



**XXIII SNPTTE
SEMINÁRIO NACIONAL
DE PRODUÇÃO E
TRANSMISSÃO DE
ENERGIA ELÉTRICA**

FI/GLT/08
18 a 21 de Outubro de 2015
Foz do Iguaçu - PR

GRUPO - III

GRUPO DE ESTUDO DE LINHAS DE TRANSMISSÃO- SIGLA - GLT

LINHA DE TRANSMISSÃO COMPACTA COM CIRCUITOS MÚLTIPLOS: SELEÇÃO ÓTIMA DA TOPOLOGIA DA ESTRUTURA E DOS CABOS, E POSICIONAMENTO ÓTIMO DO FEIXE DE CONDUTORES

João Antônio de
Vasconcelos (*)
UFMG

Antônio Emílio
Angueth de Araújo
UFMG

Glássio Costa de
Miranda
UFMG

Ricardo Luiz da Silva
Adriano
UFMG

Carlos Roberto
Gontijo
UFMG

João B. G. F.
da Silva
UFMG

Marcos F. R. de
Oliveira
UFMG

Douglas Ângelo
Teixeira
UFMG

Rômulo
Schafer Mól
UFMG

Paulo Rubens
Inácio de Lima
UFMG

Edino Barbosa
Giúdice Filho
CEMIG

RESUMO

A utilização de linhas de transmissão compactas (LTC) é crescente devido à necessidade de se transmitir grandes quantidades de potência em alta tensão, dentro de áreas urbanas, em faixas de passagem reduzidas. É neste contexto que se insere este trabalho. Ele apresenta uma nova metodologia desenvolvida para selecionar a topologia da estrutura, a escolha dos cabos (condutores e de proteção) e a determinação do posicionamento espacial ótimo dos mesmos para as tensões de 138 kV e 230 kV. Nessa metodologia se faz uso de técnicas de tomada de decisão e de otimização evolucionária para problemas com muitos objetivos. Os resultados gerados pelo software implementado com base nesta metodologia original mostram seu caráter inovador e promissor.

PALAVRAS-CHAVE

Linhas de transmissão compactas, Otimização Evolucionária, Faixa de Passagem, Muitos objetivos e Tomada de Decisão.

1.0 INTRODUÇÃO

A necessidade de se transmitir energia em alta tensão dentro de centros urbanos se tornou uma realidade na sociedade atual. Contudo, a área disponível para transmissão da energia se limita basicamente às faixas de passagem já existentes. Assim a transmissão de maiores quantidades de energia só se faz possível a partir da recapacitação dessas linhas existentes ou a partir da construção de novas linhas que ocupem a menor faixa de passagem possível sem violar as normas técnicas vigentes.

No contexto de linhas aéreas compactas, o presente trabalho apresenta uma metodologia desenvolvida para que a escolha da topologia da estrutura, a escolha dos cabos (condutores e de proteção) e o posicionamento dos feixes de condutores sejam realizados de modo ótimo, ao mesmo tempo que atendem a todas às restrições normativas. Assim, todo o desenvolvimento está de acordo com as exigências técnicas e as normas nacionais como, por exemplo, a NBR 5422 (1), que dispõe sobre o projeto de linhas aéreas de transmissão de energia elétrica.

2.0 METODOLOGIA

As sessões seguintes apresentam em detalhes as etapas que constituem a metodologia proposta para tomada de decisão na escolha das topologias e a otimização na escolha e posicionamento dos cabos.

(*) Laboratório de Computação Evolucionária - Departamento de Engenharia Elétrica – UFMG
Av. Pres. Antônio Carlos, nº 6627 – sala 2108 – Bloco 2 – CEP 31.270-010 – Belo Horizonte, MG, Brasil
Tel.: (+5531) 3409-4826 – E-mail: jvasconcelos@ufmg.br

2.1 Tensões, Circuitos e Potências Consideradas

Na modelagem do problema de tomada de decisão e otimização foram considerados circuitos múltiplos com tensões de 138 kV e 230 kV, simples ou duplos. No modelo desenvolvido, é possível considerar a transmissão simultânea de até quatro potências independentes, limitadas a duas em 138 kV e duas em 230 kV. Por questões de segurança em relação à manutenção em linhas vivas, os circuitos de tensão mais elevada são posicionados acima do circuito com tensão de menor amplitude.

Para a modelagem apresentada, entende-se por potências independentes as potências que são transmitidas em uma mesma torre, porém possuem origens e destinos diferentes, mesmo que os circuitos correspondentes a essas potências possuam a mesma tensão nominal e eventualmente, o mesmo valor de potência a ser transmitida.

Uma vez que toda solução apresentada deve possuir simultaneamente tensões de 138 kV e 230 kV, e que para cada tensão pode haver um ou dois circuitos, cada solução proposta pelo software desenvolvido apresenta uma torre que suporta de dois a quatro circuitos, com duas a quatro potências independentes. Quando existirem dois circuitos de mesma tensão, mesma origem e destino, o circuito será chamado de circuito duplo, pois as potências destes dois circuitos não são consideradas independentes, isto é, poder-se-ia ter apenas um circuito simples para a transmissão desta potência.

2.2 Alternativas Topológicas

Na metodologia desenvolvida, a topologia de cada circuito pode variar nas configurações vertical, horizontal, delta e delta invertido. Para o caso de circuitos duplos, considera-se que os dois circuitos possuam a mesma configuração topológica e mesmo tipo de condutores. Assim como é possível obter uma solução com duas, três ou quatro potências independentes, na qual os circuitos podem ser simples ou duplos, pode-se dizer que em um caso extremo a solução será constituída por quatro circuitos simples e cada um desses circuitos terá uma configuração topológica diferente.

2.3 Base de Dados

A base de dados utilizada no processo de otimização possui: (i) tabela de cabos condutores CAA – Cabos de Alumínio com Alma de Aço - de diversas seções transversais; (ii) tabela de cabos de proteção (cabos guarda); (iii) tabela de alternativas topológicas e (iv) tabela de parâmetros ambientais necessários na realização dos cálculos envolvidos no processo.

As tabelas sobre alternativas topológicas armazenam informações sobre estruturas que suportam circuitos simples ou duplos para as tensões de 138 kV e 230 kV. Dessa forma, ao representar circuito simples por “s” e circuito duplo por “d”, e identificando primeiro o circuito de 138 kV à esquerda do traço (-) e o circuito de 230 kV à direita, as opções de estruturas podem ser codificadas como:

- a) s-s, s-d, d-s ou d-d para duas potências independentes, uma em 138 kV e outra em 230 kV.
- b) ss-s, s-ss para três potências independentes, duas em 138 kV e uma em 230 kV, e vice-versa.
- c) ss-ss para quatro potências intendentess, duas em 138 kV e duas em 230 kV.

Na base de dados do software utilizada, o número de alternativas para a tomada de decisão é dado na Tabela 1.

Tabela 1. Número de alternativas topológicas existentes na base de dados.

Circuito	Alternativas Topológicas
S-S	1152
SS-S	5184
S-SS	5120
SS-SS	25600

S → Circuito simples de 138 kV se estiver à esquerda do traço e de 230 kV se estiver à direita.

SS → Dois circuitos simples, independentes, de 138 kV se estiver à esquerda do traço e de 230 se estiver à direita.

Na base de dados, a configuração de um circuito é denotada pela letra “H” para configuração horizontal, “V” para vertical, “D” para delta e “Di” para delta invertido.

Na escolha dos condutores, inicialmente utilizou-se de uma base de dados composta de setenta e cinco condutores CAA de diversas seções transversais. A Figura 1 apresenta um exemplo de parte da tabela com as informações referentes aos condutores fornecidas pelo fabricante que são armazenadas no banco de dados. As diversas informações dos condutores são utilizadas nos cálculos das funções objetivo e das funções de restrição do problema de otimização, apresentadas na seção 3.0.

Condutor	Bitola	Seção transversal (mm ²)		Formação do condutor				Diâmetro nominal (mm)		Peso nominal (kg/km)			Porcentagem no peso total (%)	
	AWG ou kcmil	Alumínio	Total	Alumínio		Aço		Alma de aço	Total	Alumínio	Aço	Total	Alumínio	Aço
				Nº de fios	Diâmetro (mm)	Nº de fios	Diâmetro (mm)							
Turkey	6	13,28	15,49	6	1,679	1	1,679	1,68	5,04	36,4	17,2	53,6	67,9	32,1
Thrush	5	16,78	19,58	6	1,887	1	1,887	1,89	5,66	46,0	21,8	67,8	67,9	32,1
Swan	4	21,14	24,66	6	2,118	1	2,118	2,12	6,35	58,0	27,4	85,4	67,9	32,1
Swallow	3	26,69	31,14	6	2,380	1	2,380	2,38	7,14	73,2	34,6	107,8	67,9	32,1
Sparrow	2	33,64	39,25	6	2,672	1	2,672	2,67	8,02	92,3	43,6	135,9	67,9	32,1
Robin	1	42,41	49,48	6	3,000	1	3,000	3,00	9,00	116,4	55,0	171,4	67,9	32,1

Figura 1 – Informações dos condutores utilizadas nos cálculos das funções objetivo e de restrição.

2.4 Espaço de Busca e Posicionamento dos Condutores

Para cada alternativa topológica de um problema específico, é preciso realizar uma busca no processo de otimização de quais condutores serão utilizados, do número de condutores por feixe, do raio desses feixes de condutores e do posicionamento espacial de cada condutor e cabo guarda. Este processo de otimização deve respeitar todas as funções que restringem o espaço de busca, que no caso do posicionamento dos condutores são as distâncias mínimas prescritas na norma NBR5422, a qual apresenta para cada situação as distâncias mínimas de segurança que devem ser respeitadas entre duas fases (fase-fase) e entre fase e terra (fase-terra).

Os condutores são alocados com base em um eixo de coordenadas cartesianas em duas dimensões cuja a origem se encontra no nível do solo e ao centro da torre. Além das distâncias mínimas de fase-fase e fase-terra, se faz necessário o cálculo da catenária apresentada pelo condutor, para que também a distância mínima em relação ao solo, ditada por norma, seja atendida. Cabe ressaltar que a partir do cálculo da catenária é possível determinar a distância do condutor em relação ao solo em qualquer ponto na extensão do vão. Desta forma consegue-se determinar a altura do cabo na torre para um cabo condutor específico, na temperatura de projeto, em relevo plano e para um determinado comprimento do vão entre duas torres.

Assim, primeiramente são alocados de modo mais centralizado possível na torre os condutores referentes ao circuito de 138 kV que se encontram mais próximos ao solo, de modo que sejam respeitadas as distâncias em relação ao solo, as distâncias fase-terra e fase-fase. Para esse posicionamento é definida uma largura de torre padrão igual à distância fase-terra de 230 kV. Quanto ao ângulo que define o espaçamento entre os condutores em um feixe, ele é definido simplesmente pela divisão de 360° pelo número de condutores no feixe.

Uma vez alocado o circuito mais próximo ao solo, os circuitos seguintes são alocados acima, sempre respeitando as distâncias mínimas e o fato de que os circuitos de 230 kV devem estar acima dos de 138 kV. Isso leva a soluções com menores faixas de passagem e que atendam às práticas de manutenção das concessionárias de energia.

3.0 OTIMIZAÇÃO RESTRITA COM MUITOS OBJETIVOS

A modelagem do problema de otimização se constitui basicamente na definição de: (i) variáveis de otimização; (ii) funções objetivo e (iii) funções de restrição, as quais são descritas nos tópicos seguintes. Observe que a metodologia proposta faz a escolha da topologia da estrutura, da quantidade de cabos por feixe de cada circuito, do tipo de cabo condutor de cada feixe, dos cabos de proteção, e os posiciona espacialmente. Tudo isto visando otimizar simultaneamente um conjunto de sete objetivos e concomitantemente satisfazendo ao conjunto de restrições.

3.1 Variáveis de Otimização

As variáveis de otimização consideram o tipo e posicionamento espacial de ambos os cabos condutores e de proteção, e o número de condutores por feixe. O posicionamento dos cabos condutores é definido considerando o centro de cada feixe de condutores e o raio que define o círculo onde os condutores serão posicionados. O ângulo entre cabos de um mesmo feixe, para obtenção de um polígono regular, foi considerado constante e igual a $360/n$, onde n é o número de cabos. A variação do raio do feixe foi limitada de três a vinte vezes o diâmetro do condutor a ser posicionado. Além destas variáveis de otimização, o indivíduo é codificado com parâmetros fixos que informam sobre a alternativa topológica, o número de potências independentes e o número e tipo de cabos para-raios.

Dentre os parâmetros fixos, o primeiro é sobre a alternativa topológica, a qual define basicamente, de modo qualitativo, em que local cada fase de cada circuito estará em relação às demais, onde cada circuito pode estar na horizontal, na vertical, em delta ou em delta invertido. Por sua vez, o segundo parâmetro fixo define se as fases de

cada circuito são constituídas por feixe ou não, e se for o caso, o número de condutores por feixe. Para complementar essa informação sobre os feixes, o terceiro parâmetro é uma variável de otimização que indica o raio do feixe de condutores. Além disso, há dois outros parâmetros que indicam se o circuito presente na topologia se trata de um circuito simples ou duplo e o tipo de condutor escolhido para este circuito.

3.2 Funções Objetivo

O problema de otimização foi formulado com sete funções objetivo a serem simultaneamente otimizadas. A seguir são apresentadas as definições das funções objetivo.

3.2.1 Minimização da altura da torre

A primeira função considera a minimização da altura da torre. O cálculo da altura da torre é feito respeitando a distância mínima entre o cabo e o solo para linhas de 138 kV, prescrita na NBR5422. Uma vez identificada a altura do condutor mais próximo ao solo, os demais condutores são posicionados a partir das distâncias mínimas fase-fase e fase-terra. As distâncias fase-terra e fase-fase para 138 kV são 1,4m e 1,8m, respectivamente. Para os circuitos de 230 kV são 1,7m e 2,1m. Cabe ressaltar que o circuito de 230 kV é posicionado acima do circuito de 138 kV a uma distância de 2,1 m entre suas fases. Por fim, posicionam-se os cabos-guarda. A altura dos cabos-guarda é considerada como sendo a altura da torre que se deseja minimizar.

3.2.2 Maximização da Ampacidade Excedente

A segunda função objetivo busca maximizar a ampacidade excedente nos cabos condutores, isto é, a diferença entre a corrente máxima (ampacidade) que o feixe de condutores pode transmitir e a corrente elétrica para transmitir a potência nominal do circuito. A ampacidade dos cabos é calculada para cada um dos condutores a partir de dados do condutor e das condições ambientais do local onde a linha será construída.

Uma vez definida a potência que cada circuito deve transportar, define-se a corrente nominal que deve circular pela linha de transmissão. A partir desta informação, busca-se no banco de dados quais condutores podem conduzir no mínimo a corrente nominal e no máximo até 50% acima desse valor. Assim, devido a essa função objetivo a otimização prioriza soluções com maior ampacidade excedente.

3.2.3 Minimização do Custo dos Cabos Elétricos

A terceira função objetivo busca minimizar o custo dos cabos utilizados. Calcula-se o custo (C_{cabo}) em função do peso do cabo para 1 km de comprimento de linha e do preço por unidade de peso. Assim, o custo é dado por:

$$C_{cabo} = peso_{total} \times preço$$

em que “preço” é o preço por unidade de massa, isto é $R\$/kg$, o peso é dado em kg/km como unidade de peso por km de linha, e a unidade do custo do cabo será então $R\$/km$.

3.2.4 Minimização de Perdas por Efeito Joule e Corona

No cálculo das perdas são consideradas as perdas provenientes do aquecimento dos cabos (efeito Joule) e as perdas relacionadas à ionização do ar em volta do condutor (efeito corona).

3.2.5 Minimização de Esforços Mecânicos na Estrutura

Nesse cálculo são consideradas as forças que o vento faz nas estruturas de suspensão e o peso dos condutores por unidade de comprimento.

3.2.6 Maximização da Potência Característica da Linha

A potência característica da linha de transmissão é definida por:

$$P_{car} = \frac{U_n^2}{Z_c}$$

em que U_n é a tensão nominal de operação da linha de transmissão e Z_c é a impedância característica, dada por:

$$Z_c = \sqrt{\frac{Z_1}{Y_1}}$$

Nesta expressão, $Z1$ é a impedância série de sequência positiva por unidade de comprimento e $Y1$ a admitância transversal de sequência positiva por unidade de comprimento da linha.

Mais detalhes sobre o cálculo de parâmetros elétricos de linhas de transmissão podem ser encontrados em (2).

3.2.7 Minimização da Faixa de Passagem

A minimização da faixa de passagem é crucial para o projeto de uma linha de transmissão compacta. A largura da faixa de segurança de uma linha de transmissão de energia elétrica deve ser determinada levando-se em conta o balanço dos cabos devido à ação do vento, efeitos elétricos e magnéticos e posicionamento das fundações de suporte e estais (1).

A Figura 2 apresenta as distâncias envolvidas nos cálculos para se determinar o balanço dos cabos condutores, levando em consideração a ação do vento para uma alternativa topológica da estrutura.

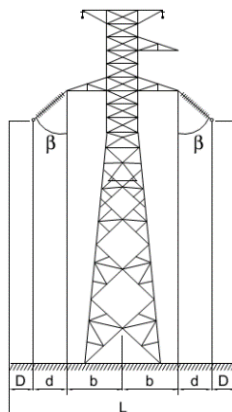


Figura 2 – Faixa de passagem.

A largura da faixa de segurança (L), devido ao balanço dos cabos condutores, é determinada pela equação a seguir:

$$L = 2 \times (b + d + D)$$

em que: b é o comprimento da mísula (m); d é a distância horizontal (m) varrida pelo ângulo de balanço β - o qual depende do tipo do cabo condutor utilizado na LT, de fatores ambientais, como vento e pressão dinâmica - e D é uma distância de segurança (m), a qual depende do nível de tensão considerado na LT.

3.3 Funções Restrição

O conjunto de funções de restrição considerado no modelo é composto de restrições de desigualdades, as quais consideram as normas técnicas e especificações exigidas pelo usuário final. Este conjunto é composto de: tração no condutor, ampacidade do cabo, nível de rádio interferência, nível de ruído audível, perdas por efeito corona, níveis de campo elétrico e campo magnético, distâncias de segurança entre circuitos, custo total do conjunto de cabos por unidade de comprimento da linha e limite de faixa de passagem.

4.0 ALGORITMOS DE OTIMIZAÇÃO EVOLUCIONÁRIOS COM MUITOS OBJETIVOS

Tendo em vista as características do problema de otimização tratado nesse trabalho ser restrito, não linear e com variáveis mistas (inteiras e reais), se optou por desenvolver três algoritmos de otimização evolucionária, específicos para sua resolução. Primeiramente, por ser algoritmos evolucionários, eles trabalham com população de indivíduos (soluções candidatas do problema de otimização), em que usualmente cada indivíduo é definido como o conjunto das variáveis de otimização. Na modelagem aqui desenvolvida, consideramos o indivíduo formado pelas variáveis de otimização e por parâmetros fixos, os quais definem a topologia da torre, o número de subcondutores por feixe, o número de potências independentes, entre outros. As variáveis de otimização são o tipo de condutor, o raio do feixe de cada circuito, o tipo de cabo para-raios. Esta modelagem foi necessária porque o problema aqui tratado antes do processo de otimização utiliza de tomada de decisão na escolha de um conjunto de topologias mais promissoras. Para cada topologia promissora deste conjunto é gerada uma subpopulação de indivíduos que vai competir com as outras subpopulações de indivíduos geradas a partir das outras topologias promissoras. Neste processo, algumas topologias menos competitivas vão desaparecer e as mais competitivas vão ter sua subpopulação aumentada em número de indivíduos.

A geração de novos indivíduos é realizada por um algoritmo evolucionário desenvolvido neste trabalho. O Algoritmo 1 apresenta o pseudocódigo do algoritmo de tomada de decisão/otimização.

Neste pseudocódigo, na linha 2, gera-se um indivíduo para cada alternativa topológica. No caso de quatro circuitos simples, teríamos 25600 possibilidades. Após avaliação de cada indivíduo, aplica-se a tomada de decisão descrita na linha 4. O resultado é um conjunto de topologias promissoras para resolver o problema de linhas compactas. Nas linhas 5, 6 e 7 gera-se a população inicial, avalia e aplica-se o método do torneio binário para escolha do conjunto “Pais_Selecionados”. Da linha 8 à 14, tem-se o loop principal do processo de otimização, no qual busca-se evoluir a população na direção de soluções eficientes ou não-dominadas.

Algoritmo 1. Pseudocódigo do algoritmo de tomada de decisão/otimização.

$X \leftarrow \text{Algoritmo_de_Otimização}(N, A)$

```

Entrada: N: tamanho da população
Entrada: A: alternativas topológicas
Dados: ng: número de gerações
Saída: X: conjunto dos melhores indivíduos encontrados

1  Início
2      Ap  $\leftarrow$  Geração_de_um_indivíduo_para_cada_alternativa_topológica(A)
3      Ap  $\leftarrow$  Avaliação(Ap)
4      A  $\leftarrow$  Tomada_de_Decisão_Inicial (Ap) % Seleção do conjunto de melhores alternativas topológicas
5      pop  $\leftarrow$  Geração_da_População_Inicial(N, A)
6      pop  $\leftarrow$  Avaliação(pop)
7      Pais_Selecionados  $\leftarrow$  Torneio_Binário(N, pop) % N indica o número de pais selecionados
8      Para i = 1 até ng faça
9          Filhos_Gerados  $\leftarrow$  Cruzamento(Pais_Selecionados)
10         Filhos_Gerados  $\leftarrow$  Mutação(Filhos_Gerados)
11         Filhos_Gerados  $\leftarrow$  Avaliação(Filhos_Gerados)
12         dpop  $\leftarrow$  Concatenação(pop, Filhos_Gerados)
13         Pais_Selecionados  $\leftarrow$  Torneio_Binário(N, dpop)
14     Fim Para
15     X  $\leftarrow$  Tomada_de_Decisão_Final (pop)
16     Retorna X
17 Fim

```

Na linha 15, faz-se nova tomada de decisão para classificar as soluções eficientes encontradas e na linha 16 retorna-se o resultado ordenado. Isto deve ser feito, pois o software deve disponibilizar ao usuário as melhores soluções, ordenadas em de acordo com os critérios do tomador de decisão, isto é, em de acordo com seus critérios de prioridade entre os diversos objetivos.

O processo de tomada de decisão utilizado foi o SMARTS (Simple Multi-Attribute Rating Technique using Swings). Nesse método, para se atribuir uma nota a uma solução candidata, é utilizado um procedimento chamado de “swing weights” (peso das trocas), no qual são atribuídos diferentes pesos a funções de pertinência definidas a partir dos objetivos adotados, onde a soma dos pesos tem valor unitário. Assim, como nesse trabalho foram utilizados sete objetivos, deve-se avaliar a importância de cada um em relação aos demais para a determinação dos pesos dentro do contexto de cada projeto de linha de transmissão.

Para a realização do cálculo das pertinências, primeiramente é atribuído para cada objetivo um pseudo-objetivo $\varphi_i(x, r_p)$, formado pela função objetivo ($F_i(x)$) somado ao resultado da multiplicação de um parâmetro de penalidade (r_p) por uma função de penalidade ($P(x)$). Então o valor de $P(x)$ é definido como o somatório das violações de todas as restrições conforme mostrado na equação a seguir. Note que quanto menor o valor de $\varphi_i(x, r_p)$ melhor, uma vez que deseja-se minimizar $F_i(x)$ e $P(x)$ é nula quando todas as restrições são satisfeitas.

$$\varphi_i(x, r_p) = F_i(x) + r_p P(x)$$

$$P(x) = \sum_{j=1}^m \{ \max[0, g_j(x)] \}^2$$

Em seguida é realizado o cálculo da função de pertinência $u_i(x, r_p)$ para cada um dos i objetivos, conforme apresentado na equação a seguir. Para isto toma-se os valores máximos e mínimos para cada um dos i pseudo-objetivos. Note que quanto menor o valor de $\varphi_i(x, r_p)$ maior será o valor de $u_i(x, r_p)$.

$$u_i(x, r_p) = \frac{\max \varphi_i(x, r_p) - \varphi_i(x, r_p)}{\max \varphi_i(x, r_p) - \min \varphi_i(x, r_p)}$$

Após o cálculo de todas as pertinências, faz-se o somatório da multiplicação do peso de cada objetivo (w_i) pela função de pertinência $u_i(x, r_p)$ em cada solução candidata k . Assim obtém-se a nota final U_k de cada solução candidata, onde uma solução com maior nota é preferível em relação a uma solução de menor nota. Isso torna possível ordenar as soluções candidatas da melhor até a pior para os pesos atribuídos no método.

$$U_k(x, r_p) = \sum_{i=1}^m w_i u_i(x, r_p)$$

5.0 RESULTADOS

Para exemplificar os resultados da metodologia de tomada de decisão e otimização implementadas no software LION (LIne OptimizationN) foram realizadas duas simulações. Elas diferem quanto à potência transmitida em 138kV e 230kV, a faixa de passagem e os pesos atribuídos a cada objetivo. Os pesos utilizados nas duas simulações, respectivamente, foram:

$$W_1 = \{0,05; 0,05; \mathbf{0,5}; \mathbf{0,25}; 0,05; 0,05; 0,05\}$$

$$W_2 = \{0,05; 0,05; \mathbf{0,25}; \mathbf{0,5}; 0,05; 0,05; 0,05\}$$

As simulações foram realizadas com uma população de 400 indivíduos, 100 gerações, 40 alternativas topológicas e taxa de mutação 0,3. A simulação 1 foi realizada sem limitar a faixa de passagem e com as potências de 120 e 300 MVA para os circuitos de 138 e 230 kV, respectivamente. A simulação 2 foi realizada com a faixa de passagem limitada no máximo a 10m e com as potências de 145 e 350 MVA, respectivamente para os circuitos de 138 e 230 kV. Há uma série de outros parâmetros, os quais foram mantidos constantes.

Observe que na primeira simulação maior importância foi dada ao terceiro (custo dos cabos) e quarto (perdas por efeito Joule e corona) objetivos, respectivamente. Na segunda simulação, a maior importância foi dada ao quarto (perdas por efeito Joule e corona) e em seguida ao terceiro (custo dos cabos) objetivos. Os resultados apresentados na Tabela 2 mostram apenas os valores para os objetivos “altura da torre”, “Custo dos cabos elétricos”, “Perdas por Efeito Joule e Corona” e “largura da faixa de passagem”. É fácil verificar a coerência dos resultados.

Tabela 2. Valores dos principais objetivos para as simulações realizadas.

Objetivos	Simulação 1	Simulação 2
f ₁ - Minimização da Altura da Torre (m)	25,07	26,97
f ₃ - Minimização do custo dos cabos elétricos (R\$)	29581,87	92704,61
f ₄ - Minimização de perdas por Efeito Joule e Corona (W)	969,9	410,34
f ₇ - Minimização da largura da faixa de passagem (m)	18,08	8,52

A Figura 3 apresenta o layout das topologias com a indicação do número de subcondutores, das coordenadas e tipo de cabo condutor. Observe que as soluções obtidas são diferentes em função das preferências fornecidas pelo decisor. A melhor solução encontrada na primeira simulação (Figura 3.a) tem uma faixa de passagem mais larga que a solução da segunda simulação (Figura 3.b), porém a estrutura é mais baixa. Observe também que tanto o número de subcondutores por circuito é diferente assim como o tipo de cabos subcondutores.

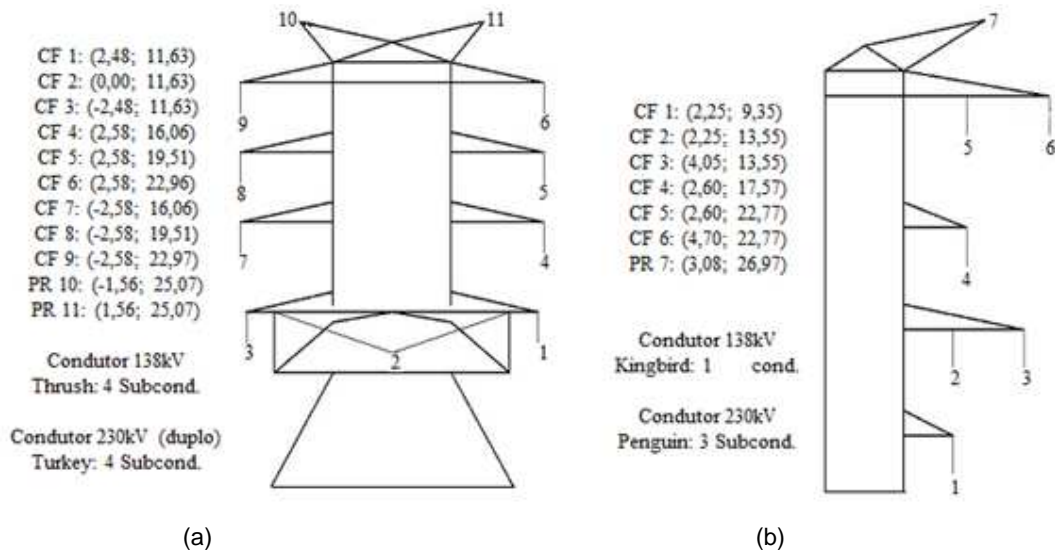


Figura 3 - A torre (a) apresenta a melhor alternativa topológica da simulação 1 e a torre (b) apresenta a melhor alternativa topológica da simulação 2.

6.0 CONCLUSÕES

A metodologia de tomada de decisão e otimização apresentada nesse trabalho é promissora e gera resultados interessantes e às vezes pouco comuns. Por exemplo, nos circuitos de 138 kV, a indicação de se utilizar feixes de condutores no lugar de um único cabo pode ser algo inovador, embora deva ser salientado que no modelo desenvolvido até o presente momento não foram computados os custos relativos às ferragens e acréscimo na mão de obra para a construção/installação de feixes. Além disto, não se considerou também o desgaste precoce de subcondutores devido ao atrito com as garras das ferragens.

A metodologia embora inicialmente seja desenvolvida para linhas compactas pode ser aplicada para qualquer situação de faixa de passagem, pois o usuário pode escolher quais parâmetros e objetivos devem ser considerados no momento de configuração do software para a execução do processo de se determinar a topologia, cabos e seus respectivos posicionamentos.

Como continuidade do presente trabalho se pretende estender a metodologia desenvolvida para circuitos que apresentem outras faixas de tensão além das de 138 kV e 230 kV.

7.0 AGRADECIMENTOS

Este trabalho foi desenvolvido no âmbito do Programa de Pesquisa e Desenvolvimento Tecnológico do Setor de Energia Elétrica regulado pela ANEEL. Este trabalho está em execução sob o número P&D CEX - APQ-03432-11, cujo nome é "Desenvolvimento de Software para Otimização de Topologias de Torres de Transmissão Suportando Múltiplos Circuitos".

Os autores agradecem à FAPEMIG e Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) pelo apoio financeiro, ao Laboratório de Computação Evolucionária e à UFMG pela infraestrutura disponibilizada para a realização desta pesquisa.

8.0 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) ABNT, NBR. "5422-Projeto Eletromecânico de Linhas Aéreas de Transmissão de Energia Elétrica." Associação Brasileira de Normas Técnicas. Rio de Janeiro (1985).
- (2) L. C. Zanetta Jr, "Fundamentos de Sistemas Elétricos de Potência", 1ª ed., São Paulo: Editora livraria da Física, 2006.

9.0 DADOS BIOGRÁFICOS

João Antônio de Vasconcelos: Natural de Monte Carmelo – MG (1958), Doutor pela École Centrale de Lyon - França (1994), Mestre pela UFPb (1985) e Engenheiro Eletricista pela UFMG (1982). É Professor Titular do Departamento de Engenharia Elétrica da UFMG. É pesquisador nível 1B do CNPq. É membro fundador de duas sociedades científicas ICS (Intern. Compumag Society) e SBMAG (Soc. Bras. de Eletromagnetismo Aplicado). Possui mais de 220 trabalhos publicados entre periódicos, congressos e capítulos de livros nacionais e internacionais. Dentre estas publicações se destacam as contribuições na área da otimização mono e multiobjetivo, aplicadas a problemas modelados com e sem incertezas paramétricas. Orientou mais de 30 alunos de pós-graduação em nível de doutorado e mestrado e mais de uma centena de alunos de graduação. É o responsável pela criação do Lab. de Computação Evolucionária da UFMG, onde chefia a equipe de pesquisadores em níveis de pós-doutorado, doutorado, mestrado e graduação desde sua criação. Coordenou dezenas de projetos de pesquisa nacionais (CNPq, P&D ANEEL, FAPEMIG) e internacionais (CAPES-COFECUB, Lab. Int. Associado James Clerk Maxwell), e projetos de P&D com o setor elétrico.