

OPTIMIZED STRUCTURAL DESIGN OF TRANSMISSION LINE CONDUCTOR

Joelington Tadeu da Silva Filho¹, Márcio André Araújo Cavalcante¹

¹*Campus of Engineering and Agricultural Sciences, Federal University of Alagoas
BR-104, Rio Largo, 57100-000, Alagoas, Brazil.
joelington.filho@ceca.ufal.br, marcio.cavalcante@ceca.ufal.br*

Abstract. *The transmission line conductor is an essential element of an electrical transmission system, once it defines the system efficiency, in terms of electrical conductance. However, the choice for the best material for a transmission line conductor does not consider just electrical properties, but also mechanical properties, as strength and stiffness. In terms of design, material cost is also an essential factor. Taking in account only electrical and mechanical properties, copper would be the best choice. However, it presents a high price, which makes the aluminum conductor steel reinforced the most common solution for a transmission line. The combination of these two materials overcomes the limited mechanical properties of the aluminum. In this study, optimization techniques are employed at the design of aluminum conductor steel reinforced to minimize the conductor's weight, based on a strength material approach, considering only its self-weight. In the optimization procedure, the aluminum and steel cross-sectional areas and the wire sag are the design variables, the conductor's weight is the objective function, and some electrical and mechanical considerations are adopted as restrictions. Thus, this study proposes a framework for an optimized design of transmission line conductors.*

Keywords: *Transmission line; Aluminum; Optimization.*

1 Introdução

A primeira linha de transmissão construída no Brasil foi em 1901, com a entrada em serviço da central hidrelétrica de Santana do Parnaíba, a então São Paulo Tramway, Light and Power Company, com um sistema de 40kV. Desde então, a demanda por energia elétrica só aumenta no país, e com ela a necessidade de se expandir as redes de transmissão, que têm como protagonista os cabos de transmissão aéreos [1].

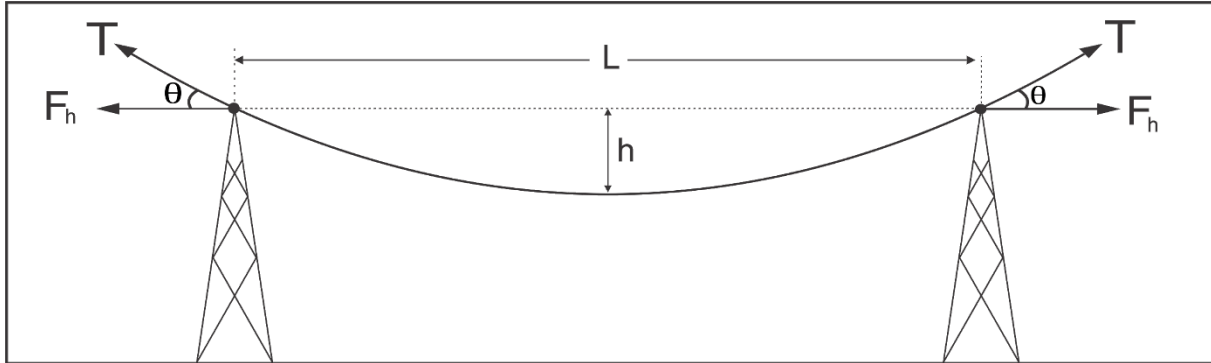
O Brasil conta com uma variabilidade de fontes geradoras de energia que promovem uma segurança energética para o país, porém, as perdas associadas à transmissão dessa energia até a unidade consumidora são as mesmas, resultando inevitavelmente em perdas técnicas relacionadas à transformação de energia elétrica em energia térmica nos condutores (efeito joule), além da queda de tensão da corrente elétrica transmitida por conta das longas distâncias percorridas pelo sistema.

Os cabos mais empregados na confecção das linhas de transmissão são os CA (cabo de alumínio) e CAA (cabo de alumínio com alma de aço), onde o alumínio exerce a função de condutor elétrico e o aço tem um papel estruturante, pois possui maior resistência mecânica que o alumínio. A escolha da configuração ótima dos cabos condutores deve considerar parâmetros elétricos, mecânicos, ambientais e térmicos. Porém, para esse trabalho analisamos apenas os aspectos mecânicos e elétricos, com o objetivo de avaliar a influência desses aspectos na otimização do projeto. No problema de otimização de cabos aéreos de linhas de transmissão de energia elétrica foram adotados a massa do cabo como função objetivo e a área e a flecha do cabo como variáveis de projeto.

2 Metodologia

A metodologia aplicada nesse trabalho consiste na avaliação dos esforços mecânicos no cabo decorrentes do seu peso próprio, além do emprego de parâmetros geométricos da estrutura e de fatores elétricos da linha, cujo objetivo é minimizar a massa do condutor, determinando-se as sessões transversais e flechas ótimas. Com este fim, adota-se a hipótese de que o cabo é perfeitamente flexível e inextensível, assim, o cabo considerado não resiste a esforços que provocam curvatura, ou seja, a força de tração atua sempre tangente ao cabo, além disso, o cabo tem seu comprimento constante, logo, as deformações que provocam aumento do seu comprimento são desprezíveis. Como consequência, o cabo assume a forma de uma catenária, como ilustrado na figura 1.

Figura 1. Representação ilustrativa do cabo condutor e torres de transmissão.



Para se determinar a flecha (h), deve-se utilizar a Eq.1 [2], que tem como variáveis a força horizontal (F_h), o peso linear (W_o) e o comprimento do vão (L), enquanto a Eq. 2 permite avaliar o valor da tração máxima atuante no cabo, deduzida a partir da relação entre T, F_h e θ no ponto de apoio, como ilustrado na figura 1 [2]. Por meio da Eq. 3, pode-se determinar o valor de L_o (comprimento do cabo) [2]:

$$h = \frac{F_h}{W_o} \left[\cosh \left(\frac{W_o L}{2F_h} \right) - 1 \right] \quad (1)$$

$$T_{\text{máx}} = F_h \cosh \left(\frac{W_o L}{2F_h} \right) \quad (2)$$

$$L_o = \frac{2F_h}{W_o} \sinh \left(\frac{W_o L}{2F_h} \right) \quad (3)$$

A partir da tração máxima atuante no cabo, pode-se determinar a tensão máxima ($\sigma_{\text{máx}}$) presente no cabo, por meio da Eq. 4 [4]. Assim, com base nas propriedades mecânicas do material, pode-se avaliar se o cabo resiste a tração sem sofrer grandes deformações ou se romper, pois o escoamento provocado por tensões mecânicas elevadas pode ocasionar o aparecimento de trechos de menor área de seção transversal (A), ocasionando perda de condutividade elétrica e fragilização mecânica.

$$\sigma_{\text{máx}} = \frac{T_{\text{máx}}}{A} \quad (4)$$

Quando temos cabos heterogêneos, ou seja, que são formados por mais de um material, podemos considerar que ambos os materiais se deformam igualmente ao longo do cabo, assim, podemos chegar nas Eq. 5 e 6 [4]:

$$\sigma_{\text{máx},2} = \frac{T_{\text{máx}}}{\left(\frac{E_1}{E_2} A_1 \right) + A_2} \quad (5)$$

$$\sigma_{\text{máx},1} = \sigma_{\text{máx},2} \frac{E_1}{E_2} \quad (6)$$

onde:

E_1 e $\sigma_{\text{máx},1}$ são o módulo de elasticidade e a tensão máxima do material 1;

E_2 e $\sigma_{m\acute{a}x,2}$ são o m3dulo de elasticidade e a tens3o m3xima do material 2.

Completando-se a an3lise dos parâmetros que foram selecionados para serem considerados nesse trabalho, tem-se a avaliaç3o da queda de tens3o el3trica da linha de transmiss3o calculada a partir da Eq. 6, que foi simplificada de [5] e [6]:

$$\% \Delta V = \frac{P l}{V} \left[\frac{\rho}{A_1} + \frac{f_z \mu_0 \tan(\varphi)}{4} \left(1 + \ln \frac{D}{\sqrt{A_1/\pi}} \right) \right] \quad (7)$$

na qual:

- % ΔV = queda de tens3o;
- V = tens3o da rede (kV)
- P = pot3ncia da rede (kW);
- l = comprimento total da linha (km);
- ρ = resistividade el3trica do condutor (Ωm);
- f_z = frequ3ncia da linha (H_z);
- μ_0 = permeabilidade magn3tica do v3cuo ($4\pi 10^{-7}$ H/m);
- D = espaç3o entre os condutores (m)
- φ = ângulo do fator de pot3ncia (Graus).

Para a determinaç3o da queda de tens3o, adotou-se uma linha de transmiss3o curta de 80 km, com 230 kV de tens3o, 165 MVA de pot3ncia, 60 H_z de frequ3ncia e espaç3amento entre os condutores de 5 metros, conforme prescrito em norma [3], um fator de pot3ncia de 90% e um percentual m3ximo de queda de tens3o de 3%. A tabela 1 apresenta as propriedades dos materiais que comp3em os dois tipos de cabos que foram utilizados nesse estudo.

Tabela 1 – Propriedades dos materiais [4] e [8]

Material do condutor	Massa especifica (Mg/m^3)	Tens3o de escoamento (MPa)	M3dulo de El3stica (GPa)	Condutividade el3trica (%ICAS)
Alum3nio 1350	2,7	30	70	61
Aço A-36	7,85	250	200	14

2.1 Otimizaç3o

Otimizaç3o 3 uma problema matem3tico com muitas aplicaç3es no “mundo real”. Consiste em encontrar os m3nimos ou m3ximos de uma funç3o de v3rias vari3veis, com valores dentro de uma determinada regi3o do espaç3o multidimensional [7]. Neste trabalho, empregou-se a funç3o de otimizaç3o *pattern search*, presente na toolbox de otimizaç3o do software MATLAB®, onde tamb3m foi feita a modelagem do problema para encontrar os valores 3timos das vari3veis de projeto. Neste estudo, as vari3veis de projeto s3o as 3reas das sess3es transversais dos materiais que comp3em o cabo condutor, a funç3o objetivo 3 a massa do condutor e as restriç3es que governam o nosso problema s3o de origem mec3nica e el3trica, empregando-se no primeiro caso o m3todo das tens3es admiss3veis e no segundo caso a queda de tens3o da linha. A Fig.2 mostra os elementos que foram adotados no problema de otimizaç3o do cabo de linha de transmiss3o.

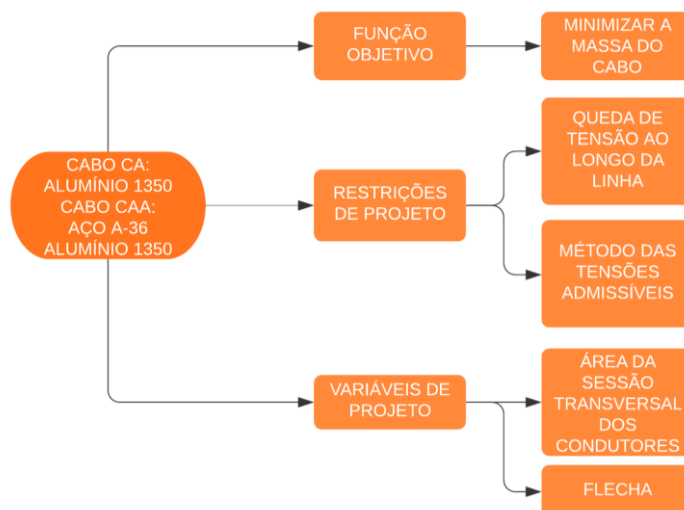


Figura 2. Elementos do problema de otimização adotados na função *pattern search* do software MATLAB®.

4. Resultados e discussões

Após as simulações aplicando-se o *pattern search*, chegou-se ao resultado ótimo da massa condutor para diferentes vãos. Essa metodologia nos permite avaliar o comportamento das variáveis de projeto quando são adotadas diferentes distâncias entre as torres de transmissão, variando-se de 100 até 500 metros. Esses resultados são apresentados na figura 3, e eles mostram que o cabo CAA, para as condições adotadas nesse trabalho, apresentou uma massa superior ao cabo CA, o que justifica o fato do emprego das ligas de alumínio ter se intensificado nos últimos anos, pois apresentam boa condutividade e maior resistência a ambientes agressivos, além de menor custo [9], uma vez que os condutores chegam a representar 20 a 40 por cento do custo do projeto, além deles terem relação direta na escolha da torre e na isolamento utilizada.

Fazendo-se um comparativo da massa por metro linear necessária nos 5 casos analisados, pode-se observar que o vão de 100 metros apresentou uma massa por metro linear menor, porém, o número de torres necessárias nesse tipo de empreendimento é consideravelmente maior em comparação aos vãos de 400 e 500 metros, o que pode resultar num maior custo total do projeto, mesmo utilizando-se um cabo mais barato.

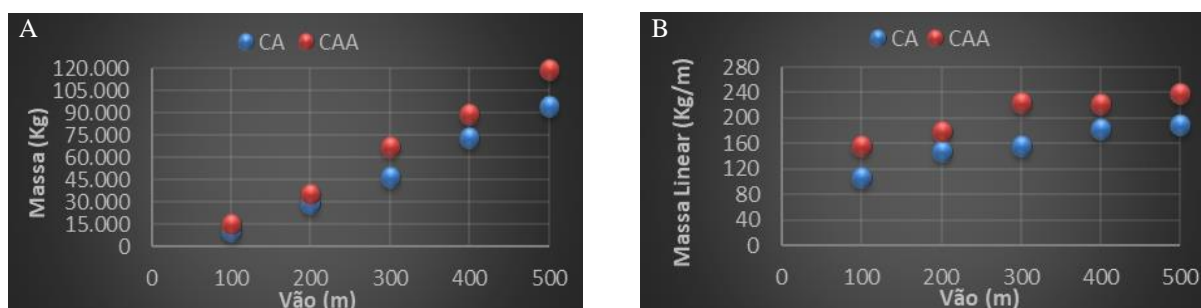


Figura 3 – Representação gráfica da massa do condutor por vão e massa linear por vão; A. Massa; B. Massa Linear.

5. Conclusão

Concluiu-se que a partir da metodologia empregada o cabo CA apresentou resultados melhores que o cabo CAA para as condições adotadas neste trabalho. No entanto, o cabo CAA apresenta uma maior segurança do ponto de vista mecânico ou estrutural, por conta da presença do aço. A escolha adequada do condutor é uma atividade importante e complexa num projeto de linhas de transmissão, deste modo, nenhum dos dois cabos pode ser idealizado como o melhor cabo para uso em linhas de transmissão, pois a escolha depende do tipo de projeto e das condições econômicas propiciadas pelos materiais constituintes. Além disso, os custos iniciais também interferem consideravelmente nos custos e nas perdas ao longo da vida útil do empreendimento. Como proposta para trabalhos

futuros, propõe-se a avaliação dos valores ótimos considerando-se a variação de temperatura, que influencia tanto na resistência mecânica quanto na resistência elétrica, a ação do vento, intemperes e demais fatores, além de avaliar os custos provenientes da seleção destes cabos na implementação do projeto.

Referências

- [1] P. R. Labegolini, J. A. Labegolini, R. D. Fuchs and M. T. Almeida. *Projetos Mecânicos das Linhas Aéreas de Transmissão*. 2 ed. Edgard Blücher, 1992.
- [2] R. C. Hibbler. *Estática: Mecânica para engenharia*. 12 ed. Pearson Prentice-Hall, 2011.
- [3] Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 5422. *Projeto de Linhas Aéreas de Transmissão de Energia Elétrica*. ABNT, 1985.
- [4] R. C. Hibbler. *Resistência dos Materiais*. 7 ed. Pearson Prentice-Hall, 2010.
- [5] L. C. Zanetta Jr. *Fundamentos de Sistemas Elétricos de Potência*. 1 ed. Livraria da Física, 2006.
- [6] C. C. B. Oliveira, H. P. Schmidt, N. Kagan and E. J. Robba. *Introdução a Sistemas Elétricos de Potência – Componentes Simétricas*. 2 ed. Edgard Blücher, 2000.
- [7] J. M. Martínez and S. A. Santos. *Métodos Computacionais de Otimização*. 1 ed. Sociedade Brasileira de Matemática, 1995.
- [8] Ficha Técnica de Materiais. Império dos Metais. Disponível em: <<https://www.imperiodosmetais.com.br/ficha-tecnica>>. Acesso em: 29/07/2020.
- [9] Nexans. *Catálogo de Condutores de Alumínio Nu*. Nexans, 2013.
- [10] V. P. Menezes. *Linhas De Transmissão de Energia Elétrica Aspectos Técnicos, orçamentários e construtivos*. Trabalho de Conclusão de Curso, UFRJ, 2015.