de arranjos de subestações ou chaveamento de linhas de transmissão, cuja seleção era realizada através de análise de sensibilidade, índices de desempenho ou fatores de distribuição, em concordância com a filosofia do redirecionamento da sobrecarga, proposto por Koglin and Müller (1980) e Müller (1981). Apesar das várias diferenças existentes na filosofia dos métodos propostos, todos ressaltam a importância da técnica de Chaveamentos Corretivos como elemento de controle na operação de sistemas elétricos.

Para a aplicação da técnica de Chaveamentos Corretivos na operação de sistemas elétricos, é necessário que os cálculos sejam processados rapidamente. O cálculo de fluxo de carga é um processo não-linear e, em certos casos, pode apresentar divergência, retardando a tomada de decisão dos operadores dos centros de controle. Dessa forma, o processo de linearização da solução é uma alternativa atraente, devido à rapidez no processamento dos cálculos. Esse processo foi apresentado em Koglin and Medeiros Júnior (1983), Koglin and Medeiros Júnior (1985), Koglin and Medeiros Júnior (1987) e Medeiros Júnior (1987), tendo sido mantido para avaliação de acoplamento de barras. Esses autores desenvolveram ainda, heurísticamente, Funções de Alívio baseadas em experimentos de cálculos em redes reais, para avaliar a estimativa de corrente em ramos sobrecarregados, a partir da abertura de barramentos, originariamente acoplados.

O objetivo do presente trabalho é desenvolver, analiticamente, equações para estimar a alteração de corrente em ramos sobrecarregados, após a realização de chaveamentos exclusivamente em subestações, por meio de rearranjo das conexões entre ramos e cargas. A seleção das variantes de chaveamento a serem testadas para eliminar a sobrecarga será realizada *on-line*, mediante o emprego de poucos cálculos, decorrentes de aproximações lineares, utilizando os conceitos de Nós de Chaveamento e redirecionamento de potência apresentados em Müller (1981). Todas as variantes pertencentes aos Nós de Chaveamento são testadas através de cálculos simples, para definir quais são as variantes capazes de eliminar a sobrecarga no ramo. Essas variantes, segundo as estimativas realizadas, são classificadas em uma lista, cuja ordem de prioridade é estabelecida de forma ascendente com relação à corrente de chaveamento. Seguindo a ordem de classificação estabelecida na lista, a 1ª variante de chaveamento da lista capaz de eliminar a sobrecarga no ramo sem provocar violações de carregamento em outros ramos ou de tensões em barras de subestações, é a escolhida. Ressalta-

se que a avaliação final de uma variante de chaveamento é realizada através de um cálculo exato de fluxo de carga.

No que concerne à organização do presente trabalho, a Seção 2.1 apresenta a técnica de Injeção Reversa proposta por Koglin and Medeiros Júnior (1983), que fundamenta a dedução apresentada na Seção 3.1. Dessa forma, os desenvolvimentos aqui apresentados podem ser considerados como uma evolução natural da pesquisa que resultou nessa técnica. Além disso, a proposição do estabelecimento de Funções de Alívio, formuladas com um número reduzido de cálculos, foi inspirada nos trabalhos de Koglin and Medeiros Júnior (1985), Koglin and Medeiros Júnior (1987) e Medeiros Júnior (1987). Já a Seção 2.2 aborda um resumo das idéias contidas em Medeiros Júnior and Oliveira (2010b), as quais constituem uma evolução do trabalho desenvolvido por Medeiros Júnior and Oliveira (2010a), incorporando a teoria de curto-circuito para estimar correntes e tensões em decorrência do acoplamento de barras. A Seção 3.1 desenvolve analiticamente um modelo baseado em uma Função de Alívio para estimar a corrente em todos os ramos de um sistema, após o acoplamento de barras para eliminar a sobrecarga em um ramo específico. A Seção 3.2 apresenta uma Função de Alívio, também deduzida analiticamente, baseada na técnica de circuito equivalente para estimar a corrente no ramo sobrecarregado após abertura de barras. A Seção 4 apresenta resultados dos modelos desenvolvidos. Por fim, a Seção 5 apresenta as conclusões para o trabalho.

2 ACOPLAMENTO DE BARRAS

A técnica de Injeção Reversa proposta por Koglin and Medeiros Júnior (1983), que fundamenta o desenvolvimento apresentado por Medeiros Júnior and Oliveira (2010a), é adotada como base para a melhoria aqui proposta, utilizando a teoria de Curto-circuito. Apresentam-se nesta seção, as equações resultantes das deduções detalhadas em Medeiros Júnior and Oliveira (2010b). Essas técnicas fundamentam o desenvolvimento de novas Funções de Alívio, para estimar o efeito de acoplamento de barras no carregamento de ramos de um sistema, cujas correntes de curto-circuito sejam calculadas *on-line*.

2.1 Injeção Reversa

A técnica de Injeção Reversa (*Backward Injection*) foi desenvolvida por Koglin and Medeiros Júnior (1983) e baseia-se em uma linearização das equações de fluxo de carga (Análise Nodal) e no princípio da superposição.

Para apresentar essa técnica, tome-se como exemplo o processo de abertura entre as barras S e N de uma subestação a partir de um disjuntor ou chave seccionadora, conforme ilus-

tra a figura 1. Nessa figura, apresentam-se três situações. A primeira, equivalente ao caso base, apresenta n linhas de transmissão interligadas a duas barras que se encontram fechadas, sendo I_s^{cb} a corrente através do disjuntor que interliga as barras. Para realizar a situação intermediária, isto é, o caso da injeção reversa, introduz-se uma carga na barra N e uma fonte de corrente na barra S de valor $\Delta I = I_s^{cb}$. Aplicando o princípio da superposição aos casos base e de injeção reversa, obtém-se a situação final, na qual as barras S e N estão abertas.

O procedimento oposto é o acoplamento de barras, apresentado na figura 2, fundamentado também em três situações. A primeira, consiste nas referidas barras abertas, para a qual a corrente $I_s^{cb} = 0$. Para se obter a situação final, com as barras acopladas, considera-se o caso intermediário, ou seja, o caso da injeção reversa em superposição ao caso base. Na situação intermediária, aplica-se uma carga na barra S e uma fonte de corrente na barra N de valor $\Delta I = I_s^{fe}$, sendo I_s^{fe} a corrente resultante através do disjuntor, após o acoplamento entre as barras S e N.

Um ponto de operação de um sistema elétrico é representado através de (1), que é a equação da Análise Nodal. Nessa equação, \mathbf{i} representa o vetor de correntes líquidas injetadas; \mathbf{Y} é a matriz de admitância nodal; \mathbf{v} é o vetor das tensões do sistema. Todas as grandezas são complexas e se referem ao caso base.

$$\mathbf{i} = \mathbf{Y} \cdot \mathbf{v} \quad (1)$$

Para uma operação de chaveamento entre as barras S e N, o sistema elétrico definido por (1) sofre alterações na sua topologia passando a ser regido por (2). Nessa equação, \mathbf{j} é o vetor de correntes líquidas em todas as barras do sistema, após a ação de chaveamento; $\Delta \mathbf{Y}$ corresponde à matriz das variações de admitância nodal que representa uma medida de chaveamento entre as barras S e N; \mathbf{u} representa o vetor das tensões do sistema, após o chaveamento. Destaca-se que uma ação de chaveamento corresponde à abertura ou ao acoplamento de barras.

$$\mathbf{j} = (\mathbf{Y} + \Delta \mathbf{Y}) \cdot \mathbf{u} \quad (2)$$

Considerando que houve variações das correntes líquidas apenas na barras S, N e *slack*, subtraindo os sistemas (2) e (1), obtém-se (3), no qual ΔI se refere à variação de corrente entre as barras S e N, cujos valores são I_s^{cb} para o caso de abertura de barras e I_s^{fe} para o caso de acoplamento de barras.

$$\begin{bmatrix} \Delta I_1 \\ 0 \\ \vdots \\ -\Delta I \\ \vdots \\ \Delta I \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} y_{11} & y_{12} & \cdots & y_{1S} & \cdots & y_{1N} \\ y_{21} & y_{22} & \cdots & y_{2S} & \cdots & y_{2N} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ y_{S1} & y_{S2} & \cdots & y_{SS} & \cdots & y_{SN} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ y_{N1} & y_{N2} & \cdots & y_{NS} & \cdots & y_{NN} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta V_1 \\ \Delta V_2 \\ \vdots \\ \Delta V_S \\ \vdots \\ \Delta V_N \end{bmatrix} \quad (3)$$

Uma vez que não há variação de tensão na barra *slack*, desenvolve-se (3), resultando em (4) que corresponde a um sistema linear do tipo $\mathbf{Ax}=\mathbf{b}$. De acordo com (4), o vetor de termos independentes \mathbf{b} é função apenas de ΔI . No processo de abertura das barras S e N através da Injeção Reversa, a corrente de chaveamento ΔI através do disjuntor que interliga as barras tem o mesmo módulo da corrente I_s^{cb} , obtida através do caso base, porém defasada de 180° com relação a I_s^{cb} . Para o caso de acoplamento entre as barras S e N, a corrente de chaveamento ΔI é igual a I_s^{fe} , a qual é desconhecida, denotando um aparente obstáculo. Entretanto, esse problema encontra-se resolvido em Medeiros Júnior and Oliveira (2010a).

$$\begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \vdots \\ -\Delta I \\ \vdots \\ \Delta I \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -1 & y_{12} & \cdots & y_{1S} & \cdots & y_{1N} \\ 0 & y_{22} & \cdots & y_{2S} & \cdots & y_{2N} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & y_{S2} & \cdots & y_{SS} & \cdots & y_{SN} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & y_{N2} & \cdots & y_{NS} & \cdots & y_{NN} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta I_1 \\ \Delta V_2 \\ \vdots \\ \Delta V_S \\ \vdots \\ \Delta V_N \end{bmatrix} \quad (4)$$

Uma vez obtido o vetor de termos dependentes de (4) através da resolução deste sistema, calculam-se as variações de corrente em todos os ramos do sistema, através de (5), em que ΔI_{AB} representa a variação de corrente em um ramo A-B; y_{AB} é a admitância do ramo A-B; ΔV_A e ΔV_B são as variações de tensão nas barras A e B, respectivamente.

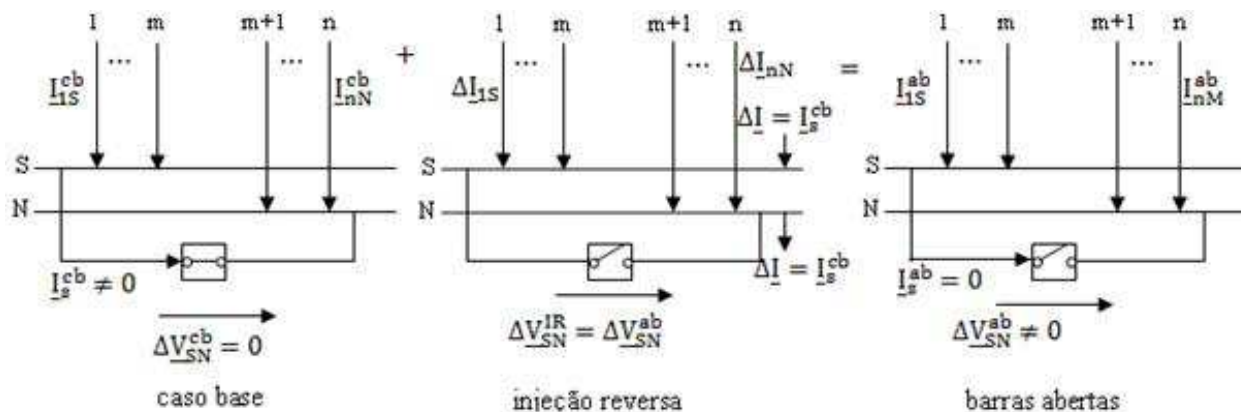


Figura 1: Simulação da abertura de barras através da superposição do caso base e do caso da Injeção Reversa.

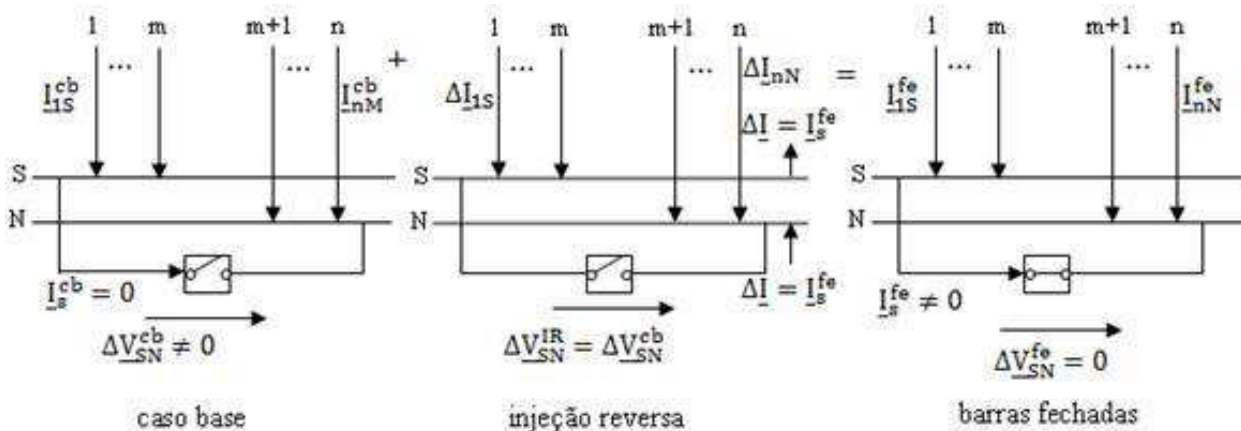


Figura 2: Simulação do acoplamento de barras através da superposição do caso base e do caso da Injeção Reversa.

$$\Delta I_{AB} = y_{AB} \cdot (\Delta V_A - \Delta V_B) \quad (5)$$

Verifica-se que o objetivo da técnica de Injeção Reversa, demonstrada nesta seção, é calcular correntes e tensões em um sistema elétrico, considerando que ocorreram alterações na topologia da rede. Os efeitos dessas alterações são avaliados, de acordo com a técnica proposta, modificando a matriz de admitância nodal. Trata-se, portanto, de uma metodologia de fundamentação diversa do Teorema da Compensação, apresentado em Monticelli (1983), Edwin and Eichler (1983), Alsac et al. (1983) e Castro and Murari (1997), que evita a implementação de modificações na matriz de admitância nodal do caso base. Embora o Teorema da Compensação não requeira alterações nessa matriz, este não foi utilizado para solucionar sistemas que modelam chaveamentos provenientes de abertura ou acoplamento de barras de subestações. Por outro lado, ações de chaveamento como estas podem ser analisadas através do método da Injeção Reversa.

2.2 Acoplamento de barras usando a teoria de curto-circuito

O processo de abertura de barras através da Injeção Reversa foi desenvolvido em Koglin and Medeiros Júnior (1983) e se encontra detalhado em Medeiros Júnior (1987). Já a solução para acoplamento de barras encontra-se em Medeiros Júnior and Oliveira (2010a). Entretanto, para este último processo, pode-se estimar de forma ainda mais rápida o carregamento de todos os ramos, usando a teoria de curto-circuito, conforme formulada em Medeiros Júnior and Oliveira (2010b).

Para o caso de acoplamento entre as barras S e N da figura 2, a corrente de chaveamento ΔI é desconhecida. Nesse caso, divide-se (4) por ΔI , resultando em (6):

$$\begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \vdots \\ -1 \\ \vdots \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -1 & \underline{y}_{12} & \cdots & \underline{y}_{1S} & \cdots & \underline{y}_{1N} \\ 0 & \underline{y}_{22} & \cdots & \underline{y}_{2S} & \cdots & \underline{y}_{2N} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \underline{y}_{S2} & \cdots & \underline{y}_{SS} & \cdots & \underline{y}_{SN} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \underline{y}_{N2} & \cdots & \underline{y}_{NS} & \cdots & \underline{y}_{NN} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \underline{V}_1 / \Delta \underline{I} \\ \Delta \underline{V}_2 / \Delta \underline{I} \\ \vdots \\ \Delta \underline{V}_S / \Delta \underline{I} \\ \vdots \\ \Delta \underline{V}_N / \Delta \underline{I} \end{bmatrix} \quad (6)$$

Em (6), $\Delta \underline{V}_i$ representa a variação de tensão na i -ésima barra em função do acoplamento entre as barras S e N. Em Medeiros Júnior and Oliveira (2010a), para se obter as correntes nos ramos após o acoplamento dessas barras, era necessária a resolução de (6). A inovação do trabalho de Medeiros Júnior and Oliveira (2010b) consiste na supressão da resolução deste sistema, o que resulta na redução do tempo de processamento computacional. Para tanto, a solução é obtida aplicando a teoria de curto-circuito. Considerando um curto-circuito em uma barra X, tem-se (7).

$$\begin{bmatrix} \underline{I}_1 \\ \underline{I}_2 \\ \vdots \\ \underline{I}_S \\ \vdots \\ \underline{I}_N \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \underline{y}_{11} & \underline{y}_{12} & \cdots & \underline{y}_{1S} & \cdots & \underline{y}_{1N} \\ \underline{y}_{21} & \underline{y}_{22} & \cdots & \underline{y}_{2S} & \cdots & \underline{y}_{2N} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \underline{y}_{S1} & \underline{y}_{S2} & \cdots & \underline{y}_{SS} & \cdots & \underline{y}_{SN} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \underline{y}_{N1} & \underline{y}_{N2} & \cdots & \underline{y}_{NS} & \cdots & \underline{y}_{NN} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \underline{V}_1^X \\ \Delta \underline{V}_2^X \\ \vdots \\ \Delta \underline{V}_S^X \\ \vdots \\ \Delta \underline{V}_N^X \end{bmatrix} \quad (7)$$

Em (7), $\Delta \underline{V}_i^X$ representa a variação de tensão na i -ésima barra de um sistema devido a um curto-circuito na barra X. Uma vez que a corrente de curto-circuito na barra X é muito maior que a corrente de carga nas demais barras, representa-se através de (8), (9) e (10), respectivamente, a corrente de carga em todas as barras do sistema, exceto nas barras S e N, e as correntes de curto-circuito nas barra S e N, designadas através de \underline{I}_S^{cc} e \underline{I}_N^{cc} . Por fim, a variação de tensão na barra

X devido a um curto-circuito nesta mesma barra é modelada através de (11), em que \underline{V}_X^{cb} corresponde à tensão da barra X para o caso base.

$$\underline{I}_i = 0 \quad (8)$$

$$\underline{I}_S = -\underline{I}_S^{cc} \quad (9)$$

$$\underline{I}_N = -\underline{I}_N^{cc} \quad (10)$$

$$\Delta \underline{V}_X^X = -\underline{V}_X^{cb} \quad (11)$$

Aplicando curtos-circuitos nas barras S e N e seguindo o desenvolvimento adotado em Medeiros Júnior and Oliveira (2010b), obtêm-se os sistemas (12) e (13).

$$\begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \vdots \\ -1 \\ \vdots \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \underline{y}_{11} & \underline{y}_{12} & \cdots & \underline{y}_{1S} & \cdots & \underline{y}_{1N} \\ \underline{y}_{21} & \underline{y}_{22} & \cdots & \underline{y}_{2S} & \cdots & \underline{y}_{2N} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \underline{y}_{S1} & \underline{y}_{S2} & \cdots & \underline{y}_{SS} & \cdots & \underline{y}_{SN} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \underline{y}_{N1} & \underline{y}_{N2} & \cdots & \underline{y}_{NS} & \cdots & \underline{y}_{NN} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \underline{V}_1^S / \underline{I}_S^{cc} \\ \Delta \underline{V}_2^S / \underline{I}_S^{cc} \\ \vdots \\ -\underline{V}_S^{cb} / \underline{I}_S^{cc} \\ \vdots \\ \Delta \underline{V}_N^S / \underline{I}_S^{cc} \end{bmatrix} \quad (12)$$

$$\begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \\ \vdots \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \underline{y}_{11} & \underline{y}_{12} & \cdots & \underline{y}_{1S} & \cdots & \underline{y}_{1N} \\ \underline{y}_{21} & \underline{y}_{22} & \cdots & \underline{y}_{2S} & \cdots & \underline{y}_{2N} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \underline{y}_{S1} & \underline{y}_{S2} & \cdots & \underline{y}_{SS} & \cdots & \underline{y}_{SN} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \underline{y}_{N1} & \underline{y}_{N2} & \cdots & \underline{y}_{NS} & \cdots & \underline{y}_{NN} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -\Delta \underline{V}_1^N / \underline{I}_N^{cc} \\ -\Delta \underline{V}_2^N / \underline{I}_N^{cc} \\ \vdots \\ \Delta \underline{V}_S^N / \underline{I}_N^{cc} \\ \vdots \\ \underline{V}_N^{cb} / \underline{I}_N^{cc} \end{bmatrix} \quad (13)$$

Somando os sistemas (12) e (13), obtêm-se (14):

$$\begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \vdots \\ -1 \\ \vdots \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \underline{y}_{11} & \underline{y}_{12} & \cdots & \underline{y}_{1S} & \cdots & \underline{y}_{1N} \\ \underline{y}_{21} & \underline{y}_{22} & \cdots & \underline{y}_{2S} & \cdots & \underline{y}_{2N} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \underline{y}_{S1} & \underline{y}_{S2} & \cdots & \underline{y}_{SS} & \cdots & \underline{y}_{SN} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \underline{y}_{N1} & \underline{y}_{N2} & \cdots & \underline{y}_{NS} & \cdots & \underline{y}_{NN} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \underline{V}_1^S / \underline{I}_S^{cc} - \Delta \underline{V}_1^N / \underline{I}_N^{cc} \\ \Delta \underline{V}_2^S / \underline{I}_S^{cc} - \Delta \underline{V}_2^N / \underline{I}_N^{cc} \\ \vdots \\ -\underline{V}_S^{cb} / \underline{I}_S^{cc} - \Delta \underline{V}_S^N / \underline{I}_N^{cc} \\ \vdots \\ \Delta \underline{V}_N^S / \underline{I}_S^{cc} + \underline{V}_N^{cb} / \underline{I}_N^{cc} \end{bmatrix} \quad (14)$$

Considerando que a barra 1 é a *slack* e para esta não há variação de tensão, eliminam-se as primeiras linha e coluna de (14). Observa-se que (6) e (14) são equivalentes e, portanto, a igualdade (15) é satisfeita.

$$\begin{bmatrix} \Delta \underline{V}_2 / \Delta \underline{I} \\ \vdots \\ \Delta \underline{V}_S / \Delta \underline{I} \\ \vdots \\ \Delta \underline{V}_N / \Delta \underline{I} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta \underline{V}_2^S / \underline{I}_S^{cc} - \Delta \underline{V}_2^N / \underline{I}_N^{cc} \\ \vdots \\ -\underline{V}_S^{cb} / \underline{I}_S^{cc} - \Delta \underline{V}_S^N / \underline{I}_N^{cc} \\ \vdots \\ \Delta \underline{V}_N^S / \underline{I}_S^{cc} + \underline{V}_N^{cb} / \underline{I}_N^{cc} \end{bmatrix} \quad (15)$$

Portanto, não é necessário resolver (6), sendo suficiente conhecer as correntes de curto-circuito nas barras S e N, além dos efeitos que estas produzem nas demais barras do sistema elétrico. Observa-se que essas correntes e seus efeitos precisam ser conhecidos *on-line*, para que seja computacionalmente vantajoso o uso dessa metodologia.

Para obter $\Delta \underline{I}$, aplicam-se as seguintes condições:

$$\underline{V}_S^{ACPSN} = \underline{V}_N^{ACPSN} \quad (16)$$

$$\underline{V}_N^{ACPSN} = \underline{V}_N^{cb} + \Delta \underline{V}_N \quad (17)$$

$$\underline{V}_S^{ACPSN} = \underline{V}_S^{cb} + \Delta \underline{V}_S \quad (18)$$

Em (16), (17) e (18), \underline{V}_S^{ACPSN} e \underline{V}_N^{ACPSN} representam as tensões nas barras S e N após o acoplamento entre estas; $\Delta \underline{V}_S$ e $\Delta \underline{V}_N$ equivalem às variações de tensão nas barras S e N em consequência do acoplamento entre estas barras.

Substituindo (18) e (17) em (16), obtém-se (19).

$$\Delta \underline{V}_N - \Delta \underline{V}_S = \underline{V}_S^{cb} - \underline{V}_N^{cb} \quad (19)$$

A partir de (15), obtêm-se os elementos $[\Delta \underline{V}_S / \Delta \underline{I}]$ e $[\Delta \underline{V}_N / \Delta \underline{I}]$, especificados, respectivamente, através de (20) e (21).

$$\frac{\Delta \underline{V}_S}{\Delta \underline{I}} = \underline{R}_S \quad (20)$$

$$\frac{\Delta \underline{V}_N}{\Delta \underline{I}} = \underline{R}_N \quad (21)$$

Expressando $\Delta \underline{I}$ em (20) e (21) e igualando-as, obtém-se (22).

$$\Delta \underline{V}_N - \left(\frac{\underline{R}_N}{\underline{R}_S} \right) \cdot \Delta \underline{V}_S = 0 \quad (22)$$

Resolvido o sistema composto por (19) e (22), obtêm-se os valores de $\Delta \underline{V}_S$ e $\Delta \underline{V}_N$. A partir daí, calcula-se $\Delta \underline{I}$ resolvendo (20) ou (21). Em seguida, calcula-se o vetor das variações das tensões do sistema devido ao acoplamento entre as barras S e N, $\Delta \underline{v}$, multiplicando o vetor obtido em (15) por $\Delta \underline{I}$. Por fim, através da resolução de (23), obtêm-se as tensões em todas as barras do sistema elétrico após o acoplamento entre as barras S e N.

$$\underline{u} = \underline{v} + \Delta \underline{v} \quad (23)$$

Uma vez obtido o vetor \underline{u} , calculam-se as correntes em cada um dos ramos do sistema após o acoplamento entre as barras S e N a partir de (24). Nessa equação, $\underline{I}_{AB}^{ACPSN}$ representa a corrente em um ramo A-B após o acoplamento; \underline{V}_A^{ACPSN} equivale à tensão na barra A após o acoplamento.

$$\underline{I}_{AB}^{ACPSN} = \underline{y}_{AB} \cdot (\underline{V}_A^{ACPSN} - \underline{V}_B^{ACPSN}) \quad (24)$$

Para comparar o modelo desenvolvido por Medeiros Júnior and Oliveira (2010a) com o baseado na teoria de curto-circuito, desenvolvido em Medeiros Júnior and Oliveira (2010b) e aqui revisado, a figura 3 apresenta um diagrama de blocos, destacando as etapas envolvidas para realizar o processo de acoplamento entre as barras S e N. O método desenvolvido em Medeiros Júnior and Oliveira (2010b) apresenta um menor tempo de processamento, uma vez que se evita a resolução de um sistema de equações.

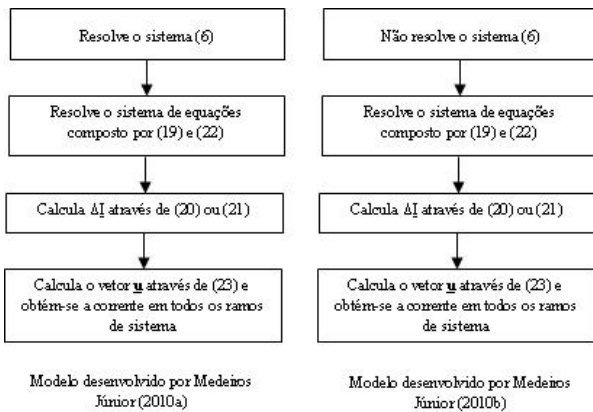


Figura 3: Diagrama de blocos comparando os métodos desenvolvidos para realizar o acoplamento de barras.

3 METODOLOGIA DA FUNÇÃO DE ALÍVIO

Esta seção apresenta o desenvolvimento analítico de Funções de Alívio para abertura e acoplamento de barras em uma subestação.

3.1 Dedução analítica de uma Função de Alívio para acoplamento de barras de subestações

Koglin and Medeiros Júnior (1985), Koglin and Medeiros Júnior (1987) e Medeiros Júnior (1987) desenvolveram, através de análise de sensibilidade, Funções de Alívio para estimar o carregamento de ramos que se encontravam sobrecarregados, após abertura de barras em uma subestação. Entretanto, destaca-se que essas Funções de Alívio descartavam a influência da potência reativa na estimativa do carregamento final do ramo sobrecarregado, além de não contemplar a possibilidade de acoplamento entre dois barramentos em uma subestação. Esta seção destina-se à dedução analítica de uma Função de Alívio para estimar não apenas o carregamento do ramo que se encontrava sobrecarregado, mas também o carregamento dos demais ramos de um sistema elétrico após uma operação de acoplamento de barras, considerando também os efeitos da potência reativa.

Para proceder ao desenvolvimento de uma Função de Alívio com a finalidade de estimar o carregamento de ramos em um sistema elétrico a partir do acoplamento de barras utilizam-se os conceitos de redirecionamento de potência e Nós de Chaveamento apresentados em Müller (1981). A figura 4 ilustra o fluxo de potência em uma representação de um equivalente de um sistema elétrico. Nessa figura, é mostrado o ramo A-B sobrecarregado, além dos Nós de Chaveamento S e N inter-

ligados através de um disjuntor que se encontra aberto. Ademais, neste Nó de Chaveamento estão conectados 4 ramos, além da carga.

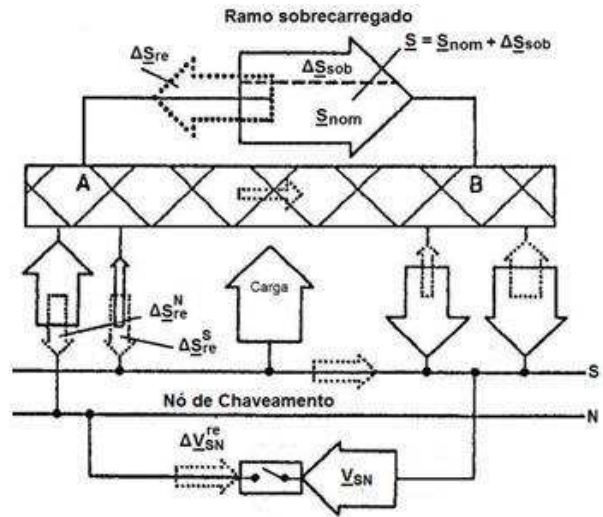


Figura 4: Representação de um equivalente de uma rede elétrica para simular o redirecionamento de potência com barras abertas.

Com relação às grandezas elétricas contidas na figura 4, \underline{S} consiste no carregamento do ramo sobrecarregado no caso base; \underline{S}_{nom} corresponde à potência nominal do ramo; ΔS_{sob} é a sobrecarga nesse elemento; ΔS_{re} representa a parcela de carga a ser redirecionada; ΔS_{re}^S consiste na parcela da sobrecarga redirecionada que chega ao Nó de Chaveamento S; ΔS_{re}^N consiste na parcela da sobrecarga redirecionada que chega ao Nó de Chaveamento N; \underline{V}_{SN} é a diferença entre as tensões das barras S e N no caso base; $\Delta \underline{V}_{SN}^{re}$ equivale à diferença das tensões entre as barras S e N para o caso de redirecionamento da sobrecarga e para o caso base.

Na figura 4, o carregamento do ramo A-B é: $\underline{S} = \underline{S}_{nom} + \Delta \underline{S}_{sob}$. Para eliminar a sobrecarga nesse ramo, é preciso redirecionar potência em sentido oposto a \underline{S} , satisfazendo à seguinte condição: $|\Delta \underline{S}_{re}| > |\Delta \underline{S}_{sob}|$. A potência redirecionada, ilustrada na figura 4, através das setas tracejadas, produz uma redistribuição de potência em todo o sistema elétrico.

Uma vez que o disjuntor que interliga as barras S e N encontra-se aberto, não há qualquer potência fluindo através deste componente. Assim sendo, não é possível o desenvolvimento de uma Função de Alívio baseada em potência, sendo necessário adotar como grandezas as tensões no caso base e no caso de redirecionamento da sobrecarga. Desse modo, para que o acoplamento entre as barras S e N resulte em alívio da sobrecarga no ramo A-B, é necessário que:

- O acoplamento entre as barras S e N produza uma redução na diferença entre as tensões nas barras A e B, o que resulta na redução da corrente no ramo A-B;
- A seguinte condição seja satisfeita se $\underline{V}_{SN} = -\Delta \underline{V}_{SN}^{re} = \underline{V}_{SN}^{re} - \underline{V}_{SN}$, em que \underline{V}_{SN}^{re} representa a diferença entre as tensões das barras S e N para o caso de redirecionamento da sobrecarga.

A dedução de uma Função de Alívio para acoplamento de barras é iniciada através da aplicação da Análise Nodal sobre o sistema da figura 5, regida através de (25). Nessa figura, \underline{I}_{AB} corresponde à corrente no ramo A-B; \underline{I}_{nom} refere-se ao limite térmico do ramo; \underline{I}_{sob} representa a sobrecarga no ramo.

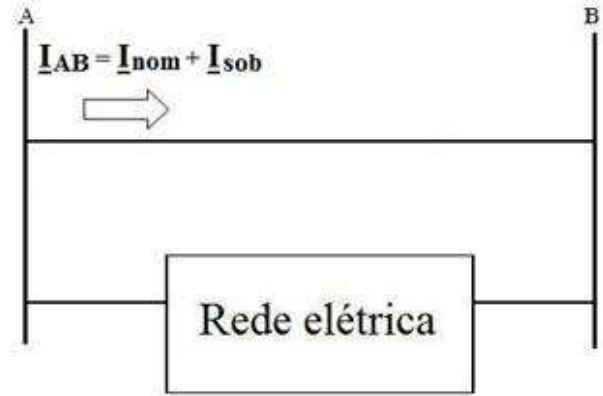


Figura 5: Representação de um equivalente de uma rede elétrica com um ramo em sobrecarga.

$$\begin{bmatrix} \underline{I}_1 \\ \vdots \\ \underline{I}_A \\ \vdots \\ \underline{I}_S \\ \vdots \\ \underline{I}_B \\ \vdots \\ \underline{I}_N \\ \vdots \\ \underline{I}_M \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \underline{y}_{11} & \cdots & \underline{y}_{1A} & \cdots & \underline{y}_{1S} & \cdots & \underline{y}_{1B} & \cdots & \underline{y}_{1N} & \cdots & \underline{y}_{1M} \\ \vdots & & \vdots & & \vdots & & \vdots & & \vdots & & \vdots \\ \underline{y}_{A1} & \cdots & \underline{y}_{AA} & \cdots & \underline{y}_{AS} & \cdots & \underline{y}_{AB} & \cdots & \underline{y}_{AN} & \cdots & \underline{y}_{AM} \\ \vdots & & \vdots & & \vdots & & \vdots & & \vdots & & \vdots \\ \underline{y}_{S1} & \cdots & \underline{y}_{SA} & \cdots & \underline{y}_{SS} & \cdots & \underline{y}_{SB} & \cdots & \underline{y}_{SN} & \cdots & \underline{y}_{SM} \\ \vdots & & \vdots & & \vdots & & \vdots & & \vdots & & \vdots \\ \underline{y}_{B1} & \cdots & \underline{y}_{BA} & \cdots & \underline{y}_{BS} & \cdots & \underline{y}_{BB} & \cdots & \underline{y}_{BN} & \cdots & \underline{y}_{BM} \\ \vdots & & \vdots & & \vdots & & \vdots & & \vdots & & \vdots \\ \underline{y}_{N1} & \cdots & \underline{y}_{NA} & \cdots & \underline{y}_{NS} & \cdots & \underline{y}_{NB} & \cdots & \underline{y}_{NN} & \cdots & \underline{y}_{NM} \\ \vdots & & \vdots & & \vdots & & \vdots & & \vdots & & \vdots \\ \underline{y}_{M1} & \cdots & \underline{y}_{MA} & \cdots & \underline{y}_{MS} & \cdots & \underline{y}_{MB} & \cdots & \underline{y}_{MN} & \cdots & \underline{y}_{MM} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \underline{V}_1 \\ \vdots \\ \underline{V}_A \\ \vdots \\ \underline{V}_S \\ \vdots \\ \underline{V}_B \\ \vdots \\ \underline{V}_N \\ \vdots \\ \underline{V}_M \end{bmatrix} \quad (25)$$

Para simular o processo de redirecionamento da sobrecarga no ramo, adota-se o Teorema da Compensação apresentado em Monticelli (1983). Dessa forma, mantém-se o ramo, sendo necessário que a corrente \underline{J}^{re} seja injetada na barra B e consumida na barra A, conforme ilustra a figura 6.

Na figura 6, \underline{Z}_{AB} é a impedância do ramo A-B e \underline{Z}_{AB}^{mod} corresponde à impedância equivalente da rede elétrica vista pelas barras A e B sem \underline{Z}_{AB} .

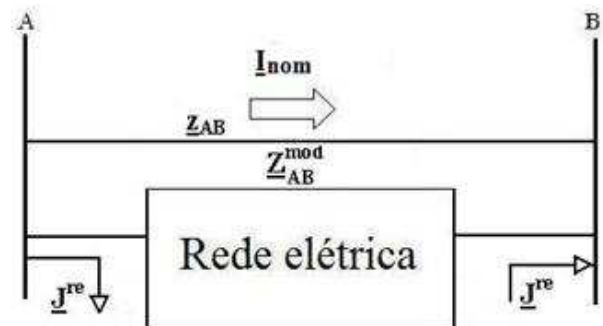


Figura 6: Redirecionamento de sobrecarga em um ramo usando o Teorema da Compensação.

A corrente \underline{J}^{re} é obtida através do cálculo da impedância de Thévenin \underline{Z}_{AB}^{th} entre as barras A e B do sistema. Considerando um curto-circuito trifásico \underline{I}_F entre essas duas barras tem-se:

$$\underline{Z}_{AB}^{th} = \Delta \underline{V}_{AB} / \underline{I}_F \quad (29)$$

Usando a teoria de Curto-circuito, obtêm-se essa mesma impedância a partir da diferença entre (30) e (31), conforme se apresenta em (32).

$$\Delta \underline{V}_A = (\underline{Z}_{AA} - \underline{Z}_{AB}) \underline{I}_F \quad (30)$$

$$\Delta \underline{V}_B = (\underline{Z}_{AB} - \underline{Z}_{BB}) \underline{I}_F \quad (31)$$

$$\Delta \underline{V}_{AB} = (\underline{Z}_{AA} + \underline{Z}_{BB} - 2\underline{Z}_{AB}) \underline{I}_F \quad (32)$$

A impedância \underline{Z}_{AB}^{th} também é calculada através da associação em paralelo entre \underline{Z}_{AB}^{mod} e \underline{Z}_{AB} . Determina-se a corrente

\underline{J}^{re} aplicando um divisor de corrente na rede elétrica da figura 6, cujo resultado é apresentado em (33).

$$\underline{J}^{re} = \frac{\underline{Z}_{AB}}{\underline{Z}_{AB}^{th}} \cdot (\underline{I}_{AB} - \underline{I}_{nom}) \quad (33)$$

A partir de (28), obtêm-se (34) e (35), as quais serão utilizadas para estimar as correntes em todos os ramos da rede elétrica, mediante acoplamento entre as barras S e N.

$$\Delta \underline{V}_{AB}^{re} = -(\underline{Z}_{AA} + \underline{Z}_{BB} - 2\underline{Z}_{AB}) \cdot \underline{J}^{re} \quad (34)$$

$$\Delta \underline{V}_{SN}^{re} = (\underline{Z}_{SB} + \underline{Z}_{NA} - \underline{Z}_{SA} - \underline{Z}_{NB}) \cdot \underline{J}^{re} \quad (35)$$

Considerando o acoplamento entre as barras S e N, o sistema (6) é reescrito em termos da matriz \underline{Z} , cujo resultado é expresso em (36).

$$\begin{bmatrix} \Delta \underline{I}_1^{ACPSN} / \Delta \underline{I} \\ \vdots \\ \Delta \underline{V}_A^{ACPSN} / \Delta \underline{I} \\ \vdots \\ \Delta \underline{V}_S^{ACPSN} / \Delta \underline{I} \\ \vdots \\ \Delta \underline{V}_B^{ACPSN} / \Delta \underline{I} \\ \vdots \\ \Delta \underline{V}_N^{ACPSN} / \Delta \underline{I} \\ \vdots \\ \Delta \underline{V}_M^{ACPSN} / \Delta \underline{I} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -1 & \cdots & \underline{Z}_{1A} & \cdots & \underline{Z}_{1S} & \cdots & \underline{Z}_{1B} & \cdots & \underline{Z}_{1N} & \cdots & \underline{Z}_{1M} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & \cdots & \underline{Z}_{AA} & \cdots & \underline{Z}_{AS} & \cdots & \underline{Z}_{AB} & \cdots & \underline{Z}_{AN} & \cdots & \underline{Z}_{AM} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & \cdots & \underline{Z}_{SA} & \cdots & \underline{Z}_{SS} & \cdots & \underline{Z}_{SB} & \cdots & \underline{Z}_{SN} & \cdots & \underline{Z}_{SM} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & \cdots & \underline{Z}_{BA} & \cdots & \underline{Z}_{BS} & \cdots & \underline{Z}_{BB} & \cdots & \underline{Z}_{BN} & \cdots & \underline{Z}_{BM} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & \cdots & \underline{Z}_{NA} & \cdots & \underline{Z}_{NS} & \cdots & \underline{Z}_{NB} & \cdots & \underline{Z}_{NN} & \cdots & \underline{Z}_{NM} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & \cdots & \underline{Z}_{MA} & \cdots & \underline{Z}_{MS} & \cdots & \underline{Z}_{MB} & \cdots & \underline{Z}_{MN} & \cdots & \underline{Z}_{MM} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ \vdots \\ 0 \\ \vdots \\ -1 \\ \vdots \\ 0 \\ \vdots \\ 1 \\ \vdots \\ 0 \end{bmatrix} \quad (36)$$

A partir de (36), obtêm-se (37) e (38).

$$\Delta \underline{V}_{AB}^{ACPSN} = (\underline{Z}_{SB} + \underline{Z}_{NA} - \underline{Z}_{SA} - \underline{Z}_{NB}) \cdot \Delta \underline{I} \quad (37)$$

$$\Delta \underline{V}_{CD}^{ACPSN} = (\underline{Z}_{CN} + \underline{Z}_{DS} - \underline{Z}_{CS} - \underline{Z}_{DN}) \cdot \Delta \underline{I} \quad (38)$$

Em (38), $\Delta \underline{V}_{CD}^{ACPSN}$ corresponde à variação de tensão produzida pelo acoplamento entre as barras S e N em um determinado ramo da rede elétrica, exceto o A-B.

Resolvendo o sistema composto pelas equações (19) e (22), obtêm-se, a partir de (20) ou (21), $\Delta \underline{I}$. Essa grandeza também pode ser obtida através de (39).

$$\underline{I} = \frac{V_{SN}^{cb}}{R_N - R_S} \Rightarrow \Delta \underline{I} = \frac{V_{SN}^{cb}}{\underline{Z}_{SN}^{th}} \quad (39)$$

Reescrevendo (35), obtêm-se (40).

$$\frac{\Delta \underline{V}_{SN}^{re}}{\underline{J}^{re}} = (\underline{Z}_{SB} + \underline{Z}_{NA} - \underline{Z}_{SA} - \underline{Z}_{NB}) \quad (40)$$

Substituindo (33), (39) e (40) em (37), resulta em (41), a qual é a Função de Alívio que permite estimar a corrente no ramo A-B após realização da variante de chaveamento, utilizada com a finalidade de eliminar a sobrecarga neste ramo.

$$F_r = \Delta V_{AB}^{ACPSN} = -\frac{Z_{AB}^{th}}{Z_{SN}^{th}} \cdot \frac{\Delta V_{SN}^{re}}{\Delta V_{AB}^{re}} \cdot V_{SN}^{cb} \quad (41)$$

Para calcular a estimativa de corrente nos ramos remanescentes do sistema após o acoplamento entre as barras S e N, substitui-se (39) em (38) para obter (42).

$$\Delta V_{CD}^{ACPSN} = -\frac{(Z_{CN} + Z_{DS} - Z_{CS} - Z_{DN})}{Z_{SN}^{th}} \cdot V_{SN}^{cb} \quad (42)$$

De acordo com a dedução desenvolvida, verifica-se, através de (41) e (42), que o efeito de uma operação de acoplamento entre duas barras de um sistema elétrico pode ser estimado a partir do conhecimento do comportamento deste sistema para os casos base e de redirecionamento de uma sobrecarga.

A partir de (41) e (42), a corrente em qualquer ramo do sistema é obtida de acordo com (43).

$$I_{ramo}^{ACPSN} = I_{ramo}^{cb} + \Delta I_{ramo}^{ACPSN} \Rightarrow I_{ramo}^{ACPSN} = I_{ramo}^{cb} + \frac{\Delta V_{ramo}^{ACPSN}}{Z_{ramo}} \quad (43)$$

Em (43), I_{ramo}^{ACPSN} representa a corrente em um ramo do sistema após o acoplamento entre as barras S e N; I_{ramo}^{cb} é a corrente em um ramo do sistema no caso base; ΔI_{ramo}^{ACPSN} refere-se à variação de corrente em um ramo do sistema decorrente do acoplamento entre as barras S e N.

3.2 Dedução analítica de uma Função de Alívio para abertura de barras de subestações

Na seção anterior, desenvolveu-se, analiticamente, uma Função de Alívio capaz de estimar a corrente em todos os ramos de um sistema elétrico a partir do acoplamento entre duas barras, sendo também incorporada a potência reativa na análise. Koglin and Medeiros Júnior (1985), Koglin and Medeiros Júnior (1987) e Medeiros Júnior (1987) desenvolveram heurísticamente Funções de Alívio baseadas em experimentos de cálculo em redes reais para avaliar a estimativa de corrente em ramos sobrecarregados a partir da abertura de barramentos de uma subestação, originariamente acoplados. Entretanto, destaca-se que a modelagem desenvolvida não considerava a influência da potência reativa na estimativa do carregamento final do ramo sobrecarregado. Esta seção destina-se a uma dedução analítica de uma Função de

Alívio, considerando também a potência reativa, para estimar o carregamento de um ramo sobrecarregado após uma operação de abertura de barras de uma subestação.

Para proceder à dedução de uma nova Função de Alívio para abertura de barras, apresenta-se, através da figura 7, o modelo desenvolvido em Medeiros Júnior and Oliveira (2010a). Nesse modelo, introduz-se uma nova barra A' juntamente à barra A, com uma fonte de corrente de valor igual à corrente no ramo A-B. Na barra A, representa-se uma carga com valor igual à corrente nesse ramo.

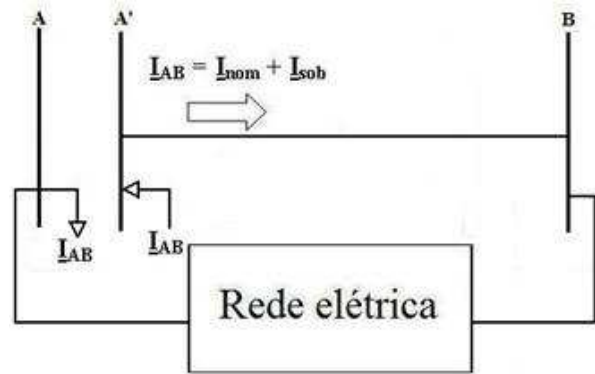


Figura 7: Representação de um equivalente de uma rede elétrica com ramo em sobrecarga, representado através da metodologia desenvolvida em Medeiros Júnior and Oliveira (2010a).

Para proceder ao redirecionamento da potência de sobrecarga, injeta-se, na barra A, a parcela equivalente à sobrecarga no ramo A-B. Já na barra A' representa-se uma carga com valor da sobrecarga. Esse procedimento é visualizado na figura 8. De acordo com esta figura, infere-se que a potência redirecionada percorrerá alguns nós do sistema elétrico, sendo alguns contemplados integralmente e outros com uma parcela dessa potência. Utilizando a técnica de circuito equivalente, obtém-se a parcela de potência que chega ao Nó de Chaveamento S e, dessa forma, estima-se o carregamento no ramo A-B para uma variante de chaveamento específica.

Considere o circuito elétrico apresentado na figura 9, no qual se deseja obter o valor das impedâncias Z_{der} , Z_{ser} , Z_P e Z_{switch} , conhecendo I_{re} (corrente redirecionada devido à sobrecarga), I_{re}^S (parcela da corrente redirecionada que chega ao Nó de Chaveamento S), I_{re}^V (parcela da corrente que chega ao nó S e que atravessa o disjuntor que integra os Nós de Chaveamento na barra S), Z_{AB} (impedância do ramo sobrecarregado), $V_{AA'}^{re}$ (diferença de tensão entre os nós A e A' para o caso de redirecionamento da sobrecarga) e $V_{A'B}^{re}$ (diferença de tensão entre os nós A' e B para o caso de redirecionamento da sobrecarga).

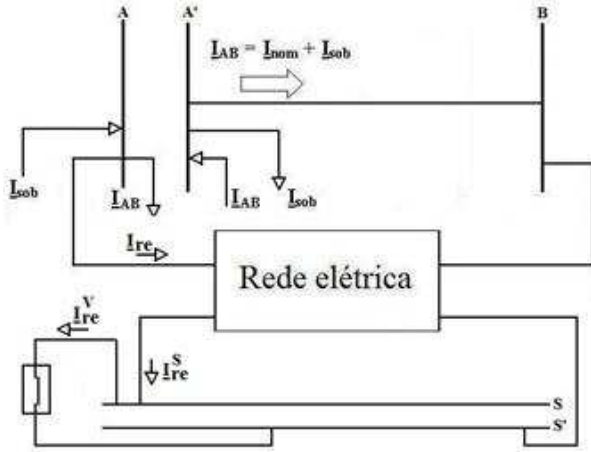


Figura 8: Redirecionamento de potência no ramo A-B através do modelo desenvolvido em Medeiros Júnior and Oliveira (2010a).

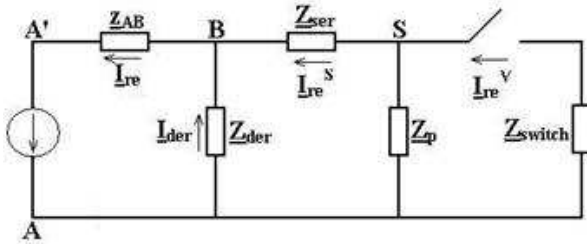


Figura 9: Representação do redirecionamento da sobrecarga de potência através de um circuito elétrico equivalente.

De acordo com o circuito elétrico apresentado na figura 9, para eliminar a sobrecarga no ramo A-B, a corrente I_{re} deve ser redirecionada através do circuito, o qual apresenta alguns dos nós de uma rede elétrica. Entretanto, em certos casos, a totalidade da corrente I_{re} não chegará até o Nó de Chaveamento S. Desse modo, representa-se no circuito elétrico a impedância Z_{der} para indicar que uma parcela de I_{re} pode fluir através desta impedância. A parcela da corrente I_{re} que chega ao nó de chaveamento S é I_{re}^S e esta flui através de Z_{ser} , que corresponde à impedância equivalente entre os nós B e S. Por fim, uma parcela de I_{re}^S pode atravessar o disjuntor que interliga as barras acopladas do Nó de Chaveamento S. Essa parcela de corrente é I_{re}^V e é representada fluindo através de Z_{switch} .

Uma vez que a corrente I_{re}^S equivale a uma parcela de I_{re} , ela é representada através de (44):

$$I_{re}^S = k \cdot I_{re} \quad (44)$$

Em (44), k representa a parcela da corrente redirecionada I_{re} que chega ao Nó de Chaveamento S. O valor de k situa-se entre 0 e 1. Analisando a malha composta pelos nós A, A' e B, calcula-se Z_{der} através de (45).

$$Z_{der} = -\frac{V_{A'A}^{re} + z_{AB} \cdot I_{re}}{I_{re} \cdot (1 - k)} \quad (45)$$

Para calcular a impedância Z_{ser} , analisa-se a malha composta pelos nós B, S e A, obtendo (46).

$$Z_{ser} = \frac{V_{SA}^{re} - V_{BA}^{re}}{k \cdot I_{re}} \quad (46)$$

De acordo com (47), obtém-se a corrente através de Z_{switch} utilizando divisor de corrente entre esta e a impedância Z_P .

$$I_{re}^V = \frac{Z_P}{Z_P + Z_{switch}} \cdot I_{re}^S \quad (47)$$

Analisando a malha composta pelos nós B, S e A obtém-se (48).

$$\frac{V_{BA}^{re}}{I_{re}^S} = -\left(Z_{ser} + \frac{Z_P \cdot Z_{switch}}{Z_P + Z_{switch}} \right) \quad (48)$$

Para calcular Z_P e Z_{switch} , desenvolvem-se (47) e (48), obtendo (49) e (50).

$$Z_{switch} = \frac{-\left(\frac{V_{BA}^{re}}{I_{re}^S} + Z_{ser} \right)}{I_{re}^V / I_{re}^S} \quad (49)$$

$$Z_P = \frac{-\left(\frac{V_{BA}^{re}}{I_{re}^S} + Z_{ser} \right)}{1 - (I_{re}^V / I_{re}^S)} \quad (50)$$

Após conhecidas as impedâncias do circuito da figura 9, calcula-se a variação da corrente ΔI no ramo A-B após realização de uma variante de chaveamento. Para tanto, adota-se o circuito da figura 10.

Nesse circuito, I_{switch} é a corrente no disjuntor que interliga as barras do Nó de Chaveamento S, a qual é obtida através de cálculo exato de fluxo de carga para o caso base. A variação de corrente ΔI através do ramo A-B após a realização da

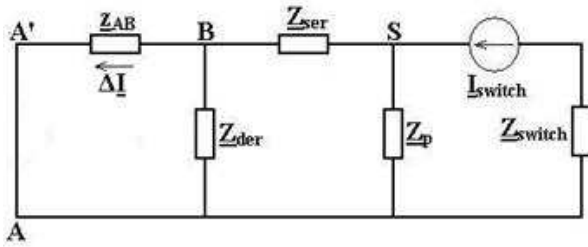


Figura 10: Representação da estimativa da variação de corrente no ramo A-B após realização da variante de chaveamento.

variante de chaveamento é dada por (51), sendo a impedância Z_1 calculada através de (52). Em (53), apresenta-se o cálculo de I_{AB}^{ABTSN} , corrente no ramo A-B após a abertura das barras S e N.

$$\Delta I = \frac{Z_{der}}{Z_{der} + z_{AB}} \cdot \frac{Z_P}{Z_P + Z_1} \cdot I_{switch} \quad (51)$$

$$Z_1 = Z_{ser} + \frac{Z_{der} \cdot z_{AB}}{Z_{der} + z_{AB}} \quad (52)$$

$$I_{AB}^{ABTSN} = I_{AB}^{cb} + \Delta I \quad (53)$$

A figura 11 apresenta o diagrama de blocos do processo para estimar a corrente no ramo sobrecarregado, após a abertura de barras.

Destaca-se que, para o acoplamento de barras, não foi apresentado um diagrama de blocos devido ao fato de que, na maioria dos casos, essa operação consiste de uma etapa intermediária necessária à transposição de ramos de uma barra para outra, em uma subestação. Desse modo, a situação inicial consiste em uma topologia em que as barras estão abertas. Posteriormente, essas barras são acopladas. Por fim, através da abertura do disjuntor de transferência, as barras são abertas, resultando em um arranjo de ramos diferente da situação inicial.

4 RESULTADOS

Os resultados para os modelos desenvolvidos são apresentados em duas seções, os quais foram obtidos através de um computador portátil tipo *notebook* com processador de 1,8 GHz e memória 1GB usando o *software* livre *Scilab* (versão 4.1.2). A Seção 4.1 refere-se às estimativas para o carregamento dos ramos de um sistema, para o acoplamento de barras. Já a Seção 4.2 corresponde à estimativa do carregamento, a partir da abertura de barras, apenas para o ramo que se encontrava sobrecarregado. Em ambas as seções, foi utilizada uma rede de distribuição com 28 barras e 38 ramos,

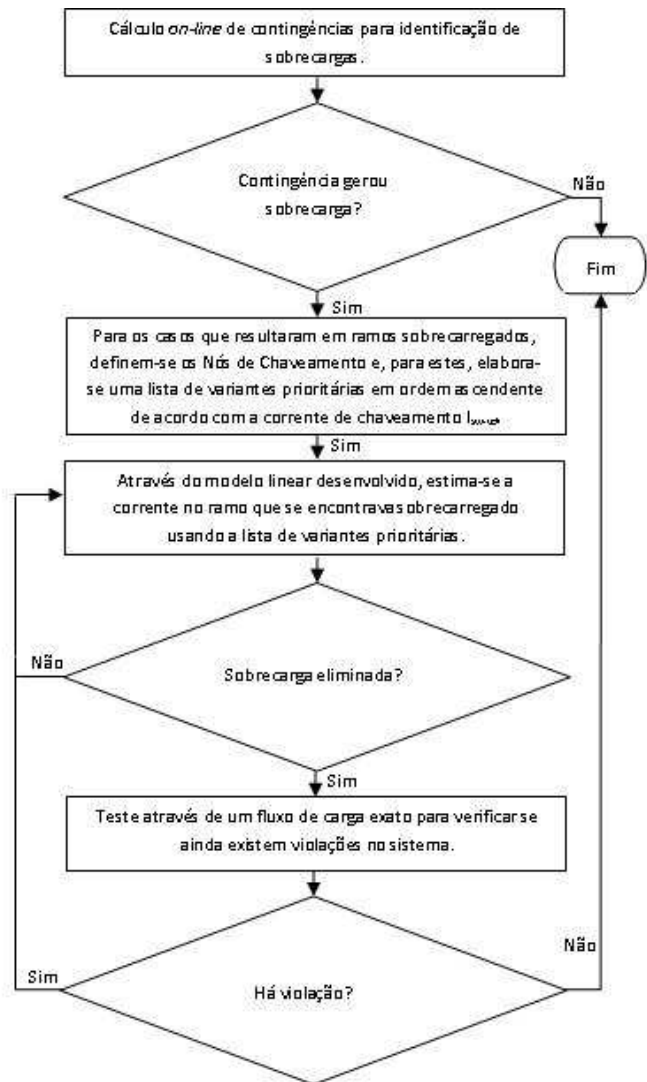


Figura 11: Diagrama de blocos do processo de estimativa da corrente para o ramo sobrecarregado para abertura de barras.

tensão de operação de 69 kV cujos dados encontram-se em Medeiros Júnior (2011). Entretanto, antes de apresentar os principais resultados de aplicação, cabe destacar a importância de gráficos como os apresentados nas figuras 12 e 14, para uma boa avaliação de Funções de Alívio. Nessas figuras, cada ponto considerado corresponde à comparação entre os valores calculados através de um fluxo de carga exato e os estimados através do processo linear da Função de Alívio. O eixo das abscissas representa os carregamentos de ramos, estimados a partir do processo de linearização. Já o eixo das ordenadas representa os carregamentos obtidos através de um fluxo de carga exato. Cada figura é dividida em quatro regiões. Pontos na região B correspondem a estimativas ruins, isto é, variantes de chaveamento seriam rejeitadas

erroneamente por estas estimativas. Por outro lado, pontos na região A implicam em cálculos supérfluos de fluxo de carga. Todos os demais pontos nessas figuras correspondem a variantes com bons carregamentos estimados.

4.1 Resultados para o acoplamento de barras

Para o sistema elétrico analisado, todas as 28 subestações operam em configuração de barra fechada. Entretanto, com o objetivo de realizar o acoplamento entre barras de subestações e aferir o carregamento dos ramos deste sistema a partir dos modelos lineares desenvolvidos (Função de Alívio e curto-circuito), admitiu-se que sempre uma das 28 subestações estava operando com as barras abertas.

Inicialmente, a tabela 1 apresenta uma comparação entre três metodologias, para os carregamentos dos ramos que, no caso base, se encontram sobrecarregados. Essas metodologias são o cálculo exato de fluxo de carga, a metodologia da Função de Alívio e a teoria de Curto-circuito, após o acoplamento de barras. Apresenta-se ainda na tabela, o Nó de Chaveamento cujas barras foram acopladas, além dos ramos interconectados ao Nó de Chaveamento, antes de serem acoplados. De acordo com os resultados apresentados através da referida tabela, verifica-se que os carregamentos dos ramos obtidos através dos dois modelos lineares são bastante próximos àqueles obtidos por um fluxo de carga exato.

Para simular o carregamento de todos os ramos de um sistema após o acoplamento de barras, foram realizadas simulações de 9 casos de sobrecargas considerando diferentes barras abertas para o caso base. Assim, após o acoplamento das barras para cada um dos casos analisados, os carregamentos de todos os ramos estimados pela metodologia da Função de Alívio foram confrontados com aqueles obtidos por um fluxo de carga exato, cujos resultados são apresentados na figura 12. No total, foram realizadas 279 comparações entre os dois métodos. Observa-se que, embora esses resultados tenham sido obtidos através de um processo linear, eles são satisfatórios, se comparados com resultados provenientes de um cálculo exato de fluxo de carga, uma vez que não há pontos situados nas regiões A e B. Comparando os tempos computacionais necessários ao processamento dos cálculos pelos dois métodos, enquanto os resultados obtidos através de um fluxo de carga exato foram processados em aproximadamente 0,74 segundo, os resultados calculados pelo processo linear da Função de Alívio foram obtidos em aproximadamente 0,050 segundo, ou seja, o esforço computacional para processar um cálculo exato de fluxo de carga é 15 vezes maior que o esforço necessário para as estimativas de carregamento baseadas em Funções de Alívio. Ressalta-se que os tempos de processamento computacional informados para

os dois métodos referem-se à média de diversas simulações realizadas.

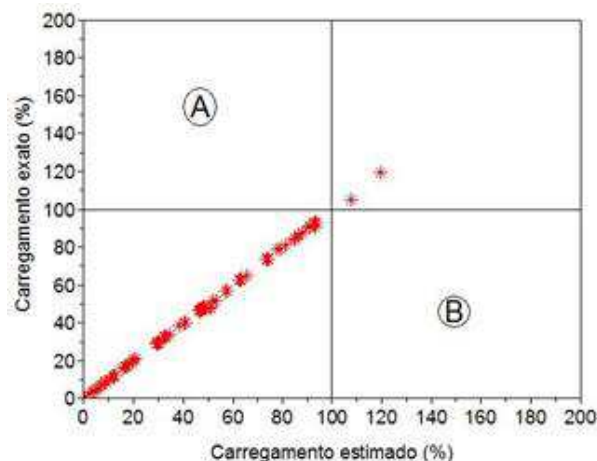


Figura 12: Estimativa do carregamento de um ramo após o processo de acoplamento de barras em uma subestação.

Outra importante análise a ser realizada consiste na comparação dos tempos computacionais necessários para simular o acoplamento de barras para os 3 modelos lineares desenvolvidos: Função de Alívio e Curto-circuito, ambos desenvolvidos neste trabalho, e Injeção Reversa, desenvolvido em Medeiros Júnior and Oliveira (2010a). Enquanto que, para o método da Função de Alívio, o tempo de simulação obtido foi de 0,050 segundo, no modelo de Injeção Reversa, o tempo de processamento foi, em média, 0,025 segundo. Usando a modelagem baseada na teoria de Curto-circuito, o tempo de processamento, em média, foi de 0,01 segundo. Desse modo, esse último método é o que apresentou melhor desempenho, cuja principal vantagem é a não necessidade de resolução de (6), tendo em vista que as variações de tensões em decorrência de curtos-circuitos nas barras S e N já são conhecidas, no momento em que são necessárias para a realização das estimativas.

4.2 Resultados para a abertura de barras

Para simular o modelo desenvolvido para abertura de barras, utilizou-se também a rede elétrica documentada em Medeiros Júnior (2011). Na figura 13, apresenta-se um diagrama unifilar simplificado com uma contingência no ramo que interliga as barras 25 e 17, resultando em uma sobrecarga de aproximadamente 6% no ramo que interliga as barras 11 e 17.

A figura 14 apresenta os resultados decorrentes do processo de abertura de barras para eliminar a sobrecarga no ramo entre as barras 11 e 17, a partir do modelo desenvolvido na Seção 3.2. Os resultados compreendem apenas a estimativa de

Tabela 1: Comparação entre os carregamentos obtidos para o ramo sobrecarregado a partir de um cálculo de fluxo de carga exato e linearizações por Curto-circuito e Funções de Alívio.

| Nº do ramo | Carregamentos (p.u.) | | | Configurações antes do acoplamento | | |
|------------|----------------------|------------------|----------------|------------------------------------|-----------------------------|--------------------------------|
| | Curto-circuito | Função de Alívio | Fluxo de carga | Nó de chaveamento | Nós ligados ao barramento A | Nós ligados ao barramento B |
| 30 | 0,5621 | 0,5621 | 0,5582 | 11 | 1 e 14 | 17 e carga |
| 23 | 0,1405 | 0,1405 | 0,1385 | 25 | 17 e carga | 1 |
| 21 | 0,4367 | 0,4367 | 0,4328 | 17 | 11, 24 e 25 | 12 e carga |
| 21 | 0,4375 | 0,4375 | 0,4328 | 17 | 11 e 25 | 12, 24 e carga |
| 17 | 0,7075 | 0,7072 | 0,7036 | 2 | 1 (ckts 1 e 2), 18 e carga | 1 (ckt 3), 19 e 7 |
| 17 | 0,7097 | 0,7094 | 0,7036 | 2 | 1 (ckts 1 e 2), 19 e carga | 1 (ckt 3), 18 e 7 |
| 17 | 0,7206 | 0,7199 | 0,7036 | 2 | 1 (ckt 1 e 2) | 1 (ckt 3), 18, 19, 7 e carga |
| 1 | 0,2702 | 0,2702 | 0,2638 | 2 | 1 (ckt 1), 18, 19 e carga | 1 (ckts 2 e 3) e 7 |
| 1 | 0,2675 | 0,2675 | 0,2638 | 2 | 1 (ckt 1), 18 e carga | 1 (ckts 2 e 3), 19 e 7 |
| 17 | 0,7102 | 0,7099 | 0,7036 | 2 | 1 (ckt 1) e 7 | 1 (ckts 2 e 3), 18, 19 e carga |
| 17 | 0,7045 | 0,7045 | 0,7036 | 7 | 2, 3 e 8 | 10, 20 e carga |
| 17 | 0,7112 | 0,7112 | 0,7036 | 7 | 2, 8 e 20 | 10, 3 e carga |

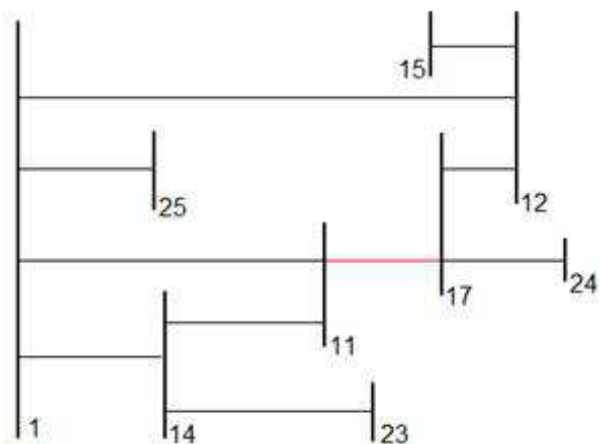


Figura 13: Diagrama unifilar simplificado para uma continência no ramo que interliga as barras 25 e 17.

corrente nesse ramo, sendo efetuadas 16 comparações entre os resultados obtidos através de um cálculo exato de fluxo de carga e o modelo linear aqui desenvolvido. Verifica-se que certas variantes não são eficazes para aliviar a sobrecarga no ramo sobrecarregado. Entretanto, uma vez que não existem estimativas situadas nas regiões A e B, os resultados apresentados pelo processo linear são satisfatórios quando comparados com aqueles provenientes de um fluxo de carga exato,

cujo processo computacional apresenta soluções com maior grau de exatidão, porém com maior esforço computacional.

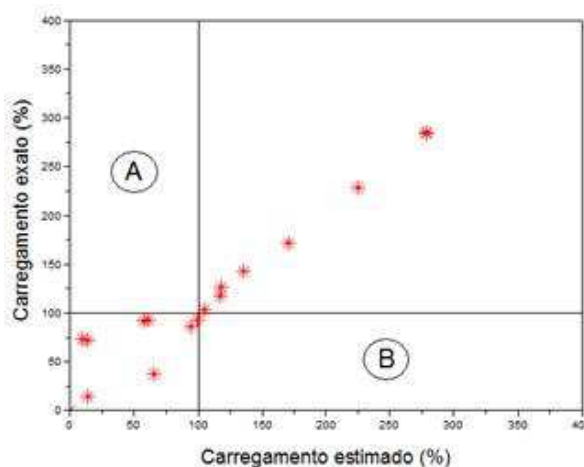


Figura 14: Estimativa do carregamento de um ramo após o processo de abertura de barras em uma mesma subestação.

Através da figura 14, constata-se que é possível eliminar a sobrecarga no ramo entre as barras 11 e 17 através de algumas variantes de chaveamento. As variantes que mais exercerão influência no alívio da sobrecarga serão aquelas provenientes dos melhores Nós de Chaveamento que, para a sobrecarga em questão, são as barras 11, 12, 14 e 17. Assim, essas variantes foram classificadas em uma lista em ordem ascendente

com relação ao módulo da corrente de chaveamento I_{switch} . Dessa forma, para aquelas variantes capazes de eliminar a sobrecarga no ramo 11-17, a primeira variante testada através do modelo linear desenvolvido é aquela com menor I_{switch} . A ordem de classificação das variantes é apresentada na tabela 2.

Para a primeira variante de chaveamento da tabela 2, de acordo com a estimativa realizada pelo modelo linear desenvolvido, o carregamento do ramo 11-17 após a consecução da variante de chaveamento passou a ser 99,05% do limite térmico desse ramo. Simulando esta variante através de um fluxo de carga exato, obtém-se um carregamento de 93,36% do limite térmico. Ademais, a realização dessa variante não apresenta quaisquer outras violações operativas. Desse modo, é necessário realizar apenas um único cálculo de fluxo de carga *on-line*. A configuração final adotada para o sistema é apresentada na figura 15.

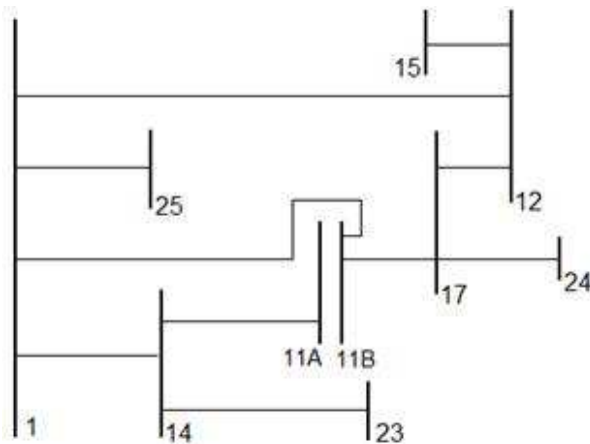


Figura 15: Diagrama unifilar representando a variante de chaveamento adotada para eliminar a sobrecarga.

Um outro exemplo que pode ser realizado para verificar a eficácia da metodologia de Funções de Alívio, para o processo de abertura de barras aqui desenvolvido, é a análise do esforço computacional necessário ao teste de todas as variantes de chaveamento em um Nó de Chaveamento. Considerando duas subestações, ambas com duas barras, sendo uma dotada de 10 ramos interconectados e a outra com 20 ramos interconectados, o número de variantes a ser testado para esses Nós de Chaveamento, devido à simetria, é, respectivamente, 2^9 e 2^{19} . Desse modo, utilizando o *hardware* e o *software* especificados, uma vez que não se dispunha de redes com a quantidade de 10 ou 20 ramos interconectados a uma única subestação, os tempos computacionais estimados para 10 e 20 ramos são, respectivamente, 0,59 e 602 segundos. Cabe ressaltar que a linguagem utilizada nas simulações foi uma linguagem de prototipagem, possuindo uma eficiência computacional muito inferior a de uma linguagem de programa-

ção. Ademais, o *hardware* utilizado apresenta uma configuração defasada com relação às máquinas mais modernas.

5 CONCLUSÕES

Embora diversas medidas preventivas sejam adotadas na operação de sistemas reais, pode ocorrer eventualmente a imposição de restrições operativas, principalmente devido a faltas simultâneas ou faltas simples coincidentes com indisponibilidades programadas de componentes do sistema elétrico. Por exemplo, sobrecargas em linhas de transmissão ou transformadores afetam os limites térmicos e comprometem a vida útil dos equipamentos. Assim sendo, estas devem ser eliminadas tão rapidamente quanto possível.

Os resultados de simulação apresentados neste trabalho demonstram a validade de estimativas do carregamento de ramos de um sistema elétrico, a partir de uma linearização, para simular o efeito do acoplamento entre dois barramentos de uma subestação. Essa conclusão decorre da constatação de que os diferentes processos de linearização propostos conduziram a resultados equivalentes e próximos dos valores exatos. Essas estimativas podem ser obtidas a partir de cálculos simples, haja vista que os dados relativos às matrizes \mathbf{Y} e \mathbf{Z} já se encontram disponíveis. Isso implica em uma redução significativa da quantidade de cálculos não-lineares de fluxo de carga. De acordo com os tempos de simulação apresentados ao longo deste trabalho, verifica-se que a metodologia baseada na teoria de curto-circuito apresenta o melhor desempenho, superando inclusive o método desenvolvido em Medeiros Júnior and Oliveira (2010a).

Em trabalhos anteriores desenvolveu-se, heurísticamente, uma Função de Alívio com a finalidade de estimar o carregamento de ramos a partir da abertura de barras pertencentes a uma subestação. Para essa situação, desenvolveu-se neste trabalho uma Função de Alívio, deduzida a partir da linearização das equações de fluxo de carga. Essa função demonstrou-se eficiente a partir das simulações realizadas com o sistema teste. Desse modo, a aplicação de modelos lineares destinados à operação de sistemas elétricos desponta como solução atrativa, tendo em vista que diversas alternativas de restauração de um estado seguro podem ser rapidamente avaliadas por operadores de centros de controle, proporcionando maior confiabilidade à operação do sistema elétrico.

REFERÊNCIAS

- Alsac, O., Stott, B. and Tinney, W. (1983). Sparsity-oriented compensation methods for modified network solutions, *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems PAS-102*(5): 1050–1060.

Tabela 2: Lista de prioridade das variantes de chaveamento.

| Classificação | Nó de chaveamento | Barra ligada ao Nó de chaveamento A | Barra ligada ao Nó de chaveamento B | Carga ligada ao nó | Módulo I_{switch} (p.u.) |
|---------------|-------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|--------------------|----------------------------|
| 1 | 11 | 14 | 1 e 17 | 11B | 0,1635 |
| 2 | 14 | 11 | 1 e 23 | 14B | 0,1636 |
| 3 | 11 | 14 e 17 | 1 | 11B | 0,1741 |
| 4 | 14 | 11 e 23 | 1 | 14B | 0,1781 |
| 5 | 17 | 11 e 24 | 12 | 17A | 0,2928 |
| 6 | 17 | 11 | 12 e 24 | 17A | 0,3364 |
| 7 | 11 | 1 e 14 | 17 | 11A | 0,3364 |
| 8 | 14 | 11 | 14 e 23 | 14A | 0,4189 |
| 9 | 14 | 11 e 23 | 1 | 14A | 0,4334 |
| 10 | 11 | 14 e 17 | 1 | 11A | 0,6004 |

- Bacher, R. and Glavitsch, H. (1986). Network topology optimization with security constraints, *IEEE Transactions on Power Systems* **1**(4): 103–111.
- Castro, C. and Murari, C. (1997). Comparison of compensation methods applied to the analysis of topological changes in electrical networks, *International Journal of Electrical Power and Energy Systems* **19**(8): 511–518.
- Edwin, K. W. and Eichler, R. (1983). Corrective switching - a tool for preventive network operation, *CIGRE/IFAC Symposium Control Application for Power System Security*, Florence, Italy.
- Koglin, H. J. and Medeiros Júnior, M. F. (1983). Further developments in corrective switching, *CIGRE/IFAC Symposium Control Application for Power System Security*, Florence, Italy.
- Koglin, H. J. and Medeiros Júnior, M. F. (1985). Corrective switching approaching on-line application, *IFAC Symposium on Planning and Operation of Electric Energy Systems*.
- Koglin, H. J. and Medeiros Júnior, M. F. (1987). Corrective switching by means of optimal strategy, *Power System Computation Conference*, Lisboa, Portugal.
- Koglin, H. and Müller, H. (1980). Overload reduction through corrective switching actions, *International Conference on Power System Monitoring and Control. IEE Conference Publication.*, number 187, pp. 159–164.
- Mazi, A. A., Wollenberg, B. F. and Hesse, M. H. (1986). Corrective control of power system flows by line and bus-bar switching, *IEEE Transactions on Power Systems* **1**(3): 258–264.
- Medeiros Júnior, M. F. (1987). *Überlastreduktion durch Korrekatives Schalten*, PhD thesis, TH Darmstadt, Germany.
- Medeiros Júnior, M. F. (2011). Sistema de distribuição em 69 kv para simulação de chaveamentos corretivos, Publicado em <http://www.dca.ufrn.br/~firmino/DadosdoregionalNTL>.
- Medeiros Júnior, M. F. and Oliveira, A. V. C. (2010a). Novas contribuições na avaliação rápida de medidas de chaveamento para eliminação de sobrecargas, *III Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos*, Belém, Brasil.
- Medeiros Júnior, M. F. and Oliveira, A. V. C. (2010b). Power system security by corrective switching, *VIII IREP Symposium - Bulk Power System Dynamics and Control*, Armação dos Búzios, Brazil.
- Monticelli, A. (1983). *Fluxo de Carga em Redes de Energia Elétrica*, Edgar Blucher, Rio de Janeiro - RJ.
- Müller, H. (1981). *Eine maßnahme zur gezielten entlastung von betriebsmitteln in elektrischen energieverorgungsnetzen*, Master's thesis, TH Darmstadt, Germany.
- Rolim, J. and Machado, L. (1999). A study of the use of corrective switching in transmission systems, *IEEE Transactions on Power Systems* **14**(1): 336–341.
- Rossier, C. A. and Germond, A. (1983). Network topology optimization for power system security enhancement, *CIGRE/IFAC Symposium Control Application for Power System Security*, Florence, Italy.
- Schnyder, G. and Glavitsch, H. (1988). Integrated security control using an optimal power flow and switching concepts, *IEEE Transactions on Power Systems* **3**(2): 782–790.

Shao, W. and Vittal, V. (2005). Corrective switching algorithm for relieving overloads and voltage violations, *IEEE Transactions on Power Systems* **20**(4): 1877–1885.

Wrubel, J., Rapcienski, P., Lee, K., Gisin, B. and Woodzell,

G. (1996). Practical experience with corrective switching algorithm for on-line applications, *IEEE Transactions on Power Systems* **11**(1): 415–421.