

Ferramenta de Restauração de Redes de Distribuição com Foco no Operador do Centro de Operação da Distribuição

Carlos E. R. Nogueira
CEMIG-D

Companhia Energética de Minas Gerais
PPGEE

Universidade Federal de Minas Gerais
Belo Horizonte, MG 30332-0250
Email: carlos-nogueira@ufmg.br

Wallace C. Boaventura
DEE

PPGEE

Universidade Federal de Minas Gerais
Belo Horizonte, MG 30332-0250
Email: wventura@cpdee.ufmg.br

Eduardo G. Carrano
DEE

PPGEE

Universidade Federal de Minas Gerais
Belo Horizonte, MG 30332-0250
Email: egcarrano@ufmg.br

Resumo—A restauração de sistemas de distribuição de energia elétrica tem papel crucial no ambiente das concessionárias, tendo em vista as metas estabelecidas pelos órgãos de regulação e a pressão sofrida pelos operadores. Neste artigo é proposta uma nova estratégia de restauração de sistemas de distribuição que tem como principal característica lidar com o problema da forma com que ele é enfrentado pelo operador, sem simplificações como a maioria dos trabalhos da literatura. Nesta proposta, um algoritmo genético, baseado no SPEA2, foi utilizado com o objetivo de restabelecer, em tempo real, as cargas que não dependem do conhecimento *à priori* da localização da falha. Para validar a metodologia proposta foram testados 2 sistemas. Os sistemas teste, com 31 barras e 19 equipamentos e 93 barras e 61 equipamentos, foram submetidos a situações de falhas simples e múltiplas. Os resultados obtidos foram os esperados, sendo alcançados com tempo computacional muito baixo, da ordem de 3 segundos, atendendo todas as necessidades operativas.

Index Terms—Restauração. Autorrecuperação. Redes Elétricas Inteligentes. Otimização. Algoritmos Genéticos.

I. INTRODUÇÃO

Nos últimos anos as concessionárias de energia elétrica vêm investindo na automação de suas redes de distribuição de energia elétrica - RDEE. Um número cada vez maior de equipamentos telecomandados tem sido utilizado nas redes de distribuição, permitindo assim o restabelecimento de consumidores atingidos por desligamentos acidentais, emergenciais ou programados, em tempo reduzido, atendendo às recomendações da Agência Nacional de Energia Elétrica – ANEEL [1].

O reestabelecimento de energia em tempo real é realizado por meio de procedimentos de restauração que têm como principal objetivo viabilizar, em tempo reduzido, uma configuração factível da RDEE em situações de contingência [6]. Devido ao número cada vez maior de equipamentos de manobra, o número de possibilidades de reconfiguração pode ser elevado, dificultando a tomada de decisão por parte do operador do sistema. Este deve atender de forma aceitável o maior número de consumidores e/ou as cargas mais importantes, reestabelecendo o funcionamento do sistema da melhor forma e no menor tempo possíveis. Além disso, os requisitos e

restrições do sistema devem ser atendidos de forma que a nova configuração possa ser implementada com segurança.

Assim, com a contínua expansão do sistema elétrico e a evolução dos sistemas de automação e telecomunicações, cada vez mais os operadores das salas de controle dos centros de operação da distribuição têm sido exigidos no tocante à tomada de decisão em tempo real, em situações de contingência.

Neste contexto, faz-se necessária a utilização de ferramentas que possam auxiliar os técnicos das salas de controle na transferência imediata de blocos consumidores via equipamentos telecomandados. Tal ação deve ser rápida, a fim de melhor atender aos critérios estabelecidos nos Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional – PRODIST, Módulo 8 – Qualidade da Energia Elétrica [1]. Além disso, as restrições técnicas do problema devem ser atendidas, a fim de garantir a qualidade do produto oferecido aos clientes.

Os algoritmos evolucionários (AEs) são técnicas de otimização capazes de lidar com este tipo de problema, mesmo em redes de grande dimensão [3]. Desde que adequadamente construídos, estes são capazes de lidar com problemas combinatórios, altamente restritos e não lineares de forma eficiente, levando a boas soluções em curtos espaços de tempo.

Este trabalho tem por objetivo propor um algoritmo capaz de auxiliar no processo de restabelecimento de energia das RDEE submetidas à falhas em um ou mais pontos do sistema, por meio da operação automática de dispositivos telecomandados. A técnica utilizada é baseada em uma otimização mono-objetivo, buscando-se minimizar o número de cargas desconectadas e respeitando-se as restrições do sistema, como limite de tensão e capacidade de corrente nos cabos. Outros objetivos usuais da literatura, como o número de manobras realizadas ou o tempo de execução das manobras, não são relevantes no contexto deste trabalho, uma vez que todas as manobras serão realizadas em equipamentos telecomandados. A implementação da ferramenta proposta tem papel importante no cotidiano das concessionárias, tendo como objetivos auxiliar os operadores dos centros de operação da distribuição e melhorar os índices de continuidade

e qualidade da energia, por meio de um restabelecimento mais ágil e confiável.

A integração do sistema proposto com o sistema SCADA (do inglês, Supervisory Control and Data Acquisition) irá permitir a restauração do sistema em tempo real e de forma automática, buscando a melhor configuração num dado momento/hora do dia, melhorando o perfil de tensão e a distribuição de cargas das RDEE, por exemplo. Tal ação aproximaria as RDEE do conceito de Smart Grids, melhorando a qualidade da energia elétrica distribuída.

II. APRESENTAÇÃO DO PROBLEMA

A alteração da configuração das redes de distribuição em regime normal de operação usualmente tem como objetivo a redução de perdas [2] e é conhecida na literatura como reconfiguração. Já o procedimento de execução emergencial de manobras de chaveamento, necessárias quando o sistema é afetado por alguma falta que gera desligamento total ou parcial de cargas, é referenciado na literatura como restauração de redes e deve atender aos seguintes requisitos [10]:

- Restaurar a maior quantidade de cargas possível, considerando simultaneamente clientes prioritários;
- Não violar restrições operacionais;
- Delinear uma sequência possível de operações para alcançar a configuração final;
- Garantir o balanceamento de cargas;
- Ser executada em um curto espaço de tempo;
- Manter a estrutura de rede radial (este requisito tem como objetivo facilitar a localização de falhas, isolamento e coordenação dos dispositivos de proteção);

A implementação do restabelecimento de energia em um sistema de distribuição é um problema de otimização combinatória complexo, devido ao grande número de equipamentos envolvidos e às características do sistema de distribuição. Este problema pode levar a um longo tempo de processamento do algoritmo de otimização para se chegar a um plano de restauração viável, que satisfaça todas as restrições requeridas.

Na prática, os técnicos das salas de controle utilizam de sua experiência e de planos de contingências pré-elaborados como auxílio para a restauração do sistema. Isso, na maioria das vezes, leva a tempos elevados de restabelecimento, implicando no pagamento de compensações financeiras por parte das concessionárias. Por esse motivo, este tema tem recebido maior atenção por parte dos pesquisadores nos últimos anos.

Os sistemas de distribuição das concessionárias de energia utilizam proteção coordenada. Assim, a ocorrência de um defeito na rede implica na operação da proteção a montante mais próxima ao local da falha. Já os algoritmos presentes na literatura consideram o setor (ou setores) onde ocorreu a falha como sendo conhecido. Os técnicos de operação dependem de informações vindas de consumidores (ligações para a central de atendimento) ou do envio de equipes à campo para identificar o local preciso da falha. Logo, o conhecimento do ponto de falha não é uma premissa válida sob o ponto de vista prático. No algoritmo proposto, os setores em falta são determinados por meio da identificação dos equipamentos operados, informação

obtida do SCADA em tempo real. Com a informação do bloqueio de um dispositivo de proteção obtida em tempo real, as manobras de restauração podem ser efetuadas imediatamente após a ocorrência de um desligamento acidental, reduzindo de forma quase instantânea a região afetada e, conseqüentemente, o pagamento de multas por parte da concessionária.

Vale destacar que esse procedimento não restringe a área desligada ao menor número de setores possível, uma vez que devem ser consideradas como “em falta” todas as seções entre o dispositivo de proteção operado e os outros dispositivos de proteção a justante deste. No entanto, dadas as informações disponíveis logo após a ocorrência da falta, esta é a menor área que pode ser especificada como a que, garantidamente, contém a falta. Além disso, uma vez que esta esteja melhor identificada, é possível transferir os demais setores desligados em um segundo passo da restauração.

A. Formulação Matemática

O problema de restauração do sistema de distribuição de energia elétrica proposto foi modelado como um problema de otimização mono-objetivo, cuja função objetivo minimiza a porcentagem de cargas não restauradas – Equação (1).

$$\min \left\{ \sum \frac{Nu}{Nl} \times 100\% \right\} \quad (1)$$

Sujeito às seguintes restrições:

- limite máximo de corrente nos elementos do sistema (cabos, chaves, reguladores de tensão, dentre outros):

$$I_i \leq I_{imax} \cdot \left(1 + \frac{Fsobrecarga}{100} \right) \quad (2)$$

- limite de ajuste de proteção:

$$I_i \leq I_{Protj} \quad (3)$$

- faixa de tensão admissível nas redes de distribuição:

$$V_{jmin} \leq V_j \leq V_{jmax} \quad (4)$$

- radialidade.

onde:

Nu : número de cargas não religadas;

Nl : número total de cargas desligadas devido a contingência;

$Fsobrecarga$: fator de sobrecarga permitido (em %);

I_i = corrente no ramo i ;

I_{Protj} : corrente de atuação do dispositivo de proteção j ;

I_{imax} : corrente máxima admissível no ramo i ;

V_j : módulo da tensão no nó j ;

V_{jmin} : módulo da tensão mínima aceitável no nó j ;

V_{jmax} : módulo da tensão máxima aceitável no nó j .

A porcentagem de cargas não restauradas se refere somente aos blocos onde não ocorreram falhas. Dessa forma, é possível alcançar 100% de cargas restauradas. No entanto, essa taxa nem sempre é possível, pois podem não haver rotas entre a parte ativa do sistema e uma carga potencialmente restaurável ou ainda devido à alguma restrição do sistema.

III. REVISÃO DE LITERATURA

O estado da arte dos métodos usados para tratar a restauração de sistemas de distribuição incluem técnicas heurísticas, métodos de enumeração implícita e meta-heurísticas/inteligência computacional.

Os métodos heurísticos são aqueles construídos com base nas características específicas do problema em questão. Estes são comumente mono-objetivo, e o objetivo é sempre minimizado de forma heurística, o que, quase sempre, leva a ótimos locais. No entanto estes métodos também se caracterizam por geralmente apresentar baixa complexidade de execução. Exemplos de abordagens que utilizam tais métodos podem ser encontrados em [4], [7].

Nos métodos de enumeração implícita, o problema de restauração é modelado como um problema de programação inteira, que é resolvido por algum método exato, como programação dinâmica, *branch-and-bound*, planos de corte, etc. Estes métodos garantem a obtenção da solução ótima, mas podem gastar um tempo proibitivo para gerá-la, pois possuem complexidade computacional de pior caso exponencial ou fatorial. Alguns exemplos de trabalhos que empregam esta classe de métodos podem ser vistos em [5], [8].

Por fim, por serem mais eficazes que os métodos heurísticos e com flexibilidade suficiente para solucionar problemas com funções objetivo e restrições, os métodos meta-heurísticos têm sido uma tendência recente no tratamento de problemas de restauração. Outra vantagem é a possibilidade de controle do tempo de execução, encontrando soluções adequadas em tempo suficientemente curto. Exemplos de abordagens dentro desta classe podem ser vistos em [3], [9].

Todos os trabalhos acima citados, além de vários outros da literatura, compartilham de uma mesma deficiência: eles iniciam o processo de restauração a partir da localização exata das faltas. Como já foi dito anteriormente, este tipo de abordagem é ineficiente nos dias de hoje, uma vez esta localização pode demandar um longo tempo, tempo esse em que já poderiam ter sido realizadas transferências de carga por meio de equipamentos telecomandados. O algoritmo proposto aqui tem como objetivo viabilizar a transferência imediata de cargas que não dependem do conhecimento à priori do local da falha, por meio da utilização de equipamentos TLC. Esta ferramenta se enquadra perfeitamente no paradigma de auto-restauração (ou *self-healing*), que vem sendo difundido como um dos pontos chaves das *Smart Grids*.

Por ser uma referência recente e ter obtido bons resultados em aplicações reais de grande porte, o algoritmo proposto em [3] foi utilizado como algoritmo de otimização base na ferramenta proposta neste trabalho.

IV. ALGORITMO PROPOSTO

O algoritmo proposto é baseado em [3], e apresenta uma nova metodologia de processamento da falha, utilizando como informação para determinação dos setores em falta dados obtidos do sistema SCADA em tempo real. Inicialmente, o sistema completo, obtido da base de dados da concessionária, é processado, obtendo-se a topologia completa do sistema.

Após o processamento, são efetuadas reduções. O processo de redução tem por objetivo remover informações que não serão consideradas pelo algoritmo de otimização, etapa final do processo, tais como linhas não manobráveis e equipamentos sem telecomando (TLC). Isso reduz o espaço de busca do problema, o que proporciona um processamento mais rápido do algoritmo, permitindo a obtenção de respostas de forma rápida mesmo em sistemas de grande porte.

O fluxo do algoritmo proposto é apresentado na Figura 1.

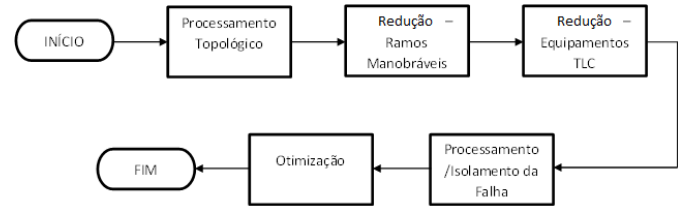


Figura 1: Fluxograma da arquitetura proposta.

A. Sistema Completo

Um sistema de distribuição completo é composto por barramentos interligados por linhas (ramos) manobráveis e linhas não manobráveis. Linhas manobráveis são equipamentos que interligam barramentos, como chaves e religadores. Um conjunto de barramentos pode ser denominado setor de carga. Um exemplo de sistema de distribuição é mostrado na Figura 2. Este sistema apresenta uma subestação que possui 3 alimentadores (Linha de Distribuição - LD). Os retângulos representam as fontes destes alimentadores, enquanto os círculos representam os barramentos. Linhas tracejadas são ramos não manobráveis e linhas cheias são ramos manobráveis N.F. Os ramos manobráveis N.A. são representados por linhas cheias interrompidas.

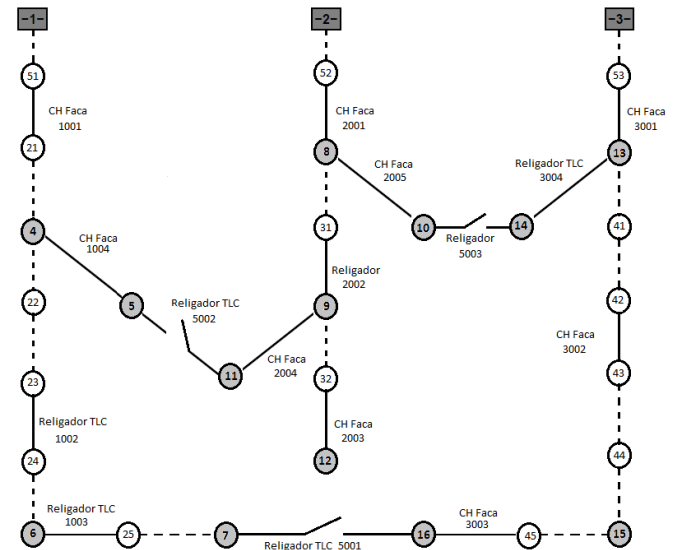


Figura 2: Sistema Completo.

B. Sistema Equivalente - Considerando Ramos Manobráveis

Para reduzir o sistema, com o objetivo de retirar informações desnecessárias ao problema de restauração, os barramentos interligados por linhas não manobráveis são agrupados, formando setores de carga. Desta forma, o sistema equivalente obtido é composto por setores de carga interligados por equipamentos (Figura 3).

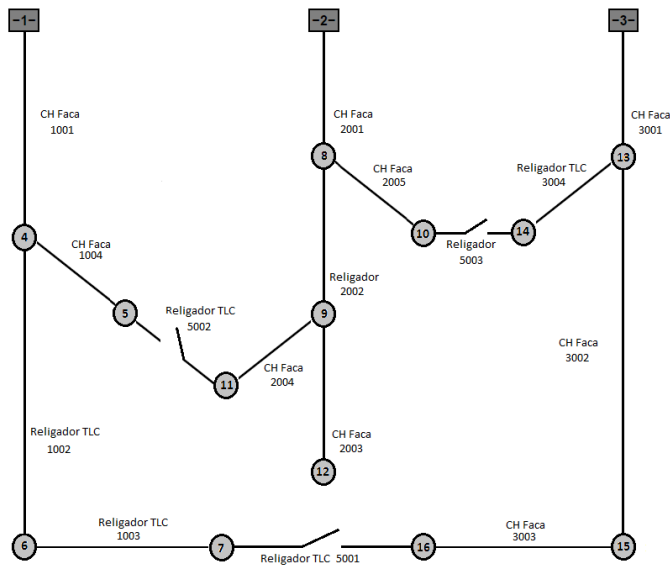


Figura 3: Sistema Equivalente - 16 Barras - Ramos Manobráveis.

C. Sistema Equivalente - Considerando Equipamentos TLC

Como os equipamentos podem ser de operação local ou por TLC, uma nova redução é efetuada. Nessa nova representação, os equipamentos sem TLC são agrupados, formando novos setores de carga. Nesse novo sistema reduzido, um bloco é a unidade mínima do problema de restauração, não sendo possível desconectar ou reconectar partes deste bloco remotamente. Todavia, mediante envio de equipes à campo, um bloco poderá ser dividido, desde que possua chaves manuais em seu interior. A figura 4 apresenta o sistema completo após redução.

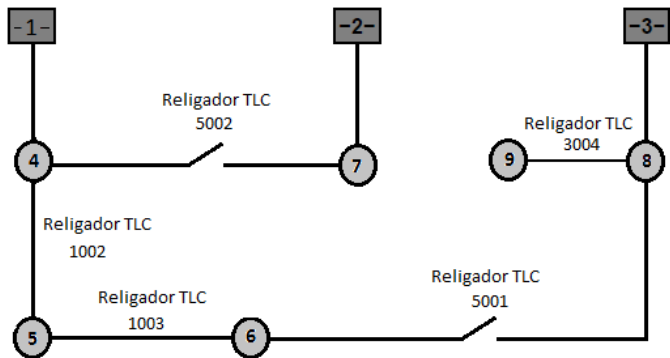


Figura 4: Sistema Equivalente - Apenas Equipamentos TLC.

Na configuração original, o sistema é composto por 31 barras e 31 linhas. Após a primeira redução, o sistema passa a ser

composto por 16 barras e 16 linhas. Finalmente, após a segunda redução, o sistema é simplificado à 9 barras e 8 linhas.

Como as linhas são os equipamentos que podem ser manobrados e, sabendo-se que estes podem assumir os estados aberto ou fechado, o número de combinações possíveis é drasticamente reduzido. Um limitante superior para este número pode ser calculado por 2^N , onde N é o número de equipamentos. Desta forma, para o sistema completo, são possíveis 524.288 (2^{19}) combinações, enquanto que para o sistema reduzido TLC o número de combinações é reduzido para 256 (2^8). Com um número menor de combinações, os algoritmos de otimização tornam-se mais rápidos. Isso é fundamental para a restauração, uma vez que essa depende fortemente de velocidade de execução para minimizar o tempo em que os clientes são afetados.

D. Processamento/Isolamento da Falha

Na ocorrência de uma falha, o dispositivo de proteção imediatamente a montante do bloco atingido irá operar, a fim de proteger o sistema, equipes de operação e manutenção e terceiros. Uma vez que os sistemas de distribuição são radiais, a interrupção no fornecimento de energia não se dará apenas para o bloco que falhou, mas também para todos os blocos à jusante do dispositivo de proteção operado. O bloco em falha somente poderá ser restabelecido após correção da falha. Contudo, alguns blocos desligados, que não apresentam falha, poderão ser restabelecidos antes da correção. Consideremos, como exemplo, o bloqueio do alimentador 1, Figura 2. O sistema SCADA irá sinalizar para o operador a atuação da proteção do alimentador 1, em tempo real. Com a abertura do dispositivo de proteção, ocorrerá o desligamento dos blocos de carga 4, 5, 6 e 7, bem como dos blocos 51, 21, 22, 23, 24 e 25. Estando a proteção devidamente coordenada, é conveniente afirmar que o setor com defeito está à montante do religador TLC 1002, sendo possível restabelecer os blocos 6, 7, 24 e 25 por meio da abertura do religador TLC 1002 e posterior fechamento do religador TLC 5001. Este procedimento, além de reduzir o tempo de desligamento para o conjunto de cargas ligadas nos barramentos restabelecidos, reduz o valor a ser pago a título de compensações financeiras, uma vez que, conforme a legislação vigente [1], os blocos desligados por menos de 3 minutos não geram multas. Em seguida, equipes de operação deverão ser enviadas a campo para inspeção e correção da falha, que, dependendo do local em que ocorreu, permitirá novas manobras de transferência de carga, antes de sua correção. Importante ressaltar que, para efetuar o restabelecimento dos setores de carga após o religador TLC 1002, o local exato da falha não precisa ser conhecido a priori, situação a qual técnicos e engenheiros de operação do sistema lidam diariamente. O método utilizado para processamento e isolamento da falha, determinando os setores que podem conter o local do defeito, no instante em que ocorre o bloqueio de um equipamento de proteção, constitui uma inovação, como forma de disparar os algoritmos de recuperação.

E. Otimização

Para lidar com o problema da restauração foi utilizado um algoritmo genético mono-objetivo baseado em [3]. Na referência, os autores utilizaram o algoritmo genético Strength Pareto Evolutionary Algorithm 2 (SPEA2) para formular um problema de otimização multi-objetivo, considerando o total de cargas restauradas e o tempo necessário para restaurá-las como critérios de projeto. Um novo esquema de codificação foi proposto, separando as chaves do sistema em grupos, de acordo com a função que exercem em relação à falta. Esses grupos foram usados para criar sub permutações, cuja união compõe uma solução candidata para o problema proposto. Os operadores de cruzamento, mutação e busca local empregados também exploram o mecanismo de sub permutações de forma eficiente. As estratégias propostas proporcionaram uma redução massiva do espaço de busca do algoritmo, tornando o processo de solução muito mais eficiente. Mais detalhes sobre esta ferramenta podem ser vistos em [3].

Algumas adaptações foram efetuadas a fim de tornar o algoritmo aplicável à situação proposta. Por considerar apenas equipamentos TLC, o tempo de manobra foi considerado nulo. Desta forma, o problema multi-objetivo foi automaticamente reduzido a um problema mono-objetivo, sem qualquer necessidade de alteração no processo de seleção. O algoritmo de otimização proposto em [3], bem como os demais trabalhos encontrados na literatura, tratam o problema de otimização a partir do conhecimento prévio do local onde ocorreu a falha. O algoritmo proposto neste trabalho utiliza as ferramentas discutidas ao longo dessa seção de forma a eliminar as chaves manuais para compor o cenário de falta unicamente com as informações em tempo real disponíveis no SCADA. Isso afeta o cenário de entrada do algoritmo de otimização e permite sua aplicação em uma situação que é condizente com a enfrentada pela equipe de operação nos Centros de Operação da Distribuição (CODs). Logo, com estas modificações, o algoritmo proposto em [3] se torna apto a lidar com situações mais realistas, em um cenário de auto-restauração.

V. RESULTADOS

Para validação da metodologia proposta, dois cenários de falta foram testados, considerando atuação de um único e de múltiplos dispositivos de proteção. Esses cenários são discutidos a seguir. Deve-se ressaltar que todas as simulações foram realizadas em um PC com processador Intel(R) Core(TM) i7-3630QM CPU @ 2.40GHz, memória 6,00 GB, utilizando Windows 10 Home Single Language e Matlab R2012a.

A. Caso I - Atuação de um único dispositivo de proteção

No primeiro caso, foi considerada uma falta que forçou a atuação da proteção na saída do alimentador 1 para o sistema de 31 barras, 31 linhas e 19 equipamentos da Figura 2. Na prática, este tipo de falta é denominado bloqueio da LD, sendo muito comum na operação do sistema. Com o bloqueio do alimentador 1, todas as cargas desta LD têm o fornecimento interrompido. Como as proteções são coordenadas, o defeito estará localizado entre a proteção operada e o religador 1002.

O algoritmo indicou a abertura do religador TLC 1002 e o fechamento do religador TLC 5001, nessa ordem, restabelecendo 100% das cargas. Essa situação é melhor visualizada na Figura 4, com o sistema reduzido. Essa resposta se repetiu ao longo de 10 execuções, com critério de parada igual a 3 segundos.

Apesar de ser uma falta simples, há mais de uma opção de transferência. A análise da melhor opção de transferência de carga por um operador pode demorar além do tempo desejável de 3 minutos. A utilização do algoritmo proposto irá proporcionar a escolha da melhor opção de restabelecimento factível, respeitando as restrições estabelecidas, com processamento em tempo reduzido, e, se integrada ao sistema SCADA, efetuada de forma automática.

B. Caso II - Atuação de múltiplos dispositivos de proteção

No segundo caso, o sistema caso I foi triplicado, simulando 3 subestações distintas, com 3 alimentadores cada. Foram acrescentadas chaves de interligação entre os alimentadores destas subestações. Para melhorar a visualização, a Figura 5 apresenta o sistema equivalente, reduzido para apenas equipamentos com TLC. Contudo, vale ressaltar que o sistema completo é formado por 93 barras, 97 linhas e 61 equipamentos. Foi simulada a operação dos alimentadores 1 e 3 da subestação 1 e do religador TLC 102 (alimentador 1 da subestação 2).

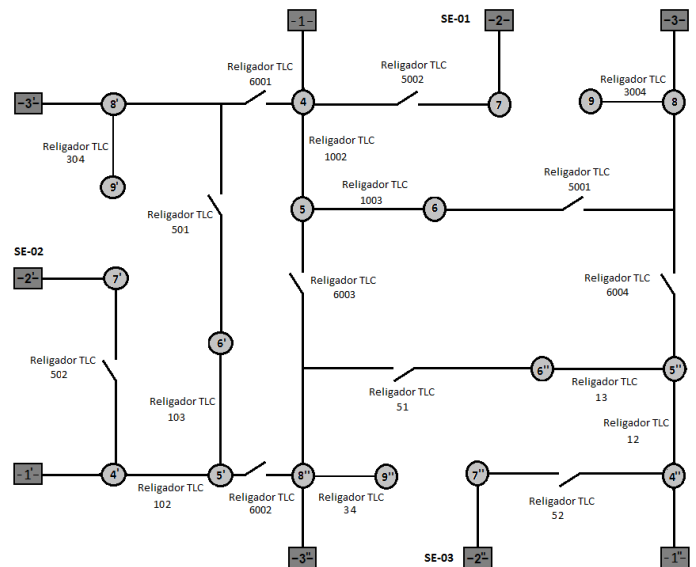


Figura 5: Sistema Equivalente - 3 Subestações

Como resposta a essa simulação, repetida após 10 execuções do algoritmo, foi obtida a seguinte sequência de manobras:

- 1) Abrir religador TLC 1002
- 2) Fechar religador TLC 6003
- 3) Abrir religador TLC 103
- 4) Fechar religador TLC 501

As etapas 1 e 2 referem-se a transferência de cargas do alimentador 1 da SE-01 para o alimentador 3 da SE-03, passíveis de transferência. Nas etapas 3 e 4, de forma análoga, é

feita a transferência de cargas do religador TLC 102 para o alimentador 3 da SE-03. Deve ser notado que não há manobra referente ao alimentador 3 da SE-01. Este alimentador não possui proteção a jusante, não sendo possível a transferência de cargas para estas situações. Apesar de não ser possível a recuperação de cargas do alimentador 3 da SE-01, todas as cargas passíveis de recuperação foram restabelecidas. Assim como no caso anterior, o critério de parada foi de 3 segundos de execução.

VI. CONCLUSÃO

A exigência do cumprimento de metas de indicadores de continuidade, pelo lado da concessionária, e a pressão a que são expostos os técnicos dos COD, em situação de contingência, demandam o desenvolvimento de ferramentas que possam auxiliar a tomada de decisão em tempo reduzido.

Foi apresentada uma nova metodologia para a restauração do sistema em tempo real. A partir do uso de equipamentos telecomandados e sem a necessidade de indicação do local da falha, o algoritmo indica qual a melhor opção para transferência de cargas, respeitando a função objetivo e as restrições definidas. Foram utilizados 2 sistemas teste para validação da ferramenta proposta. No caso I o sistema com 3 alimentadores, 31 barras e 19 equipamentos, foi submetido à operação de um único equipamento. Simulações da operação de múltiplos equipamentos foram efetuadas no sistema teste de 93 barras e 61 equipamentos no caso II. Apesar de todos os dispositivos utilizados nos sistemas teste serem religadores, o algoritmo foi desenvolvido para qualquer tipo de equipamento, como chaves SF6, seccionalizadores, entre outros.

Em todos os testes, o algoritmo gerou as soluções esperadas no tempo de 3 segundos e repetiu os resultados ao longo de 10 execuções. Os resultados obtidos comprovaram a eficiência da estratégia aqui apresentada.

Para trabalhos futuros é proposta a validação para sistemas reais de grande porte.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem às agências ANEEL, CAPES, CNPq e FAPEMIG e a concessionária de distribuição CEMIG-D pelo apoio financeiro.

REFERÊNCIAS

- [1] ANEEL. (2015, janeiro) Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional – PRODIST: módulo 8 – qualidade da energia elétrica. Brasília. Acesso em 14 de setembro de 2015. [Online]. Available: <http://www.aneel.gov.br/area.cfm?idArea=82>
- [2] C. H. N. R. Barbosa, “Reconfiguração e Restauração Ótima de Sistemas de Distribuição Primária de Energia Elétrica,” Ph.D. dissertation, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, dezembro 2012.
- [3] E. G. Carrano, G. P. S. Ribeiro, E. P. Cardoso, and R. H. C. Takahashi, “Sub-permutation Based Evolutionary Multiobjective Algorithm for Load Restoration in

Power Distribution Networks,” *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, 2015.

- [4] S. Dimitrijevic and N. Rajakovic, “An innovative approach for solving the restoration problem in distribution networks,” *Electric Power Systems Research*, vol. 81, pp. 1961 – 1972, 2011.
- [5] H. Hijazi and S. Thiébaux, “Optimal distribution systems reconfiguration for radial and meshed grids,” *Electrical Power and Energy Systems*, no. 72, pp. 136 – 143, 2015.
- [6] L. Lindgren, “Automatic Power System Restoration - Application of a Search Algorithm,” Ph.D. dissertation, Lund University, SWEDEN, 2009.
- [7] J. Mantovani, F. Casari, and R. A. Romero, “Reconfiguração de sistemas de distribuição radiais utilizando o critério de queda de tensão,” *Controle and Automação*, pp. 150 – 159, 2000.
- [8] R. Pérez-Guerrero, G. T. Heydt, N. J. Jack, B. K. Keel, and A. R. C. Jr., “Optimal restoration of distribution systems using dynamic programming,” *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 23, no. 3, pp. 1589 – 1596, 2008.
- [9] D. S. Sanches, J. B. A. L. Junior, and A. C. B. Delbem, “Multi-objective evolutionary algorithm for single and multiple fault service restoration in large-scale distribution systems,” *Electric Power Systems Research*, no. 110, pp. 144 – 153, 2014.
- [10] T. D. Sudhakar, “Power Restoration in Distribution Network Using MST Algorithms, New Frontiers in Graph Theory,” 2012.