



# PLANEJAMENTO DE EXPANSÃO E OPERAÇÃO DE SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO PRIMÁRIOS – METODOLOGIA MULTIPARTIDA E BUSCA LOCAL

Matheus Diniz Gonçalves Leite <sup>1</sup>  
Ricardo Luiz Barros de Freitas <sup>2</sup>

## RESUMO

A necessidade por maior disponibilidade de energia e maior confiabilidade no atendimento à crescente demanda se configura como um dos grandes desafios do sistema elétrico. Discute-se neste artigo uma metodologia PRIM multipartida, para árvores geradoras mínimas, a partir da qual geram-se radiais com subsequente aplicação de busca em vizinhança (*Branch Exchange*), com o intuito de otimizar o Planejamento de Expansão e Operação de Sistemas de Distribuição (PEOSD). Cada sistema teste gera uma topologia radial nova que minimiza os custos totais, dados pela soma do custo de construção de circuitos somados aos custos com perdas de energia, atendendo às restrições físicas e de operação do sistema. São apresentados os resultados para sistemas teste de 33, 49, 136 e 415 barras, com excelentes resultados.

**Palavras-chave:** PRIM, Topologia Radial, *Branch Exchange*, Planejamento, Sistemas de Distribuição.

## INTRODUÇÃO

De forma a ilustrar o aumento do consumo energético global, cita-se o estudo da IEA (s.d.), International Energy Agency, que constatou que o consumo mundial de energia elétrica aumentou mais de 100% entre 1990 e 2017, ultrapassando o impressionante valor de 20 TWh no ano de 2017. Além disso, a previsão feita pela IEA (2019) é que o tamanho da economia global dobrará no final dos próximos 20 anos.

O Planejamento de Expansão e Operação do Sistema de Distribuição (PEOSD) atua nesta problemática, uma vez que possibilita às concessionárias uma maior disponibilidade de energia, melhora a qualidade da mesma e, através da minimização dos custos com novas linhas e operação do sistema, maximiza o impacto positivo dos investimentos no Sistema de Distribuição de Energia Elétrica (SDEE) a partir de um determinado montante de capital disponível para investimento.

---

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

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



Neste artigo, para se atingir os objetivos supracitados, realiza-se a otimização do PEOSD através da aplicação de um algoritmo baseado na metodologia PRIM, com utilização de técnicas de melhoria local (*Branch Exchange*), que têm como intuito contornar a característica míope da primeira etapa. O método PRIM tem se mostrado uma robusta ferramenta de otimização do PEOSD, uma vez que permite alcançar resultados de boa qualidade, tratando de maneira simples a restrição de radialidade do sistema e com baixos tempos computacionais. Desta forma, a metodologia proposta neste trabalho pode ser utilizada tanto para o planejamento a médio e longo prazo quanto para aplicações em tempo real, devido ao baixo tempo de processamento.

## REFERENCIAL TEÓRICO

O método PRIM multipartida utilizado neste trabalho foi concebido como uma variação da metodologia PRIM (1957). O intuito da abordagem multipartida foi contornar a característica míope do algoritmo, forçando-o a explorar de maneira mais abrangente o espaço de soluções. Um algoritmo míope caracteriza-se por tomar decisões baseadas apenas no estado presente do sistema, sem considerar os possíveis impactos futuros da escolha atual.

Para a etapa de melhoria local utilizou-se a metodologia *Branch Exchange* proposta no artigo de Civanlar, Grainger e Lee (1988), assim como o equacionamento de variação aproximada de perdas e conclusões apresentadas no mesmo.

O sistema de 33 barras foi baseado nos parâmetros do sistema apresentado em Baran, Wu (1989). O sistema de 136 barras foi baseado nos parâmetros do sistema apresentado em Mantovani, Casari e Romero (2000). O sistema de 49 barras é uma parcela adaptada do sistema de 136 barras, resultando em sistema composto por 49 barras e 76 ramos candidatos à adição. O sistema de 415 barras foi baseado nos parâmetros do sistema apresentado em Bernal-Augustin (1988).

## METODOLOGIA

Serão consideradas apenas soluções radiais para o problema de otimização de PEOSD. Isto se deve ao fato de que o SDEE opera, comumente, em configuração radial, que diminui a complexidade dos dispositivos de proteção, implica em menores correntes de curto-circuito e reduz custos de construção de linhas, quando comparado a configurações malhadas. Uma configuração radial é obtida quando todas as barras estão energizadas, tem-se um número de



ramos igual ao número de barras menos um e não existam laços (“*loops*”) ao longo do circuito (ou seja, partindo-se de uma barra há apenas um caminho até a subestação).

A otimização do PEOSD será modelada como um problema de minimização de uma Função Objetivo (F.O), onde os custos considerados são: custo de construção dos circuitos e custo de operação do sistema ao longo do horizonte de planejamento, conforme mostrado a seguir.

$$\text{Min F.O} = C_{\text{circuitos}} + C_{\text{operação}} \quad (1)$$

O termo ‘ $C_{\text{circuitos}}$ ’ é o custo de construção das novas linhas responsáveis pela expansão do sistema, escolhidas a partir de um conjunto de linhas candidatas. Este primeiro termo da equação (1) é calculado da seguinte maneira.

$$C_{\text{circuitos}} = \sum_{n=1}^{n_l} C_{\text{km},n} * \text{Dist}_{\text{km},n} * \text{Const}_n \quad (2)$$

Em que ‘ $C_{\text{km},n}$ ’ é o custo por km da ‘ $n$ -ésima’ linha de distribuição, ‘ $\text{Dist}_{\text{km},n}$ ’ é a distância, em quilômetros, da ‘ $n$ -ésima’ linha de distribuição, ‘ $\text{Const}_n$ ’ é a variável binária que indica se a ‘ $n$ -ésima’ linha de distribuição foi escolhida para ser construída ( $\text{Const}_n=1$ ) ou não ( $\text{Const}_n=0$ ) e  $n_l$  é o número de linhas candidatas a serem construídas.

O custo de operação do sistema (‘ $C_{\text{operação}}$ ’) é dado pelo custo da potência dissipada por efeito Joule nos condutores ao longo do horizonte de planejamento, 20 anos.

Concomitantemente com o objetivo de se minimizar os custos totais, de acordo com a equação (1), para que uma determinada configuração radial possa ser candidata à solução final, esta deve atender às restrições físicas e operacionais do sistema.

- Restrições físicas: Limite de correntes nos condutores.
- Restrições operacionais: Limites de tensão nas barras, restrição de radialidade e balanço de potência.

Desta forma, tem-se.

$$S_{j,\text{in}} + S_{j,\text{gerada}} - S_{j,\text{out}} = S_{j,\text{demanda}} \quad \forall j \in n_b \quad (3)$$

$$V_{\text{min}} \leq V_j \leq V_{\text{max}} \quad \forall j \in n_b \quad (4)$$



$$I_n \leq I_{\max} \quad \forall n \in n_l \quad (5)$$

$$\text{Const}_n \in \{0,1\} \quad \forall n \in n_l \quad (6)$$

$$\sum_{n=0}^{n=n_l} \text{Const}_n = n_b - 1 \quad \forall n \in n_l \quad (7)$$

Em que ‘ $n_b$ ’ é igual ao número de barras do sistema.

A restrição relativa à equação (3) diz respeito ao balanço do fluxo de potência na ‘ $j$ -ésima’ barra. ‘ $S_{j,\text{in}}$ ’ corresponde à soma dos fluxos de potência que chegam à ‘ $j$ -ésima’ barra, ‘ $S_{j,\text{out}}$ ’ corresponde à soma dos fluxos de potência que saem da ‘ $j$ -ésima’ barra, ‘ $S_{j,\text{gerada}}$ ’ corresponde à potência gerada na ‘ $j$ -ésima’ barra e ‘ $S_{j,\text{demanda}}$ ’ é a potência demandada na ‘ $j$ -ésima’ barra.

As equações (4) e (5) representam, respectivamente, os limites de tensão máximo e mínimo estipulados para as barras e o valor máximo de corrente suportado pelos condutores.

A restrição (6) indica que ‘ $\text{Const}_n$ ’ pode assumir apenas valores binários, ‘ $\text{Const}_n=1$ ’ para o caso em que a ‘ $n$ -ésima’ linha candidata tenha sido construída e ‘ $\text{Const}_n=0$ ’ caso a ‘ $n$ -ésima’ linha candidata não tenha sido construída.

A equação (7) é referente à uma condição necessária para a radialidade do sistema, em que o número de linhas construídas deve ser igual ao número de barras menos um.

Para a verificação do atendimento, ou não, às restrições impostas pelas equações (3) à (5), e determinação das grandezas do circuito, como corrente nos ramos, tensão nas barras, perdas totais no sistema, e é necessário um algoritmo de Fluxo de Carga (F.C) que forneça, com boa eficiência computacional, tais informações.

A metodologia utilizada para o cálculo do fluxo de potência foi o *Backward Forward Sweep (BFS)*. O método BFS pode ter seu funcionamento dividido a partir de 2 etapas.



- Etapa Backward: Etapa ascendente, atualiza os valores de corrente nos ramos, no sentido dos ramos mais extremos em direção à subestação.
- Etapa Forward: Etapa descendente, atualiza os valores de tensão nas barras, no sentido da subestação em direção às barras mais extremas.

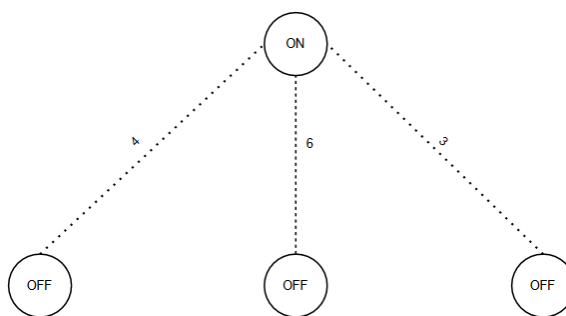
Para a obtenção das radiais candidatas à solução ótima do problema de minimização, apresentado através das equações (1) e (2), e que serão, posteriormente, submetidas à etapa de melhoria local, utiliza-se, inicialmente, a metodologia PRIM (1957). Este método se baseia na teoria de grafos para encontrar a árvore geradora mínima.

A partir da subestação adicionam-se, sequencialmente, os ramos ao circuito, até que seja atingida uma configuração radial em que todas as barras estejam energizadas. Em cada estágio do algoritmo é escolhida a melhor decisão, localmente, a ser tomada.

Após a primeira execução do algoritmo, os parâmetros do sistema são variados, dentro de uma faixa de valores, aleatoriamente, de forma a diversificar o espaço de busca e permitir que sejam encontradas novas soluções radiais. Foram geradas 2000 soluções radiais, sendo mantidas as radiais diferentes entre si e que atendessem às restrições físicas e operacionais.

O algoritmo PRIM em cada movimento escolhe a opção de menor valor (peso) para integrar à árvore geradora em construção. Uma situação hipotética de escolha de movimento do algoritmo PRIM é representada na Figura 1.

Figura 1- Situação Representativa do Algoritmo PRIM



Fonte: Autor

De acordo com a metodologia PRIM o ramo a ser escolhido seria o de peso igual a 3, uma vez que, dentre as opções possíveis do sistema da Figura 1, é o de menor peso.

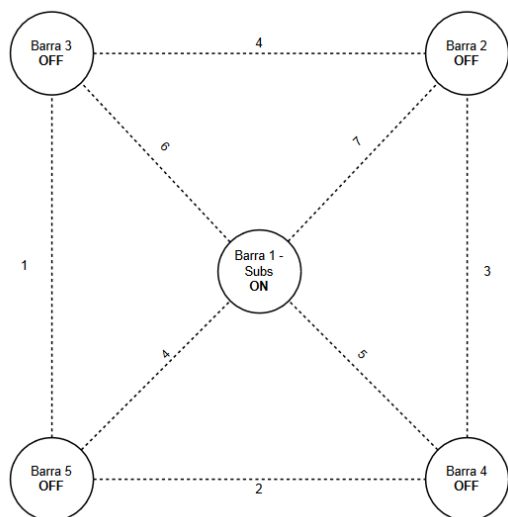
O algoritmo PRIM permite tratar de forma eficiente e implícita a restrição de radialidade e de conectividade do sistema, de forma que não sejam formados laços ao longo do sistema e que não haja ramos desconexos. Para tal, um ramo pode ser construído se, e somente se, uma das duas barras a serem interligadas estiver desenergizada (OFF) e a outra estiver energizada



(ON), de forma que se partindo de uma determinada barra haja um, e apenas um, caminho até a subestação.

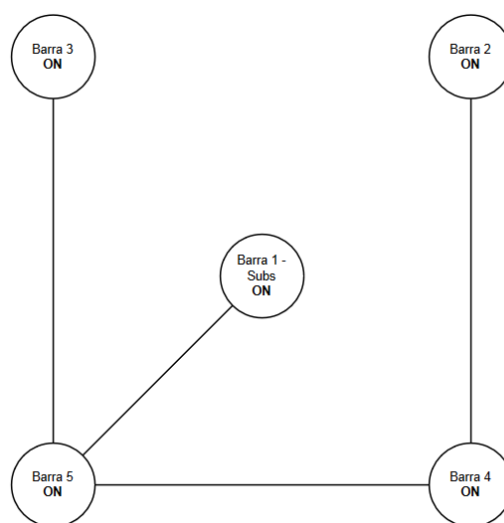
Desta forma, em cada iteração do algoritmo são analisados todos os ramos que se enquadrem na restrição acima citada e é escolhido aquele de menor peso. O processo é repetido até que todas as barras do sistema estejam energizadas. A seguir é apresentado, na Figura 2, um sistema malhado, na Figura 3, a configuração radial resultante após a aplicação do método PRIM neste sistema e na Figura 4 é apresentado o fluxograma da metodologia empregada, com o intuito de exemplificar a execução do algoritmo.

Figura 2 – Configuração Malhada



Fonte: Autor

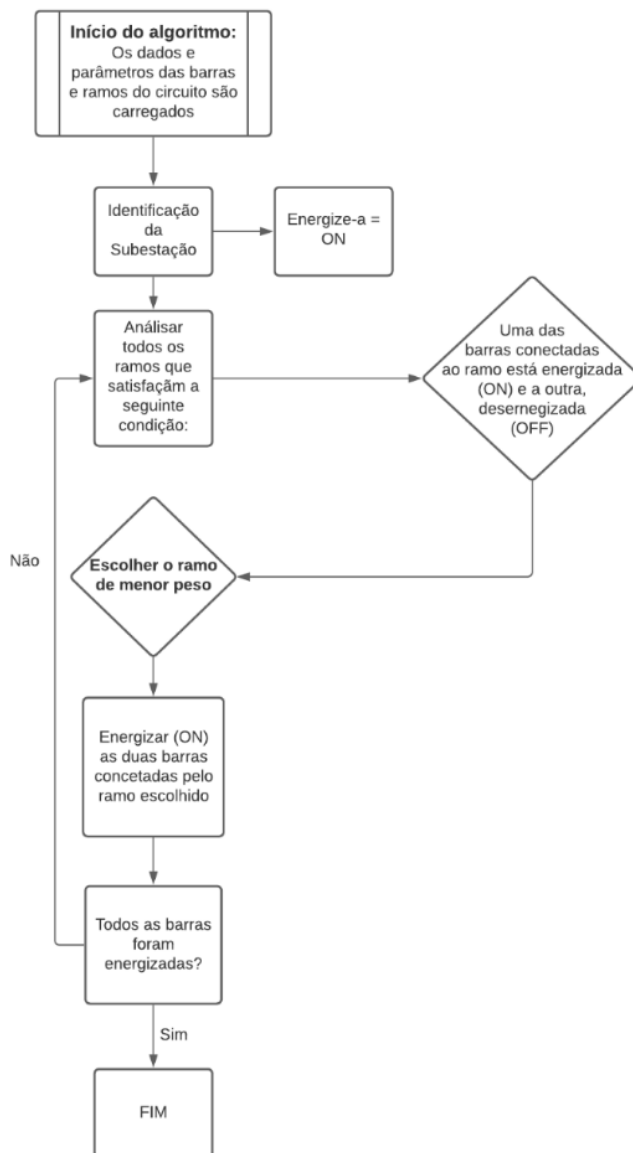
Figura 3 – Configuração Radial Após Algoritmo PRIM



Fonte: Autor



Figura 4 - Fluxograma do Algoritmo PRIM



Fonte: Autor

No caso em que dois ramos candidatos apresentem o mesmo peso, como critério de desempate, será construído aquele que tenha sido analisado primeiramente.

Os pesos de todos os ramos foram normalizados de acordo com o seu respectivo custo de construção. Ao ramo de menor custo de construção foi atribuído o peso vinte (20) e então atribui-se aos ramos seguintes, em ordem crescente de custo, pesos inteiros, sequencialmente.

A normalização dos pesos intensifica a diversificação do espaço de busca durante a etapa de variação aleatória dos pesos dos ramos.

Após a obtenção da primeira solução radial, obtida a partir dos parâmetros originais do sistema, foram geradas novas radiais com novos pesos, com o intuito de se contornar a



característica míope do algoritmo PRIM, explorar o espaço de busca e escapar de regiões de ótimo local convexas. Resultou-se, desta forma, em um sistema multipartida. Esses pesos foram variados em até 40% para cada ramo. Cada ramo teve o seu peso original variado de acordo com a seguinte equação.

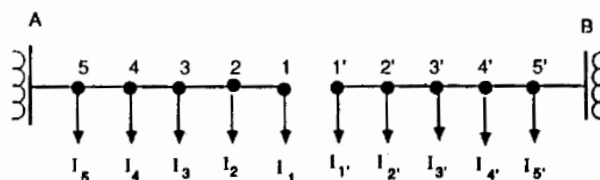
$$\text{Peso}_{r,j,\text{variado}} = \text{Peso}_{j,\text{original}} * \frac{(\text{rand}()\%81 + 60)}{100} \quad (8)$$

Na equação (8), ‘Peso<sub>r,j,variado</sub>’ corresponde ao novo peso do ‘j-ésimo’ ramo da ‘r-ésima’ radial, ‘Peso<sub>j,original</sub>’ corresponde ao peso original do ‘j-ésimo’ ramo, e o termo ‘(rand()%81+60)/100’ retorna um valor que varia o peso de cada ramo em 40% para mais ou para menos.

Após a geração das 2000 radiais através do método PRIM multipartida, foram escolhidas as 10 radiais de menor custo total e as 10 radiais de menor perdas para compor a Grupo de Qualidade (GQ). Tal abordagem foi escolhida com o intuito de diversificar o espaço de busca.

A partir de então, a etapa de melhoria local, baseada no método de troca de ramos (*Branch Exchange*), foi aplicada no GQ. O método de *Branch Exchange* consiste na transferência de carga entre circuitos vizinhos através do fechamento de um ramo aberto e da subsequente abertura de um ramo fechado, de forma a se manter a radialidade do sistema. Observando-se a figura 5, a transferência da barra 1’ para o lado ‘A’ pode ser atingida fechando-se o ramo entre as barras 1 e 1’ e a subsequente abertura do ramo entre as barras 1’ e 2’.

Figura 5 – Exemplo de Troca de Ramos



Fonte: Civanlar, Grainger e Lee (1988)

A metodologia aplicada será descrita a seguir, em passos, sendo baseada nas conclusões de Civanlar, Grainger e Lee (1988).

- **Passo 1** - Escolher a radial de menor custo total como Solução Incumbente (SI).





- **Passo 2** - Analisa-se todos os ramos abertos, de todas as radiais presentes no GQ, efetuando a transferência de carga para o lado de maior tensão final (menor queda de tensão em relação a subestação).
- **Passo 3** - Analisar se operação de troca de ramos não resulta na formação de laços e/ou barras desconectadas do circuito.
- **Passo 4** - Manter todas as trocas de ramos que resultem em redução de perdas, através da equação (9), relativa à variação aproximada de perdas após a transferência de cargas.

$$\Delta P_{\text{erdas}} = \text{Real}\{2 * (I_i) * (E_m - E_n)^*\} + R_{\text{loop}} |I_i|^2 \quad (9)$$

$E_m$  é a queda de tensão, em relação à subestação, da barra para onde se está transferindo a carga,  $E_n$  é a queda de tensão, em relação à subestação, da barra que está sendo transferida,  $I_i$  é a corrente demandada na barra que está sendo transferida e  $R_{\text{loop}}$  é a resistência total ao longo do loop gerado ao se fechar um determinado ramo.

- **Passo 5** - Rodar o algoritmo de Fluxo de Carga (BFS) para as novas configurações.
- **Passo 6** - Atualizar grupo de soluções de qualidade, mantendo as radiais que apresentaram redução no custo total após o *Branch Exchange* e descartando as que não se alteraram/apresentaram aumento de custo.
- **Passo 7** - Atualiza-se a solução incumbente, caso alguma solução do grupo de qualidade apresente menor custo total. Caso grupo de qualidade não for vazio, retorne ao **Passo 2**, caso contrário, vá ao **Passo 8**.
- **Passo 8** - Apresenta-se a melhor radial (menor custo total) antes e após aplicação do *Branch Exchange*.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

A seguir são apresentados os resultados para os sistemas de 33, 49, 136 e 415 barras. É mostrado, para cada sistema teste, a radial de menor custo total após o processo de multipartida, onde são geradas 2000 soluções, assim como a solução final após a fase de melhoria local.



Tabela 1-Resultados para os Sistemas Teste

Sistema Teste	CUSTO TOTAL/ PERDAS (PRIM)	MENOR TENSÃO [PU] (PRIM)	CUSTO TOTAL/ PERDAS (B.E)	MENOR TENSÃO [PU] (B.E)
33 BARRAS	U\$370527,59 20,44 kW	0,99 Barra 17	U\$370527,59 20,44 kW	0,99 Barra 17
49 BARRAS	U\$117137,13 4,66 kW	0,99 Barra 31	U\$116543,44 3,40 kW	0,99 Barra 30
136 BARRAS	U\$2655312,2 160,62 kW	0,97 Barra 120	U\$2635194,5 126,80 kW	0,98 Barra 77
415 BARRAS	U\$656571,69 240,56 kW	0,98 Barra 174	U\$571594,81 176,55 kW	0,99 Barra 170

Fonte: Autor

Observa-se que, com excessão do sistema de 33 barras, obteve-se melhores resultados após a etapa de melhoria local, sendo que o sistema de 415 barras foi o que apresentou a melhoria mais expressiva. Todavia, para todos os sistemas teste, pôde-se observar que a metodologia multipartida PRIM encontrou soluções iniciais de alta qualidade.

Para o sistema de 33 barras, a solução final encontrada pelo *Branch Exchange* foi a mesma encontrada pelo método multipartida PRIM, o que corrobora a qualidade da solução inicial encontrada.

Para o sistema de 49 barras, após a etapa de melhoria local, foi encontrada uma solução com custos totais 0,5% menores que a melhor solução encontrada pelo método PRIM e com perdas 27,03% menores.

Para o sistema de 136 barras, após a etapa de melhoria local, foi encontrada uma solução com custos totais 0,76% menores que a melhor solução encontrada pelo método PRIM e com perdas 21,05% menores.

Para o sistema de 415 barras, após a etapa de melhoria local, foi encontrada uma solução com custos totais 12,94% menores que a melhor solução encontrada pelo método PRIM e com perdas 26,60% menores.



## CONSIDERAÇÕES FINAIS

A metodologia proposta alcançou resultados expressivos com ótima eficiência computacional. Desta forma, ressalta-se a aplicabilidade do método proposto neste trabalho tanto para o planejamento de expansão quanto para o operação e reconfiguração de sistemas já construídos.

Caso a metodologia proposta fosse readequada para a otimização da operação, objetivaria-se a redução apenas das perdas. Para o sistema teste de 49, 136 e 415 barras observou-se uma redução de perdas, percentualmente, mais expressiva que a redução de custos totais.

Para trabalhos futuros, modelagens que considerem uma curva de demanda variável ao longo do dia e que prevejam a existência de compensadores síncronos ao longo do circuito, para o balanço de potência reativa, podem atingir resultados com maior acurácia e fidedignidade.

## REFERÊNCIAS

- Baran, M. E., & Wu, F. F. (s.d.). Network Reconfiguration In Distribution Systems For Loss Reduction And Load Balancing .
- Bernal-Agustin, J. L., & Ramirez-Rosado, I. J. (Maio de 1998). Genetic Algorithms Applied To The Design Of Large Power Distribution Systems.
- 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.
- IEA. (2019). *Energy Efficiency Is the First Fuel, and Demand for It Needs to Grow*. Acessado em 07 de junho de 2020. Fonte: <https://www.iea.org/commentaries/energy-efficiency-is-the-first-fuel-and-demand-for-it-needs-to-grow>
- IEA. (s.d.). *World Electricity Consumption by Sector, 1974-2017*. Acessado em 07 de junho de 2020. Fonte: <https://www.iea.org/data-and-statistics/charts/world-electricity-final-consumption-by-sector-1974-2017>
- Mantovani, J. R., Casari, F., & Romero, R. A. (2000). Reconfiguração de Sistemas de Distribuição Radiais Utilizando Critério de Queda de Tensão .
- R., C. P. (8 de May de 1957). Shortest Connection Networks And Some Generalizations.