



RECONFIGURAÇÃO DE SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO COM O ALGORITMO DINÂMICO PRIM

Ana Paula Dobler Gunsch¹
Helton Fernando Scherer²

RESUMO

Diminuir custos e aumentar a qualidade da energia elétrica consumida no Brasil se tornou uma necessidade para o setor elétrico. A busca por uma configuração de rede mais inteligente se torna cada vez mais indispensável, a fim de garantir uma energia com mais qualidade, menores custos e perdas. Neste contexto, o estudo de reconfiguração das redes de distribuição tem se mostrado de grande importância para as concessionárias, uma vez que explora possibilidades de otimizar a transmissão de energia elétrica apenas rearranjando conexões, ao invés de realizar grandes investimentos. Nesse artigo, apresenta-se uma pesquisa realizada na temática de Reconfiguração de Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica (RSDEE), em que foram utilizados algoritmos simples, como o algoritmo guloso PRIM, juntamente com outras técnicas e ferramentas a fim de encontrar melhores topologias para o sistema de distribuição. Para validar o funcionamento do algoritmo implementado foram utilizados sistemas padronizados disponíveis na literatura, em que foi possível verificar um comportamento eficiente, gerando boas radiais para todos os sistemas testados.

Palavras-chave: algoritmo PRIM, topologia radial, reconfiguração.

INTRODUÇÃO

A sociedade moderna carece cada vez mais de energia elétrica, já que a mesma alimenta a maior parte das atividades desenvolvidas nos diversos setores econômicos. Essa crescente demanda pode sobrecarregar a rede de distribuição, fazendo concessionárias operarem nos limites e causando sérios prejuízos ao Sistema Elétrico de Potência (SEP), consumidores finais e demais serviços envolvidos.

O SEP está subdividido em Geração, Transmissão e Distribuição. A geração é responsável pela transformação das fontes naturais, como a água, em energia elétrica. A transmissão efetua a condução dessa energia até os centros de consumo. Por fim, a distribuição é feita quando se recebe a energia da transmissão, ocorrendo uma redução de tensão para então distribuí-la aos consumidores finais. Durante cada processo existem perdas responsáveis por parte da energia injetada no sistema não chegar ao consumidor final. Elas se dividem em: perdas técnicas ou não técnicas.

¹ Graduando do Curso de Engenharia Elétrica da Universidade Estadual do Oeste do Paraná - UNIOESTE, anagunschapg@gmail.com;

² Doutor pelo Curso de Engenharia de Automação e Sistemas da Universidade Federal de Santa Catarina - UFSC, hfscherer@gmail.com;



As perdas técnicas são aquelas ocasionadas pelos fenômenos de transporte da energia, os quais estão correlacionados à qualidade e configuração das redes de distribuição. Mensuradas através da diferença entre as perdas totais e as perdas técnicas, as não técnicas estão ligadas a fraudes, erros de medição e furtos de energia. Conforme a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) em 2019, as perdas técnicas somaram 7,33%, tornando-se imprescindível buscar maneiras de minimiza-las.

Dessa forma, o problema Reconfiguração de Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica (RSDEE) visa melhorias na rede, obtendo-se uma topologia mais eficiente, o que impacta diretamente na redução de perdas. Tem-se ainda mais benefícios caso esse processo esteja associado à redução de custos nos investimentos.

É importante ressaltar que a formulação matemática deste tipo de problema é não linear, combinando variáveis inteiras e contínuas em sua formulação. Com isso, se torna um problema extremamente difícil de ser resolvido de maneira ótima, além de necessitar de um elevado tempo computacional para chegar na solução.

As pesquisas nesta temática possuem vários objetivos, entre eles está a busca de algoritmos que consigam resolver o problema de RSDEE de uma maneira mais eficiente. Entre as opções, está a utilização de heurísticas, em que não existirá uma garantia de encontrar a solução ótima, entretanto, será possível resolver o problema de maneira rápida, podendo gerar soluções suficientemente boas para que sejam implementadas.

Neste trabalho, foi utilizado o algoritmo guloso PRIM (PRIM, 1957), combinado com benefícios da linguagem adotada para sua implementação (linguagem C), de tal maneira que fosse possível carregar informações de sistemas de distribuição e gerar rapidamente topologias possíveis para a operação.

METODOLOGIA

Para alcançar o objetivo proposto, de um algoritmo que resolva problemas de RSDEE, foi necessário implementar um algoritmo que pudesse receber dados de uma rede de distribuição e alocar as informações de maneira que ficasse evidente as conexões possíveis. O sistema é modelado como um grafo, formado por ramos e nós, em que os ramos representam as linhas de transmissão e os nós podem ser os postes, onde são alocadas as cargas que devem ser supridas com energia elétrica. O sistema com todas as informações de caminhos possíveis é dito malhado.



Após construir o sistema malhado, é necessário que sejam executadas rotinas para a escolha de uma topologia adequada para operação, dita radial. No trabalho de Kersting (2002), “Distribution System Modeling and Analysis” fica evidente os benefícios da configuração radial, uma vez que o fato de existir apenas um caminho para a energia fluir da subestação para o usuário facilita as análises de tensão, fluxo de corrente e, caso necessário, o inter rompimento de energia. Ademais, não só as configurações radiais podem ser utilizadas nos sistemas elétricos, como também os sistemas malhados, isto é, existem ramos em sua topologia. Esse tipo de configuração é comumente utilizada de maneira temporária a fim de realizar uma reconfiguração ou manutenção na rede (CAMILLO, *et al.*, 2016). Para Balamurugan e Srinivasan (2011) existem propostas de operar em condições regulares com o sistema em configuração malhada.

A primeira parte do trabalho se relaciona com a formulação matemática para o problema de reconfiguração de rede, encontrando uma topologia radial. A fim de obter uma configuração radial, a topologia deve obedecer a seguinte restrição:

$$n_{ij} = \sum_{(ij) \in \Omega_i} x_{ij} = n_b - 1 \quad (1)$$
$$x_{ij} \in \{0, 1\} \quad \forall (i, j) \in \Omega_i \quad (2)$$

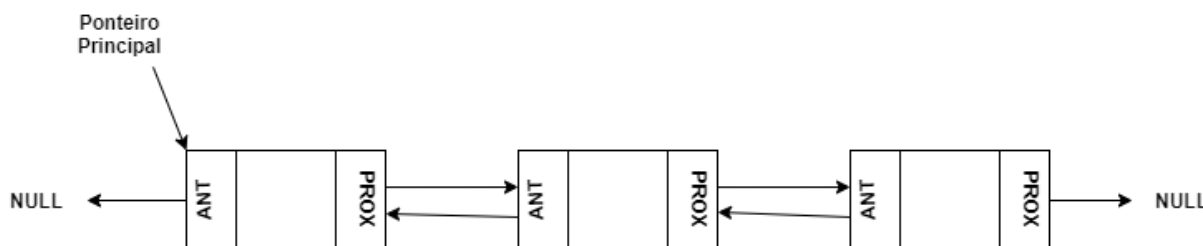
Na formulação matemática, n_{ij} é o número de ramos que o sistema radial possui, a variável x_{ij} representa o estado de cada ramo, se x_{ij} assumir valor 1 significa que o ramo está no circuito, se assumir valor 0, que o ramo não está no circuito. Os parâmetros n_b e Ω_i , representam respectivamente, o número de barras e o conjunto de ramos do sistema. A equação (1) é a condição necessária para que o sistema assuma configuração radial e a equação (2) representa os valores que x_{ij} pode assumir, identificando quais ramos farão parte do sistema.

A metodologia utilizada para resolver o problema proposto (1) atendendo as restrições (2) será o algoritmo guloso PRIM. Para tornar o algoritmo mais eficiente, foi utilizada a linguagem C, aproveitando de uma estrutura que utiliza ponteiros, formando assim listas duplamente encadeadas. O uso de ponteiros possibilita a alocação dinâmica da memória. Dessa forma, o espaço ocupado é proporcional ao número de elementos da lista, os quais estão duplamente encadeados através de dois ponteiros: um apontando para o próximo elemento e outro para o anterior, tornando-se possível percorre-las em ambos os sentidos e



fazer a inserção de novos elementos de maneira ordenada. A Figura 1 ilustra esse conceito de lista duplamente encadeada.

Figura 1 - Lista duplamente encadeada.



Fonte: elaborado pelos autores.

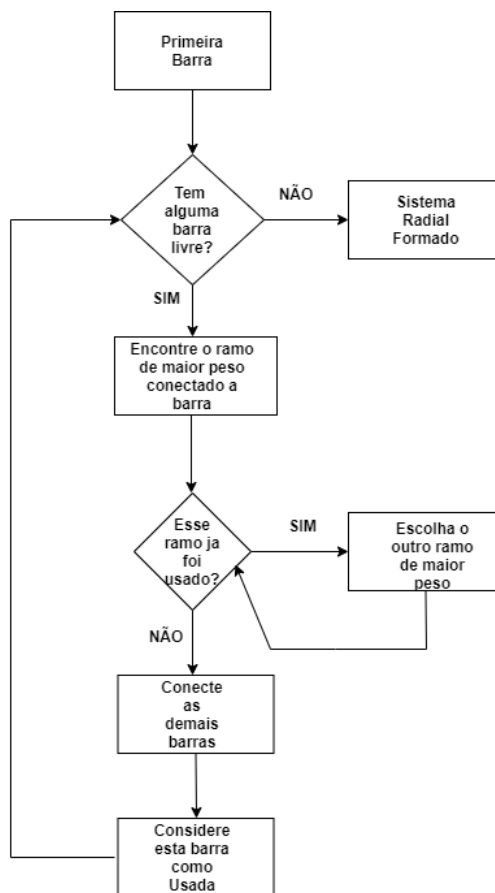
Partindo das informações do sistema malhado, o algoritmo utilizado escolhe a melhor opção por etapa de processamento, sem considerar a solução geral. O PRIM pretende determinar um sistema radial, em que todas as barras estejam conectadas, garantindo que nenhuma permaneça ilhada. Para sua aplicação, é necessário que todos os ramos estejam fechados (chaves fechadas), mantendo todas as barras conectadas, para então atribuir-lhes peso. Em seguida, é necessário desconectá-los (chaves abertas), a fim de, a partir da primeira barra (subestação), realizar uma escolha míope, analisando qual o ramo de maior peso conectado a ela. Em seguida, a chave do ramo de maior peso é fechada, conectando uma nova barra. Esse procedimento se repete até que todas as barras estejam interligadas radialmente. Na Figura 2, tem-se um fluxograma do Algoritmo Prim.

REFERENCIAL TEÓRICO

Segundo o livro de SCHILDT, “*C – The Complete Reference*”, a linguagem C foi inventada e implementada primeiramente por Dennis Ritchie, na década de 70. Com o passar dos anos e a popularidade de microcomputadores, um grande número de códigos em linguagem C foi implementado. A linguagem C é dita de nível médio, uma vez que combina elementos da linguagem de alto nível com facilidades da linguagem *assembly*. Possui alta portabilidade, isto é, é possível adaptar um programa escrito para um computador para outro, além de ser uma das linguagens mais populares entre programadores, visto que foi feita para facilitar a vida do programador.



Figura 2- Fluxograma do algoritmo PRIM



Fonte: elaborado pelos autores.

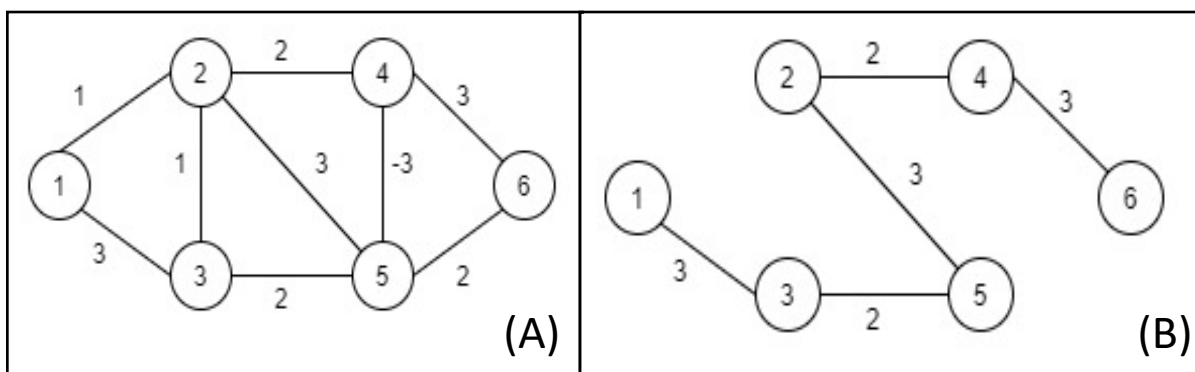
Além disso, a utilização de ponteiros também é um excelente recurso na programação, já que fornecem os meios pelos quais as funções podem modificar seus argumentos, além de auxiliarem na alocação dinâmica. Ainda, é importante destacar os benefícios trazidos pela alocação dinâmica utilizada na linguagem C, visto que não é preciso utilizar memória além daquela que realmente está sendo usada, por exemplo, as listas duplamente encadeadas. Estes fatores combinados impactaram positivamente na velocidade de funcionamento do algoritmo proposto.

O algoritmo PRIM foi retratado no trabalho “*Shortest connection networks and some generalizations*” (PRIM, 1957), no qual se apresenta uma metodologia para encontrar a árvore geradora mínima de um grafo. Esse grafo seria estruturado por N vértices (nós) e por pesos. Após ser aplicado a metodologia proposta pelo algoritmo, o sistema apresenta configuração radial, formado por todos os vértices (nós) e N-1 ramos. Na Figura 3 (A) é possível identificar as possíveis conexões, os nós e os ramos com os respectivos pesos. Ao aplicar o método do



algoritmo PRIM, tem-se uma configuração radial, obedecendo as restrições impostas pelo mesmo, vista na Figura 3 (B).

Figura 3 – Possíveis Conexões (A) e Sistema Radial (B)



Fonte: elaborado pelos autores.

Ao aplicar o método do algoritmo PRIM, tem-se uma configuração radial, obedecendo as restrições impostas pelo mesmo. Na figura 4 é possível visualizar um exemplo de topologia radial encontrada pelo PRIM.

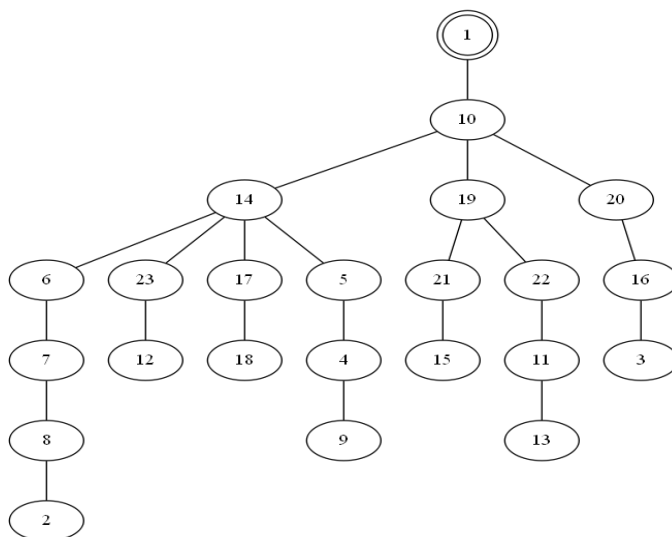
RESULTADOS E DISCUSSÃO

A seguir são dados os resultados obtidos para os sistemas de 23, 33, 51 e 136 barras após a aplicação do algoritmo PRIM.

O sistema de 23 barras, apresentado por Nahman e Peric em 2008, possui uma barra ligada à geração (barra da subestação), 22 barras de carga e 35 ramos. Ao ser aplicado o algoritmo PRIM, obteve-se como configuração radial a Figura 4, com as 23 barras e 22 ramos conectados.



Figura 4 – Topologia Radial para o sistema de 23 barras



Fonte: elaborado pelos autores.

O sistema de 33 barras foi apresentado por Baran e Wu em 1989 e possui uma barra ligada à geração (barra da subestação), 32 barras de carga e 37 ramos. Ao ser aplicado o algoritmo PRIM, obteve-se como configuração radial a figura 5, com as 33 barras e 32 ramos conectados.

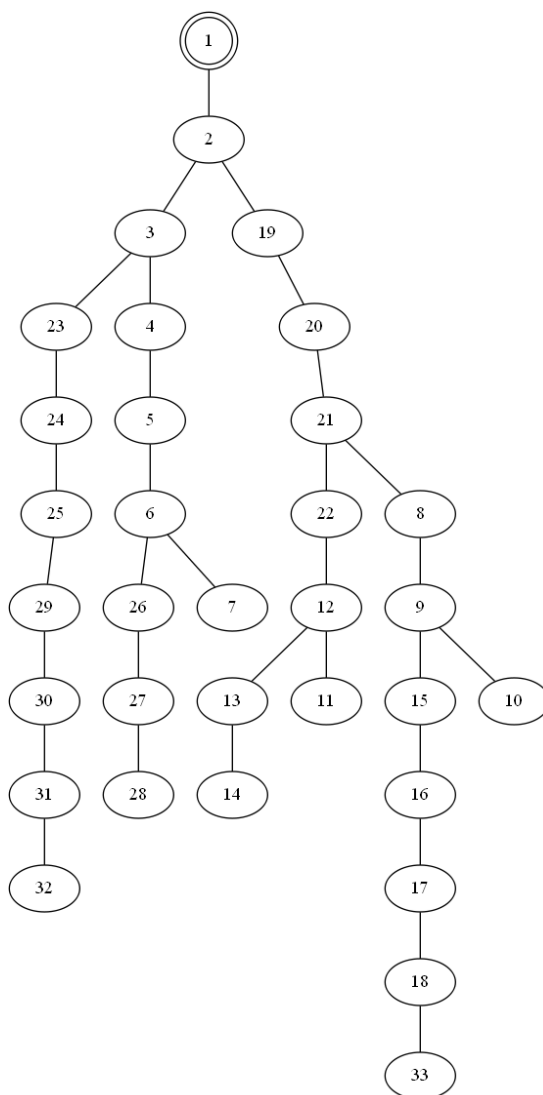
O sistema de 49 barras foi apresentado por Borniotti em 2018 como uma adaptação do sistema de 136 barras. Possui uma barra ligada a geração (barra da subestação), 48 barras de carga e 76 ramos. Ao ser aplicado o algoritmo PRIM, obteve-se como configuração radial a figura 6, com as 49 barras e 48 ramos conectados.

O sistema de 51 barras foi apresentado por Miranda *et al.*, 1994. Possui a barra de número 51 ligada a geração, 50 barras de carga e 61 ramos. Ao ser aplicado o algoritmo PRIM, a topologia radial gerada é a figura 7, com 51 barras e 50 ramos conectados.

O sistema de 136 barras foi apresentado por Montavani *et al.*, 2000. É considerado um sistema de grande porte. Possui a barra de número 1 ligada a geração, 135 barras de carga e 149 ramos. Obteve-se uma topologia radial com 136 barras usadas e 135 ramos conectados com a seguinte ordem de barras usadas (Figura 8).



Figura 5 – Topologia radial para o sistema de 33 barras

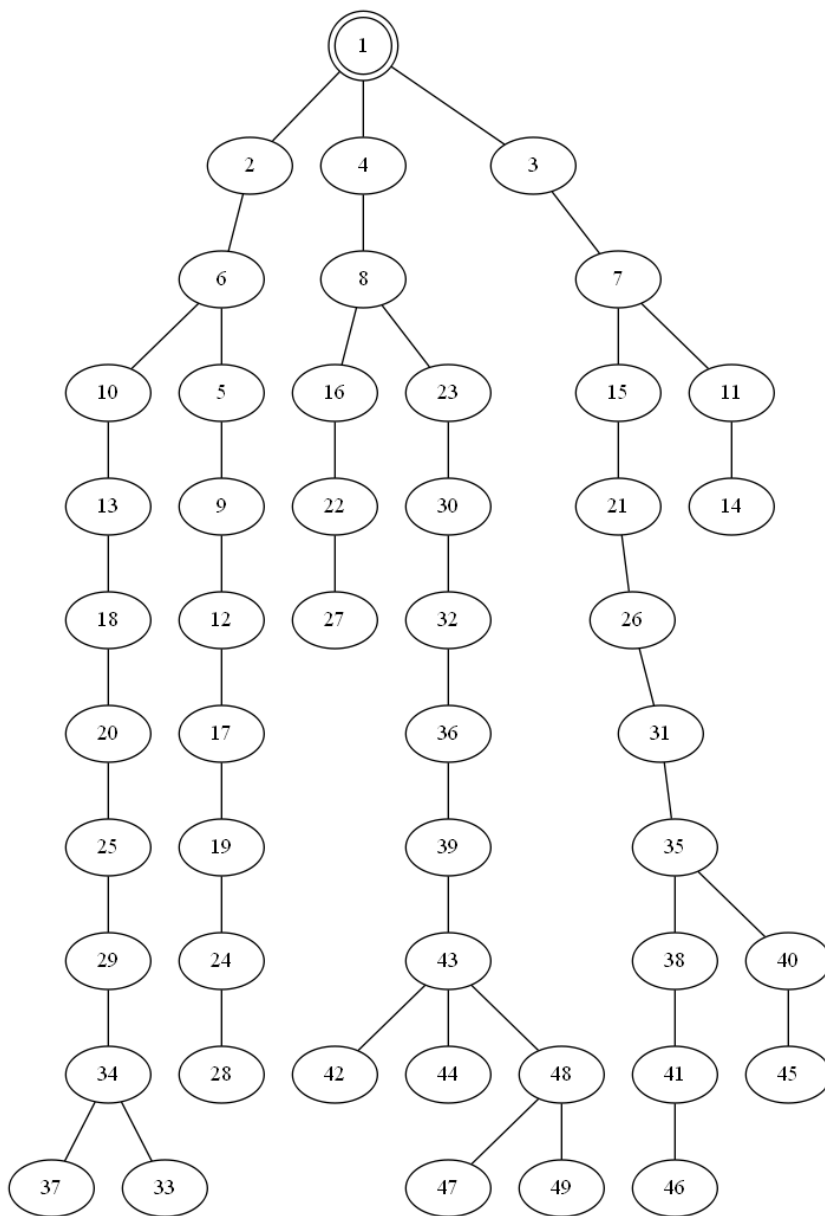


Fonte: elaborado pelos autores.

Para o sistema de 415 barras, também considerado um sistema de grande porte. Composto por 415 barras, sendo a barra de número 1 conectada a geração e 414 barras de carga, além de 473 ramos. Ao ser aplicado o algoritmo PRIM, obteve-se uma boa topologia radial com 415 barras e 414 ramos.



Figura 6 - Topologia radial para o sistema de 49 barras



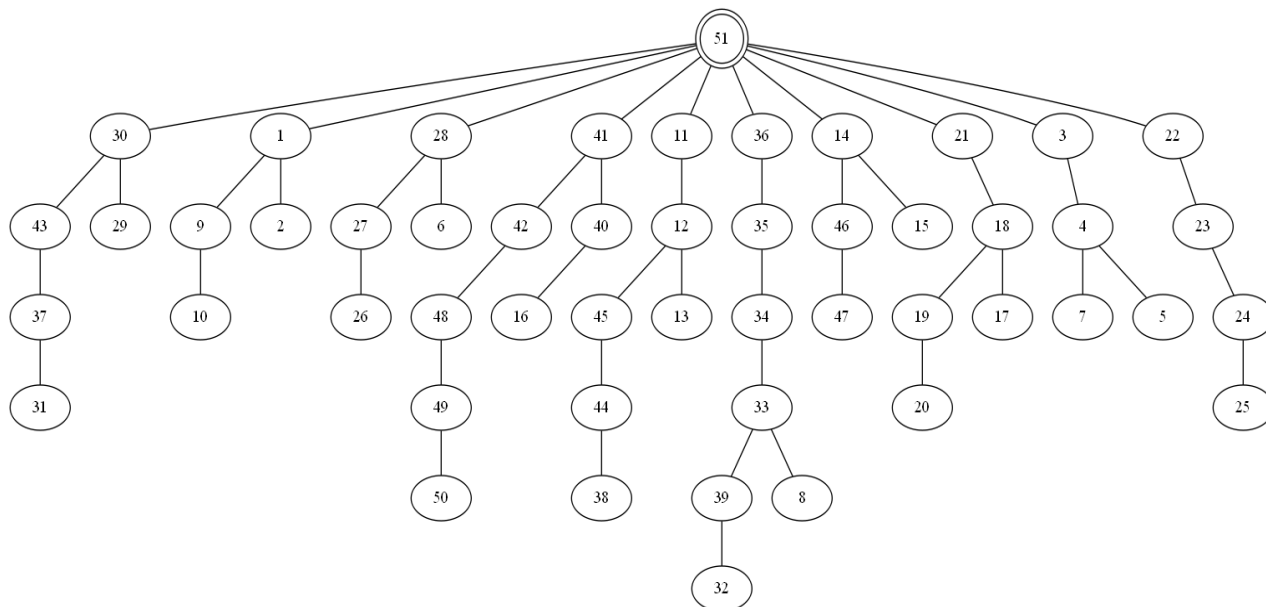
Fonte: elaborado pelos autores.

Em conclusão dos resultados, é possível verificar que o algoritmo proposto consegue encontrar uma solução radial para todos os sistemas. É importante ressaltar que este resultado não é ótimo, mas um resultado possível de ser aplicado na rede. A próxima etapa desta pesquisa irá na direção de implementar técnicas que criem variações nos pesos do sistema, de tal maneira que o PRIM encontre outras possíveis soluções. Por fim, ao gerar um conjunto de soluções distintas, será possível realizar comparações relacionando elementos como perdas



elétricas, de tal maneira que se consiga encontrar as topologias mais eficientes para cada sistema.

Figura 7 – Topologia Radial para o Sistema de 51 barras



Fonte: elaborado pelos autores.

Figura 8 – Sistema de 136 Barras

001 - 018 - 019 - 020 - 021 - 023 - 025 - 026
027 - 028 - 029 - 030 - 031 - 136 - 039 - 036
037 - 038 - 099 - 135 - 134 - 133 - 132 - 056
055 - 054 - 053 - 052 - 049 - 048 - 131 - 130
128 - 032 - 126 - 062 - 124 - 002 - 003 - 004
063 - 108 - 123 - 005 - 122 - 098 - 006 - 094
093 - 092 - 064 - 047 - 091 - 007 - 076 - 090
089 - 097 - 077 - 107 - 046 - 065 - 106 - 066
009 - 078 - 067 - 079 - 087 - 068 - 105 - 011
051 - 050 - 069 - 044 - 080 - 081 - 071 - 061
060 - 074 - 043 - 100 - 059 - 082 - 101 - 014
041 - 040 - 102 - 104 - 088 - 086 - 096 - 109
033 - 034 - 058 - 045 - 095 - 013 - 115 - 116
075 - 083 - 084 - 129 - 070 - 015 - 057 - 111
016 - 012 - 110 - 112 - 010 - 024 - 118 - 113
114 - 119 - 125 - 072 - 073 - 022 - 008 - 120
117 - 127 - 085 - 017 - 103 - 035 - 121 - 42

Fonte: elaborado pelos autores.



CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste trabalho foram apresentados os resultados obtidos até o momento com a implementação de um algoritmo para o problema de RSDEE que utiliza um algoritmo guloso PRIM, em que foi utilizada linguagem C, aproveitando de benefícios da linguagem para realizar uma implementação com alocação dinâmica e listas duplamente encadeadas para representar os sistemas malhados e radiais

Foram realizados testes com sistemas radiais de 23, 33, 49, 51, 136 e 415 barras, demonstrando boa aplicabilidade para problemas de Reconfiguração do Sistema de Distribuição de Energia Elétrica.

Para a sequência dos trabalhos, serão implementadas técnicas heurísticas que permitam ampliar o espaço de busca de soluções, de tal maneira que o algoritmo não fique parado em soluções locais, mas que consiga realizar buscas mais amplas a fim de encontrar topologias mais eficientes para os sistemas de distribuição.

REFERÊNCIAS

ANEEL. AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Perdas de Energia Elétrica na Distribuição**. ed. 1, 2020. Disponível em:

<<https://www.aneel.gov.br/documents/654800/18766993/Relat%C3%B3rio+Perdas+de+Energia+2019.pdf/6cb0bf36-4074-bbc3-d15d-ed370f44b34b>> Acesso em: 15 nov. 2020.

BALAMURUGAN, K.; SRINIVASAN, D. Review of power flow studies on distribution network with distributed generation. **IEEE Power Electronics and Drive Systems**, Singapura, p. 411-417, dez. 2011.

BORNIOTI, F. B. **Algoritmo dinâmico PRIM aplicado ao planejamento da expansão de redes de distribuição aéreas de média tensão**. 2018. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade Estadual do Oeste do Paraná – Unioeste. Foz do Iguaçu, 2018.

CAMILLO, M. *et al.* **Determination of Switching Sequence of Service Restoration in Distribution Systems: application and analysis on a real and large-scale radial system**. 2016.



EPE. EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Balço Energético Nacional**: relatório síntese. 2020. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-479/topico-521/Relato%CC%81rio%20Si%CC%81ntese%20BEN%202020-ab%202019_Final.pdf>. Acesso em: 15 nov. 2020.

KERSTING, W. H. **Distribution System Modeling and Analysis**. Boca Raton: CRC Press, 2002, p. 270.

MASSIGNAM, J. A. D. *et al.*, Modeling issues on load flow calculation for meshed distribution systems, **IEEE Manchester PowerTech**, Manchester, p. 1-6, 2017.

MIRANDA, V.; RANITO, J. V.; PROENÇA, L. M. Genetic algorithm in optimal multistage distribution network planning. **IEEE Transactions on Power Systems**, v. 9, n. 4, p. 1927-1933, nov. 1994.

NAHMAN, J.; PERIC, D. Optimal planning of radial distribution networks by simulated annealing technique. **IEEE Transactions on Power Systems**, v. 23, n. 2, p. 790-795, maio 2008.

NUNES JUNIOR, H. L. M. *et al.*, Reconfiguração de Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica com a Aplicação do Algoritmo Dinâmico Guloso. In: 12th Latin-American Congress on Electricity Generation and Transmission, 2017, Mar Del Plata. **Anais...** Mar Del Plata: CLAGTEE, 2017.

POSSAGNOLO, L.H.F.M. **Reconfiguração de sistemas de distribuição operando em vários níveis de demanda através de uma meta-heurística de busca em vizinhança variável**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade Estadual Paulista - UNESP. Ilha Solteira: 2015.

PRIM, R. C. Shortest connection networks and some generalizations. **The Bell System Technical Journal**, v. 36, n. 6, p. 1389-1401, nov. 1957.

SCHILDT, H. C – **The Complete Reference**. 3. ed. São Paulo: Makron Books, 1996.