

Análise de algoritmos de agrupamento aplicados aos problemas de reconfiguração de rede de distribuição

Thiago Eliandro de Oliveira Gomes*, Vinícius Jacques Garcia*
Laura Lisiane Callai dos Santos*, Rui Anderson Ferrarezi Garcia**

*Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, Rio Grande do Sul,
Brasil (e-mail: thiago.gomes@acad.ufsm.br; viniciusjg@ufsm.br; laura.santos@ufsm.br).
**Companhia Estadual de Distribuição de Energia Elétrica, Porto Alegre, Rio Grande do Sul,
Brasil (e-mail: ruiifg@ceee.equatorialenergia.com.br)

Abstract: In order to seek alternatives to accelerate the solution process in a reconfiguration problem, this article uses the notions of graph theory to propose the exploration of different techniques oriented to the topological decomposition of a distribution system and the search for paths with lower cost. The methodological process is divided into the presentation of algorithms for topological reduction, followed by the presentation of alternatives to the search for shortest paths. The results showed better performance for the decomposition performed by the Malgrange algorithm, bringing brevity to the process and similarity between the results of the short path search algorithms.

Resumo: Com a finalidade de buscar alternativas para aceleração do processo de solução em um problema de reconfiguração, este artigo vale-se das noções da teoria de grafos para propor a exploração de distintas técnicas orientadas à decomposição topológica de um sistema distribuição e à busca de caminhos com menor custo. O processo metodológico foi dividido na apresentação dos algoritmos para redução topológica, seguidos da apresentação das alternativas à busca de caminhos mínimos. Os resultados evidenciaram melhor desempenho para decomposição realizada pelo algoritmo de Malgrange trazendo brevidade ao processo e similaridade entre os resultados dos algoritmos de busca por caminhos curtos.

Keywords: Reconfiguration; Theory of graphs; Cluster analysis; Partitioning; Shortest path algorithm; Radial network.

Palavras-chaves: Reconfiguração; Teoria dos grafos; Análise de agrupamentos; Particionamento; Algoritmo de caminhos mínimos; Rede radial.

1. INTRODUÇÃO

O aumento da demanda por eletricidade dos últimos anos (Peyghami, Palensky and Blaabjerg, 2020) é um desafio imposto à indústria de energia em promover um planejamento para a garantir um determinado nível de serviço no fornecimento de energia aos seus consumidores. Esta entrega é realizada por meio do sistema elétrico de potência (SEP), que deve manter sua operação com continuidade e qualidade (Bichels, 2018; Tur, 2020) sem que eventuais falhas comprometam as condições operacionais estabelecidas e os limites de desempenho desejados (Zeng *et al.*, 2017; Peyghami, Palensky and Blaabjerg, 2020; Tur, 2020).

Os grafos, são comumente usados para especificar relações entre os objetos e com aplicações nas mais diversas áreas, e pode ser descrito como um conjunto conectado de objetos, chamados vértices (V) e arestas (E), dos quais se unem em pares, podendo ser usados para representar os mais diversos tipos de relações (Li *et al.*, 2016; Nicoletti and Hruschka Jr, 2018; Szwarcfiter, 2018).

Dado que os circuitos elétricos representam a conexão de pontos uns aos outros, havendo a transferência da eletricidade por um caminho que vai da subestação ao usuário final, a estrutura e as características operacionais da rede de distribuição permitem que ela seja comparada a um grafo interligado e estruturado em árvore (rede radial em operação) e seja aplicado um processo sistemático para caminhar pelos vértices e arestas do mesmo grafo até uma solução ideal para problema de planejamento e reconfiguração da rede de distribuição (Sarkar *et al.*, 2015; Li *et al.*, 2016; Xue *et al.*, 2016; Szwarcfiter, 2018; Zhang *et al.*, 2018).

Este artigo é baseado na estrutura determinada pela teoria de grafos para propor a exploração de distintas técnicas aplicadas a decomposição topológica da rede e à busca por caminhos de valores mínimos, com intenção de aceleração do processo de busca da solução ótima em um problema de reconfiguração.

A decomposição em k subconjuntos proporciona redução do espaço de busca para a exploração das informações relativas à topologia da rede, sob a perspectiva de viabilizar a definição de uma solução com um tempo computacional aceitável.

A abordagem de tornar um grafo em um ou mais subgrafos segue a mesma correspondência observada na formação de *clusters* e, portanto, permite então aplicar algoritmos aos grafos para identificação de características similares ao problema de agrupamento de dados (Garza-Fabre, Handl and Knowles, 2018; Liu and Barahona, 2020).

Esta pesquisa, além da aplicação na construção da árvore correspondente às topologias de rede para representar uma rede radial, vale-se das noções da teoria de grafos para agrupar os vértices de um dado grafo (Nicoletti and Hruschka Jr, 2018; Poudel and Dubey, 2018; Xiaoming *et al.*, 2018; Mohamad *et al.*, 2019; Gautam *et al.*, 2020; Liu and Barahona, 2020) na redução do tempo computacional.

A análise é construída sob a perspectiva de implantação para o melhoramento do desempenho de um sistema de distribuição elétrica e preparada para receber a fase de implementação da reconfiguração da rede.

2. ALGORITMOS EXPLORADOS

O processo de formação de uma base teórica requer diferentes conhecimentos. Logo o estudo das mais variadas ferramentas e suas características gerais, dão o embasamento adequado ao desenvolvimento de pesquisas.

Neste contexto, a exploração do desempenho de distintas técnicas orientadas à decomposição da topologia de um sistema distribuição e à busca daqueles caminhos que apresentem os menores valores, permitem a criação de alternativas complementares, dos quais podem ser aplicadas a problemas diretamente relacionados a escolha de soluções ótimas.

2.1 Decomposição de grafo

O método Malgrange emprega uma estratégia que consiste em realizar o processo de decomposição da rede, agrupando barras e clientes com a definição de um ou mais subconjuntos do grafo (subgrafo) para o agrupamento formado (Gautam *et al.*, 2020), mantendo as relações de adjacência (conexidade) do grafo em sua forma original, ou seja, apenas determinando em que subgrafo cada vértice se posiciona (Boaventura Netto and Jurkiewicz, 2017).

Este algoritmo tem por finalidade determinar a separação das regiões fortemente conexas (f-conexas) de um grafo, com base na construção de fechos transitivos de um vértice, seguida da realização da interseção dos grupos formados e, portanto, um subconjunto de vértices. Esse processo é iterativo, percorrendo todos os elementos de uma matriz de adjacência à procura das vizinhanças dos vértices encontrados até que todos os vértices pertençam a algum grafo f-conexo e não forem encontrados novos vértices a serem incluídos (Boaventura Netto and Jurkiewicz, 2017; Szwarcfiter, 2018).

2.2 Algoritmos de Agrupamentos

O agrupamento de dados é uma ferramenta para análise exploratória de dados, que tem o objetivo de identificar

características comuns ou grupos de objetos homogêneos entre si, apoiados no conceito da similaridade entre os dados, o que permite ao segmento de energia elétrica, serem usadas para agrupar os comportamentos de consumidores (Garza-Fabre, Handl and Knowles, 2018; Rajabi *et al.*, 2020).

Quanto à qualidade de energia, técnicas de *cluster* são voltadas ao aprimoramento das avaliações de qualidade de energia, ou então, para detectar uso anormal de energia das quais podem comprometer a confiabilidade da rede elétrica (Sharma and Singh, 2015; Jasiński, Sikorski and Borkowski, 2019).

Enquanto a formação de agrupamento é permitida com a escolha da medida e na construção de uma matriz de similaridade de um conjunto de dados, de uma perspectiva diferente, a matriz de similaridade também pode ser equiparada a matriz de adjacência de um grafo totalmente conectado (Liu and Barahona, 2020).

Para a análise, são estudados os seguintes algoritmos: a) algoritmo *K-means*, b) algoritmos hierárquicos, c) algoritmo baseado em rede neural *Self-Organizing Map* (SOM), e d) algoritmo não paramétrico baseado em densidade DBSCAN, além explorar combinações entre os algoritmos (Granell, Axon and Wallom, 2015; Wang *et al.*, 2017; Cembranel *et al.*, 2019; Pan and Tan, 2019; Panapakidis and Moschakis, 2019).

Clássica técnica de agrupamento por similaridade, o algoritmo *k-means* está baseado em um método iterativo para partição de um conjunto de n -número de observações em k *clusters* (Sharma and Singh, 2015; Cembranel *et al.*, 2019; Panapakidis and Moschakis, 2019).

No algoritmo *K-means*, diferentes pontos iniciais (centróides) podem gerar resultados diferentes e, portanto, não há garantia de que o algoritmo encontrará a melhor partição de dados. Outro ponto, é que o *k-means* necessita previamente de um número de *clusters* como dados de entrada (Cembranel *et al.*, 2019). Todavia, o seu aspecto da exploração na literatura, faz referência do sucesso da aplicação em outras pesquisas (Cembranel *et al.*, 2019; Panapakidis and Moschakis, 2019).

Já o algoritmo hierárquico, cria uma decomposição hierárquica formada de um determinado conjunto de dados, podendo ser aglomerativo, que produz uma árvore ou dendrograma, ou divisivo, que pode ser cortada em qualquer nível que permita obter os *clusters* correspondentes (Ramos *et al.*, 2015; Rajabi *et al.*, 2020).

A principal diferença a abordagem aglomerativa e divisiva, está em, a primeira mescla os objetos ou *clusters* que estão próximos uns dos outros, enquanto na segunda, a cada iteração sucessiva, um *cluster* é dividido em *clusters* menores (Rajabi *et al.*, 2020).

Para Rajabi *et al.* (2020) o agrupamento hierárquico é um algoritmo mais flexível, mas sua resolução normalmente é mais onerosa do ponto de vista computacional quando comparada a complexidade linear do *K-means*.

Também, existem os algoritmos baseados em densidade, que, ao invés de especificar o número do *cluster* como em *k-means* e algoritmos hierárquicos, o algoritmo de *clustering* baseado

em densidade, tem como ideia geral, agrupar pontos que estão compactados e os considera como *clusters* as regiões de alta densidade no espaço, marcando pontos como *outliers* que ficam isolados em regiões de baixa densidade (Ramos *et al.*, 2015; Yang *et al.*, 2019).

O *Density-Based Spatial Clustering of Applications with Noise* (DBSCAN) forma *clusters* de maneira que cada ponto de dados deva consistir em pelo menos, um número mínimo de pontos em sua vizinhança, definida por um determinado raio (*eps*) (Sharma and Singh, 2015) e permite identificar grupos de diferentes formatos topológicos.

Já o SOM (anacrônico do inglês *Self-organizing Map*) trata-se de um algoritmo baseado em uma rede neural $M \times N$ que mapeia ou projeta uma alta dimensional em um espaço bidimensional. O algoritmo organiza os dados de acordo com suas semelhanças e durante a iterações, os dados são alocados e realocados juntos ou próximos (Cembranel *et al.*, 2019).

2.3 Algoritmos de busca em grafos

O problema de reconfiguração do sistema de distribuição caracteriza-se como um caso de Programação Não Linear Inteira Mista e, portanto, um problema de formulação básica não linear e não trivial, necessitando do uso de recursos computacionais e técnicas para resolvê-lo, por tratar de um problema complexo de otimização que inclui variável combinatória (Raut and Mishra, 2017; Belazzoug, Sebaa and Nouri, 2018; Gangwar, Singh and Chakrabarti, 2019; Gerez *et al.*, 2019; Cikan and Kekezoglu, 2021).

Encontrar uma solução ideal para este problema em um curto espaço de tempo é uma tarefa desafiadora, difícil de formular e igualmente lento na convergência, e muitos métodos heurísticos e meta-heurísticos têm sido desenvolvidos e aperfeiçoados como alternativa aos métodos tradicionais (Raut and Mishra, 2017; Gangwar, Singh and Chakrabarti, 2019; Cikan and Kekezoglu, 2021).

Um dos métodos mais comuns para se resolver o problema de reconfiguração da rede de distribuição, é pesquisar exaustivamente todas as combinações possíveis. Contudo, em razão do grande espaço de busca e à natureza dinâmica das cargas elétricas, técnicas de busca exaustiva acabaram não sendo eficazes e eficientes no caso de sistemas de distribuição elétrica (Gautam *et al.*, 2020).

Logo, numa rede de distribuição, há múltiplos pontos de abastecimento, tornando o problema de reconfiguração ótima da rede, praticamente em um problema de encontrar a minimização da floresta de extensão (Jakus *et al.*, 2020).

O primeiro algoritmo destinado a este problema, trata-se do algoritmo de árvores geradoras de Kruskal. Para um grafo representativo de uma rede $R(V, E)$ conectado, pode ter várias árvores geradoras, cuja definição é dada como um subconjunto do grafo, com um número mínimo de arestas conectando todos os vértices (ou nós). Cada uma das arestas do grafo R tem certos valores ou pesos relacionados diretamente ao problema, dos quais são somados para determinar a árvore de

abrangência mínima (AGM) (Sarkar *et al.*, 2015; Mohamad *et al.*, 2019; Gautam *et al.*, 2020).

O algoritmo de Kruskal é usado para encontrar a árvore geradora aleatória mínima para um grafo conectado, que consiste em selecionar uma aresta por vez, adicionada repetidamente à solução em ordem crescente de seus pesos, incorporando a um subgrafo vazio criado, até que o grafo contenha todos os vértices conectados, e minimizado o peso total das arestas (Sarkar *et al.*, 2015; Mohamad *et al.*, 2019; Jakus *et al.*, 2020).

A busca em largura é mais um dos métodos básicos pertencentes a teoria dos grafos. Seu processo de busca refere-se ao acesso a cada vértice do restante dos vértices do grafo e seu princípio de busca se dá primeiro aos nós adjacentes (Xue *et al.*, 2016).

O caminho desce na árvore por processo denominado ordem de nível, utilizando o critério de fila, cujo objetivo é caminhar no grafo, de modo a visitar todos os vértices e arestas, evitando, contudo, repetições desnecessárias de visitas a um mesmo vértice ou aresta (Szwarcfiter, 2018).

Da mesma forma que os demais algoritmos de busca, o algoritmo de Floyd-Warshall calcula os menores pesos de todos os caminhos que conectam um par de pontos, mas o faz em simultâneo para todos os pares de pontos. Outro ponto diferencial deste algoritmo é que ele aceita pesos negativos, enquanto os demais não permitem (Ramadhan, Siahaan and Mesran, 2018; Zhang *et al.*, 2018).

Durante o processo de execução o algoritmo usa a matriz de adjacência para armazenar arestas ao encontrar e encontrar caminho mais curto entre quaisquer dois pontos, somando os pesos destas arestas. Ele compara todos os caminhos possíveis no grafo e estima a seleção do caminho mais curto a cada estágio entre dois vértices até que seja conhecida o valor ótimo (Ramadhan, Siahaan and Mesran, 2018; Zhang *et al.*, 2018).

Outros dois algoritmos são os algoritmos de Dijkstra e Bellman-Ford, tem em seu processo, a ideia básica em determinar um subconjunto de vértices, tal que, em cada passo, seja construído a floresta de caminhos mínimos de v_1 para os demais vértices. Ambos algoritmos realizam sucessivas aproximações das distâncias até finalmente chegar na solução, isto é, iterativamente, um novo vértice é agregado a V' , finalizando quando se atinja $V' = V$. Todavia, ao contrário dos algoritmos de Bellman-Ford e Floyd-Warshall, o Dijkstra não aceita pesos negativos (Szwarcfiter, 2018). De maneira simples, ambos os algoritmos oferecem a menor distância entre um nó inicial e um nó que se deseja chegar do grafo.

Após a exposição dos conceitos dos quais dão a sustentação teórica a respeito das técnicas investigadas, a seção seguinte destina-se à apresentação da metodologia aplicada ao desenvolvimento da pesquisa, bem como as características gerais que os descrevem.

3. METODOLOGIA

Para atingir o seu objetivo, o processo de desenvolvimento da pesquisa trouxe como base uma arquitetura dividida nos

seguintes pilares: (a) apresentação das técnicas para redução do grafo e (b) apresentação dos algoritmos destinados à busca em grafos.

No primeiro estágio, com base na estrutura de grafos conectados em árvore, para realizar a decomposição dos dados, distintos algoritmos de *cluster* e o algoritmo de Malgrange foram usados, visando redução da dimensionalidade do espaço de busca para que o processo de reconhecimento da topologia se torne mais rápido.

Em seguida são apresentados algoritmos que visam a busca por caminho mínimo e, com isto, determinar o menor caminho possível entre chaves adjacentes candidatas as mudanças de *status* (aberto ou fechado) tornando o processo mais eficiente durante a busca para obter o estado de operação ideal da rede de distribuição.

No passo seguinte, a estratégia de reconfiguração é implantada a partir da estrutura de subgrafos, seguida da combinação estratégica ideal de trocas de estado das chaves em duas etapas, o fechamento de uma acompanhado pela abertura de outra. Todavia, esta pesquisa não tem por objetivo implementar este passo, portanto, não houve aplicação.

A pesquisa recorreu ao tradicional Sistema de teste IEEE 37-barras (Fig. 1) como sistemas de amostra, desenvolvido para fins acadêmicos.

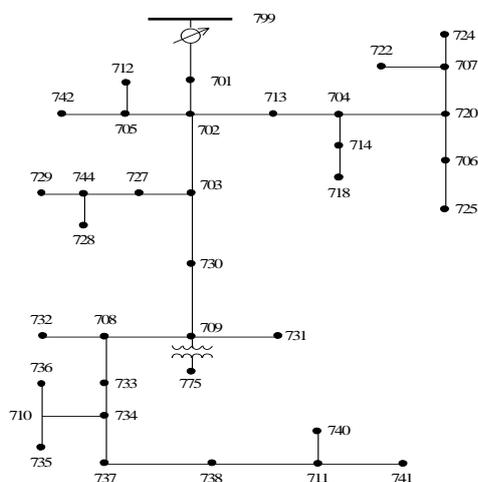


Fig. 1 Sistema teste IEEE 37-barras

Para análise da sensibilidade da alteração do número de combinações possíveis entre as chaves candidatas a reconfiguração, o cálculo é dado por (1), a seguir apresentada.

$$C_n^p = \frac{n!}{p!(n-p)!} \quad (1)$$

Em que n é número total de chaves do sistema e p refere ao número de chaves abertas durante o sistema. O sistema apresentou 13 chaves (8 chaves NF e 5 chaves NA).

Apresentados o procedimento metodológico embasado nos conceitos expostos na seção 2, tem-se a implantação dos algoritmos em estudo, sendo apresentados seus resultados na sequência. Para os procedimentos, foram combinados o uso da linguagem em *Python* e o *Software Orange*, também construído sob aspectos da linguagem *Python*.

4. RESULTADOS

O primeiro estudo, se refere a implementação dos algoritmos para a realização da partição do grafo em subgrafos, dos quais seus resultados são apresentados na Tabela 1. Vale destacar que durante a utilização dos algoritmos, o agrupamento das linhas de distribuição foi de acordo com suas características geográficas e não técnicas.

Tabela 1. Classificação pelo Método Malgrange

Agrupamento	Barras
Bloco 1	{775, 799, 701, 702, 703, 704, 705, 706, 707, 708, 709, 712, 713, 714, 718, 720, 722, 724, 725, 727, 728, 729, 730, 731, 732, 733, 742, 744}
Bloco 2	{736, 737, 738, 740, 741, 710, 711, 734, 735}

O método classificou as barras em dois blocos, com 28 e 9 barras.

O *cluster K-means* requer previamente a determinação do número de *cluster* e, portanto, o método Elbow, representado graficamente na Fig. 2, traz o valor ótimo para o parâmetro k .

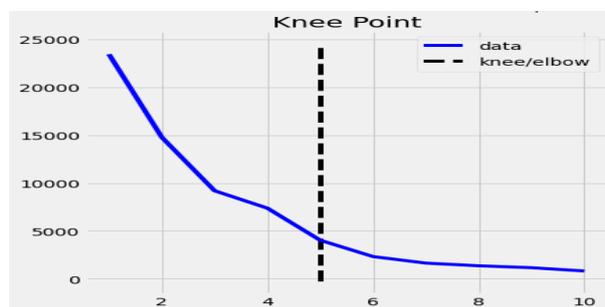


Fig. 2. Método Elbow para determinação do parâmetro k

A Fig. 2 apresenta em seu eixo x a quantidade de *clusters*, indicando que a partir do número 5 (mostrado pela linha vertical tracejada na cor preto) não há vantagens em aumentar o número de *clusters* a serem usados ao particionamento do grafo. A Fig. 3 apresenta o agrupamento pela técnica de *k-means* com 5 *clusters* formados.

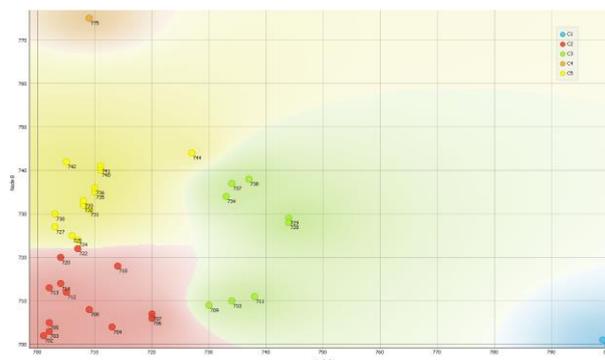


Fig. 3. Agrupamento com *K-means*

O *cluster k-means*, é baseado apenas nas coordenadas das barras. A distribuição em 5 *clusters* se mostrou satisfatória do ponto de vista da distribuição igualitária.

Foi realizado o próximo agrupamento, aplicando a *cluster* hierárquico, utilizando o critério da variância mínima de Ward, ilustrado na Fig. 4.

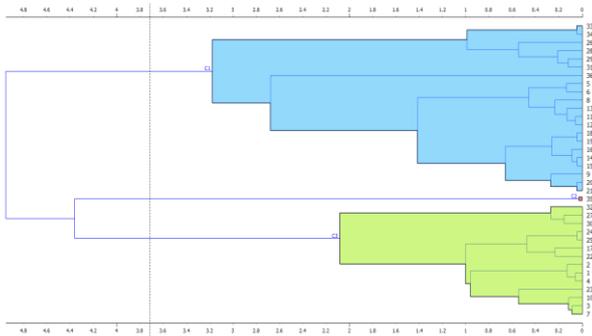


Fig. 4. Agrupamento Hierárquico pelo método Ward

O número de *clusters* formados pelo agrupamento hierárquico é mais restrito que o determinado pelo *K-means* como pode ser constatado no dendrograma da Fig. 4. É possível constatar que a distribuição das barras manteve uma semelhança entre si, formando 3 *clusters* (C1, C2 e C3), e que o *cluster* C3 na cor verde, são os que possuem a menor distância e, portanto, são os que mais se assemelham. A Fig. 5 apresenta o agrupamento formado pelo método DBSCAN.

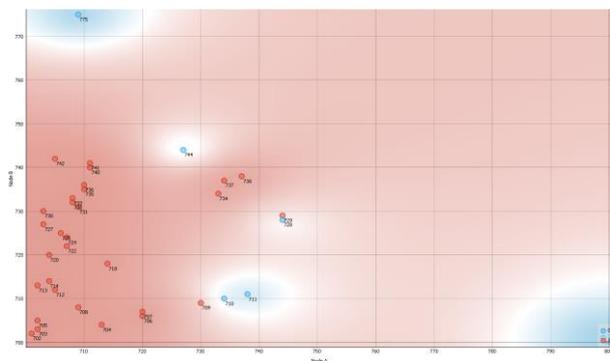


Fig. 5. Agrupamento com DBSCAN

Na aplicação do DBSCAN mostrado na Fig. 5, a formação dos agrupamentos com base na densidade dos pontos do grafo, formou grupos com pontos muito dispersos entre si, o que pode acarretar em dificuldades na aceleração do processo de caminhos percorridos. A próxima análise, apresentada na Fig. 6, contemplou o agrupamento formado com o método SOM.

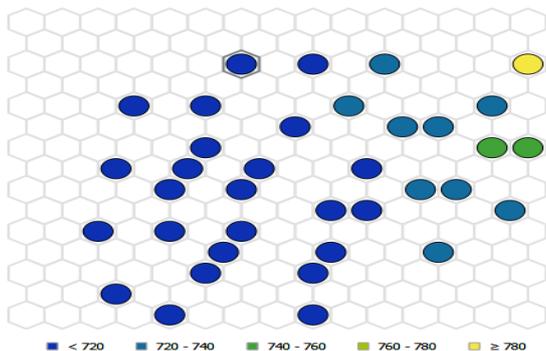


Fig. 6. Agrupamento com SOM

Para agrupar as barras, ilustrados na Fig. 6, o SOM tem sua inicialização com base na análise de componentes principais (ACP). Os parâmetros em estudo é a topologia da rede, e foi aplicado o tamanho da grade de dimensão 15 x 15 para largura e altura.

Para aplicação e avaliação do desempenho dos métodos de busca do caminho mais curto para alcançar a otimização da comunicação entre os dispositivos, usou-se como exemplo, a busca do caminho entre as barras 701 a 741 da Fig. 1, dos quais tem seus resultados ilustrados na Tabela 2.

Tabela 2. Métodos de caminhos mínimos

Método	Caminho percorrido
Largura	[701, 702, 703, 730, 709, 708, 733, 734, 737, 738, 711, 741]
Floyd-Warshall	[701, 702, 703, 730, 709, 708, 733, 734, 737, 738, 711, 741]
Dijkstra	[701, 702, 703, 730, 709, 708, 733, 734, 737, 738, 711, 741]
Bellman-Ford	[701, 702, 703, 730, 709, 708, 733, 734, 737, 738, 711, 741]

Para algoritmo de Kruskal, o peso de cada aresta foi negado, ou seja, foi considerado o peso um para todos, buscando dessa forma equiparar-se aos demais algoritmos de busca. No entanto, a árvore gerada para o sistema teste, se mostrou inviável, já que este deixou apenas uma aresta de fora.

Aplicou-se a combinação do algoritmo Kruskal ao Malgrange, porém não houve redução considerável, havendo apenas a reorganização do caminho percorrido.

5. DISCUSSÕES DOS RESULTADOS

Os algoritmos de DBSCAN e SOM não se mostraram satisfatórios em seu desempenho, haja vista que estes consideram a numeração das barras para os agrupamentos.

O algoritmo hierárquico, formou *clusters* dos quais não foram satisfatórios, visto que não houve uma separação com forte conexão entre os pontos vizinhos, havendo muita dispersão entre os pontos vizinhos.

O algoritmo de Malgrange, apesar de não evidenciar um relevante número de *clusters* formados, ainda cumpriu o seu objetivo de formar agrupamentos, proporcionando um caminho factível, e com sua separação, houve uma redução de 1.287 para 213 combinações possíveis de chaveamento radial, representando aproximadamente 83,5% de redução.

Todavia, em uma rede de grande complexidade e tamanho, deseja-se que a redução do espaço de busca apresente o maior número possível de *clusters*, para que assim seja estabelecido os menores caminhos para resolver o problema de reconfiguração.

Quanto a avaliação do desempenho dos métodos de busca do caminho mínimo, todos os testes evidenciaram similaridade entre os resultados, de modo que, independentemente onde recaia escolha, todos alcançarão o mesmo resultado em sua

aplicação. Vale lembrar, que a formação dos agrupamentos, considerou seus aspectos geográficos e não aplicando peso.

6. CONCLUSÕES

O conceito apresentado pela teoria dos grafos permitiu a resolução do problema de partição de grafos de diversas formas, mas em todos havia a perspectiva de redução da dimensionalidade do problema, proporcionando economia dos recursos computacionais e da manutenção da capacidade de interpretação.

De fato, pode-se afirmar que para os algoritmos estudados para busca por caminho de menor valor, a exceção dos seus critérios utilizados em suas respectivas estruturas, seus resultados são absolutamente idênticos.

Dado a difícil solução de um problema de reconfiguração, uma alternativa é decompor o problema principal em subproblemas, ainda que mínima, pode resultar na brevidade do processo.

AGRADECIMENTOS

Ao Programa de P&D regulado pela ANEEL executado pela Companhia Estadual de Distribuição de Energia Elétrica (CEEE-D) via Chamada Pública nº CEEE-D 001/2018.

REFERÊNCIAS

Belazzoug, M., Sebaa, K. and Nouri, H. (2018) 'Optimal distribution power system reconfiguration using Genetics Algorithms and Branch exchange', *2018 International Conference on Electrical Sciences and Technologies in Maghreb (CISTEM)*, pp. 1–6. doi: 10.1109 / CISTEM.2018.8613356.

Bichels, A. (2018) *Sistemas elétricos de potência: métodos de análise e solução*. Curitiba: EDUTFPR. Available at: <http://repositorio.utfpr.edu.br/jspui/handle/1/4610> (Accessed: 21 April 2021).

Boaventura Netto, P. O. and Jurkiewicz, S. (2017) *Grafos: introdução e prática*. 2nd edn. São Paulo: Blucher.

Cembranel, S. S. *et al.* (2019) 'A Short Review on Data Mining Techniques for Electricity Customers Characterization', in *2019 IEEE PES GTD Grand International Conference and Exposition Asia, GTD Asia 2019*. Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., pp. 194–199. doi: 10.1109/GTDAAsia.2019.8715891.

Cikan, M. and Kekezoglu, B. (2021) 'Comparison of metaheuristic optimization techniques including Equilibrium optimizer algorithm in power distribution network reconfiguration', *Alexandria Engineering Journal*. doi: <https://doi.org/10.1016/j.aej.2021.06.079>.

Gangwar, P., Singh, S. N. and Chakrabarti, S. (2019) 'Network reconfiguration for the DG-integrated unbalanced distribution system', *IET Generation, Transmission & Distribution*,

13(17), pp. 3896–3909. doi: 10.1049/IET-GTD.2019.0028.

Garza-Fabre, M., Handl, J. and Knowles, J. (2018) 'An Improved and More Scalable Evolutionary Approach to Multiobjective Clustering', *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, 22(4), pp. 515–535. doi: 10.1109/TEVC.2017.2726341.

Gautam, M. *et al.* (2020) 'A Spanning Tree-based Genetic Algorithm for Distribution Network Reconfiguration', *2020 IEEE Industry Applications Society Annual Meeting*, pp. 1–6. doi: 10.1109 / IAS44978.2020.9334819.

Gerez, C. *et al.* (2019) 'Distribution Network Reconfiguration Using Selective Firefly Algorithm and a Load Flow Analysis Criterion for Reducing the Search Space', *IEEE Access*, 7, pp. 67874–67888. doi: 10.1109/ACCESS.2019.2918480.

Granell, R., Axon, C. J. and Wallom, D. C. H. (2015) 'Impacts of Raw Data Temporal Resolution Using Selected Clustering Methods on Residential Electricity Load Profiles', *IEEE Transactions on Power Systems*, 30(6), pp. 3217–3224. doi: 10.1109/TPWRS.2014.2377213.

Jakus, D. *et al.* (2020) 'Optimal Reconfiguration of Distribution Networks Using Hybrid Heuristic-Genetic Algorithm', *Energies* 2020, Vol. 13, Page 1544, 13(7), p. 1544. doi: 10.3390/EN13071544.

Jasiński, M., Sikorski, T. and Borkowski, K. (2019) 'Clustering as a tool to support the assessment of power quality in electrical power networks with distributed generation in the mining industry', *Electric Power Systems Research*, 166, pp. 52–60. doi: 10.1016/j.epsr.2018.09.020.

Li, H. *et al.* (2016) 'An improved distribution network reconfiguration method based on minimum spanning tree algorithm and heuristic rules', *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 82, pp. 466–473. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2016.04.017>.

Liu, Z. and Barahona, M. (2020) 'Graph-based data clustering via multiscale community detection', *Applied Network Science*, 5(1), p. 3. doi: 10.1007/s41109-019-0248-7.

Mohamad, H. *et al.* (2019) 'Power system restoration in distribution network using minimum spanning tree - Kruskal's algorithm', *Indonesian Journal of Electrical Engineering and Computer Science*, 16(1), pp. 1–8. doi: 10.11591/IJEECS.V16.I1.PP1-8.

Nicoletti, M. do C. and Hruschka Jr, E. R. (2018) *Fundamentos da Teoria dos Grafos para Computação*. 3rd edn. Edited by LTC. Rio de Janeiro: LTC.

Pan, C. and Tan, J. (2019) 'Day-Ahead Hourly Forecasting of Solar Generation Based on Cluster Analysis and Ensemble Model', *IEEE Access*, 7, pp. 112921–112930. doi: 10.1109/ACCESS.2019.2935273.

- Panapakidis, I. P. and Moschakis, M. N. (2019) 'Consumer Load Profile Determination with Entropy-Based K-Means Algorithm', *International Journal of Electrical, Electronic and Communication Sciences*, 13(3), pp. 144–149. doi: 10.5281/ZENODO.2643537.
- Peyghami, S., Palensky, P. and Blaabjerg, F. (2020) 'An Overview on the Reliability of Modern Power Electronic Based Power Systems', *IEEE Open Journal of Power Electronics*, 1, pp. 34–50. doi: 10.1109/ojpe.2020.2973926.
- Poudel, S. and Dubey, A. (2018) 'A Graph-theoretic Framework for Electric Power Distribution System Service Restoration', *2018 IEEE Power & Energy Society General Meeting (PESGM)*, pp. 1–5. doi: 10.1109 / PESGM.2018.8586263.
- Rajabi, A. *et al.* (2020) 'A comparative study of clustering techniques for electrical load pattern segmentation', *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 120, p. 109628. doi: 10.1016/j.rser.2019.109628.
- Ramadhan, Z., Siahaan, A. P. U. and Mesran, M. (2018) 'Prim and Floyd-Warshall Comparative Algorithms in Shortest Path Problem', in *ICASI 2018*. Medan, Indonesia: EAI, pp. 47–58. doi: 10.4108/eai.23-4-2018.2277598.
- Ramos, S. *et al.* (2015) 'A data-mining-based methodology to support MV electricity customers' characterization', *Energy and Buildings*, 91, pp. 16–25. doi: 10.1016/j.enbuild.2015.01.035.
- Raut, U. and Mishra, S. (2017) 'A Fast Heuristic Network Reconfiguration Algorithm to Minimize Loss and Improve Voltage Profile for a Smart Power Distribution System', *2017 International Conference on Information Technology (ICIT)*, pp. 85–90. doi: 10.1109 / ICIT.2017.23.
- Sarkar, D. *et al.* (2015) 'Kruskal's Maximal Spanning Tree Algorithm for Optimizing Distribution Network Topology to Improve Voltage Stability', *Electric Power Components and Systems*, 43, pp. 1921–1930.
- Sharma, D. D. and Singh, S. N. (2015) 'Aberration detection in electricity consumption using clustering technique', *International Journal of Energy Sector Management*, 9(4), pp. 451–470. doi: 10.1108/IJESM-11-2014-0001.
- Szwarcfiter, J. L. (2018) *Teoria Computacional de Grafos: os Algoritmos*. 1st edn. Rio de Janeiro: Elsevier.
- Tur, M. R. (2020) 'Reliability assessment of distribution power system when considering energy storage configuration technique', *IEEE Access*, 8, pp. 77962–77971. doi: 10.1109/ACCESS.2020.2990345.
- Wang, Y. *et al.* (2017) 'A model of telecommunication network performance anomaly detection based on service features clustering', *IEEE Access*, 5, pp. 17589–17596. doi: 10.1109/ACCESS.2017.2685182.
- Xiaoming, C. *et al.* (2018) 'Flexible Distribution System Reconfiguration Using Graph Theory and Topology Identification Technology', *2018 International Conference on Power System Technology (POWERCON)*, pp. 2008–2014. doi: 10.1109 / POWERCON.2018.8602307.
- Xue, B. *et al.* (2016) 'Transmission path optimization method combining sensitivity analysis with breadth first search theory suitable for large scale direct electricity trade', *2016 IEEE International Conference on Power and Renewable Energy (ICPRE)*, pp. 481–484. doi: 10.1109 / ICPRE.2016.7871257.
- Yang, J. *et al.* (2019) 'A Model of Customizing Electricity Retail Prices Based on Load Profile Clustering Analysis', *IEEE Transactions on Smart Grid*, 10(3), pp. 3374–3386. doi: 10.1109/TSG.2018.2825335.
- Zeng, Z. *et al.* (2017) 'A model-based reliability metric considering aleatory and epistemic uncertainty', *IEEE Access*, 5, pp. 15505–15515. doi: 10.1109/ACCESS.2017.2733839.
- Zhang, H. *et al.* (2018) 'Island Partition of Distribution Network with Microgrid and Distributed Generation Based on Floyd-Warshall Algorithm', in *2018 International Conference on Smart Grid and Electrical Automation (ICSGEA)*, pp. 29–33. doi: 10.1109/ICSGEA.2018.00015.