

Algoritmo Genético aplicado ao problema de redução de perdas em redes primárias de distribuição considerando variações de demanda

J.T. Belotti, Doutorando em Ciência da Computação com o RA 230260.

Resumo. A reconfiguração de chaves de uma rede de distribuição pode permitir uma redução das perdas técnicas dessa rede. Esse trabalho propõe a aplicação de algoritmos genéticos para o problema da redução de perdas em redes primárias de distribuição considerando variações de demanda. São propostas duas configurações de seleção dos pais: roleta e cruzamento; dois tipos de cruzamento: de ponto e uniforme; dois tipos de mutação: estática e adaptativa; também será aplicado o elitismo na seleção da nova população. Os resultados obtidos por todos os experimentos serão comparados com o objetivo de determinar qual a melhor estratégia de seleção, cruzamento e mutação para o problema proposto.

Palavras-chave. Redução de perdas por reconfiguração, Variação de demanda, Algoritmo Genético.

1. Introdução

Sistemas elétricos são divididos em três etapas: geração, transmissão e distribuição [1]. A geração é a responsável por transformar energia potencial em energia elétrica, no ano de 2017, 65,2% de toda energia elétrica produzida no Brasil foi resultado da geração hidráulica [2]. Após a energia ser gerada é necessário que ela seja transmitida dos centros de geração para os centros consumidores, essa tarefa fica a cargo da segunda etapa, a transmissão. Por fim, a distribuição é a etapa responsável por entregar diretamente a energia elétrica produzida e transmitida para os consumidores finais.

O transporte de energia elétrica, seja na etapa de transmissão ou de distribuição gera inevitavelmente perdas técnicas de energia, seja em função da transformação da energia elétrica em térmica que ocorre nos condutores, pelas perdas que ocorrem no núcleo dos transformadores ou ainda pelas perdas dielétricas [3]. Além disso, ainda existem as perdas não técnicas, também chamadas de perdas comerciais, elas ocorrem principalmente em virtude de fraudes e furtos por partes dos consumidores, além de erros de medição e de faturamento [3].

A Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) informou através da Superintendência de Gestão Tarifária (SGT) que no ano de 2016 cerca de 14% de toda energia injetada na rede de distribuição brasileira foi perdida em forma de perdas

técnicas e comerciais representando um prejuízo de 13,3 bilhões de reais [4]. Mais especificamente perdas técnicas ocorrem sobre 7,27% de toda energia elétrica inserida nas linhas de distribuição, com um prejuízo associado de 6,9 bilhões de reais apenas no ano de 2016 [4]. Este trabalho tratará especificamente de perdas técnicas na distribuição de energia elétrica.

Redes de distribuição são organizadas de forma radial, ou seja, existe apenas um caminho energizado entre a subestação de distribuição e cada um dos postos de consumo final, utilizando a linguagem matemática redes de distribuição são árvores, não possuindo ciclos. A Figura 1 apresenta um exemplo de uma rede de distribuição.

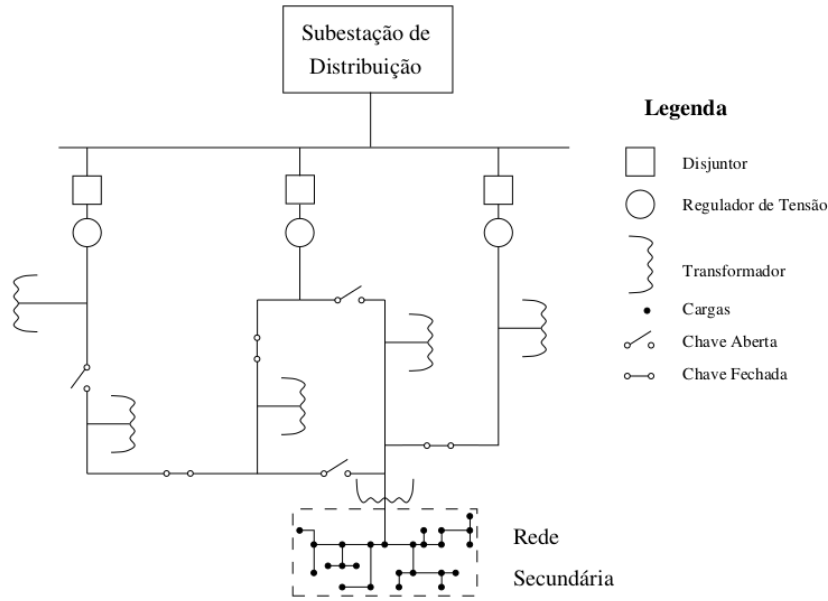


Figura 1: Exemplo de rede de distribuição (retirado de [5]).

Observando a Figura 1 nota-se a subestação de distribuição, responsável por receber a energia das linhas de transmissão e distribuir para os consumidores finais, a rede primária de distribuição contendo transformadores, chaves, disjuntores e reguladores de tensão e por fim a rede secundária, onde se encontram os consumidores finais. Ainda analisando a Figura 1 é possível comprovar que existe apenas um caminho entre a subestação e os consumidores finais. Além disso ao observar a rede de exemplo com mais cuidado nota-se que é possível alterar o caminho percorrido pela energia elétrica através da alteração de estado das chaves da rede.

Inicialmente as chaves de uma rede foram projetadas para situações de emergência, possibilitando que eventuais falhas da rede sejam isoladas e que cargas possam ser temporariamente transmitidas para outras redes. Entretanto, em 1975 Merlin e Back observaram que a troca de estados das chaves de uma rede poderia proporci-

onar oportunidades para redução de perdas técnicas [6].

As perdas de energia em uma rede elétrica de distribuição também tem relação direta com a demanda de consumo da população, que por sua vez não é a mesma em todo decorrer do dia. Logo, para cada período do dia existe uma configuração ideal de chaves que resulta nas perdas ótimas para a rede de distribuição. Entretanto a operação de chaveamento em uma rede elétrica é considerada uma operação arriscada, podendo levar a instabilidades na rede que geram desligamentos inesperados. Por esse motivo Bueno e Lyra propuseram uma nova formulação para o problema onde se deseja encontrar a melhor configuração de chaves de uma rede de distribuição considerando todas as variações de demanda que ocorrem no decorrer do dia, de modo que as variações de carga (demanda) são consideradas, mas uma vez que os estados das chaves são determinados os mesmos permanecem inalterados [7].

O objetivo desta proposta de projeto é formular a aplicação de Algoritmos Genéticos ao problema de redução de perdas em redes primárias de distribuição considerando variações de demanda proposto por Bueno e Lira.

1.1. Formulação matemática

Para o problema da redução de perdas técnicas os principais componentes da rede de distribuição são: chaves, blocos de carga, linhas e subestações. A Figura 2 apresenta um exemplo de rede de distribuição contendo apenas esses elementos.

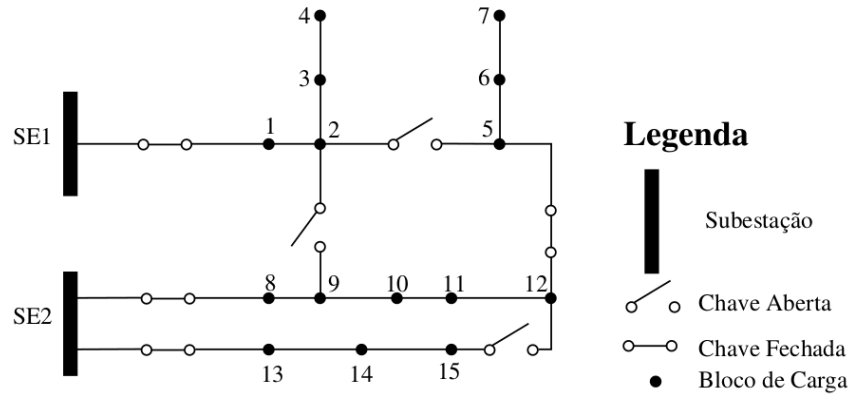


Figura 2: Rede de distribuição simplificada (retirado de [5]).

É possível realizar uma abstração da rede de distribuição através da sua representação por um grafo. Define-se um grafo $G = (V, A)$ por um conjunto de vértices $V(G)$ e um conjunto de arestas $A(G)$, sendo que uma aresta é um par não ordenado $a = \{v_1, v_2\}$, v_1 e $v_2 \in V(G)$. Nesse problema a direção que a energia se propaga na rede é importante, portanto as arestas serão representadas por pares ordenados (v_1, v_2) , onde uma aresta representa a direção de v_1 para v_2 . Um grafo $G' = (V', A')$ é um subgrafo de G se $V' \subseteq V(G)$ e $A' \subseteq A(G)$. A Figura 3 apresenta o grafo que

representa a rede de distribuição simplificada da Figura 2. Note que foi incluído um nó R que é ligado diretamente às subestações de distribuição com a finalidade de facilitar o tratamento de aspectos de conectividade, além disso, as arestas que ligam o nó R às subestações tem impedância zero, ou seja, não influenciam nas perdas de energia.

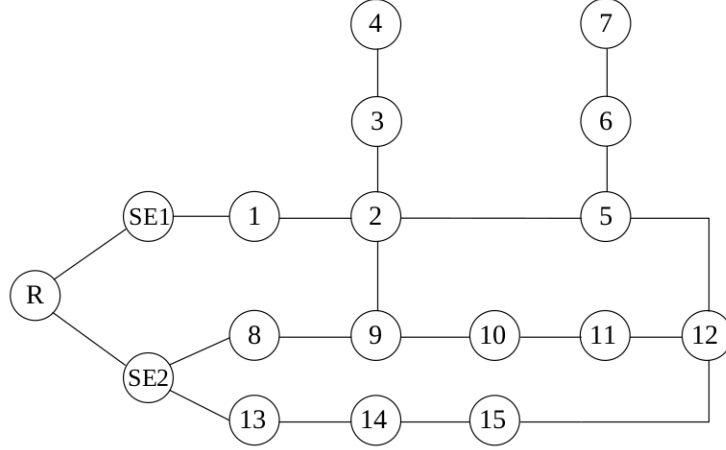


Figura 3: Grafo para a rede de distribuição da Figura2 (retirado de [5]).

As perdas em uma rede são calculadas com base nos fluxos de potência da rede, uma rede radial (sem ciclos) pode ter seus fluxos de potência calculados através das equações de Baran e Wu [8]. As equações 1.1 e 1.2 apresentam simplificações das equações de Baran e Wu para o cálculo dos fluxos de potência. Vale mencionar que os fluxos devem ser calculados das folhas em direção às raízes da rede.

$$P_{v,s} = \sum_{a \in A_s} P_a + P_{Ls} \quad (1.1)$$

$$Q_{v,s} = \sum_{a \in A_s} Q_a + Q_{Ls} \quad (1.2)$$

tal que:

- $P_{v,s}$ é o fluxo de potência ativa entre os nós v e s ;
- $Q_{v,s}$ é o fluxo de potência reativa entre os nós v e s ;
- P_{Ls} é a potência ativa da carga no nó s ;
- Q_{Ls} é a potência reativa da carga no nó s ;
- A_s é o conjunto de todas as arestas $(s, v_i) \in A'(G')$.

- $G' = (V, A')$ é uma árvore.

A partir do cálculo dos fluxos de rede pode-se definir o problema da redução de perdas em redes primárias de distribuição considerando variações de demanda como o seguinte problema de otimização combinatória:

$$\begin{aligned}
 \text{Min} \quad & \sum_{t \in T} \sum_{v \in V} \sum_{a \in A_v} \Delta_t r_a (P_{ta}^2 + Q_{ta}^2) \\
 \text{s.a.} \quad & \underline{P} \leq P_t \leq \overline{P} \\
 & \underline{Q} \leq Q_t \leq \overline{Q} \\
 & \overline{G'} = (V, A') \text{ é uma árvore}
 \end{aligned}$$

tal que T é o conjunto de intervalos de tempo, Δ_t é a duração do intervalo t , r_a é a resistência da aresta a , P_{ta} e Q_{ta} são, respectivamente, o fluxo de potência ativa e reativa da aresta a no intervalo t ; \overline{P} , \underline{P} , \overline{Q} e \underline{Q} indicam os limites superiores e inferiores para potência ativa e reativa nas arestas.

1.2. Revisão da literatura

O problema da redução de perdas considerando demandas variáveis foi proposto por Bueno e Lyra em 2002 [7], os autores definiram um problema onde a rede deve sempre permanecer fixa, porém considerando-se as variações de cargas para o cálculo das perdas. Os resultados relatam a eficiência da formulação proposta, atingindo os objetivos de redução de perdas e não alteração da topologia da rede.

Algoritmos genéticos já foram aplicados ao problema, Queiroz [5] fez uso de uma estratégia de busca local como parte de um algoritmo genético híbrido aplicado ao problema da redução de perdas considerando demanda variável. Os resultados obtidos mostraram que as estratégias de algoritmos genéticos alcançaram resultados muito próximos da melhor situação hipotética, dando ênfase ao GA com busca local.

2. Metodologia

Algoritmos Genéticos podem ser definidos como algoritmos de busca estocástica baseados em mecanismos evolutivos, sendo um sistema computacional bio-inspirado, mais especificamente tendo como inspiração biológica a teoria da evolução [9]. Inicialmente é gerada uma população inicial em que cada indivíduo representa uma solução viável para o problema. Esses indivíduos são avaliados a fim de determinar qual o grau de adaptação de cada um, ou *fitness*. Em seguida são selecionados alguns indivíduos para serem combinados através do processo de cruzamento formando uma nova geração de indivíduos. Os indivíduos da nova geração sofrem uma mutação aleatória segundo uma taxa e são então combinados com a geração anterior, algum critério de eliminação de indivíduos é aplicado a fim de se obter a nova população. Esses passos são repetidos até que um critério de parada seja alcançado

Algoritmo 1: ALGORITMO GENÉTICO.

```

1  início
2  |   crie a população inicial
3  |   avalie a população inicial
4  |   repita
5  |       selecione os pais
6  |       realize o cruzamento
7  |       se condição de mutação for atendida então
8  |           realize a mutação
9  |           reavalie os indivíduos que sofreram mutação
10 |       fim
11 |       selecione nova população
12 até que a condição de parada seja atendida;
13 fim

```

[9]. O Algoritmo 1 apresenta todos os passos que descrevem o funcionamento do Algoritmo Genético.

Como já foi mencionado na Seção 1, esta proposta de projeto descreve a aplicação de algoritmos genéticos ao problema de redução de perdas em redes primárias de distribuição considerando variações de demanda. A metaheurística de algoritmo genético foi escolhida devido a sua robustez quando aplicada a problemas combinatórios, tendo apresentado bons resultados na literatura para problemas de difícil complexidade computacional, além da sua estrutura permitir que informações específicas sobre o problema possam ser utilizadas para melhorar seu desempenho.

A seguir, as seções de 2.1 até 2.6 detalham como cada aspecto do algoritmo genético será modelada ao problema em questão.

2.1. Representação das soluções

Algoritmos genéticos representam os indivíduos através de uma cadeia de caracteres chamada de cromossomo, onde cada segmento do cromossomo, denominado gene, representa uma parte da solução. O problema estudado neste trabalho apresenta como peculiaridade o fato das soluções deverem ser árvores, de modo que apenas marcar com 0 ou 1 os nós que fazem parte da árvore torna as tarefas de cruzamento e mutação complexas, uma vez que será necessário verificar se não foram formados ciclos e corrigi-los caso sejam formados.

Para evitar esse tipo de problema este trabalho fará uso da representação NKR (do inglês *Network Random Keys*) para garantir que cada cromossomo represente uma árvore e que não seja necessário qualquer tipo de cuidado extra no cruzamento ou mutação. Um cromossomo codificado pela representação NRK é apresentado na Tabela 1.

Na Tabela 1 que cada gene do cromossomo representa uma aresta do grafo $G = (V, A)$ e além disso tem um peso associado. A árvore representada por esse

Tabela 1: Cromossomo codificado por NRK.

| Arestas | | | | | | | | | |
|---------|----|---|----|----|---|----|----|----|----|
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
| 29 | 85 | 9 | 15 | 63 | 5 | 44 | 77 | 34 | 72 |

cromossomo é a árvore geradora de custo mínimo obtida através dos pesos contidos nos genes do cromossomo. Para se obter essa árvore geradora de custo mínimo basta executar um algoritmo de grafos como Prim ou Kruskal. A Figura 4 apresenta a árvore geradora de custo mínimo extraída do cromossomo da Tabela 1.

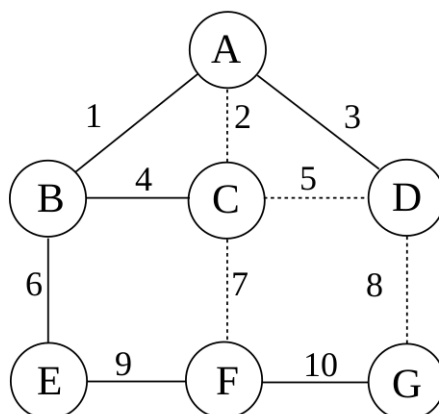


Figura 4: Árvore geradora de custo mínimo do cromossomo da Tabela 1.

2.2. Função de avaliação

A função de avaliação tem o objetivo de fornecer uma medida de qualidade para os indivíduos da população. Dado um cromossomo, a função de avaliação retorna um valor que é a medida de adaptação desse indivíduo em relação ao ambiente. Essa medida também é conhecida como *fitness*.

No problema de redução de perdas a função de avaliação dos indivíduos é a própria função objetivo do problema combinatório. Como se trata de um problema de minimização quanto menor for o valor do *fitness* de um indivíduo mais bem adaptado ao meio ele está.

2.3. Seleção dos pais

A seleção tem papel fundamental dentro dos algoritmos genéticos, pois é ela quem seleciona os indivíduos que serão combinados para formar a nova geração. Este trabalho propõe a utilização de duas estratégias de seleção: roleta e torneio.

Na seleção por roleta cada indivíduo tem a probabilidade de ser selecionado proporcional ao seu valor de *fitness*, quando a roleta gira indivíduos com maior aptidão tem maiores chances de serem selecionados. Como o problema em questão é um problema de minimização, os menores valores de *fitness* são os com mais chances de serem selecionados, para facilitar a implementação propõe-se a utilização de um valor de *fitness* auxiliar $f' = \frac{1}{1+fitness}$ na roleta.

A seleção por torneio elenca n indivíduos de forma aleatória e compara seus valores de *fitness*, é escolhido o indivíduo com o melhor *fitness*.

2.4. Cruzamento

O cruzamento ou *crossover* é o responsável por combinar dois indivíduos para a formação de novos. Neste trabalho propõe-se a utilização de duas estratégias de cruzamento: cruzamento de ponto e cruzamento uniforme. Lembrando que em função da escolha da representação NRK não é necessário verificar se essa operação gerou algum ciclo.

O cruzamento de ponto é o mais simples, nele são escolhidos p pontos de ruptura, de modo que os filhos gerados recebem os materiais genéticos dos pais de forma alternada. Nesse trabalho serão aplicados cruzamento de 2, 3 e 4 pontos.

Por sua vez o cruzamento uniforme combina o material genéticos dos pais nos filhos de forma aleatória, cada gene dos filhos tem 50% de chance de vir de cada um dos pais, sendo escolhido de forma aleatória.

2.5. Mutação

A função do operador de mutação é introduzir perturbações nos indivíduos com o objetivo de manter a diversidade genética da população, proporcionando uma maior exploração do espaço de busca. Normalmente a mutação é aplicada a um gene do cromossomo, trocando seu valor por outro gerado de forma aleatória. A probabilidade de um gene de um cromossomo sofrer mutação é chamada de taxa de mutação, esse valor deve ser pequeno para que a solução não se degenere. Este trabalho aplicará duas estratégias de mutação: mutação estática e mutação adaptativa variável.

A mutação estática utiliza a mesma taxa de mutação durante toda a execução do algoritmo, para esse problema serão utilizadas taxas de mutação de 1%, 10% e 20%. Por sua vez, a mutação adaptativa variável altera o valor da taxa de mutação dependendo do estado da população, quando a população possui pouca diversidade, a taxa é elevada e quando a diversidade é alta a taxa de mutação deve ser baixa. Nesse trabalho será utilizada a Equação 2.1 para atualizar a taxa de mutação a cada geração do algoritmo.

$$\text{tax} = 0,2 \left(1 - \frac{\bar{f} - f'}{\bar{f}} \right) \quad (2.1)$$

tal que \bar{f} é o *fitness* médio e f' é o melhor *fitness* da população.

2.6. Seleção da nova população

Normalmente algoritmos genéticos substituem a população pela nova população formada a cada geração do algoritmo. Uma forma de complementar essa seleção é através do elitismo, nele os n melhores indivíduos da geração anterior são mantidos e inseridos na nova população.

Nesse trabalho serão aplicadas duas estratégias de seleção da nova população, a primeira realizará a substituição da população atual pela nova aplicando o elitismo de 1 elemento. A segunda junta os elementos recém criados com a população atual e seleciona os melhores para a próxima geração.

3. Avaliação dos resultados

Cada estratégia de algoritmo genético descrita entre as seções 2.1 e 2.6 serão aplicadas para as mesmas instâncias. Como critério de parada será definido um tempo máximo de execução de meia hora ou um total de mil gerações sem melhora no melhor indivíduo encontrado.

Todos os experimentos serão executados para 6 redes com diferentes quantidades de vértices, arestas, números de chaves e número de subestações. Os detalhes dessas redes são descritos na Tabela 2.

Tabela 2: Configuração de cada rede.

| Rede | Vértices | Arestas | Chaves | Subestações |
|------|----------|---------|--------|-------------|
| 1 | 33 | 37 | 37 | 1 |
| 2 | 423 | 435 | 80 | 1 |
| 3 | 646 | 655 | 136 | 1 |
| 4 | 1528 | 1558 | 245 | 3 |
| 5 | 1597 | 1649 | 300 | 2 |
| 6 | 2274 | 2316 | 398 | 3 |

Os resultados obtidos por todos os experimentos serão comparados com o objetivo de determinar qual a melhor estratégia de seleção, cruzamento e mutação para o problema proposto. Além de determinar qual a configuração de algoritmo genético obteve o melhor resultado.

Referências

- [1] A. J. Monticelli and A. Garcia, *Introdução a sistemas de energia elétrica*. Campinas, SP: UNICAMP, 2^a ed., 2011.
- [2] EPE: Empresa de Pesquisa Energética, *Balanço energético nacional 2018: ano base 2017*. Rio de Janeiro: Ministério de Minas e Energia, 2018.

- [3] SGT: Superintendência de Gestão Tarifária, “Tarifas/cálculo tarifário e metodologia/distribuição/perdas de energia,” 2018.
- [4] D. A. Lima, “Perdas de energia,” tech. rep., Superintendente de Gestão Tarifária, 2018.
- [5] L. M. O. de Queiroz, “Algoritmos genéticos híbridos para redução de perdas técnicas em redes primárias de distribuição considerando variações de demandas,” Master’s thesis, Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP), Campinas, SP, 2005.
- [6] A. Merlin and H. Back, “Search for a minimal-loss operating spanning tree configuration in urban power distribution systems,” in *5th Power Systems Computation Conference*, (Cambridge, U.K), pp. 1–5, 1975.
- [7] E. Bueno and C. Lyra, “O impacto das variações das cargas ao longo de um dia sobre as perdas em sistemas de distribuição,” *XV Seminário Nacional de Distribuição de Energia Elétrica (SENDI 2002)*, Salvador, Bahia, vol. 26, 2002.
- [8] M. E. Baran and F. F. Wu, “Network reconfiguration in distribution systems for loss reduction and load balancing,” *IEEE Transactions on Power delivery*, vol. 4, no. 2, pp. 1401–1407, 1989.
- [9] M. Gendreau and J.-Y. Potvin, “Metaheuristics in combinatorial optimization,” *Annals of Operations Research*, vol. 140, pp. 189–213, Nov 2005.