

Estudo, representação matemática e solução do problema de Planejamento da Transmissão usando Algoritmos Genéticos.

Study, mathematical representation and problem solving of Transmission Planning using Algorithms Genetics

RESUMO

Cristian Gotardo
Cristiangotardo_97@hotmail.com
Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Medianeira, Paraná, Brasil

Hugo Andrés Ruiz Flórez
hugoflorez@utfpr.edu.br
Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Medianeira, Paraná, Brasil

O planejamento da expansão da transmissão é um problema que vem sendo estudado desde o surgimento da eletricidade, saber como transmitir e distribuir a energia de forma eficiente não é uma tarefa simples, exigem muitos estudos sobre estabilidade, proteção e cálculos de cargas futuras. Tendo isso em mente, o presente trabalho irá demonstrar a importância da metaheurística como solução deste problema, mas especificamente através de algoritmos genéticos. Será demonstrado a importância e precisão do algoritmo, trazendo o mesmo como uma solução para futuros problemas de aumento da demanda em um SEP.

PALAVRAS-CHAVE: Transmissão. Metaheurística. Algoritmos genéticos. SEP.

ABSTRACT

Recebido: 19 ago. 2020.

Aprovado: 01 out. 2020.

Direito autorial: Este trabalho está licenciado sob os termos da Licença Creative Commons-Atribuição 4.0 Internacional.

Planning the expansion of the transmission is a problem that has been studied since the emergence of electricity, knowing how to transmit and distribute energy efficiently is not a simple task, many studies on stability, and protection and calculations of future loads. Bearing this in mind, the presente work will demonstrate the importance of metaheuristics as a solution to this problem, but specifically through genetic algorithms. The importance and precision of the algorithm will be attributed, bringing it as a solution to future problems of increased demand in na SEP.

KEYWORDS: Transmission. Metaheuristics. Genetic algorithms. SEP.



INTRODUÇÃO

Uma das áreas mais tradicionais e antigas da engenharia elétrica é a que se refere aos sistemas de energia, popularmente conhecida como Sistemas Elétricos de Potência (SEP's). "Os SEP's são conjuntos compostos por centrais elétricas subestações de transformação e de interligação de linhas e receptores, tendo como principal função a geração, transmissão e distribuição de energia" (STEVENSON, 1982).

Dentre essas funções a que será analisada como estudo de caso é o planejamento da expansão da transmissão. Trata-se de um exemplo clássico de modelamento matemático para uma programação não linear inteira mista (PNLIM), "se refere a um estudo matemático extremamente complexo com uma explosão combinatorial de alternativas viáveis ou não viáveis, sendo a solução ótima aquela que possuir melhor função objetivo" (RÉNDON; ZULUGA; ROMERO; MONTICELLI, 2007).

O presente trabalho determina a solução do problema de Planejamento da Expansão do Sistema de Transmissão através dos Algoritmos Genéticos em conjunto com a formulação do modelo DC (*direct current*), também conhecido como modelo linearizado do fluxo de carga. Sendo ambos, ferramentas muito estudadas e utilizadas no desenvolvimento de projetos de otimização da expansão e transmissão de energia.

"Os AG são um ramo dos algoritmos evolucionários e como tal podem ser definidos como uma técnica de busca baseada numa metáfora do processo biológico de evolução natural, são técnicas heurísticas de otimização global que seguem a derivada de uma função de forma a encontrar o máximo local" (LINDEN, 2012).

Desta forma é notório que o desenvolvimento não se dará por uma busca exata e exaustiva, mas sim através de mecanismos de seleção natural, onde estes possuem grandes probabilidades de convergirem para a solução ótima.

MATERIAL E MÉTODOS

Existem diversas maneiras de se aplicar um estudo de expansão de um sistema de transmissão. "Qualquer ferramenta que possibilite encontrar uma ou mais soluções ótimas, de acordo com as restrições solicitadas pelo usuário, podem ser chamadas de técnicas de síntese de sistemas elétricos" (COPPIN, 2012). Essas são caracterizadas em métodos heurísticos e métodos exatos de otimização matemática. Em poucas palavras, algoritmos heurísticos são conjuntos de procedimentos simples, com o objetivo de encontrar soluções de ótima qualidade.

Dentre os principais modelos de otimização matemática usados na solução do problema de Expansão do Sistema de Transmissão encontra-se o modelo DC. Dito modelo se caracteriza pelo acoplamento entre as variáveis P e θ , "considerando apenas as equações de potência ativa, não levando em conta as magnitudes das tensões nodais e suas potências reativas" (MONTICELLI, 1983).

De acordo com Monticelli (1983), a linearização do fluxo de potência pode ser determinada através das seguintes etapas:

- a) Considerar apenas as equações de potência ativa (P);
b) As perdas ativas do sistema de transmissão devem ser desprezadas;

$$P_{km} = g_{km}V_k^2 - V_kV_m(g_{km} \cos(\theta_{km}) + b_{km} \text{sen}(\theta_{km})) \quad (1)$$

$$P_{km} = -V_kV_m b_{km} \text{sen}(\theta_{km}) \quad (2)$$

- c) Considerar as tensões eficazes iguais a 1 p.u.;

$$P_{km} = -b_{km} \text{sen}(\theta_{km}) \quad (3)$$

- d) Por fim, deve-se linearizar a senóide $\text{sen}(\theta_{km}) \approx \theta_{km} = (\theta_k - \theta_m)$;

$$P_{km} = -b_{km} \theta_{km} = -b_{km} (\theta_k - \theta_m) \quad (4)$$

$$P_{km} = -\frac{1}{X_{km}} \theta_{km} = -\frac{1}{X_{km}} (\theta_k - \theta_m) \quad (5)$$

Sendo P_{km} a potência ativa entre as barras k e m . Enquanto que g_{km} , b_{km} e X_{km} são respectivamente a condutância, susceptância e reatância do sistema, V_k e V_m as tensões nas barras k e m , e θ_{km} a variação angular da tensão entre as barras k e m .

Desta forma, as formulações matemáticas voltadas a otimização do planejamento de linhas de transmissão de um sistema DC podem ser representadas da seguinte maneira:

$$\text{Minimizar} \quad v = \sum_{(k,m)} c_{km} n_{km} \quad (6)$$

$$Sf + g = d$$

$$f_{km} - \gamma_{km} (n_{km}^0 + n_{km}) (\theta_k - \theta_m) = 0$$

$$|f_{km}| \leq (n_{km}^0 + n_{km}) \overline{f_{km}}$$

$$0 \leq g_k \leq \overline{g_k}$$

$$0 \leq n_{km} \leq \overline{n_{km}}$$

$$n_{km} \text{ inteiro}$$

$$f_{km} \text{ Irrestrito}$$

$$\theta_{km} \text{ Irrestrito}$$

Onde v é o investimento devido a adições de circuitos ao sistema enquanto que c_{km} e n_{km} são respectivamente o custo das linhas e número de linhas entre as barras k e m . A segunda e a terceira linha da equação 6 representam a primeira e segunda lei de Kirchhoff, em que S é a matriz de incidência de ramos do sistema elétrico, f o vetor de fluxo, g o vetor de geração, d a demanda do sistema, γ_{km} a susceptância entre as barras k e m , n_{km}^0 o número de circuitos

existentes e n_{km} o número de circuitos que serão adicionados. A partir da quarta linha da equação 6 estão presentes todas as restrições da capacidade de transmissão do sistema, sendo $|f_{km}|$ o módulo do fluxo máximo permitido entre as barras k e m , $\overline{f_{km}}$ o fluxo de carga máximo real que percorre uma linha, \overline{g}_k o vetor de máxima capacidade de geração e $\overline{n_{km}}$ o maior número de adições de linhas permitidas.

Embora na maioria das aplicações é possível determinar satisfatoriamente a solução do problema da Expansão do Sistema de Transmissão através dos modelos de otimização matemática propostos na literatura, existem situações nas quais o problema torna-se bastante complexo como é o caso dos modelos de Programação não Linear Inteira Mista (PNLIM). Neste contexto, os métodos de otimização combinatória surgem como uma alternativa de solução importante para a obtenção de soluções de boa qualidade através de um procedimento simplificado.

Dentre os principais métodos de otimização combinatória, encontra-se os Algoritmos Genéticos. Esta metodologia usa um procedimento inspirado na teoria de seleção natural Darwiniana, onde o mesmo é responsável em gerar uma sequência de populações através de mecanismos de seleção, recombinação e mutação. Uma forma de representar isso através de uma analogia, é considerar um bit como um gene e uma cadeia de bits sendo um cromossomo. “Então uma população seria um conjunto de cromossomos, e um cruzamento com mais de um cromossomo resultaria em um novo indivíduo” (COPPIN, 2012).

Neste trabalho a solução do problema de Planejamento da Expansão de Transmissão é obtida através dos Algoritmos Genéticos baseados na formulação matemática do modelo DC. É usado como sistema-teste um SEP de três barras com o intuito de explicar detalhadamente a metodologia proposta.

Para esse sistema a codificação do AG será na forma de variáveis inteiras, é considerado que o número de interligações de linhas entre cada barra seja de no máximo três. O conjunto inicial será dado através de uma população inicial gerada de forma aleatória, está que pode ser representada através de um vetor chamado de cromossomo de tamanho 3 (representam o número de ligações possíveis entre cada barra, barra 1-2, barra 1-3 e barra 2-3), onde cada bit desse vetor é chamado de genes, estes que irão variar de 0 a 3 (zero linhas até três linhas).

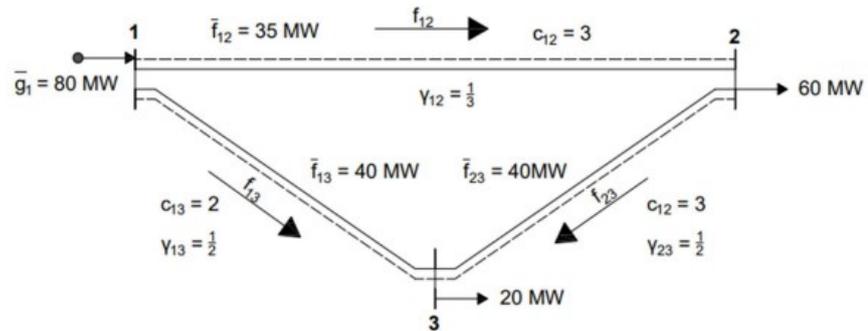
Após a criação da população inicial o AG fará uma avaliação da mesma, atribuindo um peso maior aos cromossomos com maior aptidão. Através desta avaliação o AG realizará os processos interativos como cruzamento, reprodução e mutação até que um indivíduo promissor seja gerado, este que pode ou não ser a resposta esperada para a solução.

A metodologia proposta foi implementada no software MATLAB e os resultados obtidos foram validados através da solução do modelo DC usando a ferramenta AMPL.

RESULTADOS E DISCUSSÕES

O problema de Planejamento de Expansão de três barras pode ser observado a seguir pela Figura 1.

Figura 1 – Sistema teste de três barras



Fonte: Autoria própria (2020).

Observando o sistema acima é possível perceber que a barra 1 se trata de uma central geradora, capaz de produzir 80 MW de energia que é distribuída entre as barras de cargas 2 e 3, a barra 2 é responsável pelo consumo de 60 MW enquanto que a barra 3 é responsável pelo consumo de 20 MW. O sistema inicial é composto por uma ligação entre cada barra, é necessário saber onde deve ser feito os devidos reforços de linha de tal forma que o fluxo de carga linearizado seja respeitado gerando o menor gasto de implementação possível.

Através da Figura 1 pode ser anotado todos os dados necessários para a resolução deste problema, que são:

Custo de implementação de uma nova linha de energia (considerando todo o tipo de material presente, desde metais condutores até as estruturas mecânicas) entre as barras 1, 2 e 3: $c_{12} = 3000$; $c_{13} = 2000$; $c_{14} = 2000$ (U\$)

Susceptâncias: $\gamma_{12} = \frac{1}{3}$; $\gamma_{13} = \frac{1}{2}$; $\gamma_{23} = \frac{1}{2}$ (p.u. sendo $P_b = 100$ MW)

Geração e carga: $\bar{g}_1 = 80$ MW; $\bar{d}_2 = 60$ MW; $\bar{d}_3 = 20$ MW

Enquanto que as restrições de fluxo máximo permitido entre linhas e número máximo de adições de linha se dão pelas equações (7), (8), (9) e (10). Fluxo máximo permitido entre linhas:

$$|\bar{f}_{12}| \leq 35 (1 + \bar{n}_{12}) \quad (7)$$

$$|\bar{f}_{13}| \leq 40 (1 + \bar{n}_{13}) \quad (8)$$

$$|\bar{f}_{23}| \leq 40 (1 + \bar{n}_{23}) \quad (9)$$

$$\bar{n}_{12} = \bar{n}_{13} = \bar{n}_{23} \leq 2 \quad (10)$$

Número máximo de adição de linhas permitidas por caminho (entre barras) deve ser menor que dois.

Levantando estes dados no algoritmo criado através do AMPL se tem os resultados representados na Figura 2.

Figura 2 – Resposta do software AMPL ao sistema teste de três barras

```
FO = 9
n12 = 1
n13 = 2
n23 = 1
f12 = 33.3333
f13 = 46.6667
f23 = -26.6667
```

Fonte: Autoria própria (2020).

Os dados representados pela Figura 2 são respectivamente a função objetivo (FO), número de linhas entre barras (n12, n13 e n23) e o fluxo de carga entre barras (f12, f13 e f23). Então a resposta ótima para este sistema possui um gasto de implementação de 9000 U\$. Percebe-se que as restrições de fluxo de carga e de número de linhas são obedecidas.

Após descobrir a resposta ótima do sistema basta comparar com a resposta obtida através do Algoritmo Genético criado no software MATLAB.

O algoritmo genético funcionará da seguinte forma: Primeiramente será gerada uma população inicial de forma aleatória de acordo com a entrada que o usuário definir, neste caso a população inicial se dá por um vetor cromossomo de tamanho seis. Isto significa que são geradas seis maneiras de interligar as barras diferentemente.

Após a criação da população inicial o AG avaliará os candidatos gerados através de uma função objetivo, a função objetivo é um cálculo de valor interno do AG que é responsável em retornar o custo da implementação do sistema. Tal fenômeno pode ser visualizado a seguir pelo Quadro 1.

Quadro 1 – Implementação da Função Objetivo do AG de três barras

Função Objetivo									

VALOR DA FUNÇÃO OBJETIVO									

L12	L13	L23	Custo	f12r	f13r	f23r	f12	f13	f23
3	2	2	17	46.7	33.3	-13.3	105	80	80
1	1	3	11	35.3	44.7	-24.7	35	40	120
1	2	3	13	25.7	54.3	-34.3	35	80	120
1	1	2	9	36.7	43.3	-23.3	35	40	80
3	2	1	15	50.0	30.0	-10.0	105	80	40
1	2	2	11	28.0	52.0	-32.0	35	80	80

Fonte: Autoria própria (2020).

Através do Quadro 1 pode ser observado que o quarto indivíduo gerado, se trata de uma “solução impossível” visto que o mesmo não respeita as leis de fluxo de carga, afinal o fluxo de carga que passa entre a barra 1 e 3 (43.3 MW) é superior ao fluxo de carga permitido (40 MW). No entanto não é interessante excluir este cromossomo, uma vez que existe a possibilidade do mesmo ser importante na obtenção da solução ótima do sistema, ao invés disso o AG usará uma ferramenta interna para penalizá-lo.

O próximo passo é realizar a seleção dos pais, essa seleção é realizada através do método roleta. Cria-se uma roleta, estilo gráfico de setores, onde estará presente toda a população inicial, no entanto os indivíduos com a melhor função objetivo (menor valor de custo de implementação) terão uma maior área nesta roleta. Após criada a roleta a mesma é girada por seis vezes (o número de giros sempre deverá ser igual ao tamanho da população criada) seguidas a fim de se escolher seis indivíduos para se reproduzirem. A seguir na Figura 3 pode ser observado os indivíduos selecionados para o cruzamento e seus respectivos “filhos”.

Figura 3 – Recombinação do AG de três barras

 RECOMBINAÇÃO

L12	L13	L23	Cromossomo
3	2	3	1 com 3
1	2	2	Cromossomo
1	1	2	4 com 1
3	2	2	
1	1	2	Cromossomo
3	2	2	4 com 1

Fonte: Autoria própria (2020).

Ao completar todo os passos anteriores o AG passará para a próxima etapa, esta que é conhecida como mutação, o processo de mutação de um AG consiste na possibilidade de alguns dos elementos do vetor cromossomo, conhecidos como genes, possuir uma probabilidade muito ínfima de sofrer uma alteração de dados.

Chega-se agora na etapa final que seria a nova avaliação do indivíduo, através do cálculo da função objetivo, que pode ser observado no Quadro 2.

Quadro 2 – Atualização da População do AG de três barras.

Atualização da Função Objetivo

 ATUALIZAÇÃO DA POPULAÇÃO

L12	L13	L23	Custo	f12r	f13r	f23r	f12	f13	f23
3	2	3	19	45.0	35.0	-15.0	105	80	120
1	2	2	11	28.0	52.0	-32.0	35	80	80
1	1	2	9	36.7	43.3	-23.3	35	40	80
3	2	2	17	46.7	33.3	-13.3	105	80	80
1	1	2	9	36.7	43.3	-23.3	35	40	80
3	2	2	17	46.7	33.3	-13.3	105	80	80

Fonte: Autoria própria (2020).

O AG continuará este loop de interação de acordo com o número escolhido pelo usuário. Ao concluir todas as interações o AG retornará o melhor resultado, resultado este que é observado pela Figura 4 abaixo.

Figura 4 – Solução ótima do AG de três barras

```
*****
A MELHOR SOLUÇÃO ENCONTRADA FOI:
*****
```

L12	L13	L23	Custo	f12r	f13r	f23r	f12	f13	f23
1	2	1	9	33.3	46.7	-26.7	35	80	40

Fonte: Autoria própria (2020).

CONCLUSÕES

O presente trabalho de iniciação científica teve como objetivo demonstrar a aplicação de um algoritmo evolutivo como uma forma de resolver o problema de planejamento da expansão da transmissão.

Através das comparações realizadas neste trabalho, nota-se que o algoritmo genético desenvolvido atinge bons resultados, por se tratar de um método metaheurístico de resolução.

De forma geral o AG sempre possuirá a chance de atingir a solução ótima, quanto maior a população inicial e o número de repetições do algoritmo, maior a chance de o mesmo atingir o resultado esperado, entretanto essa implementação também resultará em um maior tempo de máquina ao sistema, que muitas vezes não é o desejado.

REFERÊNCIAS

- STEVENSON, W. J. (1982). *Elementos de Análise de Sistemas de Potência*. São Paulo: McGraw-Hill. p. 20 – 74.
- RÉNDON, R. A., ZULUGA, A. E., ROMERO, A. L., & MONTICELLI, A. (2007). *Planejamento de la expansión de sistemas de transmisión de energía eléctrica*. Pereira: GP. p. 11 – 57.
- LINDEN, R. (2012). *Algoritmos Genéticos*. Rio de Janeiro: Editora Ciência Moderna LTDA. p. 101 - 133
- COPPIN, B. (2012). *Inteligência Artificial*. Rio de Janeiro: LTC. p. 40 - 42
- MONTICELLI, A. J. (1983). *Fluxo de Carga em Redes de Energia Elétrica*. São Paulo: Editora Edgard Blucher LTDA. p 17 -25