

Um modelo matemático de otimização para um projeto de linhas de transmissão compactas suportando múltiplos circuitos

A mathematical optimization model for a compact transmission line design supporting multiple circuits

DOI:10.34117/bjdv8n7-187

Recebimento dos originais: 23/05/2022

Aceitação para publicação: 30/06/2022

Felipe Augusto Oliveira Mota

Mestre em Engenharia Elétrica

Instituição: Instituto Federal do Norte de Minas Gerais - Campus Januária

Endereço: Fazenda São Geraldo, S/N, Januária - MG

E-mail: felipeaomota@gmail.com

Suzana Viana Mota

Mestra em Engenharia Elétrica

Instituição: Universidade Estadual de Campinas

Endereço: Cidade Universitária - Campinas-SP

E-mail: suzana.svm@gmail.com

RESUMO

A crescente necessidade da energia elétrica demanda um aumento constante na ampliação dos sistemas de transmissão. As linhas de transmissão compactas surgem como uma boa alternativa para a distribuição elétrica, devido a estrutura e potência, conseguem operar com uma maior força de transmissão e com custo baixo. O artigo apresenta um modelo matemático para otimizar essas linhas, considerando quatro circuitos de 138kV, 230kV, 345kV e 500kV. O modelo, considerado satisfatório, pode ser desenvolvido através dos algoritmos evolutivos. Por fim, é recomendada que sua aplicação seja executada com base na abordagem da incerteza de medição, para que possam ser obtidos melhores resultados.

Palavras-chave: linhas de transmissão compactas, modelo matemático, múltiplos circuitos, otimização.

ABSTRACT

The growing need for electric power demands a constant increase in the expansion of transmission systems. Compact transmission lines emerge as a good alternative for electrical distribution, due to their structure and power, they can operate with a greater transmission force and at low cost. The article presents a mathematical model to optimize these lines, considering four circuits of 138kV, 230kV, 345kV and 500kV. The model, considered satisfactory, can be developed using evolutionary algorithms. Finally, it is recommended that its application be performed based on the measurement uncertainty approach, so that better results can be obtained.

Keywords: compact transmission lines, mathematical model, multiple circuits, optimization.

1 INTRODUÇÃO

HISTORICAMENTE as linhas de transmissão surgiram para possibilitar que a limitação que existia na distribuição de corrente contínua em grandes distâncias fosse vencida[1].

A primeira linha que se tem registro no Brasil foi construída por volta de 1883, na cidade de Diamantina, Minas Gérias. Essa linha transportava energia gerada em uma usina hidroelétrica, construída de duas rodas d'água e dois dínamos Gramme, a uma distância de 2km, aproximadamente. A energia transmitida acionava bombas hidráulicas em uma mina de diamantes. Na época chegou a ser considerada como a linha mais longa do mundo[2].

Com o passar dos anos a demanda de energia elétrica foi crescendo cada vez mais, devido ao surgimento e popularização de vários meios eletrônicos. É possível afirmar que, atualmente, a população da terra não consegue viver sem a eletricidade.

A constância no aumento da demanda de energia elétrica gera a necessidade de ampliação dos sistemas de transmissão. A implantação de novas linhas de transmissão vem enfrentando dificuldades em funções de fatores externos, como diminuição do impacto ambiental e alto custo para construir novas faixas de servidão de passagem[3].

Desde a década de 90, quando o setor elétrico brasileiro foi aberto legalmente aos investimentos privados, diversos estudos foram realizados para viabilizar projetos de linhas de transmissão com mais baixa relação Reias/MW. [4]

As linhas compactas surgem como uma boa opção de operacionalização, tendo em vista que podem operar com uma maior carga de energia elétrica, utilizando o mesmo "espaço físico" que uma linha de transmissão comum utilizaria. Para que essas linhas possam trabalhar de forma mais eficiente, é interessante que sejam desenvolvidos projetos para otimizá-las.

Segundo o dicionário brasileiro, otimização consiste em extrair o melhor rendimento possível, no que concerne a qualquer área de atividade. Na matemática a otimização será concebida através de estudos de problemas que buscam minimizar ou maximar uma função através da escolha sistemática dos valores de variáveis reais ou inteira dentro de um conjunto viável[5].

A caracterização do problema proposto se define em encontrar um meio de otimização para linhas de transmissão compactas com múltiplos circuitos, uma vez que a demanda de energia elétrica está cada vez maior e o custo para implementação de linhas de transmissão encontra-se alto. Observando ainda o fator da alta demanda escolheu-se

trabalhar com um circuito de alta tensão e outros três de extra-alta tensão, que são os mais comuns de serem utilizados.

O objetivo deste artigo é desenvolver um modelo matemático para a problematização, considerando os circuitos de tensões 138kV, 230kV, 345kV e 500kV.

2 METODOLOGIA

Com base na NBR 5422 e em toda a pesquisa desenvolvida, a metodologia para a definição do modelo matemático do referido problema de otimização, consiste em analisar os seguintes parâmetros: Escolha da topologia da estrutura, escolha de cabos condutores, escolha dos cabos para-raios, definição do número de cabos por feixe, definição das posições dos cabos em cada feixe e definição da posição dos cabos para-raios.

Após as definições de cada parâmetro, serão apresentadas as funções objetivos e restrições do modelo matemático, observando as tensões dos quatro circuitos propostos (138kV, 230kV, 345kV e 500kV).

3 LEVANTAMENTOS INICIAIS

O primeiro passo para iniciar o projeto é o levantamento topográfico de toda a instalação existente[3]. A NBR 5422 considera, como levantamento inicial a rugosidade dos terrenos (tabela 1) e ação do vento.

As definições básicas do vento serão dadas considerando um período de retorno de 50 anos, a 10 metros de altura do solo, com período de integração de 10 minutos e medida em um terreno com categoria de rugosidade B. O cálculo para o vento de retorno em qualquer época, correção do vento para alturas diferentes e vento de projeto serão apresentados a seguir.

TABELA I
COEFICIENTE DE RUGOSIDADE DO TERRENO

Categoria do terreno	Características do terreno	Coefficiente de rugosidade k_r
A	Vastas extensões de água; Áreas planas nas costeiras; desertos planos	1,08
B	Terreno aberto com poucos obstáculos	1,00
C	Terreno com obstáculos numerosos e pequenos	0,85

D Áreas urbanizadas; terrenos com muitas árvores altas

Fonte NBR 5422

O cálculo para vento de retorno em qualquer época é definido por:

$$V_T = \beta - \frac{\ln\left[-\ln\left(1 - \frac{1}{T}\right)\right]}{\alpha} \quad (1)$$

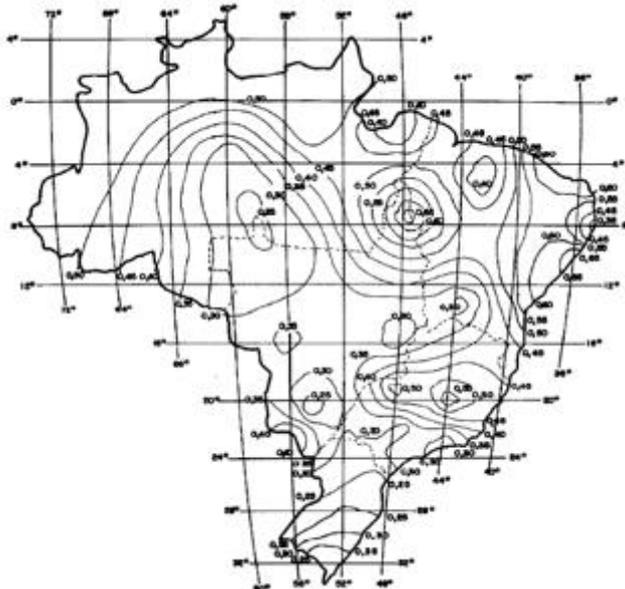
Onde:

α = Estimador do fator de escala da distribuição Gumbel, obtido através da figura 1

β = Estimador do fator de posição da distribuição Gumbel, obtido através da figura 2

T = Tempo de retorno para o qual deseja calcular

Fig. 1. Parâmetro alfa da distribuição estatística de Gumel (m/s)



Fonte: NBR5422

A figura 3 apresenta a relação k_d entre os valores médios de vento a 10 metros de altura do solo, para diferentes períodos de integração e rugosidade de terreno. Com base nela será possível calcular a correção do vento para alturas diferentes.

$$V_H = V_{10} \cdot \left(\frac{H}{10}\right)^{\frac{1}{n}} \quad (2)$$

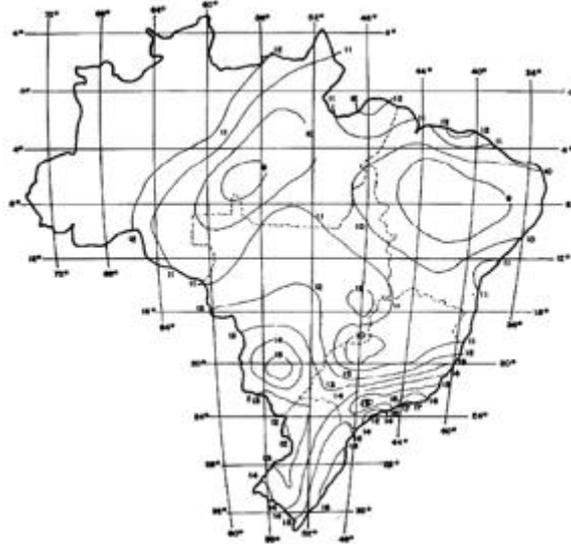
Onde:

V_{10} = Velocidade de vento a 10m de altura

V_H = Velocidade de vento à altura H

n = Depende da rugosidade do terreno e período de integração, conforme tabela 2.

Fig. 2. Parâmetro beta da distribuição estatística de Gumbel (m/s). Fonte: NBR5422



Por fim, a velocidade do vento de projeto será obtida através da seguinte fórmula:

$$V_p = K_r \cdot K_d \left(\frac{H}{10} \right)^{\frac{1}{n}} \cdot V_T \quad (3)$$

Fig. 3. Relação entre as velocidades médias a 10m de altura. Fonte: NBR5422

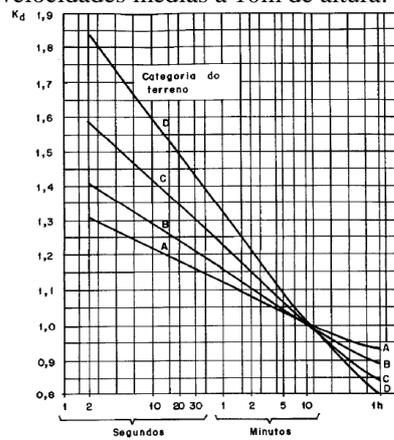


TABELA II
VALORES DE n PARA CORREÇÃO DE VELOCIDADE DO VENTO EM FUNÇÃO DA ALTURA

Categori a do terreno	n	
	$t = 2 \text{ seg}$	$t = 30 \text{ seg}$
A	13	12
B	12	11
C	10	9,5
D	8,5	8

Fonte NBR 5422

4 ESCOLHA DA TOPOLOGIA DA ESTRUTURA

A estrutura da torre é um componente com dupla função, onde mantém o espaçamento entre cabos condutores e para-raios, além de oferecer sustentação ao circuito.

As linhas de transmissão trabalham com três topologias, que determinam a disposição dos condutores na torre: Triangular, Horizontal e Vertical[6].

A Topologia Triangular consiste em condutores dispostos segundo os vértices de um triângulo. Essa disposição pode ser simétrica, caso a representação seja um triângulo equilátero, ou assimétrica, quando é definida por um outro tipo de triângulo. A Topologia Horizontal exige uma estrutura mais larga, porém de menor tamanho. Consiste em alocar os condutores em um mesmo plano horizontal. A Topologia Vertical apresenta os condutores dispostos em um mesmo plano vertical.

Quando tratada a forma de resistir aos condutores, as estruturas sofrem com três solicitações diferentes: axial vertical, horizontal transversal e horizontal longitudinal. As estruturas serão classificadas em dois grupos, observando o comportamento face a essas cargas: Estruturas Autoportantes e Estruturas Estaiadas[6].

Nas Estruturas Autoportantes todos os esforços estão diretamente transmitidos para suas fundações. Já as Estruturas Estaiadas são normalmente flexíveis ou mistas, enrijecidas através de tirantes ou estais. Estes absorvem partes dos esforços horizontais, transmitindo-os diretamente ao solo através de âncoras. A outra parte dos esforços é transmitida axialmente pela estrutura.

Ao se definir a topologia que será empregada na estrutura é essencial preocupar com as restrições apresentadas pela NBR 5422 para distância de segurança.

O primeiro ponto a ser observado é o Ângulo de Balanço da cadeia de isoladores devido a ação do vento sobre os cabos:

$$\beta = \text{tg}^{-1}(k \cdot \text{tg}\beta_R) \quad (4)$$

Onde:

β = Ângulo de balanço

k= Valor lido na figura 4

β_R = Ângulo de balanço teórico, definido pela seguinte expressão:

$$\text{tg}\beta_R = \frac{q_o \cdot d}{p \cdot (V / H)}$$

Onde:

q_o = Pressão dinâmica de referência, definida na NBR5422

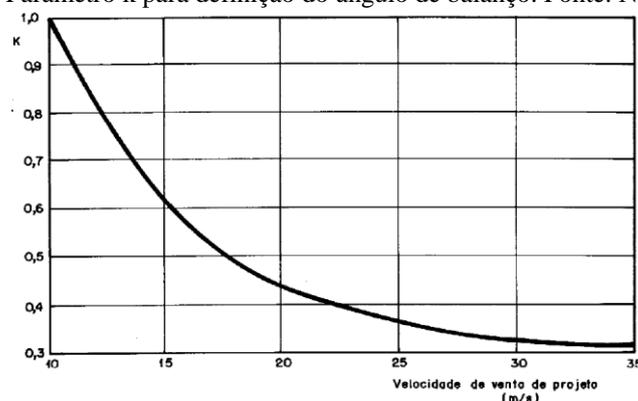
d= Diâmetro do condutor

p= Peso unitário do condutor

V= Vão de peso

H= Vão de vento

Fig. 4. Parâmetro k para definição do ângulo de balanço. Fonte: NBR5422



As distâncias mínimas no suporte serão definidas observando os critérios para os circuitos diferentes, uma vez que todas as tensões apresentadas na problematização são maiores que 50kV.

Distância Horizontal entre fases. Tomar o maior valor entre:

$$\begin{aligned} a) D &= 0,22 + 0,01D_u \\ b) D &= 0,37\sqrt{f} + 0,0076D_u \end{aligned} \quad (5)$$

Distância Vertical entre fases:

$$D = 0,50 + 0,01D_U \quad (6)$$

Respeitado o mínimo de 1 metro.

Distância entre fases e cabo para-raio:

$$D = 0,22 + 0,01D_U \quad (7)$$

Onde:

D= Distância de Segurança

f= Flecha do Condutor

D_U= Tensão

A flecha do condutor representa a maior distância vertical entre a linha que liga os pontos de apoio do cabo e um ponto da curva[3].

$$f = \frac{T_0}{p} \cdot \left[\cosh \left(\frac{A}{2 \frac{T_0}{p}} \right) - 1 \right] \quad (8)$$

Onde:

T₀ = Tração com direção a tangente da curva

f = Flecha pela equação da centenária

p = Peso unitário do condutor

A= Vão

Outro fator importante para a definição da topologia da estrutura é a distância mínima do condutor ao solo ou aos obstáculos em condições normais de operações. Esse conhecimento proporcionará definir o a altura da torre.

A NBR 5422 determina um cálculo para circuitos com tensões menores ou iguais a 87kV e outro para maiores que 87kV. Como a menor tensão a ser trabalhada é a de 138kV, será apresentado apenas o segundo cálculo.

$$D = a + 0,01 \left(\frac{D_u}{\sqrt{3}} - 50 \right) \quad (9)$$

Onde:

a = Distância básica, definida pela tabela 3.

TABELA III
DISTÂNCIAS BÁSICAS

Natureza da região ou obstáculo atravessado pela linha ou que dele se aproxime	Distância Básica a (m)
Locais acessíveis apenas a pedestres	6,0
Locais onde circulam máquinas agrícolas	6,5
Rodovias, ruas e avenida	8,0
Ferrovias não eletrificadas	9,0
Ferrovias eletrificadas ou com previsão de eletrificação	12,0
Suporte de linha pertencente a rodovia	4,0
Águas navegáveis	H+2,0
Águas não navegáveis	6,0
Linhas de Energia elétrica	1,2
Linhas de telecomunicações	1,8
Telhados e Terraços	4,0
Paredes	3,0
Instalações transportadoras	3,0
Veículos ferroviários e rodoviários	0,67

Fonte: NBR 5422

Outra distância que será determinada é a mínima entre condutores de suportes diferentes. Os limites de aproximação serão definidos através da distância horizontal (D_H), distância vertical (D_V) e distância Diagonal (D_D).

A NBR5422 indica que na condição de maior aproximação, os condutores de cada uma das linhas devem ser considerados na condição de descolamento, estando os condutores da outra linha na condição de repouso.

Distância Horizontal:

$$D_H = 0,22 + 0,01D_U \quad (10)$$

A distância vertical é obtida como indicado em (9) e a distância diagonal é igual ao maior valor entre D_H e D_V .

O último fator importante na escolha da topologia é a faixa de segurança. Faixa de terra ao longo do eixo da linha aérea de subtransmissão e transmissão, necessária para garantir seu bom desempenho, a segurança de instalações e de terceiros. [7]

A largura da faixa de segurança deve ser determinada considerando-se o balanço dos cabos devido à ação do vento, efeitos elétricos e posicionamento das fundações. Para Tensões nominais menores ou iguais a 230kV a NBR5422 apresenta dois cálculos, o primeiro para o caso de uma única linha e o segundo para o caso de várias linhas.

A largura mínima da faixa de segurança para uma única linha será determinada por:

$$L = 2 \cdot (b + d + D) \quad (11)$$

Onde:

- b= Distância horizontal do eixo do suporte ao ponto de fixação do condutor mais afastado deste eixo, em metros;
d= Soma das projeções horizontais da flecha do condutor e o comprimento da cadeia de isoladores, em metros, após seu deslocamento angular β devido à ação do vento.
D= $D_U/150$, em metros, no mínimo igual a 0,5m.

Já no caso de várias linhas, a largura mínima da faixa de segurança será determinada por:

$$L = \sum ds_i + d_1 + b_1 + D_1 + d_n + b_n + D_n \quad (12)$$

Onde:

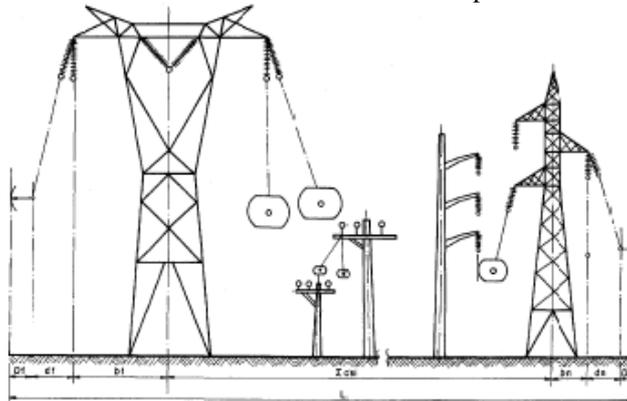
- $\sum ds_i$ = Distância conforme figura 5, observando-se (10).
 d_1, D_1, d_n, D_n = Distâncias indicadas na figura 5, conforme (11).
 b_1, b_n = Distâncias horizontais dos eixos dos suportes mais externos aos seus pontos de fixação do condutor mais afastado, conforme figura 5.

Quando as tensões nominais são superiores a 230kV, a faixa de segurança deverá ser verificada quanto aos aspectos referentes à ignição de combustível, aos níveis de rádio-interferência, ao ruído audível e a interferência na recepção de TV, compatíveis com a região atravessada pela linha.

Nesse caso, considera-se o valor do campo elétrico ao nível do solo, no limite da faixa de segurança, não deve ultrapassar 5kV/m.

Para a determinação de alguns termos dos cálculos será necessário trabalhar com o fator temperatura. O mesmo será discutido nas seções posteriores.

Fig. 5. Faixa de Servidão - Linha com caminhamento paralelo. Fonte: NBR5422



5 ESCOLHA DE CABOS CONDUTORES

Os cabos condutores são considerados os elementos ativos das linhas de transmissão e dimensionados para transportar uma potência compatível com a sua capacidade térmica. Devem ser selecionados com suficientes condições para atender um regime normal ou de emergência.

Alguns dos cabos mais usuais são:

- AAAC: Conductor de liga de alumínio;
- CAA: Conductor de alumínio com alma de aço;
- ACAR: Conductor de alumínio com alma e liga de alumínio;

Na definição dos condutores é importante observar os condutores com melhor capacidade de transmissão nas referidas tensões nominais do circuito e que ao mesmo tempo gere um menor custo econômico para sua aquisição e implementação.

Um fator que influencia a condução de energia no cabo é a temperatura. É importante observar todas as restrições que a NBR5422 apresenta para temperatura.

A ação de alguns fatores gerando perda e ganho de calor, a "nova" corrente que poderá ser transmitida é chamada de Ampacidade.

A ampacidade está relacionada à capacidade de transmissão de energia elétrica de uma determinada linha, calculada no vão crítico, que tem maior possibilidade de violação da altura cabo solo quando a linha de transmissão opera na condição nominal de tensão [8].

O valor da ampacidade representa o valor máximo de corrente que deverá circular pelo cabo condutor para que ele atinja a temperatura para qual foi projetado, mantendo assim, os valores de flecha calculados. Para realizar o método simplificado para obtenção do ampacidade do cabo será necessário considerar as seguintes informações: [3]

- Radiação solar de 1000 W/m²
- Velocidade do vento de 1m/s
- Temperatura média do ar

A temperatura num regime permanente será alcançada pelo cabo, quando existir um equilíbrio entre o ganho e a perda de calor. Dois fatores que influenciam, principalmente, o ganho de calor é a radiação solar e o efeito Joule, gerado pela circulação de corrente pelo condutor.

O efeito Joule será determinado através:

$$q_j = I_2 \cdot r \quad (13)$$

Onde:

q_j = Ganho de calor por efeito Joule [W/km]

I = Corrente que circula pelo condutor [A]

r = Resistência do condutor à temperatura de equilíbrio

A radiação solar que afeta o cabo será obtida considerando o valor médio indicativo em climas temperados.

$$q_s = 204 \cdot d \quad (14)$$

Onde:

q_s = Ganho de Calor por radiação solar [W/m]

d = Diâmetro nominal do cabo [m]

A perda de calor será determinada por convecção e irradiação. A convecção é obtida através:

$$q_c = 945,6 \cdot (t - t_o) \cdot 10^{-4} \cdot [0,32 + 0,43 \cdot (45946,8 \cdot d \cdot V)^{0,52}]$$

(15)

Onde:

q_c = Perda de calor do cabo [W/m]

V = Velocidade do vento, em geral de 0,6 a 1,0 m/s

t = Temperatura final do cabo [°C]

t_o = Temperatura do meio ambiente [°C]

d = Diâmetro nominal do cabo [m]

A perda de calor por irradiação será conhecida através:

$$q_r = 179,2 \cdot 10^3 \cdot E \cdot d \cdot \left[\left(\frac{T}{1000} \right)^4 - \left(\frac{T_o}{1000} \right)^4 \right] \quad (16)$$

Onde:

q_r = perda de calor por irradiação

E = Emissividade - varia de 0,23 a 0,90, conforme cor do cabo

d = Diâmetro nominal do cabo [m]

T = Temperatura absoluta final do cabo [K]

T_o = Temperatura absoluta do ambiente [K]

Assim, equilíbrio de temperatura será obtido:

$$q_j + q_s = q_c + q_r \quad (17)$$

Fazendo um relacionamento entre as operações, pode-se determinar a ampacidade.

$$I = \sqrt{\frac{(q_r + q_c - q_s) \cdot 10^3}{r}} \quad (18)$$

Onde:

I = Ampacidade

6 ESCOLHA DE CABOS PARA-RAIOS

As linhas de transmissão, utilizadas para transportar grandes quantidades de energia elétrica, utilizam os cabos para-raios para protegê-las de descargas atmosféricas (raios), evitando com isso o seu desligamento.

Os principais fatores a serem estudados na escolha de um cabo para-raio são: desempenho mecânico, atenuação do sinal de comunicação, corrosão, capacidade de suportar correntes de curto-circuito, perdas e consideração econômica. [monografia rio]

No projeto proposto, a definição dos cabo para-raio se dará pelo custo. Para obter, multiplica-se o peso total do cabo em quilos (kg) pelo preço do cabo em reais (R\$) [abordagem mult], gerando uma relação real por quilo (R\$/kg).

7 DEFINIÇÃO DO NÚMERO DE CABOS POR FEIXE

A problematização proposta trabalha com circuitos de quatro tensões diferentes. Quanto maior for a tensão, maior terá que ser o diâmetro do cabo condutor para combater o Efeito Corona, que ocorre devido às partículas de ar, d e poeiras e a alta umidade encontrada em torno dos condutores, que quando submetido a um campo elétrico muito elevado e intenso, tornam-se ionizadas e, como consequência emitem luz.

O efeito corona provoca perdas de eletricidade que podem variar de alguns quilowatts até algumas centenas de quilowatts por quilômetros, principalmente quando as linhas de transmissão ficam sob condições adversas de chuvas ou garoas.

Aumentar o diâmetro do cabo acarretará num aumento considerável do seu custo. Outra solução é a utilização de mais de um condutor por fase. O campo elétrico de cada cabo condutor do feixe resulta em campo elétrico equivalente a um único condutor de diâmetro maior[9].

Exceto o circuito de tensão 138kV (alta tensão), todos os outros são definidos como extra-alta tensão o que resultará na necessidade de mais um cabo por feixe.

8 DEFINIÇÃO DAS POSIÇÕES DOS CABOS EM CADA FEIXE

As posições dos cabos em cada feixe podem ser determinadas de três formas diferentes: Circuito Tradicional, Recapitado e Compacto[9].

- Circuito Convencional: Os condutores de cada fase estão com altura média em relação ao solo de 11 m e separados por uma distância de 50 cm. As fases estão alinhadas e os cabos para-raios ficam a uma altura média de 22m.
- Circuito Recapitado: Os condutores de cada fase estão em um ponto mais

alto com uma altura média de 10,5m em relação ao solo, porém não formam um quadrado. os grupos de condutores inferiores de cada ponta estão um pouco mais baixos que o grupo de condutores central. os dois cabos para-raios ficam a uma altura média de 20,5m do solo.

- **Circuito Compacto:** Os cabos condutores por fase centrais estão a uma altura média maior do que o grupo de cabos condutores laterais. Os cabos para-raios ficam a uma altura média de 266m em relação ao solo.

As figuras 6, 7 e 8 apresentam os esquemas de cada uma das posições. Para tal representação foi considerado que os circuitos eram trifásicos, com quatro cabos por feixe.

9 DEFINIÇÃO DA POSIÇÃO DOS CABOS PARA-RAIOS

A posição dos cabos para-raios deve observar (7) e está disposto em um ângulo que possa proteger todos os componentes da estrutura da torre.

10 ISOLADORES

O bom desempenho de uma linha de transmissão está diretamente ligado ao seu isolamento. Nos projetos atuais são levados em consideração para dimensionamento do isolamento da mesma, os seguintes fatores: classe de tensão, surtos de tensão por manobra, resistência de aterramento, contaminação industrial e ou salina, nível isoceráunico da região, densidade relativa do ar e pressão atmosférica[10].

Fig. 6. Circuito Convencional

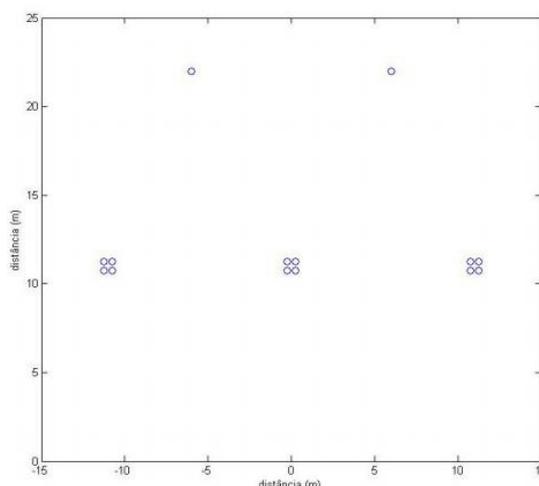


Fig. 7. Circuito Recapitado

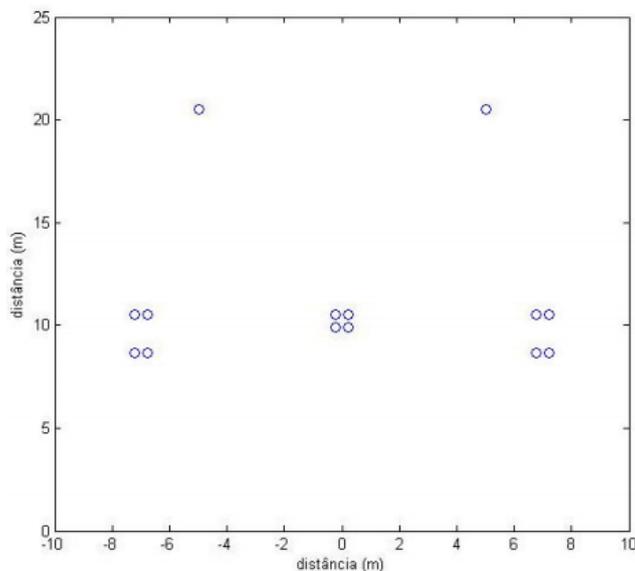
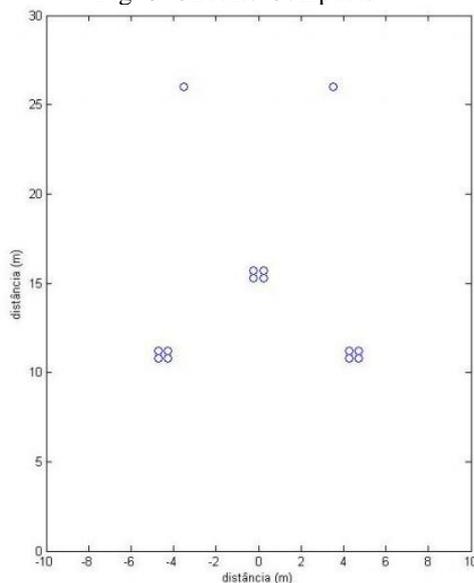


Fig. 8. Circuito Compacto



Para se determinar a tensão resultante na cadeia de isoladores da linha, a onda de sobretensão gerada no topo da torre pela descarga deve ser subtraída do valor instantâneo dos condutores da linha, o que pode causar aumento ou diminuição da tensão[11].

A tabela 4 apresenta os valores típicos de NBI (Nível Básico de Isolamento) e a quantidade de isoladores típica por nível de tensão.

TABELA IV
VALORES TÍPICOS DE NBI POR NÍVEL DE TENSÃO E RESPECTIVO NÚMERO DE ISOLADORES

Nível de Tensão (kV)	NBI (kV)	Número de Isoladores
138	550	Menor que 11
230	975	11-14
345	1240	15-19
500	1612	22-28

Fonte: CEMIG 2010[11] / COPEL 2007

11 FUNÇÕES OBJETIVOS E RESTRIÇÕES

O modelo matemático desenvolvido é multiobjetivo com restrições. O problema geral de otimização multiobjetivo foi definido por Osyczka(1985) como sendo o problema que visa encontrar um vetor de variáveis de decisão que satisfaz as restrições e otimiza uma função vetor cujos elementos representam as funções objetivo. Estas funções formam uma descrição matemática dos critérios de desempenho que normalmente são conflitantes entre eles[12].

Tomando como base todos os parâmetros apresentados na metodologia. A aplicação desse modelo matemático proporcionará a otimização das linhas compactas suportando os circuitos propostos.

As funções objetivo são:

- f_1 : Maximizar a Transmissão;
- f_2 : Minimização da Altura Cabo-Solo;
- f_3 : Minimização das Perdas;
- f_4 : Minimização dos Custos.

A Maximização da Transmissão consiste em manter a ampacidade alta de forma que fique bem próxima da tensão nominal do cabo. Para desenvolvimento da f_1 será tomado como base o cálculo (18).

$$f_1 = \sqrt{\frac{(q_r + q_c - q_s) \cdot 10^3}{r}} \quad (19)$$

A Minimização da Altura Cabo-solo manterá o cabo mais baixo da estrutura a uma altura de segurança mínima confiável. Para o desenvolvimento considera-se:

D_{ub} = Tensão do cabo mais baixo da estrutura.

A função apresentada é inspirada no cálculo (9).

$$f_2 = a + 0,01 \left(\frac{D_{ub}}{\sqrt{3}} - 50 \right) \quad (20)$$

A Minimização das Perdas será determinadas através do conhecimento da perda determinística de Joule[3], onde:

Nf = Número de fases

Rc = Resistência do condutor

Fc= Fator de Carga

Através dessas definições, foi possível desenvolver a função da seguinte forma:

$$f_3 = Nf \cdot Rc \cdot (Fc \cdot I)^2 \quad (21)$$

A Minimização dos Custos será definida através dos valores dos cabos condutores, cabos para-raio e do valor restante da estrutura. Para o desenvolvimento da função, foram as seguintes considerações:

C=Valor do cabo condutor $\rightarrow C = \sum \text{peso.custo}$

Nf=Número de fases do cabo condutor

Cp=Valor do cabo para-raio $\rightarrow Cp = \sum \text{peso.custo}$

Ve=Somatório de outros valores da estrutura

Diante do exposto, a função seria definida por:

$$f_4 = C \cdot Nf + Cp + Ve \quad (22)$$

O modelo matemática assumirá como restrições os seguintes parâmetros apresentados pela NBR5422:

- Ângulo do balanço da cadeia de isoladores;
- Distâncias mínimas no suporte;
- Distância mínima de condutores em suportes diferentes;
- Largura da faixa de Segurança.

A observância dessas restrições no desenvolvimento das funções objetivos indicará os valores otimizados que auxiliarão na definição dos parâmetros inicialmente definidos na metodologia.

12 ANÁLISE CRÍTICA DO MODELO

O modelo matemático desenvolvido é considerado satisfatório. Nesta seção é apresentada uma proposta sobre algoritmos para resolução e é feita uma consideração sobre a incerteza de medição.

13 ALGORITMOS PARA RESOLUÇÃO

Para resolver o modelo matemático é proposto a utilização de algoritmos evolutivos.

A maior motivação para usar algoritmos evolutivos (principalmente os algoritmos genéticos) para resolver problemas de otimização multiobjetivos é devido ao fato de os AEs lidarem simultaneamente com um conjunto de possíveis soluções (população) que nos permite encontrar vários membros do conjunto Pareto-ótimo em apenas uma execução do algoritmo ao invés de ter que realizar uma série de execuções separadas[12]

14 INCERTEZA DE MEDIÇÃO

Todos os cálculos executados para definição das funções objetivo e restrições foram obtidos através de medições com diferentes unidades do sistema de medida, utilizando a abordagem clássica da medição.

A metrologia moderna tende a cada vez mais se afastar da abordagem clássica e se aproximar da abordagem da incerteza de medição [13].

A mudança no tratamento da abordagem clássica a uma abordagem de incerteza levou à reconsideração de alguns conceitos. O objetivo da primeira é determinar uma estimativa do valor verdadeiro que esteja tão próxima quanto possível do valor verdadeiro único. Já na segunda Considera que o valor verdadeiro não é conhecível.[14]

Se considerado apenas o modelo matemático gerado, sem pensar nas incertezas, ele conseguirá otimizar o problema proposto com uma boa aceitação. Porém, para que seja executado com uma melhor eficiência é recomendado que ele seja adaptado acrescentando em cada função as suas respectivas incertezas.

As incertezas podem variar de acordo com o influência do ambiente, aparelhos e métodos utilizados em cada medição. A experiência de quem for desenvolver o projeto contará muito para determinação das mesmas.

15 ALGORITMOS EVOLUTIVOS E INCERTEZAS

As incertezas podem ser consideradas no algoritmos evolutivo inserindo-as nos

coeficientes das funções objetivos e/ou restrições. Um algoritmo que consegue trabalhar bem com essa demanda é o NSGA-II, apontado pela literatura como um dos melhores algoritmos genéticos para problemas multiobjetivos.

16 CONCLUSÕES

O artigo propôs desenvolver um modelo matemático multiobjetivo restrito para otimizar uma linha de transmissão compacta suportando circuitos com tensões de 138kV, 230kV, 345kV e 500kV.

As quatro funções objetivo desenvolvidas tiveram as distâncias (balanço, mínima entre condutores de suportes diferentes, mínima dos condutores ao solo ou obstáculos e faixa de segurança), como suas maiores restrições. Elas se apresentaram como essências para a definição da maioria dos parâmetros inicialmente propostos.

Considera-se satisfatório o modelo matemático gerado, conseguindo minimizar e maximizar tudo o que foi proposto. Mas é recomendado que na sua aplicação seja inserido o conceito da abordagem da incerteza de medição.

REFERÊNCIAS

I.M.D. Júnior, "Linhas de transmissão compactas urbanas a adequação de uma evolução tecnológica a parâmetros de licenciamento ambiental existentes," Mestrado. Dissertação, Instituto de Engenharia do Paraná.IEP, Curitiba, PR, 2009.

R.S. Daltin, "Representação modal alternativa de linhas de transmissão trifásicas simétricas não idealmente transpostas," Mestrado. Dissertação, Dept. Eng. UNESP, Ilha Solteira, SP, 2006.

R.S. Cavassin, T.S.P. Fernandes, "Uma abordagem multicritérios para recapitação de linhas de transmissão", presente na Revista Controle & Automação. Vol.23.nº6, Novembro e Dezembro, 2012.

L.V.F. Oliveira, D.S. Júnior, M.P. Vinagre, "Otimização de linhas de transmissão pela avaliação numérica do Vetor de Poynting", presente no IV Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos, Goiania, GO, Maio, 2012.

A.R. da Cruz, O.M. Neto, R.H.C. Takahashi, "Uma otimização multiobjetivo para a definição de uma linha de transmissão elétrica Via NSGA-II", presente no IX Simpósio de Mecânica Computacional UFSJ, São João del Rei, MG, Maio, 2010.

Componentes de Linhas de Transmissão Aéreas e NBR 5422, Douglas Ângelo Teixeira, Belo Horizonte, MG, 2015.

Especificação técnica para limitação do uso de faixa de linhas de subtransmissão e transmissão da CEL PAR - 69kV, 138kV e 230kV, CELG PAR, Goiás, 2010.

C.M.F. Oliveira, "Recapitação de linhas de transmissão," Mestrado. Dissertação, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, 2000.

F.V.C. Bezerra, "Projeto eletromecânico de linhas aéreas de transmissão de extra alta tensão," Graduação. Monografia, Dept. Eng. Eletr. UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, 2010.

Plena Transmissoras. (2008, Março). Transmissão de Energia Elétrica. [Online]. Disponível: <http://www.ebah.com.br/content/ABAAAeiiAAF/apostila-transmissao-energia-eletrica-curso-basico>

L.V. Cunha, "Desempenho de linhas de transmissão frente a descargas atmosféricas: influência do efeito corona na ruptura ao meio vão," Mestrado. Dissertação, Dept. Eng. Eletr. UFMG, Belo Horizonte, MG, 2010.

H.M. Ares, L.C.B. dos Santos, R.C. Silva, L.M.O. de Queiroz, "Algoritmo evolutivo para problemas de otimização multiobjetivo com incertezas", presente no XXXIX Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional, Fortaleza, CE, Agosto, 2007.

C. Ehrlich, R. Dybkaer, W. Wöger, "Evolution of philosophy and description of measurement (preliminary rationale for VIM3)", presente no NCSLI Workshop and Symposium, Nashville, TN, USA, Agosto, 2006.

Vocabulário Internacional de Metrologia, 1º ed. Luso-brasileira, 2012.

Projeto de Linhas Aéreas de Transmissão de Energia Elétrica - NBR 5422, Associação Brasileira de Normas Técnicas, 1985.

Manual de Fornecimento de Energia Elétrica nas Tensões de 69kV, 138kV, 230kV, Departamento de Grande Clientes, COPEL, 2007.