

Modelagem Multicritério Aplicada às Linhas de Transmissão Compactas Suportando Múltiplos Circuitos

Ciniro Ap. Leite Nametala
Instituto Federal de Minas Gerais (IFMG)
Departamento de Engenharia e Computação
Bambuí, MG, Brasil
Email: ciniro.nametala@ifmg.edu.br

Paulo Estevão Teixeira Martins
Universidade de São Paulo (USP)
Departamento de Engenharia Elétrica e de Computação
São Carlos, SP, Brasil
Email: pauloetm@usp.br

Resumo—O emprego de múltiplos circuitos em linhas de transmissão compactas permite o aumento da eficiência das estruturas que transportam energia elétrica. Apesar desse tipo de linha gerar ganhos consideráveis em vários aspectos, as mesmas não são empregadas devido à sua alta complexidade de construção, seu elevado custo e às limitações técnicas diversas, sequer previstas em normas hoje vigentes no Brasil. O projeto de uma linha de transmissão desse tipo não é convencional, por isso é necessário o desenvolvimento de tecnologias que se ajustem às diversas restrições existentes quanto à sua aplicação. Neste trabalho é utilizada uma abordagem multicritério que busca modelar matematicamente o problema das linhas de transmissão compactas que suportam múltiplos circuitos.

Index Terms—Linhas de Transmissão Compactas, Múltiplos Circuitos, Modelagem Matemática, Otimização Multiobjetivos.

I. INTRODUÇÃO

No Brasil, nas décadas de 60, 70 e 80, houve um notório empenho do governo, em conjunto com as concessionárias de energia elétrica do país, na pesquisa, desenvolvimento e aplicação de tecnologias que tiveram por objetivo garantir o fornecimento num contexto, já naquela época, de aumento constante na demanda [1]. Atualmente, não são incomuns publicações em todos os tipos de mídias que, motivadas por pesquisas recentes da área, noticiam a necessidade de adequações no atual sistema elétrico nacional. As previsões pessimistas têm impacto direto na economia, afetando assim o crescimento não só da indústria e comércio, como também, do estado como um todo [2].

O Ministério de Minas e Energia do Governo Federal publicou um relatório no ano de 2014 intitulado “Projeção de demanda de energia elétrica para os próximos 10 anos” [3]. Uma das conclusões do documento é que, apesar de aperfeiçoamentos que vem sendo incorporados à rede existente e da construção de novas usinas, se faz necessário o investimento não somente na manutenção do sistema interligado, como também, no desenvolvimento de tecnologias que permitam uma maior eficiência no transporte da energia elétrica. Neste sentido, se mostram como alternativas às linhas de transmissão convencionais, as denominadas linhas de transmissão compactas, em especial, as com suporte a múltiplos circuitos.

Linhas de transmissão compactas com múltiplos circuitos são estruturas não existentes nos atuais sistemas elétricos de potência devido à sua alta complexidade, custo e também à limitações técnicas. O emprego desse tipo de tecnologia exige a coexistência, no mesmo sistema, de condutores transmitindo tensões variando entre 138 kV e 500 kV. Normas técnicas vigentes no Brasil desde 1985, como a NBR 5222 [4], não preveem regras para a implantação desse tipo de estrutura, ficando assim o campo de estudo restrito somente ao meio acadêmico.

Trabalhos como os desenvolvidos por [1] buscam o desenvolvimento de técnicas que permitam a utilização das linhas de transmissão compactas com múltiplos circuitos. Nesses estudos uma abordagem comumente vista é a utilização de análise multicritério na modelagem matemática do problema. Esse tipo de metodologia, em que são envolvidas diversas restrições, tem apresentado resultados promissores em diversas áreas do conhecimento quando aplicado juntamente com técnicas computacionais [5].

Nesse contexto, este trabalho propõe a utilização da abordagem multicritério para a modelagem matemática do problema das linhas de transmissão compactas para múltiplos circuitos. A técnica aqui discutida foi baseada em metodologia já empregada no problema de recapacitação de linhas de transmissão (LT) conforme apresentado em [6]. Buscou-se incorporar no escopo, principalmente, o projeto mecânico com foco na topologia da torre de suporte, na escolha dos cabos condutores, cabos para-raios, quantidade de cabos por feixe, posicionamento dos cabos em cada feixe e posicionamento dos cabos para-raios.

Este artigo apresenta no domínio do estudo e, na sequência a seguir, a caracterização do problema, a metodologia empregada para cada critério abordado, uma análise crítica do ponto de vista da otimização do modelo e uma conclusão sobre o emprego da técnica discutida.

II. CARACTERIZAÇÃO DO PROBLEMA

A linha de transmissão interliga a usina geradora e o centro consumidor. Todo o sistema elétrico depende da linha

de transmissão, pois é através dela que se dá e é definida a capacidade de transporte de energia elétrica. A linha de transmissão influencia também na qualidade da energia, que muitas vezes depende de seus elementos construtivos como torres, condutores, cabos para-raios, isoladores e etc. Nesse sentido, para reduzir perdas durante a transmissão e também manter a qualidade da energia, elevadas tensões são utilizadas. Isso possibilita correntes menores circulando, e a escolha adequada dos cabos (de forma a reduzir a impedância série da linha) reduz um pouco mais as perdas de energia. No contexto da qualidade de energia essa redução termina por amenizar os efeitos de variações de tensão sentidos pelos consumidores com relação à entrada e saída de grandes blocos de carga do sistema [7].

Muitos objetivos podem ser contemplados junto ao método de otimização multicritério. Assim, propõe-se a modelagem matemática, de forma restrita, de uma linha que atenda a existência simultânea de circuitos com tensão de 138 kV, 230 kV, 345 kV e 500 kV. Para as dadas tensões são abordadas restrições oriundas da literatura referenciada, em consonância com o exposto na norma NBR 5222/1985 [4].

III. METODOLOGIA

A metodologia utilizada consiste em definir as restrições para cada um dos pontos de interesse com relação ao projeto da LT e, nestes pontos, levantar condições de minimização ou maximização. As fórmulas para cálculos de cada um dos aspectos de interesse são apresentadas e condensadas numa expressão que formaliza a modelagem do problema, sendo:

$$(condicao) \quad f_{indice} \quad (1)$$

onde *condicao* é apresentada como *min* ou *max*, tratando do critério de otimização, sendo minimizar ou maximizar respectivamente o resultado obtido. *f* é a função para cálculo do ponto de interesse e *indice* é a especificação do ponto que está sendo tratado.

A. Cabos Condutores

A escolha dos cabos influencia em diversos aspectos do projeto e construção de uma LT, inclusive na topologia da estrutura, que é tratada na Seção III.C deste trabalho.

1) *Escolha dos Cabos Condutores*: A escolha do cabo condutor para uma linha de transmissão que está sendo projetada deve levar em conta inicialmente:

- Baixa resistividade: reduz ao longo da linha as quedas de tensão e as perdas por efeito *Joule* e *Corona* no transporte;
- Elevada resistência mecânica: todas as forças mecânicas exigidas do cabo devem ser adequadas;
- Elevada resistência à corrosão atmosférica: a vida útil de toda a linha deve ser prolongada garantindo o investimento;
- Baixo custo: a exploração da linha de transmissão deve ser rentável, sendo que os custos envolvidos em sua construção devem ser levados em consideração.

Neste sentido é importante considerar como restrições na escolha dos cabos a corrente máxima permitida de tal modo que o cabo não exceda o limite de temperatura projetado, o material adotado em sua construção que determinará os esforços mecânicos em toda a estrutura, a vida útil do mesmo e, por fim, as perdas estimadas.

O cálculo da ampacidade pode ser feito com base na ideia de que um cabo atinge a temperatura em regime permanente no momento em que o calor perdido e o calor ganho pelo cabo estiverem em equilíbrio [6].

O ganho de calor pelo cabo possui uma parcela devida ao efeito *Joule*:

$$q_j = I^2 \cdot r \quad (2)$$

onde q_j é o ganho de calor por efeito Joule dado em W/km , I é a corrente circulando pelo condutor (A) e r é o valor da resistência do condutor na temperatura de equilíbrio (Ω/km).

A outra parte do calor ganho pelo cabo é devida à radiação solar:

$$q_s = 204 \cdot d \quad (3)$$

onde q_s é o ganho de calor por radiação solar (em W/m) e d é o valor do diâmetro nominal do cabo (em m).

A perda de calor pode ser em decorrência da convecção:

$$q_c = 945,6 \cdot (t - t_0) \cdot 10^{-4} \cdot [0,32 + 0,43 \cdot (45946,8 \cdot d \cdot V)^{0,52}] \quad (4)$$

onde q_c é o valor da perda de calor em W/m , V é a velocidade do vento (m/s), t é a temperatura final do cabo ($^{\circ}C$), t_0 é a temperatura do meio ambiente ($^{\circ}C$) e d é o valor do diâmetro nominal do cabo (em m).

Também ocorre perda de calor por irradiação:

$$q_r = 179,2 \cdot 10^3 \cdot \varepsilon \cdot d \cdot \left[\left(\frac{T}{1000} \right)^4 - \left(\frac{T_0}{1000} \right)^4 \right] \quad (5)$$

onde q_r é a perda por irradiação (W/m), ε é o valor da emissividade (varia de 0,23 a 0,90, sendo aproximadamente 0,5 para cabos de alumínio), d é o diâmetro nominal do cabo (m), T é a temperatura absoluta final do cabo (K) e T_0 é a temperatura absoluta do ambiente (K).

Então, o valor da ampacidade (em A) é dado por (6) [6]:

$$f_i = I = \sqrt{\frac{(q_r + q_c - q_s) \cdot 10^3}{r}} \quad (6)$$

Esse valor de ampacidade deve ser maximizado:

$$\max f_i \quad (7)$$

O cálculo do valor que determinará o esforço na estrutura é baseado nas premissas exigidas pela mesma norma e deve ser comparado com os disponíveis nos catálogos dos fabricantes. O esforço nas estruturas deve ser minimizado. Nesse sentido é necessário considerar que [6]:

$$f_{est} = F_{vcabo} + T_{cabo} \quad (8)$$

onde f_{est} é a força exercida na estrutura, F_{vcabo} é a força que o cabo provoca nos pontos de suspensão e T_{cabo} é a tração do cabo. Assim:

$$\min f_{est} \quad (9)$$

O cálculo das perdas pelo efeito *Joule* é realizado em função da temperatura e da corrente pela qual está submetida a linha de transmissão. A perda deve ser minimizada e seu cálculo é baseado em [8], sendo:

$$f_p = P_j = n_f \cdot R_{cond} \cdot (F_c \cdot I)^2 \quad (10)$$

onde P_j é a perda determinística por efeito *Joule* (W/km), n_f é o número de fases, R_{cond} é a resistência do condutor (em Ω/km), F_c é o fator de carga e I é o valor eficaz da corrente elétrica nominal (A). Como a perda deve ser minimizada:

$$\min f_p \quad (11)$$

Por fim, o custo do cabo condutor deve ser considerado com vias à minimização do investimento sem que as outras restrições sejam violadas. O cálculo do custo é o mesmo realizado para cabos para-raios, logo:

$$\min f_{custocond} \quad (12)$$

onde $f_{custocond}$ é o custo do cabo condutor de acordo com seu peso total calculado conforme (18).

2) *Definição do número e posição de cabos por feixe*: A definição do número de cabos por feixe e seu posicionamento é decorrente dos problemas gerados quando cabos condutores transmitem elevados níveis de tensão. Grande parte desses problemas tem origem no chamado Efeito *Corona*.

O Efeito *Corona* cria no entorno do cabo condutor pequenas descargas que provocam a degradação do dielétrico imposto pelo ar. Esse fenômeno provoca, além de perdas de potência no sistema (que devem ser supridas pela fonte), diversos tipos de interferência em sinais de TV e rádio, ruídos audíveis, emissão de luz, vibrações e liberação de ozônio. Existem algumas formas de se evitar o Efeito *Corona*, sendo que as mais comuns tratam do aumento do diâmetro do condutor, do uso de condutores tubulares e expandidos e/ou da utilização de múltiplos condutores por fase de forma a reduzir as linhas de fluxo do campo elétrico (Figura 1) [9].

O Efeito *Corona* tem início a partir do momento em que uma tensão crítica V_c é atingida, sendo esse valor:

$$V_c = 2,43 \cdot m \cdot \delta \cdot d \cdot \log \left(\frac{2 \cdot D}{d} \right) \quad (13)$$

onde V_c é o valor de pico da tensão crítica de corona (em kV), m é o coeficiente de rugosidade do cabo (0,93 para fios e 0,87 para cabos), d é o diâmetro do condutor (em mm), D é a distância entre os condutores (em mm) e δ é o coeficiente

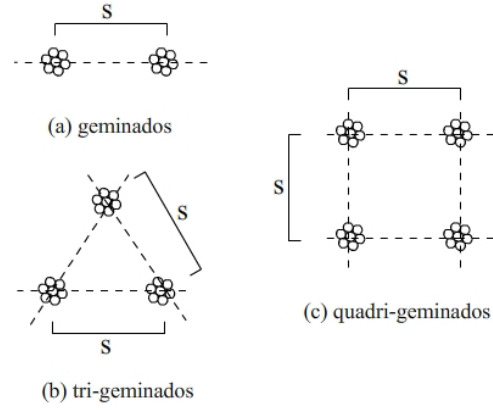


Figura 1. Tipos de disposição de cabos por feixe.

que depende da temperatura e altitude da linha. O cálculo de δ é feito por meio de (14):

$$\delta = \frac{0,386 \cdot (760 - 0,086 \cdot H)}{273 + t} \quad (14)$$

onde H é a altitude (em metros) e t é a temperatura média anual (em Celsius) que pode ser visualizada no Gráfico 25 do Anexo A da NBR 5222/1985 [4].

Por fim, as perdas a serem minimizadas são calculadas com a fórmula de *PEEK* [9]:

$$P = \frac{3,44}{\delta} \cdot f \cdot \sqrt{\frac{d}{2 \cdot D}} \cdot (V - V_c)^2 \cdot 10^{-3} \quad (15)$$

onde f é a frequência do sistema (em Hz) e V é a tensão de pico a pico da rede (em kV). O resultado da estimativa de perdas de potência é dado em kW/km .

As perdas de potência ativa P , chamadas de f_{ndcond} , devem ser minimizadas:

$$\min f_{ndcond} \quad (16)$$

B. Cabos Para-raios

Buscando-se evitar sobretensões na linha de transmissão é necessário a instalação de cabos para-raios. Os cabos para-raios, em caso de descargas atmosféricas, reduzem a corrente de surto fazendo-a fluir até o aterramento, dado que estes são conectados em paralelo às cadeias de isoladores [9].

1) *Escolha dos cabos para-raios*: Levando-se em conta as características padronizadas pela NBR 5422/1985 [4] e as práticas comumente observadas no país, para este trabalho foi considerada a possibilidade de utilização de qualquer cabo para-raios que provenha, pelo menos, os requisitos tratados a seguir. Foram adotados como base para a implantação dos cabos os parâmetros descritos pela norma na região sudeste (para outras regiões existem variações nos valores):

- Diâmetro de 1,11 cm a 1,27 cm (conforme [10]);
- Temperatura média, sem vento, em condição de trabalho de maior duração, com taxa de amostragem horária, ou seja, variando entre 20 °C e 24 °C;

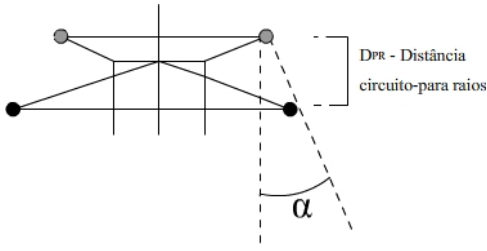


Figura 2. Posicionamento do cabo para-raios.

- Temperatura máxima, sem vento, conforme distribuição das temperaturas máximas diárias, ou seja, variando entre 25 °C a 30 °C;
- Temperatura mínima, sem vento, com probabilidade de 2% de vir a ocorrer temperatura menor anualmente, conforme distribuição de temperaturas mínimas anuais, ou seja, variando entre -2 °C e 12 °C;
- Temperaturas coincidentes quanto à ocorrência da velocidade do vento de projeto associada à média de temperatura mínima, ou seja, variando entre 14 °C e 20 °C.

A obtenção da temperatura na região de implantação do cabo para-raios pode ser obtida através de registros de mensurações realizados por órgãos de controle ou através do cálculo proposto no Anexo B da NBR 5422/1985 [4].

2) *Definição da posição dos cabos para-raios:* O posicionamento de um cabo para-raios deve ser realizado no topo da estrutura, a fim de prover proteção para todos os circuitos instalados. Esse posicionamento deve levar em conta a distância deste para o circuito mais alto na torre. A distância circuito-para-raios é apresentada em (31) e influencia diretamente na altura da estrutura de sustentação.

Outro ponto importante é o ângulo de proteção α que o cabo para-raio projeta sobre toda a torre (Figura 2). Esse ângulo deve ser fixado, segundo [10], em no máximo 15°. Em [11] é proposta uma tabela padronizada para o posicionamento do cabo de acordo com a topologia. Como neste trabalho são pretendidos múltiplos circuitos, deve-se considerar o de tensão 500 kV posicionado no topo da estrutura. Assim, adotou-se a recomendação feita em [10].

3) *Restrições quanto a cabos para-raios:* Dado que se adotou um posicionamento fixo para o cabo para-raios e que existem características não variáveis quanto à sua escolha, o principal critério de restrição passa a ser o custo. Assim, pretende-se escolher um cabo que atenda aos requisitos, que seja posicionado conforme descrito e que tenha o menor custo possível, logo:

$$\min f_{custopr} \quad (17)$$

onde $f_{custopr}$ é o custo do cabo, sendo que este é dado pelo peso do cabo ($pesototal$ em kg) multiplicado pelo preço do cabo (em R\$/kg). O preço do cabo é dado pelo fabricante e o peso total é calculado conforme (18):

$$pesototal = n \cdot L \cdot p \quad (18)$$

onde L é comprimento total do cabo, n é o número de cabos utilizados e p é o peso unitário do cabo. O cálculo do comprimento total do cabo pode ser feito por meio da Equação da catenária [6], sendo:

$$L = \sqrt{h^2 + 4 \cdot \left(\frac{T_0}{p}\right)^2 \cdot \sinh^2 \left(\frac{A}{2 \cdot \frac{T_0}{p}}\right)} \quad (19)$$

onde L é o comprimento do cabo pela equação da catenária para vãos desnivelados, T_0 é a tração do cabo, A é o comprimento do vão e h é a diferença de altura entre as estruturas. O mesmo cálculo de preço é utilizado para a estimativa do custo de cabos condutores.

C. Topologia da Estrutura

A topologia da estrutura diz respeito à técnica escolhida para o projeto das estruturas que irão sustentar os cabos existentes nas linhas de transmissão aéreas. Não são abordadas neste estudo as linhas submarinas e subterrâneas.

1) *Minimização da faixa de passagem:* Conforme observa-se na Figura 3, a faixa de passagem D (em metros) é composta da soma das distâncias fase-terra (D_1), balanço do cabo (D_2) e faixa de segurança (D_3).

A distância fase-terra D_1 (em metros) é dada de forma normalizada pela NBR 5422/1985 [4], por meio da Tabela 4 – distâncias mínimas no suporte, sendo:

$$D_1 = 0,03 + 0,005 \cdot D_u \quad (20a)$$

$$D_1 = 0,09 + 0,006 \cdot D_u \quad (20b)$$

onde D_u é a distância (em metros) numericamente igual à tensão eficaz fase-fase do circuito (em kV) para (a) tratando-se de elementos de suporte e para (b) tratando-se de estais.

Além do cálculo da distância fase-terra já tratado, a distância entre circuitos dispostos em lados opostos da estrutura também deve ser levada em conta. Essa distância é dada também de acordo com a Tabela 4 – distâncias mínimas no suporte da norma e pode ser observada como D_{h2} na Figura 4. Deve-se escolher o maior valor entre:

$$D_{h2} = 0,22 + 0,01 \cdot D_u \quad (21a)$$

$$D_{h2} = 0,37 \cdot \sqrt{f_x} + 0,0076 \cdot D_u \quad (21b)$$

onde f_x é o valor da flecha (em metros) que, segundo [6], é dada por:

$$f_x = \frac{T_0}{p} \cdot \left[\cosh \left(\frac{A}{2 \cdot \frac{T_0}{p}} \right) - 1 \right] \quad (22)$$

onde T_0 é a tração com direção tangente à curva (em kgf), p é o peso unitário do condutor (em kgf/m) e A é o vão (em metros).

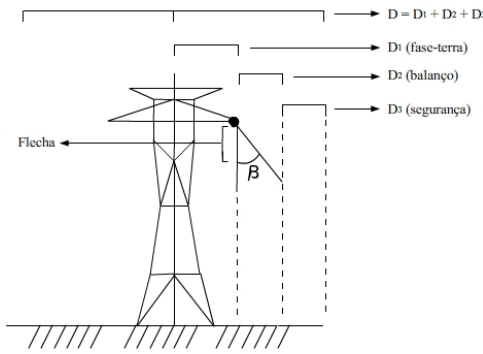


Figura 3. Distâncias relevantes à faixa de passagem.

A distância D_2 referente ao balanço é determinada pelo ângulo β gerado pelo cabo de acordo com o tamanho da sua flecha, em decorrência da velocidade básica do vento (V_b) em uma dada região. O valor desse ângulo é dado, conforme a norma [4], como:

$$\beta = \tan^{-1}(K \cdot \tan \cdot \beta_R) \quad (23)$$

onde K é um valor que pode ser obtido na Figura 7 da norma [4]. β_R é o ângulo teórico de balanço dado por:

$$\beta_R = \tan^{-1} \left(\frac{q_0 \cdot d}{p \cdot (V/H)} \right) \quad (24)$$

onde q_0 é a pressão dinâmica de referência (extraída diretamente da norma em sua Seção 8.2.1), d é o diâmetro do condutor (em metros), p é o peso unitário do condutor (em N/m), V é o tamanho do vão de peso (em metros) e H é o tamanho do vão de vento (em metros).

Assim, a distância de balanço D_2 (em metros), levando-se em conta a estrutura de ferragens e isoladores, é geometricamente dada por:

$$D_2 = f_x \cdot K \cdot \tan \cdot \beta_R \quad (25)$$

A última distância a ser calculada é a distância de segurança D_3 (em metros). O valor da mesma é dado, segundo a norma [4], por:

$$D_3 = \frac{D_u}{150} \quad (26)$$

A distância D (Figura 3) diz respeito somente a um dos lados da estrutura. Logo, deve-se proceder também com o cálculo do valor para o outro lado. O critério de minimização correspondente à faixa de passagem pode ser expresso como:

$$f_{fp} = (D_1 + D_2 + D_3)_{esquerda} + (D_1 + D_2 + D_3)_{direita} \quad (27)$$

onde f_{fp} é o tamanho da faixa de passagem (em metros) a ser minimizada:

$$\min f_{fp} \quad (28)$$

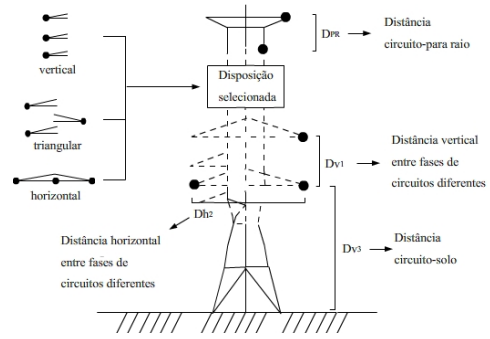


Figura 4. Distâncias entre circuitos.

2) *Minimização da altura da torre*: Conforme observado na Figura 4, o cálculo da altura da torre está condicionado à determinação dos valores de distância mínimos entre os circuitos e seus condutores verticalmente. Toma-se por base o somatório das distâncias mínimas entre fases de condutores de circuitos diferentes D_{v1} , a distância mínima entre o último condutor do topo da estrutura para o cabo para-raios D_{PR} e a distância mínima do primeiro condutor da base da estrutura para o solo D_{v3} .

Diferentes valores de tensão exigirão diferentes distâncias, sendo neste caso, menos exigente a tensão de 138 kV. Logo, deve-se tomar por premissa que os circuitos devem ser dispostos de forma crescente na estrutura, começando de 138 kV na base até, finalmente, dispor 500 kV no topo da torre.

O cálculo para determinação da distância mínima entre circuitos pode ser extraído da Tabela 4 – distâncias mínimas no suporte da norma [4], e é dado por:

$$D_{v1} = 0,50 + 0,01 \cdot D_u \quad (29)$$

A distância total entre os condutores é a soma das distâncias obtidas entre todos os circuitos dispostos na estrutura.

A distância mínima de segurança da primeira fase do primeiro circuito na base da estrutura para o solo pode ser determinada, em condições normais de operação, para todas as tensões aqui apresentadas, de acordo com a expressão (30):

$$D_{v3} = a + 0,01 \cdot \left(\frac{D_u}{\sqrt{3}} - 50 \right) \quad (30)$$

onde a é um valor que, conforme o ambiente de instalação da estrutura possui valores (em metros) diferentes, os quais podem ser consultados nas especificações contidas na Tabela 5 – distâncias básicas da norma [4].

A expressão para o cálculo da distância mínima exigida entre a última fase do último circuito no topo da estrutura e o cabo para-raios é dada pela expressão extraída da Tabela 4 – distâncias mínimas no suporte da norma [4], sendo:

$$D_{PR} = 0,22 + 0,01 \cdot D_u \quad (31)$$

Por fim, o valor de altura a ser minimizado para a estrutura corresponde a:

$$f_{at} = \left(\sum_{i=1}^{nc-1} D_{v1} \right) + D_{PR} + D_{v3} \quad (32)$$

onde f_{at} é a altura da torre (em metros) e nc é a quantidade de circuitos dispostos verticalmente com fases que exigem distâncias D_{v1} mínimas, sendo a função de restrição:

$$\min f_{at} \quad (33)$$

IV. OTIMIZAÇÃO DO PROBLEMA

Após a apresentação dos diversos critérios que devem ser considerados, procede-se a listá-los para melhor entendimento na Tabela I.

Tabela I
VARIÁVEIS DE OTIMIZAÇÃO

Variável	Definição	Crítério de Otimização
f_i	Ampacidade do condutor	Maximizar
f_{est}	Esforço feito pelo condutor na estrutura	Minimizar
f_p	Perdas no condutor pelo efeito Joule	Minimizar
$f_{custocond}$	Custo dos cabos condutores	Minimizar
f_{ndcond}	Perdas no condutor pelo efeito Corona	Minimizar
$f_{custopr}$	Custo dos cabos para-raios	Minimizar
f_{fp}	Tamanho da faixa de passagem	Minimizar
f_{at}	Altura da estrutura de sustentação	Minimizar

As oito variáveis de otimização podem ser manipuladas a fim de aperfeiçoar o projeto da LT conforme os critérios adotados. Em [6] vê-se uma abordagem que pondera os critérios e, dessa forma, traz uma proposta válida para este tipo de problema, contudo, a mesma não é feita de forma computacional. É sugerido que, dada a natureza da modelagem matemática realizada, sejam adotados algoritmos que permitam ajustar os parâmetros de entrada, ou seja, os elementos construtivos da linha de transmissão, a fim de se obter o melhor conjunto possível nas variáveis de otimização.

Algoritmos com abordagem evolucionária e multiobjetivos, como os da família *Non-dominated Sorting Genetic Algorithm* (NSGA) [12], *Strength Pareto Evolutionary Algorithm* (SPEA2) [13] ou *Multiobjective Diferencial Evolution* (MOED) [14], são uma boa opção, pois possuem capacidade de convergência em espaços n-dimensionais, produzindo assim, na maioria dos casos, soluções ótimas ou "vizinhas" de ótimas.

V. CONCLUSÕES

Neste trabalho foi apresentada uma proposta de modelagem matemática para otimização de linhas de transmissão compactas suportando múltiplos circuitos.

Foram dispostas oito variáveis de otimização que, com base na variação dos parâmetros de entrada e, tomando-se por base cálculos para cada um dos pontos de interesse, geram valores que devem ser maximizados ou minimizados.

As soluções para esse problema estão condicionadas à escolha dos elementos construtivos da LT, dentre eles o tipo e a disposição dos cabos condutores utilizados no projeto, o que influencia diretamente no comportamento do sistema elétrico frente a distúrbios que venham a afetar a qualidade da energia elétrica. O balanceamento das variáveis de otimização pode garantir uma solução que permita a implementação do melhor caso esperado, ou pelo menos, conscientizar o projetista da linha de transmissão da viabilidade ou inviabilidade do projeto multicircuitos no contexto de interesse.

Como continuidade desse trabalho será efetivamente implementado um algoritmo multiobjetivo capaz de obter o conjunto pareto ótimo para o modelo de otimização proposto. A modelagem matemática para o problema é apresentada como contribuição deste estudo para a comunidade científica, a qual incentiva-se também a buscar soluções para o referido problema, utilizando os métodos propostos ou outros quais julgar mais adequados.

REFERÊNCIAS

- [1] R. C. Puccinelli, Jr., "Compactação de linhas de transmissão de 138/230kv para instalação em área urbana: Especificidades, dimensionamento e critérios relevantes para determinação da viabilidade de implantação," Master's thesis, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, SP, Aug. 1992.
- [2] S. FIRJAN. (2011, Aug.) Quanto custa a energia elétrica para a indústria no Brasil. Rio de Janeiro, RJ. [Online]. Available: <http://www.provedor.nuca.ie.ufrj.br/eletrobras/estudos/firjan7.pdf>
- [3] E. de Pesquisa Energética. (2012, Dec.) Projeção da demanda de energia elétrica para os próximos 10 anos (2013-2022). Ministério de Minas e Energia. Rio de Janeiro, RJ. [Online]. Available: <http://goo.gl/UL3owM>
- [4] *Projeto de linhas aéreas de transmissão de energia elétrica*, ABNT Std. NBR 5422, 1985.
- [5] A. H. F. Dias and J. A. de Vasconcelos, "Multiobjective genetic algorithms applied to solve optimization problems," *IEEE Trans. Magn.*, vol. 38, no. 2, pp. 1133–1136, Mar. 2002.
- [6] R. S. Cavassin and T. S. P. Fernandes, "Uma abordagem multicritérios para recapacitação de linhas de transmissão," *Revista Controle & Automação*, vol. 23, no. 6, pp. 749–765, Nov./Dec. 2012.
- [7] R. C. Dugan, M. F. McGranaghan, S. Santoso, and H. W. Beaty, *Electrical Power Systems Quality*, 3rd ed. New York: McGraw-Hill, 2012.
- [8] C. A. M. Nascimento, M. F. Guimarães, I. Motta, and E. B. Giudice Filho, "A experiência da cemig no uso de condutores especiais nas fases de viabilidade, projeto e construção de linhas aéreas de transmissão," in *Proc. of 20th Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica*, Recife, PE, Brasil, Nov. 22–25, 2009, pp. 1–8.
- [9] R. D. Fuchs, *Transmissão de energia elétrica: linhas aéreas*, 2nd ed. Rio de Janeiro, RJ: LTC, 1979.
- [10] R. D. Castro, "Overview of the transmission line design process," *Electric Power Systems Research*, vol. 35, no. 2, pp. 109–118, 1995.
- [11] *Linhas aéreas de alta tensão*, Coelce Std. CP 10/2005, 2005.
- [12] K. Deb, A. Pratap, S. Agarwal, and T. Meyarivan, "A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: Nsga-ii," *IEEE Trans. Evol. Comput.*, vol. 6, no. 2, pp. 182–197, 2002.
- [13] E. Zitzler, M. Laumanns, L. Thiele *et al.*, "SPEA2: Improving the strength pareto evolutionary algorithm," 2001.
- [14] B. Babu and M. M. L. Jehan, "Differential evolution for multi-objective optimization," in *Evolutionary Computation, 2003. CEC'03. The 2003 Congress on*, vol. 4. IEEE, 2003, pp. 2696–2703.