

A linear model for overload rerouting and testing switching measures for overload elimination by means of Relief Functions^{*}

Fernandes A. C.^{*} Medeiros Júnior M. F.^{*} Oliveira A. V. C.^{**}
Fonseca J. R. L.^{*}

^{*} Programa de Pós Graduação em Engenharia Elétrica e de
Computação, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, RN,
(e-mails: arthurcostaf96@gmail.com; firmino@dca.ufrn.br;
jonatha_revoredo@hotmail.com)

^{**} Mestrado Profissional em Energia Elétrica, Universidade Federal do
Rio Grande do Norte, RN, (e-mail: arrhenius@dee.ufrn.br)

Abstract: Eventually, limit violations may occur during power systems operation, such as: overloads in transmission lines and power transformers, voltages at buses outside admissible range, etc. Thus, it is important to create ways to maintain the supply of electrical energy even in contingency operation situations, with fast and lowcost measures, keeping load restriction as the last control action. Corrective Switching is a technique capable of controlling the power flow in meshed networks by changing the network topology. The main advantage of this control tool is that it does not involve additional costs, since its implementation depends on maneuvers of elements already present in the network. In previous works, several techniques and methodologies were developed to reduce the computational effort needed to implement the technique, aiming its application in real-time operation. This work presents a new linear methodology to simulate overloads rerouting without changing the admittance matrix, avoiding extra computational effort for new factorization. Furthermore, the parameters calculated by linearization are able to build a relief function to identify switching variants capable to reconfigure the network in real-time through the technique of Corrective Switching.

Resumo: Eventualmente, podem ocorrer violações de limites durante a operação de sistemas elétricos, tais como: sobrecargas nas linhas de transmissão e transformadores de potência, tensões nos barramentos fora da faixa admissível, etc. Dessa forma, é importante desenvolver técnicas para manter o fornecimento de energia elétrica mesmo em situações de operação em contingência, com medidas rápidas e de baixo custo, mantendo a restrição de carga como último recurso. A técnica de Chaveamentos Corretivos é capaz de controlar o fluxo de potência em redes malhadas, alterando a topologia da rede. A principal vantagem desta técnica é que não envolve custos adicionais, uma vez que a sua implementação depende de manobras em equipamentos já presentes na rede. Em trabalhos anteriores, foram desenvolvidas várias técnicas e metodologias para reduzir o esforço computacional necessário à implementação da técnica, visando a sua aplicação em tempo real. Este trabalho apresenta uma nova metodologia linear para simular o redirecionamento de sobrecargas sem alterar a matriz de admitâncias, evitando um esforço computacional adicional para a nova fatoração. Além disso, as grandezas calculadas através da linearização são capazes de construir uma função de alívio para identificar variantes de chaveamento capazes de reconfigurar a rede em tempo real através da técnica de Chaveamentos Corretivos.

Keywords: Corrective Switching; Meshed Networks; Overload Rerouting; Real Time Simulation; Relief Functions.

Palavras-chaves: Chaveamentos Corretivos; Funções de Alívio; Redirecionamento de Sobrecarga; Redes Malhadas; Simulação em Tempo Real.

1. INTRODUÇÃO

Os problemas decorrentes da privação de energia elétrica aos consumidores se apresentam de diversas formas e podem causar grande impacto financeiro, social, entre outros. Portanto, os sistemas elétricos devem possuir grandes níveis de segurança, confiabilidade e qualidade. No entanto, o emprego de técnicas que garantam esses patamares elevados requer também grande investimento financeiro, pois normalmente estas técnicas envolvem a ampliação e reforço do sistema elétrico com a entrada de novos equipamentos.

Na operação de sistemas elétricos, podem ser verificadas violações operativas, tais quais: níveis de tensão, carregamento de ramos, frequência da rede, etc. A violação desses limites resulta em penalizações nos indicadores de qualidade da operação do sistema elétrico. Em determinados níveis, as violações de limites de operação podem fazer com que os sistemas de proteção atuem, perdendo o elemento da rede em que ocorre a violação, podendo desencadear novas violações e restrição de carga.

No planejamento de sistemas de potência, adota-se o critério de confiabilidade N-1, o qual garante que o sistema seja capaz de manter o funcionamento com a perda de um elemento qualquer, sem haver violações de limites das grandezas elétricas. Porém, situações de múltiplas contingências ou acréscimos inesperados de carga podem provocar violações desses limites. Uma forma de aumentar a segurança de sistemas elétricos é utilizar critérios de confiabilidade mais rígidos, como o N-2. No entanto, essa solução implica em custos muito elevados. Entretanto, outra forma de evitar que haja a violação de limites de operação é alterar a topologia da rede, através da técnica de Chaveamentos Corretivos, cujo primeiro algoritmo foi desenvolvido com o objetivo de eliminar sobrecargas em ramos do sistema através de desligamentos de linhas de transmissão e transformadores, conforme apresentado em Müller (1979). Neste trabalho, apresenta-se um resumo de indicações de referências bibliográficas que levaram finalmente ao desenvolvimento analítico de uma função de alívio. Em seguida, uma nova abordagem para o redirecionamento da sobrecarga, de maneira a tornar todo o processo computacionalmente mais eficiente, visando a uma aplicação em tempo real, com auxílio de um Simulador em Tempo Real - RTS.

A técnica de Chaveamentos Corretivos permite o controle do fluxo de potência no sistema através do chaveamento de barramentos, linhas de transmissão, ou elementos shunt. A técnica se destaca por utilizar elementos presentes no sistema, não havendo custos adicionais. A técnica de Chaveamentos Corretivos se baseia na mudança da topologia da rede para: eliminar sobrecargas em ramos do sistema, conforme apresentado em Koglin e Müller (1980), Koglin e Medeiros Júnior (1985), Koglin e Medeiros Júnior (1987), e Shao e Vittal (2005); em Koglin e Medeiros Júnior (1987), e Shao e Vittal (2005) a técnica também foi utilizada para solucionar problemas de tensões nos barramentos da rede. Em Bacher e Glavitsch (1986) foi apresentada uma abor-

dagem em que a técnica foi implementada para aumentar a segurança de sistemas elétricos. Diferente dos trabalhos anteriormente citados, que foram utilizados para eliminar sobrecargas únicas no sistema, Medeiros Júnior et al. (2016) apresentou uma metodologia de Gestão de Congestionamento capaz de eliminar sobrecargas em múltiplos ramos do sistema através de Chaveamentos Corretivos.

Um dos desafios para implementação da técnica de Chaveamentos Corretivos em tempo real é o tempo necessário para obter uma solução adequada. Isso se deve ao fato de que a técnica consiste em um processo não-linear e envolve um grande número de possíveis soluções. Para solucionar esse problema, vários métodos foram desenvolvidos para minimizar o esforço computacional na realização dos cálculos e redução do espaço de busca de soluções. Dentre esses métodos, Koglin e Medeiros Júnior (1985), Oliveira (2011) e Oliveira (2019) desenvolveram metodologias de Função de Alívio para estimar o carregamento do ramo sobrecarregado após a alteração da topologia da rede através de um cálculo linear. Dessa forma, através das Funções de Alívio, é possível classificar as variantes promissoras a serem testadas através do cálculo exato do fluxo de carga.

Para aplicação da metodologia da Função de Alívio e para identificar os nós do sistema com maior potencial de eliminação de determinada sobrecarga, utiliza-se o redirecionamento da sobrecarga. É possível realizar o redirecionamento a partir da execução do cálculo exato de fluxo de carga, conforme realizado em Müller (1979) com alteração da topologia da rede. As referências Müller (1979), e Medeiros Júnior e Oliveira (2010) também apresentaram um redirecionamento de sobrecarga realizado de forma linear através da técnica de Injeção Reversa. No entanto, os métodos apresentados em Müller (1979), e Medeiros Júnior e Oliveira (2010) envolvem a mudança da matriz Ybarra do sistema. Um dos objetivos deste artigo é apresentar uma linearização para o cálculo do redirecionamento de sobrecarga sem a necessidade de alteração da topologia da rede, ou seja, sem alteração da matriz Ybarra.

Além da linearização proposta, este artigo apresenta uma metodologia capaz de identificar sobrecargas em tempo real e utilizar a técnica de Chaveamentos Corretivos para selecionar e implementar automaticamente uma nova topologia para que a rede que seja capaz de eliminar a sobrecarga identificada em um determinado ramo e não causar novas violações no sistema. Para realizar as simulações em tempo real, utilizou-se um RTS. O mesmo RTS foi utilizado em Fonseca et al. (2018c), Fonseca et al. (2018a), e Fonseca et al. (2018b), que apresentam uma aplicação de *Self Healing* no processo de reconfiguração de um sistema elétrico que supre uma planta industrial, utilizando algoritmo genético para obter a nova configuração da planta.

A Seção 2 apresenta a dedução matemática realizada para obter a linearização do redirecionamento da sobrecarga. As Seções 3 e 4 apresenta conceitos relevantes sobre a técnica de Chaveamentos Corretivos e a metodologia da Função de Alívio, respectivamente. A Seção 5 apresenta a rotina implementada para realizar a simulação em tempo real. A Seção 6 apresenta os resultados obtidos nas simulações. A Seção 7 apresenta as conclusões obtidas no desenvolvi-

* O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES).

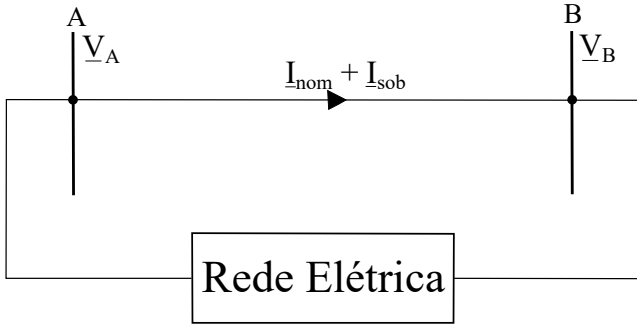


Figura 1. Equivalente de uma rede elétrica com o ramo A-B sobrecarregado.

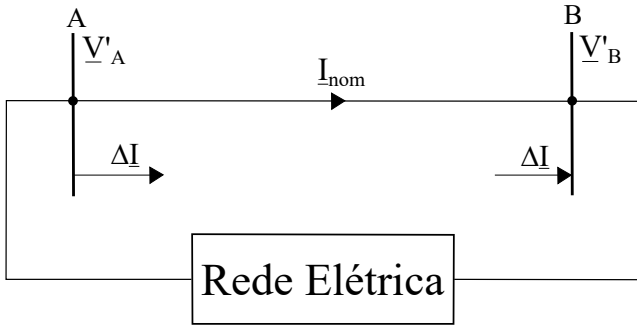


Figura 2. Equivalente de uma rede elétrica com redirecionamento da sobrecarga.

mento do trabalho. Por fim, são apresentadas as referências utilizadas.

2. CÁLCULO LINEARIZADO DO REDIRECIONAMENTO DE CORRENTE

Considera-se o equivalente de uma rede elétrica apresentado na Figura 1, em que o ramo A-B está em sobrecarga. A corrente no ramo A-B é a soma da sua corrente nominal I_{nom} com a parcela da corrente de sobrecarga I_{sob} . Além disso, V_A e V_B são as tensões complexas nas barras A e B, respectivamente.

Com o objetivo de redirecionar a parcela de sobrecarga da corrente I_{sob} , sem alterar a matriz Ybarra, simula-se uma injeção de corrente na barra B e uma corrente de carga na barra A no valor de ΔI , conforme apresentado na Figura 2. Com o redirecionamento da sobrecarga, um novo estado é obtido para o sistema, de modo que as novas tensões nas barras A e B serão V'_A e V'_B , respectivamente.

Deve-se obter o valor de ΔI para que a condição apresentada na Figura 2 seja satisfeita e a corrente no ramo A-B seja igual a sua corrente nominal. A partir da Figura 1, obtém-se (1), em que Z_{AB} é a impedância série do ramo A-B. Para simplificar os cálculos, foram desconsideradas as capacitâncias *shunt*.

$$I_{nom} + I_{sob} = \frac{V_A - V_B}{Z_{AB}} \quad (1)$$

De forma análoga, para a Figura 2, obtém-se (2).

$$I_{nom} = \frac{V'_A - V'_B}{Z_{AB}} \quad (2)$$

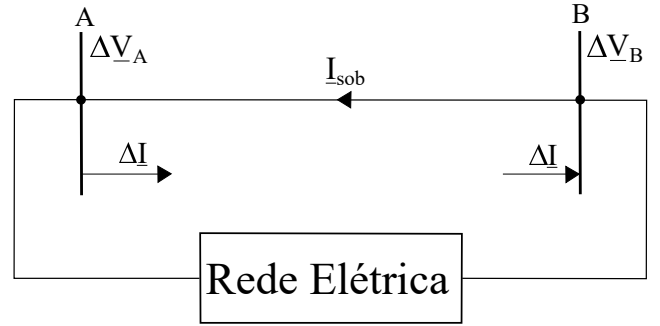


Figura 3. Superposição dos casos apresentados nas Figuras 1 e 2

Substituindo (2) em (1), considerando que $\Delta V_A = V'_A - V_A$ e $\Delta V_B = V'_B - V_B$, obtém-se (3).

$$I_{sob} = \frac{\Delta V_B - \Delta V_A}{Z_{AB}} \quad (3)$$

A superposição entre os casos da Figura 1 e Figura 2 é representada por (3). Esse caso também pode ser representado pela Figura 3.

Como a Figura 3 representa a diferença entre os casos da Figura 1 e da Figura 2, não há cargas na rede da Figura 3.

Para calcular o valor de ΔI , utiliza-se a equação nodal do sistema, representada em (4). Em que I^{cb} é o vetor de correntes líquidas injetadas nos nós do sistema no caso base, Y^{cb} é a matriz de admitância do sistema no caso base e V^{cb} é o vetor de tensões da rede para o caso base.

$$I^{cb} = Y^{cb} \cdot V^{cb} \quad (4)$$

O vetor V^{cb} é obtido através do cálculo exato do fluxo de carga para o caso base da rede. Através de V^{cb} e da matriz Ybarra obtém-se o vetor de correntes I^{cb} , de acordo com (4). Logo, é possível obter as variações de tensões para quaisquer variações de corrente líquidas nos nós do sistema, conforme (5).

$$\Delta I = Y^{cb} \cdot \Delta V \quad (5)$$

Na Figura 3 observa-se que haverá variação de corrente apenas nas barras A e B do sistema. Dessa forma, é possível obter as variações de tensões nas barras do sistema para essas variações de corrente através de (5). A representação matricial é apresentada em (6), em que n é o número de barras do sistema e as barras A e B são representadas pelos subíndices i e j .

$$\begin{bmatrix} 0 \\ \vdots \\ -\Delta I \\ \vdots \\ \Delta I \\ \vdots \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_{11} & \dots & Y_{1i} & \dots & Y_{1j} & \dots & Y_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ Y_{i1} & \dots & Y_{ii} & \dots & Y_{ij} & \dots & Y_{in} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ Y_{j1} & \dots & Y_{ji} & \dots & Y_{jj} & \dots & Y_{jn} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ Y_{n1} & \dots & Y_{ni} & \dots & Y_{nj} & \dots & Y_{nn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta V_1 \\ \vdots \\ \Delta V_i \\ \vdots \\ \Delta V_j \\ \vdots \\ \Delta V_n \end{bmatrix} \quad (6)$$

Multiplicando (6) pela inversa da matriz Ybarra e dividindo por ΔI , obtém-se (7). As variáveis Z são os elementos da matriz inversa da Ybarra. Nesse caso, a matriz composta por essas variáveis é a matriz Zbarra.

$$\begin{bmatrix} Z_{11} & \dots & Z_{1i} & \dots & Z_{1j} & \dots & Z_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ Z_{i1} & \dots & Z_{ii} & \dots & Z_{ij} & \dots & Z_{in} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ Z_{j1} & \dots & Z_{ji} & \dots & Z_{jj} & \dots & Z_{jn} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ Z_{n1} & \dots & Z_{ni} & \dots & Z_{nj} & \dots & Z_{nn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ \vdots \\ -1 \\ \vdots \\ 1 \\ \vdots \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\Delta V_1}{\Delta I} \\ \vdots \\ \frac{\Delta V_i}{\Delta I} \\ \vdots \\ \frac{\Delta V_j}{\Delta I} \\ \vdots \\ \frac{\Delta V_n}{\Delta I} \end{bmatrix} \quad (7)$$

A partir de (7), calculam-se as variações de tensão nas barras i e j através de (8) e (9).

$$\Delta V_i = (Z_{ij} - Z_{ii})\Delta I \quad (8)$$

$$\Delta V_j = (Z_{jj} - Z_{ji})\Delta I \quad (9)$$

Dessa forma, como $\Delta V_i = \Delta V_A$, $\Delta V_j = \Delta V_B$ e $Z_{ij} = Z_{ji}$, obtém-se a variação de corrente ΔI substituindo (8) e (9) em (3). A corrente ΔI que irá manter o carregamento no ramo A-B em seu valor nominal é calculada através de (10).

$$\Delta I = \frac{I_{sob} Z_{AB}}{Z_{ii} + Z_{jj} - 2Z_{ij}} \quad (10)$$

Substituindo o valor de ΔI obtido em (10) no sistema (5), obtém-se as variações de tensão nas barras após o redirecionamento da corrente I_{sob} do ramo A-B. A partir disso, calculam-se as tensões após o redirecionamento através de (11). Vale ressaltar que (11) não vale para a barra *slack* do sistema.

$$V^{re} = \Delta V + V^{bc} \quad (11)$$

Após obter o vetor V^{re} de tensões nodais após o redirecionamento da sobrecarga, todas as demais grandezas do fluxo de potência podem ser recalculadas através de cálculos lineares.

Dessa forma, o redirecionamento de sobrecarga pôde ser realizado sem a necessidade de cálculos não lineares e sem a alteração da matriz Ybarra.

3. CHAVEAMENTOS CORRETIVOS

Alguns conceitos são fundamentais para a aplicação da técnica de Chaveamentos Corretivos. Esta Seção tem como objetivo apresentar técnicas e conceitos utilizados para a implementação da técnica computacionalmente. Um dos principais procedimentos é o redirecionamento da sobrecarga para obtenção dos nós de chaveamento de 1ª ordem

e para aplicação da função de alívio. De acordo com Müller (1981), nós de chaveamento são aqueles para onde flui uma parcela substancial da sobrecarga redirecionada. Os nós de chaveamento de 1ª ordem são os nós para onde flui no mínimo 90% dessa sobrecarga redirecionada. Uma forma de realizar esse redirecionamento é através do equacionamento apresentado na Seção II. Além disso, também é realizada uma codificação de variantes de chaveamento. Por fim, para classificar as variantes promissoras que serão testadas através do cálculo exato de fluxo de carga, utiliza-se a função de alívio apresentada na Seção IV.

3.1 Codificação de variantes

Variantes de chaveamento são as diferentes topologias da rede consideradas na técnica de Chaveamentos Corretivos para eliminação de uma determinada violação do sistema. As variantes consideradas neste trabalho consistem no chaveamento de elementos em uma única subestação do sistema (nó de chaveamento), considerando o arranjo de barramento duplo. A codificação utilizada baseia-se em uma sequência de números, em que cada número indica em qual barra está conectado cada elemento. O número 1 indica os elementos conectados à barra A e o número 2 indica os elementos conectados à barra B. Para a Figura 7, os 4 primeiros dígitos da codificação representam as linhas de transmissão 1-2, 3-2, 4-2 e 5-2, respectivamente. Os 2 últimos dígitos representam geração e carga, respectivamente. Por exemplo, para a subestação com barra dupla da Figura 7, a codificação da variante é a "111222".

4. FUNÇÃO DE ALÍVIO

O cálculo exato do fluxo de carga para sistemas elétricos pode exigir um nível elevado de esforço computacional, devido aos cálculos não lineares envolvidos, que são solucionados a partir de métodos iterativos. Portanto, testar todas as possíveis variantes de chaveamento requer um tempo elevado.

Como o tempo de solução é uma variável importante para eliminação de violações, a Função de Alívio desenvolvida em Koglin e Medeiros Júnior (1985) foi implementada no código para identificar as variantes mais promissoras. O equacionamento da função de alívio F_r é apresentado em (12). Vale ressaltar que cada variante de chaveamento produz diferentes valores para as grandezas apresentadas em (12).

$$F_r = -P_s \cdot \Delta P_{re}^S \cdot \Delta P_{re}^V / \Delta P_{sob}^3 \quad (12)$$

Em (12), tem-se:

- F_r : Função de Alívio;
- P_s : Potência de Chaveamento;
- ΔP_{re}^S : Potência redirecionada que flui pelo nó de chaveamento;
- ΔP_{re}^V : Potência redirecionada que flui pelo disjuntor do nó de chaveamento;
- ΔP_{ov} : Parcela de potência de sobrecarga.

A Figura 4 ilustra o fluxo de potência ativa em um equivalente de um sistema elétrico em que a sobrecarga no ramo A-B será redirecionada através da alteração da topologia

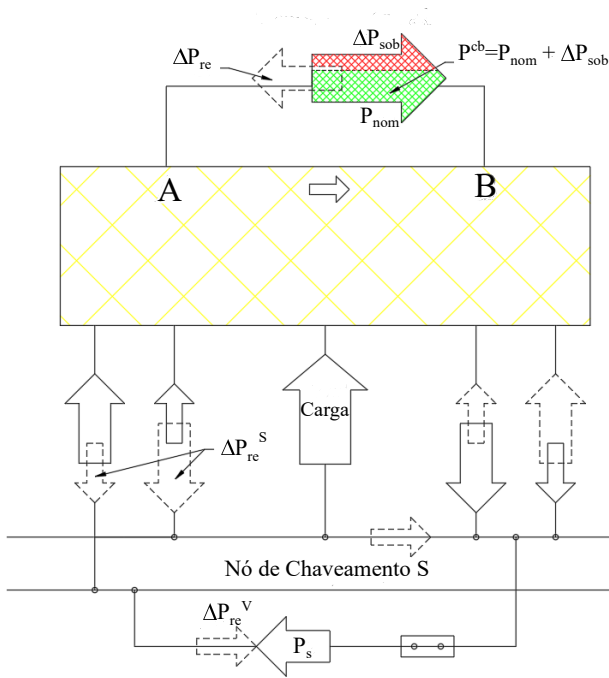


Figura 4. Equivalente de um sistema elétrico para representar as grandezas utilizadas na função de alívio.

do nó de chaveamento S. As setas pontilhadas indicam as grandezas de potência obtidas através do redirecionamento da sobrecarga e as setas contínuas representam as grandezas do caso base.

A partir do valor da função de alívio, estima-se o carregamento final do ramo sobrecarregado, após realização da medida de chaveamento, de acordo com (13).

$$P_{est} = P^{cb} - F_r \cdot \Delta P_{sob} \quad (13)$$

Em (13), tem-se:

- P_{est} : Carregamento estimado do ramo A-B;
- P^{bc} : Carregamento do ramo A-B no caso base.

5. APLICAÇÃO EM TEMPO REAL

O que difere este artigo das demais referências citadas é, além de desenvolver uma nova metodologia linear para redirecionamento de sobrecarga, foram realizadas simulações em tempo real através do RTS. Os resultados dos trabalhos realizados anteriormente eram obtidos através de simulações *offline* através do fluxo de potência. Desenvolveu-se uma rotina capaz de identificar uma sobrecarga na rede e obter uma configuração capaz de eliminar esta sobrecarga sem provocar outras violações ao sistema. A rotina desenvolvida pode ser representada pelos passos abaixo.

- Passo 1:** Identificação da sobrecarga no RTS;
- Passo 2:** Envio do *flag* de sobrecarga e da topologia atual da rede para o Scilab através de um arquivo .csv;
- Passo 3:** Obtenção do caso base através do cálculo exato do fluxo de carga;
- Passo 4:** Redirecionamento da sobrecarga utilizando a linearização apresentada na Seção II;
- Passo 5:** Identificação e classificação das variantes através

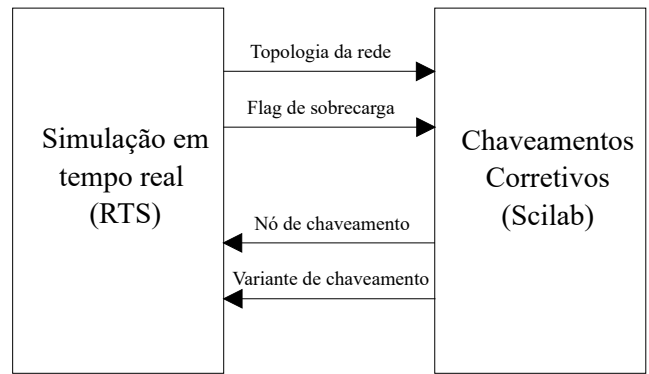


Figura 5. Fluxo de dados entre o Scilab e o RTS.

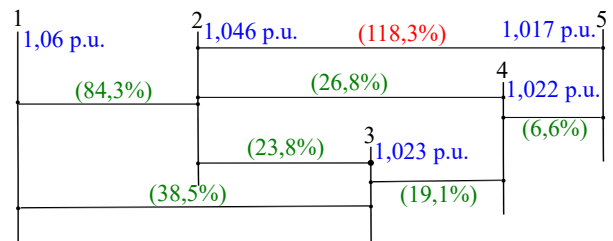


Figura 6. Rede utilizada nas simulações.

da metodologia da Função de Alívio;

Passo 6: Cálculo exato do fluxo de carga para as variantes pré-selecionadas no passo anterior;

Passo 7: Selecionar a primeira variante de chaveamento que elimina a sobrecarga sem causar novas violações na rede;

Passo 8: Envio da topologia da variante selecionada para o RTS via arquivo .csv.

Passo 9: Nova verificação da sobrecarga indicada no Passo 1 e realização das manobras para implementação da variante de chaveamento selecionada de forma automática.

Conforme apresentado no passo a passo, a simulação em tempo real foi realizada no RTS e os cálculos necessários para obter a variante de chaveamento adequada foram realizados em outra plataforma de simulação. Neste trabalho, utilizou-se o Scilab. O uso híbrido de duas plataformas de simulação decorre da incompatibilidade da linguagem do ambiente de simulação do RTS com algumas operações matemáticas necessárias no desenvolvimento da técnica.

Desse modo, desenvolveu-se um script no ambiente de simulação do RTS para interagir com o código implementado no Scilab e intercambiar dados relevantes para a técnica. A Figura 5 apresenta o fluxo de dados entre Scilab e RTS.

6. RESULTADOS

Para realizar o teste da aplicação de variantes em tempo real, foi utilizada uma rede de 5 barras e 7 linhas, conforme apresentada na Figura 6. Para o caso base, a linha 2-5 possui um carregamento de 118,3%.

Para solucionar a violação apresentada na rede teste, foi realizada a alteração da topologia da rede utilizando a técnica de Chaveamentos Corretivos e considerando a metodologia da Função de Alívio proposta em Koglin e Medeiros Júnior (1985). A Tabela I apresenta as principais

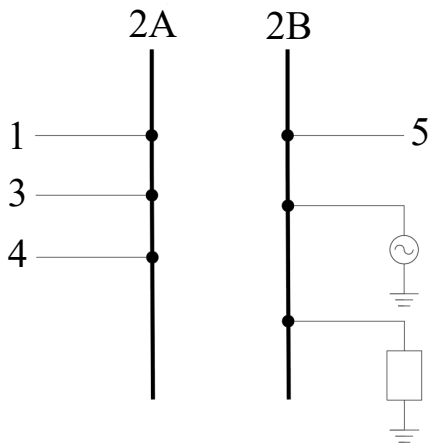


Figura 7. Variante de chaveamento selecionada.

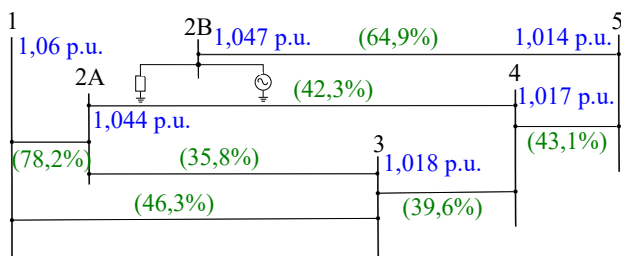


Figura 8. Esquema da rede elétrica completa após aplicação da variante de chaveamento.

características da variante de chaveamento selecionada. É importante destacar que a metodologia da Função de Alívio visa estimar variantes promissoras, não sendo necessária a exatidão da estimativa.

Tabela 1. Características da medida de chaveamento selecionada para eliminação da sobrecarga

| Dados da variante | |
|---------------------------|--------|
| Nó de chaveamento | 2 |
| Codificação | 111222 |
| Carregamento estimado (%) | 44,8 |
| Carregamento exato (%) | 64,9 |
| ΔP_{re}^V (p.u.) | -0,102 |
| P_s (p.u.) | 0,348 |
| ΔP_{sob} (p.u.) | 0,102 |

A variante de chaveamento descrita na Tabela 1 apresenta uma mudança de topologia na rede através da abertura de barras no nó 2 da rede. A Figura 7 representa a mudança de topologia realizada na barra 2, de forma simplificada.

A Figura 8 ilustra o equivalente da rede completa após a aplicação da variante de chaveamento selecionada.

A aplicação da topologia apresentada na Figura 7 em tempo real, resultou na solução da sobrecarga no ramo 2-5, cujo carregamento percentual era de 118,3% no caso base e passou a ser de 64,9% após a medida de chaveamento. A Figura 9 apresenta um gráfico com a mudança de corrente após a realização do chaveamento na barra 2 do sistema.

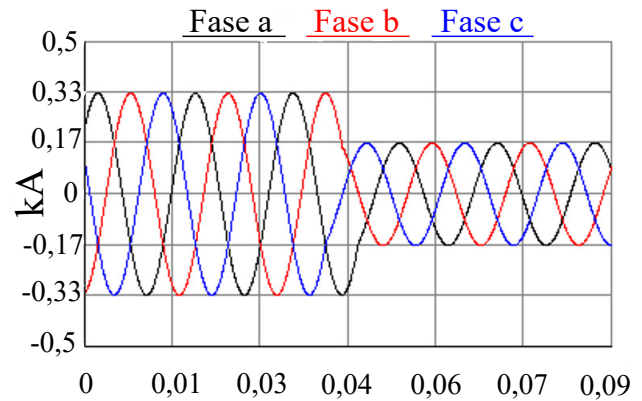


Figura 9. Gráfico da corrente no instante da realização da variante.

7. CONCLUSÃO

Com o objetivo de aplicar a técnica de Chaveamentos Corretivos em sistemas reais, torna-se necessário desenvolver técnicas que diminuam seu esforço computacional e realizar simulações cada vez mais fidedignas com a realidade. Dessa forma, apresentou-se neste artigo um método linear para redirecionamento de sobrecarga em um ramo do sistema sem alteração da matriz Ybarra. O método apresentado se mostrou capaz de selecionar, com menor esforço computacional, uma variante de chaveamento que elimina sobrecargas no sistema.

Também foi apresentada uma simulação da aplicação da técnica de Chaveamentos Corretivos em tempo real através do RTS, em que toda a rotina foi automatizada para implementar a solução em tempo real. O próximo passo é realizar ajustes automáticos no sistema de proteção do sistema após realizar a medida de chaveamento. Isso se deve ao fato de que a mudança de topologia da rede pode exigir uma alteração na parametrização de determinados relés de proteção. Além disso, a execução em tempo real de redes maiores também deve ser considerada em trabalhos futuros.

REFERÊNCIAS

- Fonseca, J.R.L., da Costa Oliveira, A.V., de Almeida, M.A.D., da Silva, J.L., and Medeiros Júnior, M.F. (2018a). A new algorithm for implementing automation process based on self healing technique. In *2018 IEEE PES Transmission Distribution Conference and Exhibition - Latin America (T D-LA)*, 1–5.
- Fonseca, J.R.L., da Silva, J.L., Oliveira, A.V.d.C., Medeiros Júnior, M.F., de Almeida, M.A.D., and Filho, M.C.P. (2018b). Self healing technique applied to an industrial plant using iec 61850. In *2018 13th IEEE International Conference on Industry Applications (INDUSCON)*, 692–697.
- Fonseca, J.R.L., Oliveira, A.V.C., de Almeida, M.A.D., Luiz da Silva, J., and Medeiros Júnior, M.F. (2018c). Self healing feature incorporated to rtds for solving reconfiguration network problem. In *2018 Simposio Brasileiro de Sistemas Elétricos (SBSE)*, 1–6.
- Medeiros Júnior, M.F., Costa Oliveira, A.V., and Costa Oliveira, A.R. (2016). Employment of corrective switching in congestion management for elimina-

- ting multiple overloads in power systems. *IEEE Latin America Transactions*, 14(1), 179–187.
- Müller, H. (1979). Zustandskorrektur von gefährdeten netzen durch abschalten von betriebsmitteln.
- Müller, H. (1981). *Korrektives Schalten: eine Maßnahme zur gezielten Entlastung von Betriebsmitteln in elektrischen Energieversorgungsnetzen*. na.
- Oliveira, A.V.C. (2011). Dedução de funções de alívio para priorização de variantes de chaveamento adequadas à eliminação de sobrecargas. *Tese de Doutorado. UFRN*.
- Oliveira, A.R.C. (2019). Análise de funções de alívio para estimação de carregamentos após chaveamentos corretivos. *Tese de Doutorado. UFRN*.