



# APLICAÇÃO DE ALGORITMO PRIM COM MULTI-START E BUSCA LOCAL PARA MINIMIZAÇÃO DE PERDAS DE SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO

Rafael Conte Marodin <sup>1</sup>  
Ricardo Luiz Barros de Freitas <sup>2</sup>

## RESUMO

A necessidade de fornecimento constante de energia elétrica está se tornando cada vez mais comum. Com isso surge o interesse em melhorar os sistemas de distribuição de energia, tanto por parte do consumidor quanto por parte da empresa fornecedora. A perda de potência elétrica na transmissão da energia é um fato indesejado que gera custos e diminui a qualidade da energia fornecida. Visando reduzir as perdas dos sistemas de transmissão, esse artigo discute a aplicação de algoritmo, em linguagem c/c++, baseado na metodologia PRIM com meta-heurística Multi-Start e heurística de Busca Local para aplicação na resolução do problema da Reconfiguração de Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica (RSDEE) visando a obtenção de menores perdas de potência elétrica do sistema e consequente maior qualidade. Foram realizados testes com sistemas de 23, 33, 49, 136 e 415 barras e comparação com a literatura quando possível.

**Palavras-chave:** Reconfiguração de Sistemas Elétricos, Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica, PRIM, Busca Local, Perdas de energia elétrica.

## INTRODUÇÃO

A crescente utilização de energia elétrica é um marco da sociedade contemporânea acarretando a necessidade de soluções eficientes para a distribuição em massa dessa energia. No Brasil, a quantidade de unidades consumidoras aumentou 11,9% entre os anos de 2013 e 2018 (ANEEL, 2020), revelando como a energia elétrica está se tornando uma das maiores necessidades modernas, o que já era esperado, visto que, atividades essenciais como saúde, educação e segurança são dependentes, direta ou indiretamente, da eletricidade.

O Sistema Elétrico de Potência (SEP), responsável por disponibilizar eletricidade para os consumidores, é constituído de três principais partes, sendo elas: a geração de energia, sua transmissão e por fim distribuição. Todas essas etapas são suscetíveis às perdas de potências, usualmente indesejadas. Sendo assim, estratégias para redução desses desperdícios são muito bem-vindas visto que também reduzem o custo do produto.

---

<sup>1</sup> Graduando do Curso de Engenharia Elétrica da Universidade Estadual do Oeste do Paraná - UNIOESTE, [rafacmarodin@gmail.com](mailto:rafacmarodin@gmail.com);

<sup>2</sup> Professor orientador: Pós-doutor, Universidade Estadual do Oeste do Paraná - UNIOESTE, [rlbfreitas@gmail.com](mailto:rlbfreitas@gmail.com).



A necessidade de um fornecimento constante de energia praticamente obriga suas distribuidoras a investirem em soluções para a expansão e manutenção dos sistemas encarregados de sua oferta, pois um esquema ineficiente gera muitos prejuízos para a concessionária e um serviço de baixa qualidade ao cliente.

Sendo assim, a Reconfiguração de Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica (RSDEE) tem por objetivo determinar como será a configuração do Sistema de Distribuição de Energia Elétrica (SDEE) baseado em análises das mais diversas naturezas: custo de construção, perdas elétricas por operação, confiabilidade do sistema de distribuição, qualidade da energia fornecida são algumas dentre as diversas nuances que um SDEE possui. O foco neste trabalho está envolto pelas perdas elétricas por operação do sistema.

A RSDEE tem como uma de suas características o fenômeno matemático conhecido como explosão combinatória, que consiste, resumidamente, em um aumento gigantesco da complexidade de um sistema quando se aumentam, mesmo que pouco, suas dimensões, pois as possibilidades distintas do sistema crescem combinatoriamente. Sendo assim torna-se muito custoso e talvez impossível, no quesito tempo, a análise de todas as configurações possíveis de um SDEE.

Para que, então, a reconfiguração não seja feito a esmo, aplicam-se técnicas para reduzir o número de possibilidades a serem analisadas: as heurísticas e meta-heurísticas. Dessa forma, busca-se evitar a análise desnecessária de soluções ruins, que apresentam alto custo e pouca eficiência, reduzindo significativamente o espaço amostral. Assim, é possível a obtenção de boas soluções que melhorarão o RSDEE e conseqüentemente o SDEE.

A qualidade de um sistema de distribuição de energia não tem apenas impacto econômico, mas também social e ambiental. Economicamente tem-se a obtenção de menores investimentos mantendo-se a qualidade e conseqüentemente é esperado uma diminuição no custo final do produto: a energia elétrica. Socialmente destaca-se a melhora da qualidade da distribuição de energia, conseqüentemente atividades que dependam da eletricidade, como saúde, educação e segurança já citados, são afetados positivamente. Ambientalmente observa-se a diminuição de recursos necessários para construção e manutenção do sistema, que, direta ou indiretamente, reduz o impacto ambiental causado.

Portanto revelam-se as vantagens em estudar e aplicar métodos que auxiliem o RSDEE, que não somente beneficiam quem realiza a distribuição da energia, mas também o consumidor e o meio ambiente que nos cerca.



Soluções capazes de analisar todos os aspectos e nuances do RSDEE são ineficientes no quesito tempo, pois a comparação de todos os detalhes do sistema torna o processo longo demais para sua aplicação. Portanto, busca-se a simplificação do problema de forma a otimizar a solução para que haja uma excelente relação entre a resolução encontrada e a demora para selecioná-la.

Neste trabalho será realizada a implementação de um algoritmo, em linguagem c/c++, que gere soluções do RSDEE baseado no algoritmo de PRIM juntamente com a meta-heurística Multi-Start e a heurística de Busca Local. Será feito o teste do algoritmo em SDEEs, reais e fictícios, para análise e comparação com a literatura visando avaliar a qualidade das soluções obtidas e o tempo para alcançá-las.

## METODOLOGIA

O SDEE tem como principal função fornecer as potências ativa e reativa que são necessárias para suprir as cargas do sistema. Sendo assim, duas de suas principais estruturas são as barras, que são onde estão localizadas as cargas do sistema, e os ramos, que são também chamados de Linhas de Transmissão (LTs) e realizam a transferência de potência dentro do sistema para suprir a necessidade das barras. Como o sistema de distribuição é responsável pelo fornecimento da energia elétrica, é natural que suas perdas estejam focadas no sistema de transmissão, ou seja, os ramos e por isso suas perdas são bem expressas pela função objetivo apresentada na Equação (1).

$$\min f = \sum_{i \in \Omega_s} r_i |I_i|^2 \quad (1)$$

As variáveis  $r_i$  e  $I_i$  representam, respectivamente, a resistência e a corrente elétrica do ramo  $i$  pertencente ao conjunto de ramos que solucionam o sistema  $\Omega_s$ . O sistema está sujeito a restrições representadas nas Equações de (2) a (4).

$$U_{min} \leq U_j \leq U_{max} \quad \forall j \in \Omega_b \quad (2)$$

$$n(\Omega_s) = n(\Omega_b) - 1 \quad \Omega_s \subset \Omega_r \quad (3)$$

$$I_i \leq I_{max,i} \quad i \in \Omega_s \quad (4)$$

$$S_{j,in} - S_{j,out} + S_{j,gen} = S_{j,demanda} \quad \forall j \in \Omega_b \quad (5)$$

A Equação (2) representa a consistência do sistema de distribuição, pois garante que nenhuma barra  $j$  tenha tensão  $U_j$  abaixo da tensão mínima estipulada  $U_{min}$ , tipicamente 95% da tensão da subestação, e nem acima da máxima  $U_{max}$ , tipicamente 105% da tensão da subestação.



Já a Equação (3) juntamente com a Equação (2) garantem a condição de radialidade do sistema, que é o fluxo de corrente em um ramo  $i$  apenas em um único sentido, pois cada barra que consome potência será alimentada por apenas um ramo  $i$ , que está contido no conjunto solução  $\Omega_s$ , o qual, por sua vez, deverá ser subconjunto do conjunto de todos os ramos  $\Omega_r$ .

A Equação (4) juntamente com a (2) e (3) garante a factibilidade do sistema, pois garante que a corrente que flui por um ramo  $i$  será menor que a corrente máxima que esse ramo foi projetado para suportar  $I_{min,i}$ .

A não violação das leis da física é garantida pela Equação (5), que representa o fluxo de potência em uma barra. Sinteticamente, a potência de demanda na barra  $j$   $S_{j,demanda}$  deve ser igual à potência que entra na barra  $S_{j,in}$  menos a corrente que sai da barra  $S_{j,out}$  mais a potência que a barra gera  $S_{j,gen}$ .

Para o cálculo das tensões e correntes do sistema é utilizado o método Backward Forward Sweep (BFS) através de um algoritmo de iteração que consiste em iniciar o sistema solução em análise com uma perda hipotética nula, assim todas as barras terão, inicialmente, a mesma tensão da subestação e a partir desse ponto inicia-se o processo de iteração com o cálculo das correntes hipotéticas em cada ramo através da Primeira Lei de Kirchhoff. Determinada a corrente em cada ramo é possível estimar as perdas elétricas e atualizar as tensões em cada barra. Com as tensões atualizadas volta-se ao primeiro passo da iteração e calcula-se as novas correntes necessárias para alimentação das barras. O processo de iteração segue até que a diferença absoluta entre as perdas totais do sistema calculadas nos dois últimos ciclos seja menor que o erro estipulado, que no caso desse trabalho é  $10^{-8}$  pu (por unidade).

Para a geração de soluções foi utilizada a metodologia PRIM, que consiste em uma árvore geradora mínima, na qual os ramos são selecionados com base em um peso simbólico atribuído ao mesmo.

A aplicação no algoritmo do método de PRIM consiste em analisar, a partir da subestação, quais ramos podem ser selecionados e, a partir desses, qual deles tem o menor peso. Para um ramo estar disponível para a seleção ele deve executar a conexão entre uma barra já ativa e uma ainda não ativada. As barras são consideradas não ativas quando não possuem conexão, direta ou indireta com a subestação, excetuando-se a própria subestação do sistema, pois esta gera potência elétrica e não precisa estar ligada a outras barras para isso. Após a análise de todos os ramos disponíveis seleciona-se o de menor peso e este ativará a barra não ativa ao qual está ligado. O processo termina quando todas as barras do sistema estiverem ativas. O conjunto dos ramos conectados forma o sistema radial.



Os pesos simbólicos, que caracterizam os ramos do sistema, têm como principal função sua variação aleatória para aplicação da meta-heurística Multi-Start, que consiste em gerar distintas configurações radiais para que estas sejam futuramente analisadas. As magnitudes dos pesos atribuídos ao sistema juntamente com uma taxa predefinida de variação afetam a sensibilidade do sistema gerador de radiais. Quanto maiores os pesos e a taxa de variação, mais caótico é o conjunto de radiais gerados, quanto menores os pesos e a taxa, mais concentrado e limitado será o conjunto obtido. Busca-se então um equilíbrio entre o caos das grandes magnitudes e a concentração das baixas magnitudes. Nesse trabalho, os pesos começam sua numeração no inteiro 20 e avançam em uma unidade até que todos os ramos tenham seus pesos caracterizados. A taxa de variação escolhida para essa magnitude de pesos foi 80%, sendo possível a variação positiva ou negativa de 40% do valor do peso.

A geração de várias radiais pela variação dos pesos tem como objetivo alimentar o algoritmo de Busca Local para maior diversificação do espaço de busca e conseqüentemente melhora dos resultados obtidos. Nesse trabalho o número de iterações do algoritmo PRIM com variação de pesos foi de 2000. Após a formação de diversas soluções radiais, são selecionadas as 10 radiais com menor perda de potência ativa e essas passarão pelo processo de Busca Local, buscando-se a melhoria da solução obtida.

A implementação da heurística de Busca Local no algoritmo se deu pela análise de substituição de ramos. Seleciona-se um ramo ativo da solução radial previamente selecionada e analisa-se a possibilidade de substituição do mesmo por um ramo desconectado. Havendo possibilidade de substituição que mantenha a radialidade e factibilidade do sistema uma nova solução é gerada. Compara-se a nova radial com sua precursora e, se a perda de potência for menor, mantém-se a substituição e passa-se a analisar as possibilidades de substituição nessa nova radial. O processo de análise e melhora de uma solução termina quando não há mais melhorias a serem feitas. É aplicada a heurística de busca local para cada uma das 10 radiais previamente geradas.

Percebe-se que o processo de Busca Local é interrompido assim que não é encontrada nenhuma substituição imediata de ramo que resulte em menores perdas de potência. Em outras palavras, o algoritmo da busca para em um mínimo local mesmo que haja configurações radiais melhores que a atual. O intuito da seleção de 10 radiais distintas aumenta o espaço de busca e conseqüentemente leva à melhores mínimos locais e possivelmente o mínimo global: a solução ótima do problema. A quantidade de 10 radiais foi escolhida por promover um balanço entre tempo de computação e qualidade de soluções.



Ao final da execução do programa, salva-se automaticamente as melhores soluções geradas em um arquivo de texto.

Todo o programa foi escrito em linguagem c/c++ visando a otimização do mesmo, pois a linguagem c possui uma menor abstração, que permite gerenciar melhor os recursos de processamento e memória do sistema, tendo um excelente ganho em operações que necessitem de um elevado nível de iterações.

## REFERENCIAL TEÓRICO

Os pioneiros da análise da RSDEE com foco em redução de perdas elétricas foram Merlin & Back (1975) que aplicaram as duas leis de Kirchhoff, utilizaram um algoritmo heurístico construtivo, classe ao qual algoritmo de Prim (1957) também faz parte, e um algoritmo de otimização clássica.

Em Civanlar, Grainger, Yin, & Lee (1988) foi proposto o uso da heurística Branch-Exchange para a resolução da RSDEE, bastante similar a heurística de Busca Local utilizada nesse trabalho.

O sistema de distribuição de 23 barras utilizado foi importado de Nahman & Peric (2008) e Gómez et al. (2004). O sistema de 33 barras provém de Goswami e Basu (1992). O sistema de distribuição de 49 barras é uma adaptação do sistema apresentado em Oliveira (2010), que possui 136 barras e também será usado nesse trabalho. O sistema de 415 barras é apresentado em Bernal-Augustin (1988).

Felipe (2018) utilizou a metodologia de PRIM para resolução da configuração de sistemas elétricos e apresentou resultados na área de redução de perdas nos sistemas de 23, 33 e 49 barras, por isso foi selecionado para comparação com os resultados obtidos nesse trabalho.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

Para execução do algoritmo utilizou-se o processador Ryzen™ 5 2600x de 3,6 GHz e 16 GB de memória RAM. Os dados dos condutores, utilizados para a construção dos ramos, foram adaptados da literatura para cada sistema.

Para o sistema de 23 e 33 barras o condutor utilizado tem especificações listadas na Tabela 1, já o sistema de 49, 136 e 415 barras foi listado na Tabela 2.



Tabela 1: Dados do condutor para o sistema de 23 e 33 barras

Capacidade (A)	Resistência ( $\Omega$ /km)	Reatância ( $\Omega$ /km)	Custo (US\$/km)
230	0,6045	0,4290	10000

Tabela 2: Dados dos condutores de 49, 136 e 415 barras

Capacidade (A)	Resistência ( $\Omega$ /km)	Reatância ( $\Omega$ /km)	Custo (US\$/km)
800	0,04068	0,03076	40000

Os resultados em comparação com Felipe (2018) podem ser vistos na Tabela 3.

Tabela 3: Comparação dos resultados dos algoritmos

Sistema	Menor Perda (kW)		Tempo computacional (ms)	
	Este trabalho	(Felipe, 2018)	Este Trabalho	(Felipe, 2018)
23 barras	12,173	12,324	100	0403
33 barras	19,325	19,428	095	0197
49 barras	02,680	03,433	332	1080

Nota-se uma significativa melhora tanto nas perdas elétricas quanto no tempo computacional gasto.

Os resultados dos sistemas de 136 e 415 barras são apresentados na Tabela 4.

Tabela 4: Resultados dos sistemas de 136 e 415 barras

Sistema	Menor Perda (kW)	Tempo computacional (ms)
136 barras	091,671	00992
415 barras	166,591	47582

Nota-se que mesmo no sistema 136 barras o tempo de execução não excedeu os 1080 milissegundos relatados por Felipe (2018) no sistema de 49 barras. Revela-se a grande performance do algoritmo mesmo em situações combinatoriamente maiores.

As menores tensões e as maiores correntes ocorrentes nas soluções de 23, 33, 49 e 136 barras são expressas na Tabela 5.



Tabela 5: Tensão e correntes nas melhores radiais encontradas

Sistema	Tensão da subestação (kV)	Menor Tensão (kV)	Maior corrente (A)
023 barras	35,535	35,441	198,458
033 barras	34,500	34,253	132,403
049 barras	34,500	34,484	091,178
136 barras	13,800	13,670	275,277

Ressalta-se, a partir da Tabela 5, a qualidade das soluções obtidas, visto que as maiores quedas de tensão registradas chegam a, no máximo, 1% da tensão da subestação. Quanto menores as quedas de tensão maior é a qualidade com que a energia chega ao consumidor.

## CONSIDERAÇÕES FINAIS

A combinação de várias heurísticas e métodos em um problema de explosão combinatória mostrou-se eficaz no problema do RSDEE, tanto no quesito qualidade da solução, por possuir menores perda, quanto no quesito velocidade de execução.

A junção, em linguagem c/c++ da metodologia PRIM com a meta-heurística Multi-Start e posterior melhora com aplicação da heurística Busca Local apresenta ganhos de até 22% nas perdas operacionais e 69% no tempo de execução quando comparado a literatura.

O foco do trabalho foi a redução das perdas, porém em sistemas de distribuição real o custo de construção dos ramos também tem grande impacto na RSDEE. Sendo assim é almejado o balanço entre o custo de construção e as perdas do sistema.

A limitação da heurística aplicada de Busca Local apresenta notável limitação quanto a presença de mínimos locais. Dessa forma, a seleção de radiais mais diversificadas favoreceria o algoritmo e pode apresentar melhoras nas soluções.

Portanto, para trabalhos futuros, é desejado a redução das limitações técnicas do algoritmo, para que este se torne completo, eficiente e com soluções de qualidade ainda melhor.





## REFERÊNCIAS

- Agência Nacional de Energia Elétrica. ANEEL, 2020. Página inicial. Disponível em: <<https://www.aneel.gov.br>>. Acesso em: 21 de jun. de 2020.
- Bernal-Agustín, J.L. (1998). Aplicación de Algoritmos Genéticos al Diseño Óptimo de Sistemas de Distribución de Energía Eléctrica. Ph.D. dissertation, Univ. Zaragoza, Zaragoza, Spain.
- Bornioti, F.B. (2018). Algoritmo Dinâmico Prim aplicado ao Planejamento da Expansão de Redes de Distribuição Aéreas de Média Tensão. Dissertação de mestrado, Universidade Estadual do Oeste do Paraná - UNIOESTE.
- Civanlar, S., Grainger, J. J., Yin, H., & Lee, S. S. (1988). Distribution Feeder Reconfiguration for Loss Reduction. IEEE Transactions on Power Delivery, v. 3, n. 3, pp. 1217-1223.
- Gómez, J.F., Khodr, H.M., De Oliveira, P.M., Ocque, L., Yusta, J.M., Villasana, R.,(2004). Ant colony system algorithm for the planning of primary distribution circuits. IEEE Transactions on Power Systems19, 996–1004.
- Goswami, S.K. andBasu, S.K. (1992). A new algorithm for the reconfiguration of distribution feeders for loss minimization. IEEE Transactions on Power Delivery7, 1484–1491.
- Nahman, J.M.andPeric, D.M. (2008). Optimal Planning of Radial Distribution Networks by Simulated Annealing Technique. IEEE Transactions on Power Systems23, 790–795.
- Oliveira, M.L. de. (2010). Planejamento Integrado da Expansão de Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica. Tese de doutorado, Universidade Estadual de Campinas.
- Prim, R.C. (1957). Shortest Connection Networks And Some Generalizations. Bell System Technical Journal36, 1389–1401.