DOI: 10.48011/asba.v2i1.1352

Restabelecimento de Serviço: uma Revisão Crítica Quanto a Aplicação em Sistemas de Distribuição Brasileiros

Amanda M. da Silva* Ana Paula G. Marchesan* Milena T. Zonin*, Adriano C. Marchesan Klaus T. Martin** Adriano P. de Morais*****

** Electrical Engineering Undergraduated, Federal University of Santa Maria, Santa Maria, RS, Brazil (e-mails: amanda_moura.s@outlook.com, anagmarchesan@gmail.com, milenatrentinz@gmail.com).*
*** Federal Institute of Education, Science and Technology Farroupilha, Jaguari, RS, Brazil (e-mails: adriano.marchesan@iffarroupilha.edu.br, klaus.martin@iffarroupilha.edu.br).*
**** Industrial Technical College, Federal University of Santa Maria, Santa Maria, Brazil, (e-mail: adriano@ctism.ufsm.br)*

Abstract: This paper aims to present a critical literature review related to the topic of Service Restoration, evaluating the application of the proposed methodology in Brazilian Distribution Systems. In this work, is emphasized the relevance of the subject, the Service Restoration Problem is described and the critical aspects are presented according to the following topics: network automation level, operation times, protection systems, distributed generation penetration, and test systems. In the end, some suggestions for future works are granted.

Resumo: Este trabalho apresenta uma revisão crítica da literatura referente ao tema de restabelecimento de serviço, analisando a aplicabilidade das metodologias propostas em sistemas de distribuição brasileiros. O artigo destaca a relevância do tema, descreve o problema de reestabelecimento e apresenta a crítica com base nos seguintes tópicos: nível de automação da rede, tempos de atuação e reparo, sistemas de proteção, inserção de geração distribuída e sistemas teste. Por fim, são apresentadas algumas sugestões para trabalhos futuros.

Keywords: Service Restoration; Distribution Systems; Brazilian Distribution Networks; Smart Grids.

Palavras-chaves: Restabelecimento de Serviço; Sistemas de Distribuição; Redes de Brasileiras de Distribuição; Redes Elétricas Inteligentes.

1. INTRODUÇÃO

O estudo acerca de reestabelecimento do serviço tem como foco buscar soluções para reestabelecer a energia elétrica de um sistema em uma situação de falta, enquanto é realizado o reparo necessário na rede. Isso se torna extremamente importante uma vez que a falta de energia pode afetar diversas esferas da sociedade, desde hospitais até empresas com grandes linhas de produção.

Além disso, o uso de geradores próprios para suprir um longo período de falta se torna economicamente muito custoso. Ademais, estratégias eficazes de reestabelecimento do serviço são de extrema relevância para o desenvolvimento de Redes Elétricas Inteligentes (*Smart Grids*).

Nesse âmbito, existem alguns trabalhos que, através de uma revisão bibliográfica do assunto, buscam apresentar o estado da arte, bem como apontar lacunas em alguns aspectos do problema de restabelecimento. Nesse sentido, há uma longa revisão bibliográfica cobrindo as décadas de 1980 e 1990 (Lindenmeyer, Dommel e Adibi, 2001), retratando o estado em que se encontrava a pesquisa, o desenvolvimento e as aplicações no restabelecimento dos sistemas de distribuição na época. Dentre os tópicos abordados, estavam: as características do sistema de potência, as estratégias de chaveamento, os sistemas de proteção e controle, as tecnologias existentes e o treinamento de operadores.

Já em (Zidan *et al.*, 2017), o problema de restabelecimento é abordado com ênfase na confiabilidade do sistema e no *self-healing*, o considerando como uma inevitável tendência futura. Ademais, o artigo analisa os desafios técnicos associados como: a detecção da falta, a isolação e o restabelecimento de serviço (FDIR) nos sistemas de distribuição. Por fim, em (Abu-Elanien, Salama e Shaban, 2018) são abordados aspectos de conexão da rede, garantia de confiabilidade, nível de automatização e representação do sistema. Além disso, este trabalho agrupa funções objetivos e restrições mais comuns, além de realizar uma comparação entre metodologias para a resolução computacional do problema.

O presente trabalho tem como proposta fazer uma análise dos principais trabalhos na temática de reestabelecimento de serviço, trazendo o foco para a aplicação em redes brasileiras com suas particularidades. Cabe ressaltar que o artigo não se

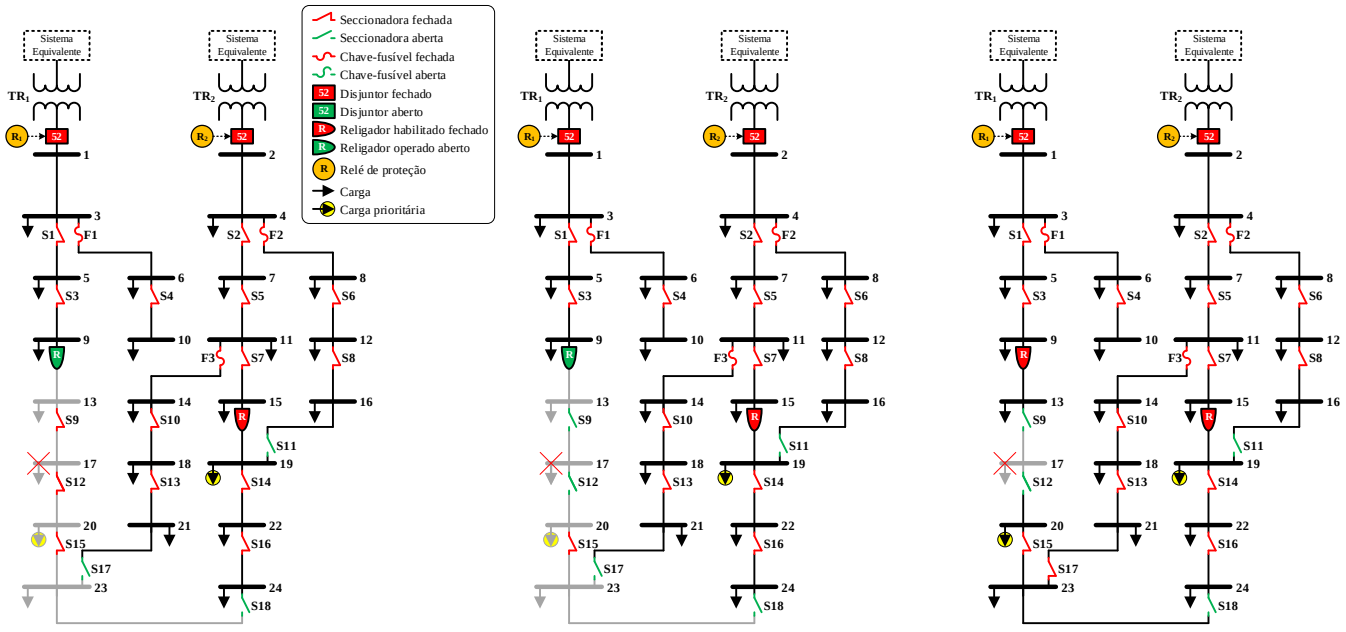

Figura 1 Principais eventos correlacionados a restabelecimento do serviço: (a) ocorrência da falha e atuação da proteção, (b) isolação do trecho em falha, (c) restabelecimento do atendimento em áreas não afetadas.

deterá a análise dos diferentes métodos computacionais de solução propostos na literatura, mas sim sobre as considerações acerca da modelagem do problema, visando sua aplicação em sistemas brasileiros. Além disso, não são contemplados no escopo desta análise trabalhos relacionados a reconfiguração de rede em etapa de planejamento, visto que as premissas sobre a modelagem e os objetivos desse estudo são diferentes.

O artigo está estruturado da seguinte maneira: no capítulo 2 é apresentado o problema de restabelecimento de serviço, no capítulo 3 são descritos os aspectos particulares do sistema brasileiro de distribuição. No capítulo 4 é realizada a revisão crítica dos trabalhos analisados e, por fim, no capítulo 5, conclui-se com a apresentação das lacunas encontradas na literatura e sugestões para trabalhos futuros.

2. O PROBLEMA DE RESTABELECIMENTO DE SERVIÇO

Para caracterização do problema abordado, são apresentados nesta seção os principais eventos correlacionados a restabelecimento de serviço em sistemas de distribuição. A Figura 1 destaca algumas dessas etapas para ilustrar a exemplificação descrita a seguir. Neste sistema, os barramentos representam agregados de rede, com suas cargas, situados entre dois dispositivos de manobra ou proteção.

2.1 Detecção e localização da falta

O problema tem seu início com a instauração de uma falta permanente no sistema e a consequente atuação da proteção. Na Figura 1(a) isso é ilustrado pela falta na barra 17 e a operação do religador a montante, evento que acarreta a interrupção do fornecimento de energia também nos setores de número 13, 20 e 23.

Nesta etapa, a correta seletividade do sistema de proteção é importante para garantir a interrupção de fornecimento na menor parcela possível da rede. Porém, este assunto costuma ser tratado em outra linha de pesquisa (Farias *et al.*, 2016).

Para que alguma intervenção seja realizada, os agentes responsáveis pela operação do sistema de distribuição, sejam eles humanos ou não, precisam tomar conhecimento do cenário implantado. Os métodos de detecção e localização de falta variam de acordo com o nível de aprimoramento tecnológico do sistema, podendo envolver sensoriamento da rede ou simplesmente o relato dos próprios consumidores desatendidos através do *call center*.

2.2 Isolação da falta

Uma vez localizada a falta, a etapa de isolação consiste na abertura de chaves Normalmente Fechadas (NF) visando segregar a porção da rede afetada. Na Figura 1 (b) isso é realizado com a abertura das chaves NF S9 e S12. A isolação da falta pode ser tratada juntamente com a estratégia de restabelecimento do serviço ou separadamente, dependendo do enfoque do trabalho.

2.3 Restabelecimento do serviço

A etapa de restabelecimento do serviço propriamente dita consiste essencialmente em restabelecer o fornecimento de energia em trechos da rede não afetadas diretamente pela falta, mas que tiveram o suprimento interrompido em decorrência dessa. Trata-se de um conjunto de ações que visam minimizar as consequências do ocorrido enquanto a falha é reparada.

No entanto, dependendo do número de variáveis envolvidas no problema, a tomada de decisão pode ser bastante complexa. Abordagens comumente verificadas na literatura revisada no capítulo 4 buscam maximizar o número de consumidores reenergizados, a quantidade de carga atendida, a redução do número de manobras necessárias, dentre outras. Já entre as variáveis de restrição do problema, pode-se destacar a conservação da radialidade da rede, a capacidade dos alimentadores, os limites operacionais como subtensão e sobrecarga e as restrições impostas pelo sistema de proteção.

Na Figura 1 (c), a etapa de restabelecimento é ilustrada pelo fechamento da chave Normalmente Aberta (NA) S17 e pelo rearme do religador operado na Figura 1 (a). Com isso, é restaurada a energia nos setores 13, 20 e 23 enquanto a manutenção do setor 17 pode ser realizada.

2.4 Recomposição da rede

Após concluídas as ações corretivas, pode-se finalmente restabelecer o atendimento aos consumidores que foram diretamente afetados pela falta. Além disso, pode-se recompor a rede de modo a retornar à sua configuração original.

3. SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO BRASILEIROS

Os sistemas de distribuição de energia elétrica brasileiros possuem algumas características peculiares que devem ser observadas para o desenvolvimento de estratégias de restabelecimento do serviço. Dentre essas, pode-se destacar:

- Redes predominantemente aéreas, sem cabo-guarda, o que propicia a ocorrência de faltas simultâneas em diferentes pontos, principalmente por ocasião de eventos climáticos. Em vista disso, é desejável que metodologias para restabelecimento do serviço sejam capazes de lidar com esse cenário.
- Alimentadores longos, podendo chegar a centenas de quilômetros. Esse fato dificulta a localização de faltas e torna morosa a operação de chaves que careçam de deslocamento de equipe para acionamento manual.
- Dificuldade de acesso a rede em áreas de vulnerabilidade social, principalmente em determinados horários do dia. Isso pode impedir a atuação das equipes para manobra ou manutenção.
- Dificuldade de deslocamento terrestre das equipes devido a congestionamentos no trânsito, principalmente em grandes aglomerados urbanos, situação que pode demandar estratégias de roteamento para minimizar os tempos de atuação.
- Presença de grande número de elos fusíveis do tipo expulsão. Esses dispositivos de proteção podem limitar a capacidade de manobra da rede e requerem intervenção local para substituição.

4. REVISÃO CRÍTICA DA LITERATURA

Constata-se na literatura uma grande gama de trabalhos com a temática de restabelecimento do serviço em sistemas de distribuição, com diferentes abordagens e metodologias de solução. Neste capítulo, faz-se uma revisão da bibliografia, dando atenção especial aos artigos de citação mais recorrente em periódicos da área, analisando-os sob alguns critérios.

Conforme citado anteriormente, não faz parte do escopo deste trabalho analisar a eficácia dos diferentes métodos de solução propostos na literatura para o problema de restabelecimento do serviço, mas sim as considerações de modelagem contempladas nessas metodologias. Para isso, selecionou-se cinco critérios relevantes à aplicabilidade em sistemas de distribuição brasileiros, dispostos a seguir, sob os quais os artigos são analisados.

4.1 Nível de Automação da Rede

O nível de automação da rede é uma consideração de modelagem que influencia diretamente nas estratégias de restabelecimento do serviço. Neste contexto, um ponto crucial na automação da operação das redes de distribuição está no tipo de chaves que ela emprega. Com a tendência mundial para um mundo mais automatizado, torna-se cada vez mais comum a presença de chaves telecomandadas. Essas se mostram como um facilitador nos problemas de restabelecimento de energia, uma vez que permite chaveamentos mais rápidos no sistema.

No entanto, na realidade brasileira o número de chaves manuais supera drasticamente o de chaves telecomandadas. Estudos acerca do problema apontam que, em termos gerais, apenas 10% das chaves em sistemas de distribuição nacionais possuem comando remoto (Maravilha et al., 2018). Embora haja um esforço para aumentar o número dessas chaves na rede, provavelmente levará vários anos para que essa proporção se torne significativa.

Outras pesquisas (Inagaki, Nakajima e Haseyama, 2006; Kumar, Das e Sharma, 2008; Gazzana et al., 2016) também mesclam os tipos de chaves existentes no sistema, fato que também é levado em consideração quando se trata do tempo necessário para que ocorra o restabelecimento. Este assunto é abordado especificamente no tópico 4.2. A maioria dos trabalhos consideram apenas chaves telecomandadas (Chen et al., 2018; Jacques Delgado Costa e Ramos Araujo, 2018; Bassey, Butler-Purry e Chen, 2020) o que implica em um sistema altamente automatizado e com um sistema de comunicação elaborado, capaz monitorar e acionar as chaves com precisão.

Com relação ao centro de comando em operações de restabelecimento do serviço, constatou-se que, de acordo com o nível de automação da rede, pode-se considerar três cenários distintos: controle centralizado, hierarquicamente distribuído e totalmente distribuído (Prabawa e Choi, 2020). A abordagem centralizada é a mais recorrente e tradicionalmente utilizada, com uma unidade central coordenando todas as operações (Hsiao e Chien, 2000; Dimitrijevic e Rajakovic, 2011; Wang e Chiang, 2016). As abordagens hierarquicamente e totalmente distribuídas vem sendo exploradas mais recentemente com a evolução da automação e com emprego de sistemas multiagentes (Shirazi e Jadid, 2019; Prabawa e Choi, 2020; Shen *et al.*, 2020; W. Li *et al.*, 2020).

Essas abordagens se distinguem pelo fato da hierárquica utilizar comunicação entre agentes locais, completando o restabelecimento em níveis de maneira gradativa, utilizando grupos de agentes subordinados a outros (Prabawa e Choi, 2020; Xu *et al.*, 2019). Já na totalmente distribuída, considera todos os multiagentes no mesmo nível, sem uma coordenação mais abrangente que conduza o restabelecimento de alguma forma (Yu, Soo e Tsai, 2015; Abel Hafez, Omran e Hegazy, 2018). Em ambas as abordagens, são consideradas chaves automáticas ou telecomandadas nos estudos, de forma coincidente com o tipo de controle requerido pelos sistemas multiagentes.

Do ponto de vista da comunicação, alguns protocolos são propostos para facilitar as abordagens descentralizadas (Abu-Elanien, Salama e Shaban, 2018). Nesse sentido, constata-se a carência de análise quanto a efetividade desses sistemas no restabelecimento de serviço, bem como a mitigação de eventuais falhas na comunicação entre os dispositivos. Tais situações não foram consideradas nos trabalhos consultados.

4.2 Tempos de Atuação

Especialmente em modelagens que consideram a presença de chaves de operação manual, que carecem de deslocamento de equipe, o tempo para execução do plano de manobras pode ser crucial para a eficácia do restabelecimento do serviço. Além disso, o tempo para reparo da falta também passa a ser pertinente, uma vez que soluções com tempo de implementação maior que o tempo de reparo não fazem sentido prático.

Nesse sentido, Kumar, Das e Sharma (2008) consideram chaves manuais e telecomandadas com seus respectivos tempos de atuação estimados de 1200 a 1500s e de 50s, optando pela solução com maior número de chaves com comando remoto, reduzindo significativamente o tempo de atuação. Gazzana *et al.* (2016) também consideram chaves manuais e automáticas com tempos de operação arbitrários.

Em Yan *et al.*, (2020) menciona-se que o tempo para implantação do plano de restabelecimento é dependente de vários fatores, como condições climáticas adversas, logística de roteamento de equipes, sequência de chaveamento, dentre outras. Além disso, os autores destacam que, na maioria dos trabalhos, considera-se uma formulação estática que, embora de tratamento mais simples, não traduzem aplicações práticas de engenharia. Nesse intuito, propõem uma metodologia que leva em consideração tais aspectos nas funções objetivos e nas restrições.

Em Bassey, Butler-Purry e Chen (2020) a execução do restabelecimento é ativada quando a operação de monitoramento do sistema detecta uma interrupção no sistema. O programa de restabelecimento utiliza o status atual da rede, projeta cargas agregadas nas barras, Geração Distribuída (GD) e outros recursos de energia distribuídos e determina a sequência de ações de restabelecimento. Como o intervalo de tempo entre as sequências é modelado neste método, os tempos de comutação são ordenados de forma crescente em relação ao tempo de comando. Cada comando é enviado por vez a partir do centro de controle da micro-rede, levando em consideração os tempos na sequência de execução do restabelecimento.

Outro ponto que carece nos trabalhos da área é a existência de um "plano B" no processo de restabelecimento, por exemplo, mitigando o mau funcionamento de chaves. Esse aspecto pode implicar em um tempo diferente para solução, visto que uma nova solução diferente deverá ser proposta desconsiderando as chaves com defeito. Gazzana *et al.* (2016) consideram que pode haver falha no restabelecimento e, em decorrência disso, a interrupção será o tempo médio de reparo da falta.

Ademais, há trabalhos que tratam com alta prioridade a maximização da carga total restaurada, mesmo que isso signifique desconsiderar a duração do plano de restabelecimento em relação a falta. Bassey, Butler-Purry e Chen (2020) inserem um termo na função objetivo com a finalidade maximizar a carga restaurada em detrimento ao tempo para manobra.

Ainda, alguns trabalhos consideram que, a partir da ocorrência da falta no sistema, se inicia o plano de restabelecimento, incluindo a detecção da falta e os chaveamentos necessários para a isolação desta. São exemplos disso as metodologias propostas por Shen *et al.* (2020) e Gholami, Moshtagh e Rashidi, (2015). Por outro lado, há trabalhos (Garcia and França, 2008; Gazzana *et al.*, 2016) que consideram a falta já detectada e isolada para, então, entrar na fase que compreende o plano de restabelecimento.

De modo geral, frente a análise bibliográfica realizada, observa-se a escassez de trabalhos que considerem a presença de chaves de operação manual no sistema, analisem o tempo de restabelecimento considerando o deslocamento de equipes e o local onde se deseja realizar a manobra. Da mesma forma, nos periódicos consultados, não form identificados trabalhos que analisem o impacto dos tempos de atuação sobre os Indicadores de Continuidade, coletivos ou individuais.

4.3 Sistema de Proteção

O sistema de proteção é um elemento ativo em qualquer sistema de distribuição em operação. Em vista disso, o mesmo não pode ser negligenciado durante o restabelecimento do serviço, sob a pena de ocasionar desligamentos indevidos ou desproteger parte da rede.

No entanto, ainda que haja uma variabilidade de sistemas-teste utilizados, como será bordado na seção 4.5, dentre os trabalhos analisados, nenhum destacou considerar a presença do sistema de proteção para as análises do problema de restabelecimento. Quanto mencionada, a abordagem costuma se restringir a etapa de detecção e isolação de falta (Shen *et al.*, 2020).

4.4 Integração de Geração Distribuída

A GD no Brasil é regulamentada pela Resolução Normativa (REN) nº 482/2012 da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) e suas revisões dispostas nas RENs ANEEL nº 517/2012, nº 687/2015 e nº 786/2017. Dentre outros provimentos, essa resolução impõe que, em caso de operação

ilhada do acessante, a proteção de anti-ilhamento deve garantir a desconexão física entre a unidade e a rede de distribuição, vedando sua conexão ao sistema durante a interrupção do fornecimento. Em vista disso, além de aspectos técnicos, a incorporação de GDs em estratégias de restabelecimento do serviço no Brasil implicam também em questões legais.

Embora esta situação seja de suma importância para o tema, uma análise quanto a legislação não será contemplada no escopo do presente trabalho. Do ponto de vista técnico, as GDs podem ser incorporadas auxiliando no restabelecimento, suprindo a demanda local (Prabawa e Choi, 2020).

Além destes, existem trabalhos que presumem que a arquitetura da micro rede esteja no modo de operação *islanded single master* (SMO) (Bassey, Butler-Purry e Chen, 2020). Em outra pesquisa desenvolvida (Shen *et al.*, 2020) utilizam-se GDs de diferentes potências em três sistemas-teste, todas operando com fator de potência unitário, e aplicam diversos cenários de falta no sistema. Em um dos casos, utilizam *load shedding* devido aos limites de tensão, o que provoca o aumento no número de chaveamentos. Dessa forma, comprovam que a incorporação de GD pode melhorar a capacidade de restabelecimento das redes de distribuição.

No entanto, a utilização de GDs para maximizar o restabelecimento do serviço em situações de contingência implica em algumas situações que devem ser ponderadas para uma solução completa. Além de limites operacionais da rede de distribuição e das GDs envolvidas, deve-se observar a eventual reversão de fluxo em equipamentos como reguladores de tensão e dispositivos de proteção.

Igualmente importante, deve-se considerar a recomposição da rede original após as correções que levaram a contingência. Caso esse cenário não seja previsto, pode-se acarretar consequências danosas ao sistema na ocasião de reconexão das porções da rede alimentadas pelas GDs devido a falta de sincronismo.

4.5 Sistemas-teste

A escolha de sistemas-teste apropriados para representar o problema de restabelecimento do serviço é primordial para a avaliação das metodologias propostas. Além disso, a publicação integral dos dados utilizados é essencial para a reprodutibilidade do método e garantir que análises comparativas possam ser realizadas, sob as mesmas condições.

Nesse aspecto, as pesquisas apresentam um diversidade de sistemas, em uma delas (Augugliaro, Dusonchet e Sanseverino, 2001) é utilizado um sistema de 20 kV, 109 barras e 18 bancos de capacitores, não considera cargas prioritárias e os parâmetros utilizados para modelagem do sistema estão disponibilizados no trabalho. Dessa forma, esse sistema foi testado utilizando outras metodologias (Garcia e França, 2008). Nesse sentido, também são empregados sistemas-teste de outros trabalhos difundidos na literatura, como o sistema de Baran e Wu (1989) por Garcia e França, (2008), Singh *et al.* (2009) e Borges *et al.* (2016) e de Civanlar *et al.* (1988) por Singh *et al.* (2009) e Borges *et al.* (2016).

Em alguns trabalhos, constatou-se que os sistemas-teste utilizados comtemplam a presença de consumidores prioritários, como em Nan Miu *et al.* (1998). Já em Marques, Delbem e London (2018) e Kumar, Das e Sharma (2008), considerou-se três diferentes categorias de consumidores presentes no sistema, estabelecendo níveis de prioridade para o restabelecimento.

Observou-se que muitos trabalhos utilizam sistemas da IEEE ou sistemas da IEEE modificados como Wang *et al.* (2019) que trabalha com a inserção de GD, Prabawa e Choi (2020) inserindo GDs e sistemas de armazenamento de energia, e P. Li *et al.* (2020), que adotam sistemas de 33 barras. Huang e Taylor (2013) usa o sistema de 69 barras, enquanto Yan *et al.* (2020) e Nezam-Sarmadi *et al.* (2010) sistemas de 119 barras. Chen *et al.* (2018), Shen *et al.* (2020) e Bassey, Butler-Purry e Chen (2020) testam o sistema IEEE-123 barras com modificações.

A utilização de sistemas testes reais pode ser bem vista uma vez que aplica os métodos em situações mais condizentes com a realidade e não idealizadas ou, até mesmo, em sistemas que não condizem com a realidade nacional (Goulart *et al.*, 2018; Hsiao e Chien, 2000; Chen, Lin e Tsai, 2002; Riahinia *et al.*, 2018; Shen *et al.*, 2020; Carvalho, Ferreira e Barruncho, 2007; Marques, Delbem e London, 2018; Garcia e França, 2008; Wang e Chiang, 2016; Camillo *et al.*, 2016). No entanto, cabe ressaltar, novamente, que essa escolha costuma dificultar ou até impedir a comparação entre metodologias de resolução, pois majoritariamente os dados de redes reais não estão publicados integralmente.

Observou-se que diferentes critérios são utilizados para a escolha do sistema-teste. Alguns autores consideram comprovar a eficiência do método em determinado aspecto do problema, como Shen *et al.* (2020) que considerou sistemas-teste de 44 e 123 barras e, além disso, um sistema brasileiro de 948 nós com o propósito de comprovar que o tempo computacional pode ser reduzido substancialmente quando o método proposto é aplicado em redes de distribuição de larga escala. Outros priorizam sistemas-teste utilizados em trabalhos anteriores com o intuito de comparar a eficiência entre os métodos aplicados, como Singh *et al.* (2009) que, utilizando os sistemas de Baran e Wu (1989) e (Civanlar *et al.* (1988), compara os resultados com foco na análise de redução de perdas, melhoria do perfil de tensão e número de passos computacionais. Chen (2010) utiliza o sistema-teste já de outro trabalho Huang (2003), considerando-o balanceado, e se preocupa em avaliar planos de restabelecimento factíveis e ranqueá-los de maneira quantitativa.

A partir desses estudos, nota-se a dificuldade em encontrar sistemas-teste que tenham os dados publicados integralmente, que sejam fidedignos às redes de distribuição reais, que representem o problema de restabelecimento de serviço e que sirvam de referência para análises comparativas. Assim sendo, a literatura carece de sistemas-teste que sejam amplamente difundidos, principalmente quando se trata do ponto de vista de engenharia, que vai além dos métodos puramente computacionais.

5. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Considerando o grau desenvolvimento tecnológico atual das redes de distribuição brasileiras, de modo geral, constata-se um modesto nível de automação, com utilização de chaves telecomandadas e de dispositivos de sensoriamento remoto. Esse fato dificulta ou até mesmo inviabiliza a aplicação de muitas das metodologias propostas nos trabalhos citados. Isso também evidencia a necessidade de investimento nesse setor no país, para que abordagens compatíveis com redes elétricas inteligentes possam, então, ser empregadas em larga escala.

No entanto, através da revisão crítica da literatura analisada no capítulo 4, constatou-se algumas lacunas que podem ser contempladas em trabalhos futuros. Destacam-se:

- Nível de Automação da Rede – A existência de um sistema controle, seja ele centralizado, hierarquicamente distribuído e totalmente distribuído é imprescindível para a tomada de decisão em problemas de restabelecimento do serviço. No entanto, abordagens realísticas devem considerar a possibilidades de falhas nos sistemas de comunicação e sensoriamento. Além disso, estratégias de mitigação podem ser propostas para explorar soluções frente essas falhas.

- Tempos de Atuação – Consonante à citação anterior, é recomendável que seja considerada a existência de chaves de operação manual e remota. Com isso posto, é importante que o plano de restabelecimento proposto envolva:

  - Contabilização dos diferentes tempos de manobra, ponderando a escolha das chaves.
  - Apresentar a sequência de chaveamento, já que o tempo de restabelecimento depende diretamente do tempo necessário para a operação das chaves. Nisso está incluso, no caso de chaves manuais, o tempo de deslocamento de equipes em campo e o tempo de atuação para manobra.
  - A elaboração de um plano de *backup* que garanta ou se aproxime do tempo de atuação proposto quando constatado mau funcionamento de chaves ou quaisquer outros imprevistos.

- Sistema de Proteção – Como este é parte ativa no sistema de distribuição em operação, não pode simplesmente ser negligenciado durante o restabelecimento do serviço. Em suma, sugere-se avaliar:

  - Que nenhuma proteção irá atuar indevidamente devido ao incremento na corrente de carga ocasionado pela manobra da rede.
  - Que nenhum trecho da rede ficará sem proteção ativa, fato que pode colocar em risco a integridade do sistema e a vida das pessoas.
  - Possibilidade de perda de seletividade e coordenação entre os dispositivos de proteção.
  - Possibilidade de implantação de novo esquema de proteção em tempo de operação, como tarte integrante da estratégia de restabelecimento do serviço.

- Integração de Geração Distribuída – Para que GDs possam ser consideradas no restabelecimento do serviço, em uma solução completa, sugere-se avaliar a eventual reversão de fluxo em reguladores de tensão e dispositivos de proteção, como religadores. Além disso, deve-se considerar a recomposição da rede original, uma vez que a reconexão ao sistema das porções alimentadas por GDs pode levar a falhas de sincronismo.

- Sistemas-teste – Conforme descrito anteriormente, nota-se a falta de sistemas-teste com dados publicados integralmente e que considerem os elementos característicos dos sistemas de distribuição reais. Sugere-se que, quando não for possível disponibilizar todos os dados utilizados no próprio trabalho, seja empregada alguma plataforma que permita o acesso a longo prazo após a publicação. Assim, se tornam mais fácil e fiel as comparações entre metodologias aplicadas no mesmo sistema.

AGRADECIMENTOS

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES/PROEX) - Código de Financiamento 001.

Os autores agradecem a Companhia Estadual de Distribuição de Energia Elétrica (CEEE-D) do Rio Grande do Sul que através do projeto de P&D intitulado *Desenvolvimento de uma Metodologia para Automatização dos Procedimentos de Manobra em Redes de Distribuição e Integração no Ambiente Computacional SIGPROD* (registro 9953356) possibilitou o desenvolvimento deste trabalho.

REFERÊNCIAS

Abel Hafez, A., Omran, W. A. and Hegazy, Y. G. (2018) 'A Decentralized Technique for Autonomous Service Restoration in Active Radial Distribution Networks', IEEE Transactions on Smart Grid, 9(3), pp. 1911–1919.

Abu-Elanien, A. E. B., Salama, M. M. A. and Shaban, K. B. (2018) 'Modern network reconfiguration techniques for service restoration in distribution systems: A step to a smarter grid', Alexandria Engineering Journal. Elsevier B.V., 57(4), pp. 3959–3967.

Augugliaro, A., Dusonchet, L. and Sanseverino, E. R. (2001) 'Evolving non-dominated solutions in multiobjective service restoration for automated distribution networks', Electric Power Systems Research, 59(3), pp. 185–195.

Baran, M. E. and Wu, F. F. (1989) 'Network reconfiguration in distribution systems for loss reduction and load balancing', IEEE Transactions on Power Delivery, 4(2), pp. 1401–1407.

Bassey, O., Butler-Purry, K. L. and Chen, B. (2020) 'Dynamic Modeling of Sequential Service Restoration in Islanded Single Master Microgrids', IEEE Transactions on Power Systems. IEEE, 35(1), pp. 202–214.

Borges, T. T. et al. (2016) 'A new OPF based distribution system restoration method', International Journal of Electrical Power and Energy Systems. Elsevier Ltd, 80, pp. 297–305.

Camillo, M. H. M. et al. (2016) 'Combining exhaustive search and multi-objective evolutionary algorithm for service restoration in large-scale distribution systems', Electric Power Systems Research. Elsevier B.V., 134, pp. 1–8.

Carvalho, P. M. S., Ferreira, L. A. F. M. and Barruncho, L. M. F. (2007) 'Optimization approach to dynamic restoration of distribution systems', International Journal of Electrical Power and Energy Systems, 29(3), pp. 222–229.

Chen, B. et al. (2018) 'Sequential Service Restoration for Unbalanced Distribution Systems and Microgrids', IEEE Transactions on Smart Grid, 9(6), pp. 6793–6805.

Chen, C. S., Lin, C. H. and Tsai, H. Y. (2002) 'A rule-based expert system with colored petri net models for distribution system service restoration', IEEE Transactions on Power Systems, 17(4), pp. 1073–1080.

Chen, W. H. (2010) 'Quantitative decision-making model for distribution system restoration', IEEE Transactions on Power Systems, 25(1), pp. 313–321.

Civanlar, S. et al. (1988) 'Distribution feeder reconfiguration for loss reduction', IEEE Transactions on Power Delivery, 3(3), pp. 1217–1223.

Dimitrijevic, S. and Rajakovic, N. (2011) 'An innovative approach for solving the restoration problem in distribution networks', Electric Power Systems Research. Elsevier B.V., 81(10), pp. 1961–1972.

Farias, P. E. et al. (2016) 'Fault location in distribution systems: A Method Considering the Parameter Estimation Using a RNA Online', IEEE Latin America Transactions, 14(12), pp. 4741–4749.

Garcia, V. J. and França, P. M. (2008) 'Multiobjective service restoration in electric distribution networks using a local search based heuristic', European Journal of Operational Research, 189(3), pp. 694–705.

Gazzana, D. S. et al. (2016) 'Multi-objective optimization model for distribution systems restoration', 2015 IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Latin America, ISGT LATAM 2015, pp. 13–18.

Gholami, M., Moshtagh, J. and Rashidi, L. (2015) 'Service restoration for unbalanced distribution networks using a combination two heuristic methods', International Journal of Electrical Power and Energy Systems. Elsevier Ltd, 67, pp. 222–229.

Goulart, F. et al. (2018) 'Permutation-based optimization for the load restoration problem with improved time estimation of maneuvers', International Journal of Electrical Power and Energy Systems. Elsevier, 101(October 2017), pp. 339–355.

Hsiao, Y. T. and Chien, C. Y. (2000) 'Enhancement of restoration service in distribution systems using a combination fuzzy-ga method', IEEE Transactions on Power Systems, 15(4), pp. 1394–1400.

Huang, C. M. (2003) 'Multiobjective service restoration of distribution systems using fuzzy cause-effect networks', IEEE Transactions on Power Systems, 18(2), pp. 867–874.

Huang, X. and Taylor, G. (2013) 'Multi-period service restoration of distribution systems incorporating interruptible load', International transactions on electrical energy systems, 20(April 2014), pp. 1–6.

Inagaki, J., Nakajima, J. and Haseyama, M. (2006) 'A multi-objective service restoration method for power distribution systems', Proceedings - IEEE International Symposium on Circuits and Systems, pp. 1784–1787.

Jacques Delgado Costa, B. and Ramos Araujo, L. (2018) 'A Method of Restoring Distribution Systems Using Adjacent Networks and Two Levels Search', IEEE Latin America Transactions, 16(2), pp. 444–452.

Kumar, Y., Das, B. and Sharma, J. (2008) 'Multiobjective, multiconstraint service restoration of electric power distribution system with priority customers', IEEE Transactions on Power Delivery, 23(1), pp. 261–270.

Li, P. et al. (2020) 'Self-healing oriented supply restoration method based on the coordination of multiple SOPs in active distribution networks', Energy. Elsevier B.V., 195.

Li, W. et al. (2020) 'A Full Decentralized Multi-Agent Service Restoration for Distribution Network with DGs', IEEE Transactions on Smart Grid. IEEE, 11(2), pp. 1100–1111.

Lindenmeyer, D., Dommel, H. W. and Adibi, M. M. (2001) 'Power system restoration - a bibliographical survey', International Journal of Electrical Power and Energy System, 23(3), pp. 219–227.

Maravilha, A. L. et al. (2018) 'Scheduling maneuvers for the restoration of electric power distribution networks: Formulation and heuristics', Electric Power Systems Research. Elsevier, 163(March), pp. 301–309.

Marques, L. T., Delbem, A. C. B. and London, J. B. A. (2018) 'Service Restoration With Prioritization of Customers and Switches and Determination of Switching Sequence', IEEE Transactions on Smart Grid, 9(3), pp. 2359–2370.

Nan Miu, K. et al. (1998) ' Fast Service Restoration for Large-scale Distribution Systems with Priority Customers and Constraints' IEEE Transactions on Power Systems, 13(3), pp. 789–795.

Nezam-Sarmadi, S. A. et al. (2010) 'A sectionalizing method in power system restoration based on wide area measurement systems', EPEC 2010 - IEEE Electrical Power and Energy Conference: 'Sustainable Energy for an Intelligent Grid', 2(1), pp. 190–197.

Prabawa, P. and Choi, D. H. (2020) 'Multi-Agent Framework for Service Restoration in Distribution Systems with Distributed Generators and Static/Mobile Energy Storage Systems', IEEE Access. IEEE, 8, pp. 51736–51752.

Riahinia, S. et al. (2018) 'Load service restoration in active distribution network based on stochastic approach', IET Generation, Transmission & Distribution, 12(12), pp. 3028–3036.

Shen, C. et al. (2018) 'Three-stage power system restoration methodology considering renewable energies', International Journal of Electrical Power and Energy Systems. Elsevier Ltd, 94, pp. 287–299.

Shen, F. et al. (2020) 'Hierarchical service restoration scheme for active distribution networks based on ADMM', International Journal of Electrical Power and Energy Systems. Elsevier, 118(June 2019), p. 105809.

Shirazi, E. and Jadid, S. (2019) 'A multiagent design for self-healing in electric power distribution systems', Electric Power Systems Research. Elsevier, 171(September 2018), pp. 230–239.

Singh, S. P. et al. (2009) 'A heuristic method for feeder reconfiguration and service restoration in distribution networks', International Journal of Electrical Power and

Energy Systems, 31(7–8), pp. 309–314.
Wang, F. et al. (2019) ‘Service restoration for distribution network with DGs based on stochastic response surface method’, International Journal of Electrical Power and Energy Systems. Elsevier, 107(June 2018), pp. 557–568.
Wang, S. and Chiang, H. D. (2016) ‘Multi-objective service restoration of distribution systems using user-centered methodology’, International Journal of Electrical Power and Energy Systems. Elsevier Ltd, 80, pp. 140–149.
Xu, Y. et al. (2019) ‘DGs for Service Restoration to Critical Loads in a Secondary Network’, IEEE Transactions on Smart Grid, 10(1), pp. 435–447.
Yan, J. et al. (2020) ‘Post-disaster power system restoration planning considering sequence dependent repairing period’, International Journal of Electrical Power and Energy Systems, 117(August 2019).
Yu, W. Y., Soo, V. W. and Tsai, M. S. (2015) ‘Power distribution system service restoration bases on a committee-based intelligent agent architecture’, Engineering Applications of Artificial Intelligence. Elsevier, 41, pp. 92–102.
Zidan, A. et al. (2017) ‘Fault Detection, Isolation, and Service Restoration in Distribution Systems: State-of-the-Art and Future Trends’, IEEE Transactions on Smart Grid, 8(5), pp. 2170–2185.