

Método de simplificação de redes de distribuição de energia elétrica para análise de manobras¹

Simplification method for electrical power distribution networks for maneuver analysis

Armando Leopoldo Keller²
 Ana Paula Mallmann³
 Lúcio Renê Prade⁴
 Rodrigo Marques de Figueiredo⁵
 Diogo Slovinski Boff⁶
 Lucas Melo de Chiara⁷

Resumo

As distribuidoras de energia elétrica precisam realizar manutenções e expandir o sistema elétrico constantemente. Essas atividades, em alguns casos, precisam ser feitas, através do desligamento de trechos de rede, e isso impacta diretamente nos indicadores de confiabilidade. Para reduzir o impacto dessa atividade, é necessário estudar maneiras que mitiguem a quantidade de clientes atingidos. Este estudo utiliza manobras na rede que criam um perímetro seguro (desenergizado) para a intervenção das equipes. A análise dos circuitos e produção do conjunto de manobras pode ser feito, utilizando-se recursos computacionais que, através do cálculo do fluxo de potência, testam as possíveis configurações da rede e propõem alternativas. Uma barreira para esse processo é o tamanho do circuito, quanto maior ele for, mais recurso computacional e tempo são necessários. Posto isso, o presente trabalho apresenta um método de simplificação de redes de distribuição que visa diminuir o impacto de custo computacional para esta análise. Utilizando-se da análise de grafos, tal método traz redução de requisito computacional para análise de redes de distribuição e viabiliza sua utilização em larga escala, trazendo ganhos para as distribuidoras, melhorando a eficiência dos desligamentos para a execução dos serviços de manutenção e expansão.

Palavras-chave: redes de distribuição de energia; simplificação de redes; grafos.

Abstract

Electric power distributors need to maintain and expand the electrical system constantly. These activities, in some cases, need to be done by disconnecting network sections and, this has a direct impact on reliability indicators. In order to reduce the impact of this activity, it is necessary to study ways to mitigate the number of reached customers. This study uses maneuvers in the network that create a safe perimeter (de-energized) for the teams to intervene. The analysis of the circuits and production of the set of maneuvers can be done using computer resources that, through the power flow calculator, test the possible configurations of the network and propose alternatives. A barrier to this process is the size of the circuit, the larger it is, the more computational resources and time are required. That said, this paper presents a distribution network simplification method that aims to reduce the impact of the computational cost impact for this analysis. Using graphic analysis, this method reduces the computational requirement for the analysis of distribution networks and enables its use on a large scale, bringing gains for the distributors, improving the efficiency of shutdowns for the execution of maintenance and expansion services.

Keywords: energy distribution networks; network simplification; graphs.

1 Agradecimento à Companhia Paulista de Força e Luz (CPFL) pelo apoio técnico e financeiro, através do projeto de Pesquisa e Desenvolvimento PD-00396-3057/2019 – *Metodologia de Planejamento de Projetos de Redes de Distribuição Otimizando o DEC Programado com a Aplicação de Inteligência Artificial* – recursos do programa de P&D da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL).

2 Mestre em Engenharia Elétrica pela Universidade do Vale do Rio dos Sinos (UNISINOS), São Leopoldo, RS, Brasil. Professor dos cursos de graduação da área Eletroeletrônica na UNISINOS. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6942-1554>. E-mail: alkeller@unisinis.br

3 Doutora em Engenharia de Materiais pela Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul (PUCRS), Porto Alegre, RS. Professora dos cursos de graduação da área Eletroeletrônica na UNISINOS. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5911-6049>. E-mail: apmallmann@unisinis.br

4 Doutor em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de Santa Maria (UFSM), Santa Maria, RS. Professor dos cursos de graduação da área Eletroeletrônica na UNISINOS. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0998-3002>. E-mail: luciorp@unisinis.br

5 Doutor em Geologia pela UNISINOS. Professor dos cursos de graduação da área Eletroeletrônica na UNISINOS. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3496-5575>. E-mail: marquesf@unisinis.br

6 Mestre em Engenharia Elétrica pela UNISINOS. Coordenador da área de projetos de distribuição em Rio Grande Energia (RGE), Caxias do Sul, RS. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2187-8504>. E-mail: dslovinskiboff@cpfl.com.br

7 Graduado em Engenharia Elétrica pela Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP), Campinas, SP, Brasil. Analista da CPFL, Campinas. ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-9305-2533>. E-mail: lucaschiara@cpfl.com.br

Artigo recebido em 18.09.2022 e aceito 17.04.2023.



1 Introdução

As distribuidoras de energia são responsáveis por entregar ao cliente um serviço de qualidade. Um dos atributos é a confiabilidade do atendimento. A confiabilidade é medida pelos indicadores de Duração Equivalente de Interrupção por Unidade Consumidora (DEC) e por Frequência Equivalente de Interrupção por Unidade Consumidora (FEC). Além disso, é de responsabilidade dessas empresas, realizar as expansões necessárias para dar suporte ao crescimento de mercado, através de novas subestações (SEs), novos alimentadores (circuitos provindos das SEs), extensão de rede para atendimento ao cliente. Outra atribuição é a manutenção da rede de energia que visa manter os ativos em condições de operação. O conjunto dessas atividades deve garantir o cumprimento das metas impostas pelo órgão regulador que, no Brasil, é denominado de Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL).

As ações, descritas acima, demandam investimentos em manutenção e construção de novas redes de distribuição. A manutenção trata de manter e melhorar o que já existe, ou seja, tornar a rede mais robusta. No estado do Rio Grande do Sul, por exemplo, há um parque de postes de madeira significativo que precisa ser modernizado. A substituição deles, por postes de concreto, torna a rede mais robusta e confiável frente aos eventos climáticos, característicos da região. Nas regiões do Pantanal, o desafio é levar energia até os clientes mais isolados em terrenos alagadiços. Com sua extensão continental, o Brasil apresenta diversos desafios seja nos grandes centros urbanos, seja nas regiões mais remotas. Não obstante, tem-se em comum uma questão fundamental, para realizar as atividades descritas e melhorar os indicadores constantemente. Essa tarefa, se não for otimizada do ponto de vista dos indicadores, pode pôr em risco as metas anuais de confiabilidade do fornecimento.

Uma solução possível é a otimização das intervenções na rede, de forma que as atividades de manutenção sejam feitas de forma planejada, fazendo com que os possíveis desligamentos tenham o menor impacto possível no número de clientes. A viabilidade dessa prática passa por simulações computacionais, onde diversas configurações de rede podem ser testadas em ambiente de simulação, definindo assim o melhor conjunto de manobras para a realização da atividade planejada. O problema dessa abordagem é o custo computacional envolvido, quanto maior a rede analisada e maior a quantidade de elementos de manobra, mais poder de processamento é necessário. Esse

trabalho busca propor um método de simplificação de redes que possa reduzir a quantidade de elementos e, dessa forma, enviar para o motor de otimização de manobras, uma rede com um menor número de elementos, com uma complexidade menor, porém que ainda represente fielmente a rede estudada. Esse modelo otimizado pode ser submetido à análise de sistemas interativos e principalmente em sistemas baseados em inteligência artificial e machine learning.

A seguir, são apresentadas as pesquisas correlatas que embasam a escolha das técnicas utilizadas e o desenvolvimento da metodologia proposta. Seguindo para a terceira seção, é apresentada a metodologia utilizada, bem como o algoritmo de simplificação e os Estudos de Caso que validam o processo. Por fim, na quarta seção, são apresentados os resultados preliminares do trabalho.

2 Revisão bibliográfica

O estudo de redes elétricas é bastante difundido no meio científico, sendo que foram desenvolvidas técnicas de modelagem e análise de redes complexas, utilizando grafos (NEWMAN, 2004a; NEWMAN, 2004b; CABRAL, 2013). Essas têm sido utilizadas para o estudo de redes elétricas, analisando sua centralidade (JIN et al., 2010) e sua vulnerabilidade (GUTIERREZ et al., 2013). Trabalhos como os de Wang, Scaglione e Thomas (2010) e Verma, Ellens e Kooij (2013) mostram como o uso de grafos auxiliam na análise de redes elétricas, permitindo localizar pontos críticos, para atuar na rede de forma mais eficaz. Em alguns casos, alteram-se técnicas de análise utilizadas em outros tipos de redes como as de Telecom (Jacob et al., 2005), de forma a adaptá-los para seu uso em redes elétricas (GUTIERREZ et al., 2013; NASIRUZZAMAN; POTA; ANWAR, 2012).

Essas análises trazem uma grande vantagem competitiva para as concessionárias de energia, pois podem avaliar sua rede de maneira mais clara e rápida. Em seu trabalho, Chen et al. (2018) propõe um modelo de otimização multiobjetivo para avaliar manobras em parte da rede de distribuição da China, sendo que um de seus limitantes é a complexidade da rede a ser otimizada. Esse problema também aparece no planejamento de expansão do sistema de distribuição de energia, que é abordado por Melo e Lima (2018), que buscam a melhor solução de otimização, envolvendo as eficiências comercial e energética, o aumento de confiabilidade do sistema e a redução de custos de investimento, com restrições baseadas nos índices FEC e DEC. Os autores também relatam a questão

da complexidade da rede como um ponto de atenção para a da implementação comercialmente.

Fica evidente que os pesquisadores dessa área possuem soluções inteligentes e relevantes, mas a complexidade da rede é algo a ser considerado. Reiman et al. (2018) propõe um método de simplificação de redes de distribuição para poder simular séries temporais quase estáticas (QSTS – Quasi-Static Time-Series), utilizadas para simular o comportamento dos sistemas de distribuição por longos períodos. Essa técnica necessita resolver iterativamente o fluxo de carga para um modelo de sistema de distribuição. A complexidade da rede é um empecilho novamente e, como forma de aliviar a carga computacional, o autor propôs seu método de simplificação que realiza a substituição de segmentos de redes, observando pontos que não sejam relevantes para a análise fim. É com base nessa premissa que a metodologia, descrita a seguir, foi elaborada.

3 Metodologia

A metodologia proposta avalia a rede, usando critérios de conectividade e manutenção das características elétricas de distribuição. Para as análises, considera-se a rede como um grafo valorado, onde os nós são os elementos de rede, e as arestas possuem as informações elétricas (impedâncias ou dimensionais de cabos). Uma vez que a simplificação atenda essas características o modelo de simplificação está validado e pode ser replicado para redes que possuam os mesmos elementos de manobra em sua estrutura. É recomendável tratar uma alteração nos elementos de manobra como um novo modelo de rede simplificado, repetindo assim o processo de validação do modelo.

A ferramenta de simplificação foi desenvolvida em linguagem de programação Python (versão 3.8.3), ferramenta base para manipulação de dados, arquivos e conexão com programas externos. Para o tratamento das redes, foi utilizado o pacote NetworkX (versão 2.4), o qual possui ferramentas que facilitam a análise de conectividade de redes em formato de grafos valorados. Para a análise das características elétricas, foi utilizado como métrica a análise do fluxo de potência. Como motor de cálculo do fluxo de potência foi escolhido o OpenDSS (versão 7.6.5 Build 65+) que possui uma API (Application Programming Interface) em Python, o que facilita sua utilização.

O fluxo de aplicação da metodologia é apresentado na figura 1, onde se pode acompanhar o passo a passo das etapas, desde a requisição até a entrega

do modelo de rede simplificado. É importante ressaltar que a metodologia possui duas formas de ser processada, uma para um novo modelo de rede simplificada, a qual passa pela etapa de validação e, outra que simplifica uma rede que possui seu modelo de simplificação já validado.

O processo parte da solicitação da rede de distribuição de energia elétrica a ser simplificada. Essa rede é trazida de um banco de dados e então traduzida para um modelo de grafo valorado. Em paralelo a isso, é verificado na lista de elementos de manobra, se há um novo elemento de manobra. Havendo esse novo elemento, deve ser deflagrada a etapa de validação. Nessa etapa, separa-se a análise do fluxo metodológico, sendo a primeira, a etapa de simplificação que consiste em uma rede que tem seu modelo de simplificação já validado e, a segunda, a etapa de validação que se baseia no produto da etapa de simplificação e o valida:

1- etapa de simplificação: é uma etapa essencialmente procedural, sendo iniciada pela identificação dos alimentadores, identifica na rede todos os elementos de manobra e elimina os não manobráveis, seguindo as regras extraídas de um dicionário de manobras;

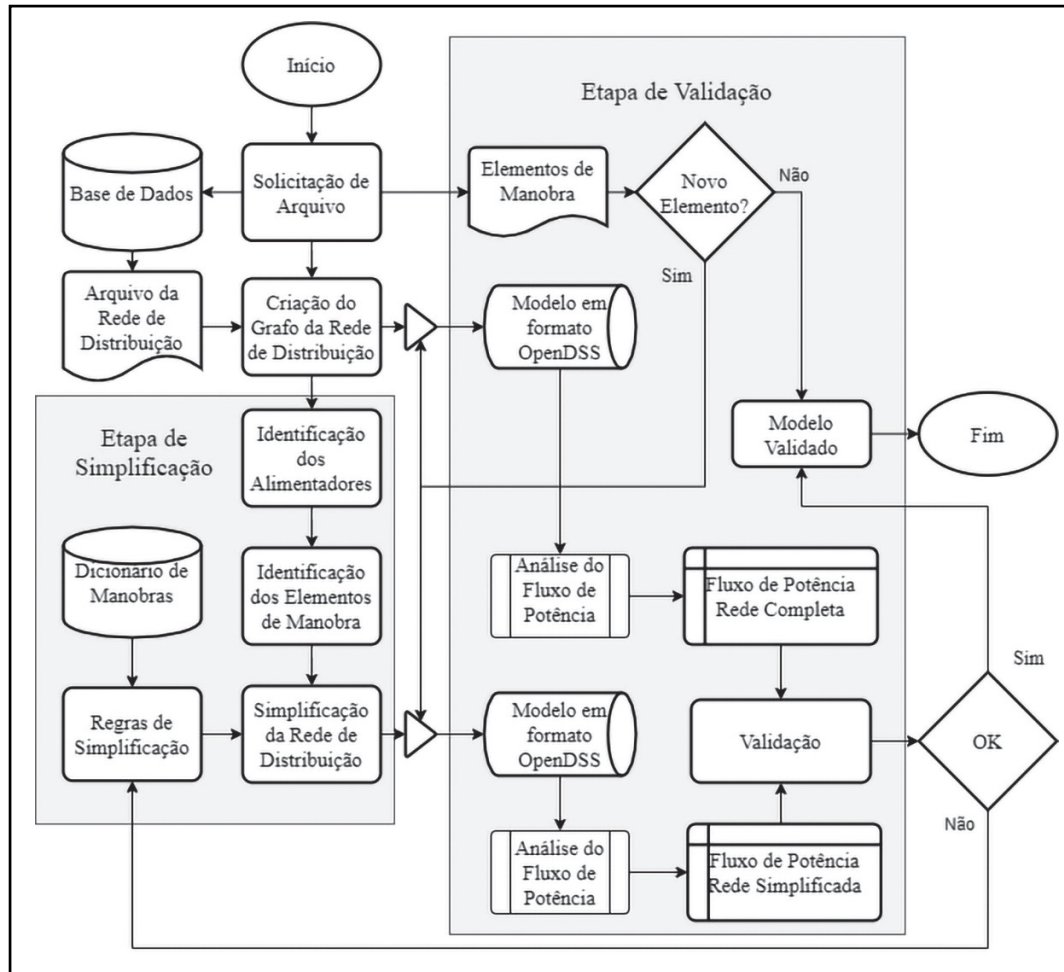
2- etapa de validação: nessa etapa, a rede completa em formato de grafo valorado é convertida para o formato OpenDSS e é calculado seu fluxo de potência, sendo a análise análoga realizada para a rede simplificada. Os resultados dos fluxos de potência são comparados, bem com as questões de conectividade (manobras). Havendo coerência entre ambos, o modelo é validado; do contrário, as regras de simplificação são revistas e, então, o processo se repete.

As regras de simplificação são as relações entre manobras disponíveis para a rede e seus elementos de manobra. Essas regras, quando coerentes, gerarão uma conectividade idêntica entre as redes completas e as redes simplificadas. O mesmo acontecerá para as características elétricas, refletidas na igualdade entre os resultados do fluxo de potência para cada uma das redes, completa e simplificada. Para demonstrar a aplicação da metodologia elaborada, implementou-se um Estudo de Caso apresentado a seguir.

3.1 Estudo de Caso

Como Estudo de Caso para este processo foram utilizadas redes de distribuição de testes do IEEE (IEEE *Test Feeders*) 37 Barras e 123 Barras. O modelo IEEE 37 Barras foi alterado, onde foram inseridas quatro (4) chaves, destacadas na figura 2. Essas chaves (Sn) estão denominadas com o sufixo “n” que representa o número da chave.

Figura 1 – Fluxograma da metodologia proposta



Fonte: Os autores (2022).

A tabela 1 apresenta a matriz de conectividade das chaves do modelo de rede de distribuição do modelo IEEE 37 Barras e o seu estado inicial.

Tabela 1 – Matriz de conectividade das chaves da rede IEEE 37 Barras

Nº	vértice A	vértice B	estado inicial
1	720	704	Fechado
2	703	727	Fechado
3	730	709	Fechado
4	737	738	Fechado

Fonte: Adaptado de Institute of Electrical and Electronics Engineers (2022).

O modelo IEEE 123 Barras possui 11 chaves em sua estrutura, e elas foram mantidas em sua integridade, tanto em sua posição na rede assim como em seu estado inicial, conforme indicado na tabela 2.

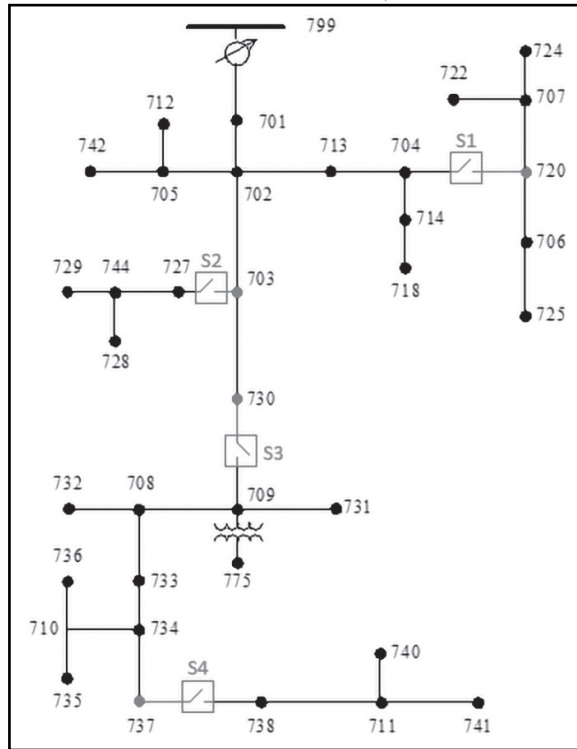
Tabela 2 – Matriz de conectividade das chaves da rede IEEE 123 Barras

Nº	vértice A	vértice B	estado inicial
1	150	149	Fechado
2	13	152	Fechado
3	18	135	Fechado
4	300	350	Aberto
5	54	94	Aberto
6	61	610	Fechado
7	60	160	Fechado
8	97	197	Fechado
9	450	451	Aberto
10	151	300	Aberto
11	250	251	Aberto

Fonte: Adaptado de Institute of Electrical and Electronics Engineers (2022).

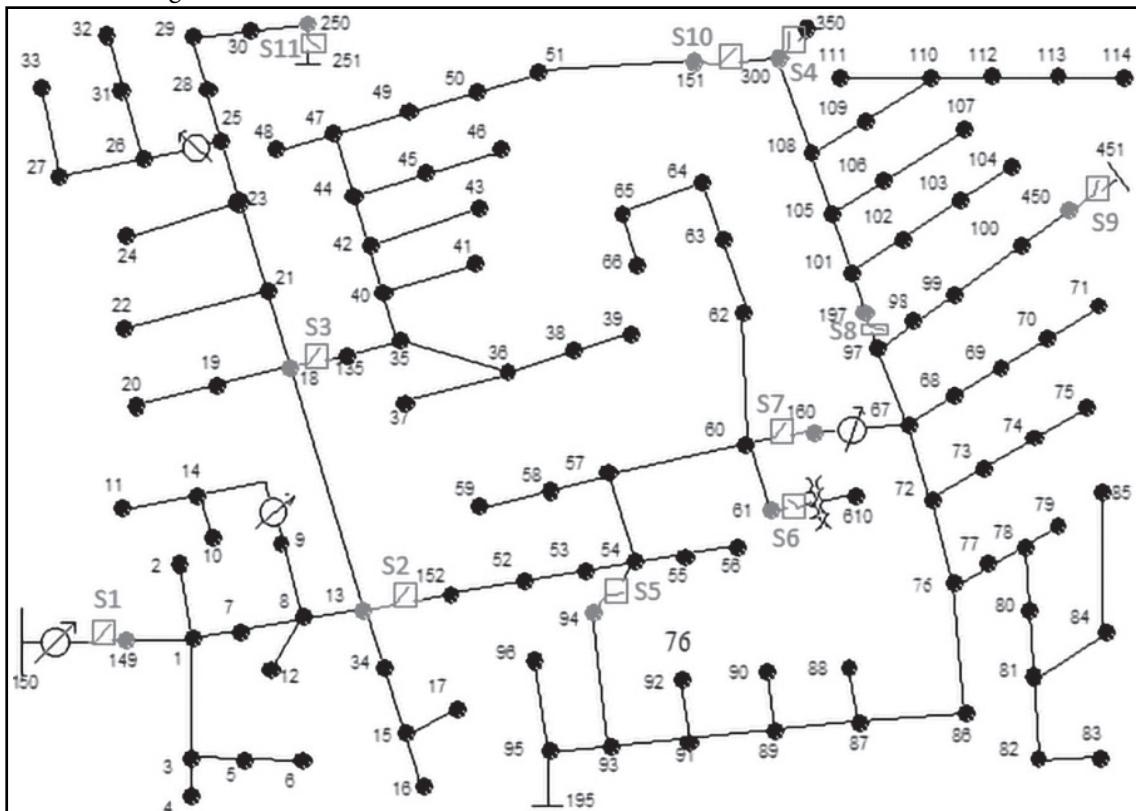
Na figura 3, as chaves estão destacadas, seguindo a mesma lógica apresentada na figura 2.

Figura 2 – Modelo IEEE 37 Barras alterado com a inserção de 4 chaves, destacadas e numeradas



Fonte: Adaptado de Institute of Electrical and Electronics Engineers (2022).

Figura 3 – Modelo IEEE 123 barras com as chaves destacadas e numeradas



Fonte: Adaptado de Institute of Electrical and Electronics Engineers (2022).

O conhecimento do estado inicial das chaves é importante para que assim seja feito o cálculo do fluxo de potência. Já a posição da chave é importante para a avaliação da conectividade dos vértices adjacentes.

O sistema de simplificação de redes de distribuição proposto é aplicado às redes de distribuição do Estudo de Caso, de forma a demonstrar que os testes são extensíveis a redes reais das concessionárias de energia.

No capítulo seguinte, Análise de resultados, a rede IEEE 37 Barras, com a adição de chaves e a Rede IEEE 123 Barras são simplificadas e suas respectivas reduções computacionais avaliadas.

4 Análise de resultados

O processo metodológico, apresentado no capítulo anterior, foi aplicado aos dois exemplos definidos. Nesse capítulo, é apresentado o processo de simplificação da rede de distribuição. Importante ressaltar que, para os dois casos, IEEE 37 Barras e IEEE 123 Barras, são consideradas iguais todos os pontos de manobras, denominados apenas de chave, seja chave fusível, chave faca e religadores. Isso não gera impacto no processo de simplificação, porém facilita o acompanhamento da metodologia como um todo.

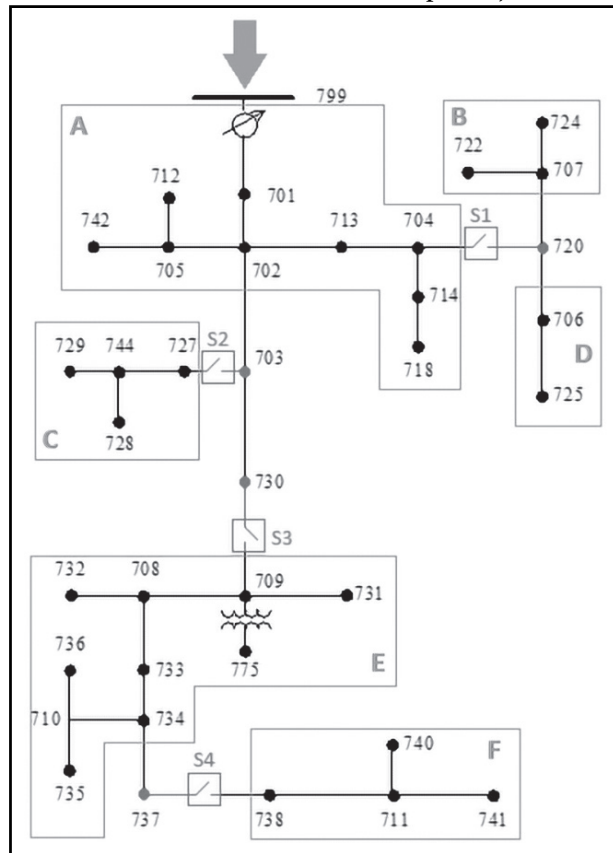
4.1 Simplificação – IEEE 37 Barras

Partindo a análise com base na figura 2, para dar-se o processo de simplificação dessa rede de distribuição, faz-se a determinação da localização do alimentador, como mostra a figura 4. Com essa definição, o grafo é percorrido, a partir do alimentador. Então todos os elementos entre dois elementos de manobra são simplificados em um único, sendo totalizadas todas suas características elétricas.

Após esse processo, a rede é simplificada, como mostra na figura 5. Nesse caso, há uma redução de 36 pontos de análise, mais o alimentador, passando para dez (10) pontos de análise mais o alimentador.

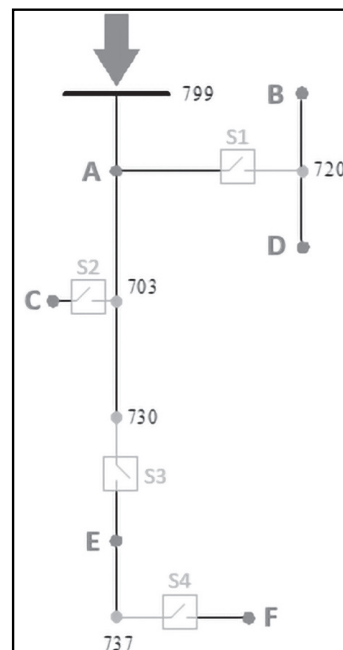
Isso traz um ganho computacional significativo, devido à redução da complexidade da rede, além disso, fica evidente que a aplicação da metodologia em redes maiores, possibilita uma simplificação maior, se comparada à rede original, resultando um ganho maior de performance no processo de análise. Esse fato pode ser comprovado na simplificação do modelo de rede IEEE 123 Barras.

Figura 4 – Modelo IEEE 37 Barras com identificação do alimentador e áreas de simplificação



Fonte: Adaptado de Institute of Electrical and Electronics Engineers (2022).

Figura 5 – Modelo IEEE 37 Barras Simplificado



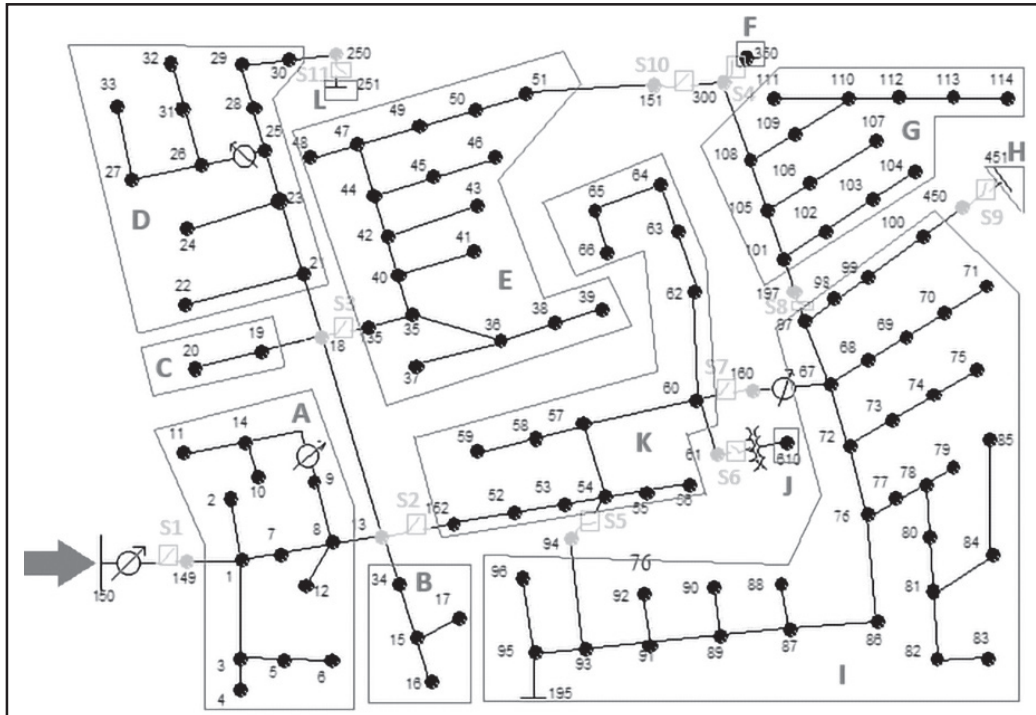
Fonte: Os autores (2022).

4.2 Simplificação – IEEE 123 Barras

Da mesma forma, que foi realizado na simplificação para o IEEE 37 Barras, parte para a simplificação do IEEE 123 Barras no seu modelo completo

no processo de simplificação, conforme indicado na figura 3. Nesse processo, identifica-se o alimentador e os grupos de vértices, sem elementos de manobra, localizados entre dois ou mais elementos de manobras, como pode ser visto na figura 6.

Figura 6 – Modelo IEEE 123 Barras com identificação do alimentador e áreas de simplificação

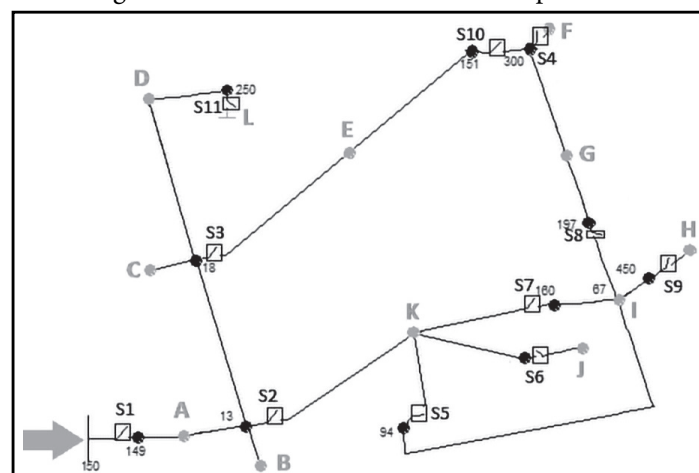


Fonte: Adaptado de Institute of Electrical and Electronics Engineers (2022).

O processo de simplificação entrega o circuito apresentado na figura 7, indicando todas as chaves presentes, mantendo sua posição de conexão com os demais elementos não manobráveis da rede, porém simplificados. A simplificação constitui-se da união

das características elétricas e funcionais dos elementos de rede que não são manobráveis. Nota-se uma redução de 122 pontos de análise, mais o alimentador, chegando a uma rede simplificada com 22 pontos de análise mais o alimentador.

Figura 7 – Modelo IEEE 123 Barras Simplificado



Fonte: Os autores (2022).

Ao observar a aplicação do sistema, para ambos os modelos, tem-se sua validação por meio da análise do fluxo de potência. Para ambos, o retorno do fluxo de potência, a partir do alimentador, possui coerência de 100% entre o modelo completo e o modelo simplificado, pois a metodologia prevê a agregação dos pontos e o cálculo da impedância equivalente dos trechos simplificados. É interessante atentar para o ganho computacional obtido que, no caso, é uma proporcionalidade entre o número de vértices reduzidos.

4.3 Ganho computacional

A análise do ganho computacional tem uma proporcionalidade entre o número de vértices a serem processados. Portanto, quanto maior o número de vértices, tanto maior será a necessidade de processamento. Dessa maneira, pode-se admitir que uma redução percentual do número de vértices resulta na redução do custo computacional. Esse fato pode ser observado na tabela 3.

Tabela 3 – Análise da redução de número de vértices (ganho computacional)

Análise	IEEE 37 Barras	IEEE 123 Barras
Modelo completo (nº Vértices)	36	122
Modelo simplificado (nº Vértices)	10	22
Nº de chaves	4	11
Razão vértices/chaves	9,00	11,01
Redução	72,22%	81,97%

Fonte: Os autores (2022).

Uma importante observação da tabela 3 é a taxa de redução do número de vértices, acima de 70%, em ambos os casos. Nota-se também uma maior redução na rede simplificada, quanto maior for a razão entre vértices e chaves. Em outras palavras, quanto mais vértices entre as chaves, maior será a simplificação experimentada pela rede. Assim, pode-se ter um bom vislumbre da capacidade de simplificação da rede de distribuição, observando a razão entre vértices e chaves existentes na rede.

5 Resultados preliminares

O método foi proposto para simplificação de análise de redes de distribuição de energia elétrica. A proposta mostrou-se eficiente, tendo resultados de simplificação, acima de 70%, na redução da rede, alcançando mais de 80% de redução em sua complexidade.

A redução experimentada em ambas as redes de distribuição do Estudo de Caso, IEEE 37 Barras e IEEE 123 Barras, é substancial e, para fins de análise *a posteriori* de viabilidade de manobras, traz um significativo ganho computacional. Esse ganho é fundamental, para que se possa submeter a rede simplificada a sistemas de Inteligência Artificial ou *Machine learning*, que trabalham com algoritmos iterativos e várias repetições, tendo um custo computacional compatível com tais técnicas.

Com isso, abre-se um caminho de otimização de intervenções na rede de energia, permitindo assim

desenvolvimento de novas técnicas de otimização e novas pesquisas no desenvolvimento de conjunto de manobras otimizadas, melhorando o investimento e aumentando a confiabilidade dos sistemas.

Referências

CABRAL, R. S. **Estudo da variabilidade de medidas em redes complexas**. 2013. 128 f. Tese (Mestrado em Engenharia) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2013.

CHEN, B. *et al.* Planning approach for cross-regional optical transmission network supporting wide-area stability control services in power system. *In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON NETWORK INFRASTRUCTURE AND DIGITAL CONTENT*, 2018, Guiyang. **Proceedings** [...]. [s. l.]: IEEE, 2018. p. 105-109. DOI: 10.1109/ICNIDC.2018.8525534.

GUTIERREZ, F. *et al.* Vulnerability analysis of power grids using modified centrality measures. **Discrete Dynamics in Nature and Society**, p. 1-11, Apr. 2013. DOI: 10.1155/2013/135731.

INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS. **IEEE PES test feeder**. 2022. Disponível em: <https://cmte.ieee.org/pes-testfeeders/resources/>. Acesso em: 30 jan. 2022.

JACOB, R. *et al.* Algorithms for centrality indices. *In: BRANDES, U.; ERLEBACH, T. (eds.). Network Analysis*. Berlin: Springer, 2005. p. 62-82.

- JIN, S. *et al.* A novel application of parallel betweenness centrality to power grid contingency analysis. *In: IEEE INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON PARALLEL AND DISTRIBUTED PROCESSING*, 24., 2010, Atlanta. **Proceedings** [...]. [s. l.]: IEEE, 2010. DOI: 10.1109/IPDPS.2010.5470400. Disponível em: http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs_all.jsp?arnumber=5470400. Acesso em: 20 maio 2013.
- MELO S. R.; LIMA, B. S. Optimization of distribution network topology with genetic algorithms in GIS environment. *In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SISTEMAS ELÉTRICOS*, 2018, Niterói. **Proceedings** [...]. [s. l.]: IEEE, 2018. p. 1-6. DOI: 10.1109/SBSE.2018.8395669.
- NASIRUZZAMAN, A. B. M.; POTA, H. R.; ANWAR, A. Comparative study of power grid centrality measures using complex network framework. *In: POWER ENGINEERING AND OPTIMIZATION CONFERENCE*, 2012, Melaka. **Proceedings** [...]. [s. l.]: IEEE, 2012. p. 176-181. DOI: 10.1109/PEOCO.2012.6230856.
- NEWMAN, M. E. Analysis of weighted networks. **Physical Review E**, v. 70, n. 5, 2004a. DOI: 10.1103/PhysRevE.70.056131.
- NEWMAN, M. E. Fast algorithm for detecting community structure in networks. **Physical Review E**, v. 69, n. 6, 2004b. DOI: 10.1103/PhysRevE.69.066133.
- REIMAN, A. P. *et al.* Electric power distribution system model simplification using segment substitution. **IEEE Transactions on Power Systems**, v. 33, n. 3, p. 2874-2881, 2018. DOI: 10.1109/TPWRS.2017.2753100.
- VERMA, T.; ELLENS, W.; KOOIJ, R. E. Context-independent centrality measures underestimate the vulnerability of power grids. **International Journal of Critical Infrastructures**, v. 11, n. 1, p. 62-81, 2013. DOI: 10.1504/IJCIS.2015.067398.
- WANG, Z.; SCAGLIONE, A.; THOMAS, R. J. Electrical centrality measures for electric power grid vulnerability analysis. *In: IEEE CONFERENCE ON DECISION AND CONTROL*, 49., 2010, Atlanta. **Proceedings** [...]. [s. l.]: IEEE, 2010. p. 5792-5797.

