[[1]](#footnote-1)

Modelagem Matemática para Otimização do Projeto de Linhas de Transmissão Compactas Suportando Múltiplos Circuitos

Flávio Velloso Laper, *UFMG*

*Abstract*—Este trabalho analisa o problema do projeto de linhas de transmissão compactas suportando múltiplos circuitos. O problema é tratado como um problema de otimização multiobjetivo. Propõe-se um modelo matemático que contempla a ampacidade dos circuitos, as perdas por efeito Joule, a altura das torres de transmissão, a largura da faixa de segurança, os esforços sobre as estruturas e o custo dos circuitos. O modelo é discutido e algumas possíveis melhorias são propostas.

*Palavras-chave*—linha de transmissão, compactação, otimização multiobjetivo, variáveis de otimização, funções de otimização, funções de restrição.

# INTRODUÇÃO

A

compactação de linhas de transmissão (LT) tem o objetivo de minimizar o espaço ocupado pelas linhas. Linhas tradicionais são projetadas de maneira conservadora, com amplos espaços entre os condutores das fases para reduzir o risco de acidentes e de interferências.

Esta compactação é de interesse tanto da concessionária que gerencia a linha quanto dos proprietários das terras pelas quais ela passará. Estes últimos muitas vezes hesitam em concordar com a utilização de suas terras para a passagem de LTs por temerem uma possível desvalorização, além dos impactos ambientais provocados pelo desmatamento necessário à faixa de servidão; em áreas urbanas, os problemas são ainda piores. Do ponto de vista da proprietária da linha, a redução de espaço implica em um menor custo com desapropriações e com outros aspectos jurídicos.

Uma solução adotada tem sido a recapacitação de linhas já existentes, evitando o ônus da obtenção de novos direitos de passagem [1]. Entretanto, isto nem sempre é possível, e a preocupação com compactação é importante no projeto de novas LTs.

Embora não sejam fundamentalmente diferentes das linhas tradicionais, o projeto de LTs compactas requer algumas considerações especiais [2]. Em geral, os estudos sobre compactação adotam como estratégias de redução de espaço a utilização de novos materiais que permitam reduzir o espaçamento entre os diversos elementos (elétricos e estruturais) das torres (garantindo que fatores como o ruído audível, a rádio-interferência e os campos eletromagnéticos permaneçam dentro de limites aceitáveis) e a alteração da geometria dos elementos, procurando arranjos que reduzam a interferência (ver [3], [4], [5], [6] e [7]).

O presente trabalho desenvolve a ideia da utilização de uma LT compacta que utilize a mesma estrutura para suportar múltiplos circuitos com diferentes tensões. Além disso, os requisitos da norma [8], que rege os projetos de LTs aéreas, devem ser obedecidos. Esse é um problema extremamente complexo e que envolve objetivos conflitantes, o que leva a uma abordagem de otimização utilizando algoritmos de computação evolucionária. Propõe-se, então, um modelo matemático que leve em conta diversos aspectos importantes do projeto de LTs desse tipo e no qual esses algoritmos poderiam se basear.

A seção II descreve o modelo, destacando as variáveis de otimização e as funções de otimização e de restrição. Na seção III é feita uma análise crítica do modelo proposto, sugerindo algumas melhorias que poderiam deixa-lo mais preciso. Finalmente, a seção IV apresenta algumas conclusões.

# Metodologia

Esta seção descreve o modelo matemático proposto para o problema de otimização do projeto de LTs compactas com circuitos com tensões , , onde , , e . Supõe-se que os circuitos serão posicionados em diferentes níveis nas torres de transmissão, com os de mais baixa tensão mais próximos ao solo.

O presente trabalho procura criar um modelo para otimizar características das LTs ligadas aos cabos condutores, tais como a ampacidade de cada circuito, as perdas por efeito Joule, os esforços nas estruturas e o custo. Além disso, a escolha dos cabos influencia também algumas características importantes das torres, tal como a altura e a largura da faixa de segurança, que também fazem parte do modelo.

A formulação matemática consiste na minimização do funcional , onde e para todo na faixa indicada. Além disso, o modelo é restrito, com funções de restrição , .

As variáveis de otimização , funções de otimização e funções de restrição são apresentadas, respectivamente, nas seções B, C e D; algumas funções auxiliares, necessárias a diversos cálculos, são discutidas na seção E. Antes, porém, outras variáveis e valores utilizados no projeto são discutidos na seção A.

## Parâmetros do projeto

Esta seção discute alguns parâmetros que, embora não sejam variáveis de otimização, são utilizados nos cálculos das funções de otimização e restrição. Esses parâmetros envolvem dados sobre o levantamento topográfico da região atravessada pela LT, dados a respeito dos cabos, dados ambientais e parâmetros do projeto da linha.

### Levantamento topográfico

Para a construção do modelo, assume-se que a LT é constituída pelas torres , , onde é o número total de torres da linha. Como mencionado em [9], todo projeto de uma LT necessita de um levantamento topográfico para determinar as características das regiões atravessadas pela linha. Este trabalho assume que tal levantamento tenha sido feito e que os seguintes parâmetros estão disponíveis (para cada torre ):

1. : altitude do ponto de instalação (m);
2. : vão entre as torres e (m);
3. : vão de peso (m): distância entre pontos com tangente horizontal das catenárias dos vãos adjacentes;
4. : vão de vento (m): media aritmética dos vãos adjacentes;
5. : ponto de violação (m): distância progressiva do ponto onde o cabo se encontra mais perto do solo;
6. : altitude do ponto de violação (m);
7. : vértice da catenária (m): distância progressiva do vértice da catenária formada pelo cabo com a torre anterior ;
8. : coeficiente de rugosidade do terreno;
9. : fator de correção para período de integração, considerando um período de integração de ;
10. : distância básica (m): para determinação da distância mínima cabo solo;
11. : coeficiente para correção da velocidade do vento em função da rugosidade do terreno, considerando um período de integração de 30 s;
12. : estimador do fator de escala da função de Gumbel;
13. : estimador do fator de posição da função de Gumbel.

Os parâmetros 1 a 7 da lista acima vêm diretamente do levantamento topográfico ou podem ser calculados a partir dele; os parâmetros 8 a 13 são obtidos a partir das tabelas e figuras da norma [8] em função da posição de instalação da torre.

### Dados ambientais

Os dados ambientais referem-se às diversas temperaturas necessárias para os cálculos das funções de otimização e restrição. Esses dados estão disponíveis a partir do levantamento topográfico e das figuras e tabelas de [8]:

1. : temperatura mínima (): menor temperatura mínima da região atravessada pela linha;
2. : temperatura coincidente (): menor temperatura coincidente da região atravessada pela linha;
3. : temperatura máxima media (): maior temperatura máxima média da região atravessada pela linha.

Além das temperaturas acima, é necessário também dispor da temperatura de projeto . A referência [1] indica que esta temperatura pode ser determinada a partir da definição da condição regente, como parte da formulação das hipóteses de cálculo. Entretanto, a referência [10] indica que pode ser obtida a partir de valores padronizados adotados pelas empresas de energia elétrica, sendo definidos a partir de critérios econômicos e da experiência operativa dessas empresas. Este trabalho apenas assume que um valor de (em ) está disponível.

### Dados sobre cabos

Os cabos a utilizar nos circuitos são variáveis de otimização do problema (seção B). Entretanto, diversas informações sobre esses cabos são necessárias para os cálculos. Assume-se que essas informações são obtidas a partir das tabelas dos fabricantes e que se encontram em uma tabela onde, para cada cabo , (onde é a quantidade total de cabos na tabela), os seguintes dados estão disponíveis:

1. : diâmetro (m);
2. : peso unitário ();
3. : resistência do cabo a ();
4. : resistência do cabo a ();
5. : ampacidade (A);
6. : tração (carga máxima de ruptura, kgf);
7. : peso nominal ();
8. : preço ().

### Dados do projeto

Os seguintes dados a respeito do projeto dos circuitos também são necessários para os cálculos. Para cada circuito () supõe-se conhecidos:

1. : potência projetada (MVA);
2. : tensão (kV);
3. : fator de carga: relação entre a demanda máxima e a demanda média de energia ().

Os seguintes parâmetros de projeto não dependem de um circuito específico:

1. : largura mínima da faixa de segurança (m);
2. : coeficiente de segurança para escolha do cabo em função da corrente a transportar ();
3. : altura mínima para fixação dos cabos da fase inferior do circuito nas torres.

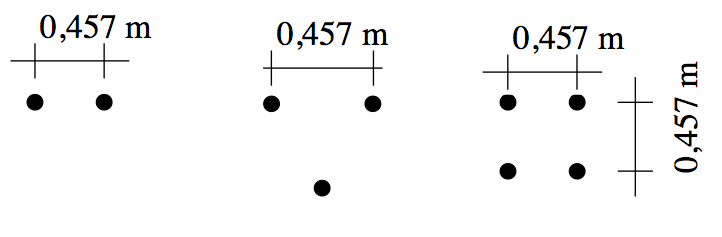


Fig. 1 Disposição dos cabos em feixes com 2, 3 e 4 condutores

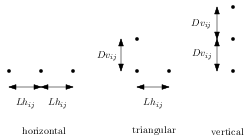


Fig. 2 Disposição dos cabos das fases do circuito

## Variáveis de otimização

Para modelar a otimização das características mencionadas, foram escolhidas variáveis de decisão que têm influencia direta sobre elas. Essas variáveis forma um vetor no espaço com os seguintes significados:

* a : indicam os cabos condutores utilizados nos circuitos a , respectivamente;
* a : indicam a quantidade de subcondutores nos cabos condutores (feixes) dos circuitos a , respectivamente. Os feixes podem ter de 1 a 4 cabos condutores, com o posicionamento mostrado na Fig. 1. O afastamento entre subcondutores no mesmo feixe é sempre de ;
* a : indicam a disposição dos cabos (ou feixes) das fases dos circuitos a , respectivamente. Os cabos podem ser dispostos de forma horizontal, triangular ou vertical, como mostrado na Fig. 2;
* : indica a altura de fixação dos cabos do circuito de mais baixa tensão nas torres.

Formalmente:

* : tal que é o cabo condutor do circuito .
* : número de subcondutores dos condutores do circuito .
* : disposição dos condutores do circuito onde
  + indica disposição horizontal;
  + indica disposição triangular;
  + indica disposição vertical.
* : altura da fase inferior do circuito nas torres.

A influência de cada uma das variáveis nas funções a otimizar ficará clara na descrição dessas na próxima seção. As funções de restrição a (descritas na seção D) são, na realidade, condições de contorno, e garantem que essas variáveis só possam assumir valores válidos.

## Funções de otimização

Como descrito acima, a modelagem consiste em um problema de otimização multiobjectivo restrito que consiste em minimizar

(1)

sujeito às restrições , , onde as funções objetivo são

* : otimização da ampacidade do circuito ;
* : otimização das perdas por efeito Joule;
* : otimização da altura das torres;
* : otimização da largura da faixa de segurança;
* : otimização dos esforços sobre as estruturas;
* : otimização dos custos dos circuitos;

e as funções de restrição são

* : restrições de faixas de valores para as variáveis de otimização;
* : restrições relativas às correntes nos cabos;
* : restrições relativas à altura cabo solo;
* : restrição relativa à largura da faixa de segurança.

As funções de otimização são descritas a seguir, e as de restrição na seção D. As fórmulas incluídas nessas seções utilizam as notações introduzidas nas seções A e B, cujas definições não serão repetidas.

### Ampacidade

Com a circulação da corrente pelos cabos, a temperatura desses se eleva, e ocorre uma troca de calor com o ambiente. O equilíbrio ocorre em uma temperatura em que o calor perdido pelo cabo iguala a quantidade ganha. A ampacidade especifica a corrente máxima que os cabos podem transportar sem que sua temperatura exceda a temperatura de projeto .

Seja a ampacidade (A) dos cabos do circuito . A ampacidade deve ser maximizada, de modo que as funções de otimização , correspondem ao inverso de . Isto pode ser feito, por exemplo, utilizando um método como o de inversão, fazendo

onde é uma constante escolhida de tal forma que o quociente nunca se torne nulo.

Segundo [8], o cálculo da ampacidade é feito utilizando os valores conservativos de radiação solar de 1000 W/, velocidade do vento de 1 m/s e temperatura igual à temperatura máxima média do ar . Este cálculo é feito da seguinte forma [1]:

onde é a resistência () do cabo do circuito à temperatura de projeto, e são as perdas de calor (W/m) por irradiação e convecção, respectivamente, e é o ganho de calor por radiação solar.

O cálculo de é feito como uma interpolação linear entre os valores de resistência do cabo a e [9]:

O cálculo de é:

onde é a velocidade do vento (1 m/s).

O cálculo de é:

onde é o coeficiente de emissividade do condutor (0,5).

Finalmente, tem-se

A ampacidade está sujeita às restrições a (seção D), que tratam das correntes nos cabos. É importante observar que o cálculo de acima não considerou o número de subcondutores nos feixes, porque o que se procura aqui é determinar o cabo que é capaz de fornecer a maior ampacidade dentre aqueles que atendem às restrições mencionadas (em cujo cálculo é considerado).

### Perdas por efeito Joule

As perdas por efeito Joule devem-se à geração de calor pela passagem de corrente pelos condutores dos circuitos, representam perda de energia e devem ser minimizadas.

A função corresponde à perda total por efeito Joule ():

onde é a perda por efeito Joule do circuito . A referência [1] menciona um método para este cálculo:

onde é o número de fases (3) e e são, respectivamente, a resistência do cabo à temperatura de projeto e a ampacidade, ambos calculados na seção anterior ((3) e (4)).

### Altura das torres

A função refere-se à altura das torres da LT, e tem um impacto direto no objetivo principal do modelo: torres de menor altura levam a linhas mais compactas. Essa altura deve então ser minimizada. Para evitar um número excessivo de funções de minimização, optou-se por minimizar

onde é a altura da torre ­­ (m). Tem-se

onde é a distância vertical ocupada pelo circuito na torre (m), é o afastamento vertical entre as fases superior do circuito e inferior do circuito na torre (m), e é o afastamento vertical entre a fase superior do circuito e os cabos para-raios (m). As distâncias verticais estão sujeitas às restrições a , relativas à altura cabo solo (seção D).

A distância depende da disposição das fases no circuito, sujeita à distância mínima entre fases, e da quantidade e disposição dos subcondutores nos feixes das fases. Formalmente:

onde é o número de vezes que a distância vertical entre fases do circuito deve ser considerada:

é a distância vertical entre fases do circuito relativa à torre :

(os parâmetros e são descritos mais abaixo), e é o número de vezes que a distância vertical de separação entre subcondutores da mesma fases deve ser considerada (desprezando o pequeno ajusto que seria necessário para :

O afastamento vertical entre circuitos considera a distância mínima entre fases de circuitos diferentes, levando em consideração a tensão do circuito de maior tensão [8]:

Por fim, o afastamento até os cabos para-raios considera a distância mínima exigida por [8]:

Nas equações (14), (16) e (17) acima, é uma distância (m) numericamente igual à tensão do circuito , e é um fator de correção de altitude [8]:

### Largura da faixa de segurança

A função refere-se à largura da faixa de segurança, que é também fator importante para a compactação da LT, e deve ser minimizada. A faixa de segurança é uma faixa do terreno onde a linha está instalada cujo acesso deve ser bloqueado para evitar riscos à sua segurança e a exposição humana e animal aos efeitos eletromagnéticos provocados por ela. Para evitar um número excessivo de funções de minimização, optou-se por minimizar

onde (m) é a largura da faixa de segurança relativa à torre . Esta largura será determinada pela maior exigência entre os circuitos da torre, ou seja, , , onde é a largura da faixa de segurança necessária para o circuito em relação à torre . Este valor depende da disposição dos cabos das fases do circuito da seguinte forma [8]:

onde é a distância horizontal do eixo da torre até o cabo mais afastado do circuito (m), é o deslocamento (m) devido à ação do vento ([8], seção 10.2.1.1), e é uma distância de segurança.

O cálculo da distância depende da largura da torre, da disposição das fases do circuito, sujeita à distância mínima entre fases, e da quantidade e disposição dos subcondutores nos feixes das fases:

onde é a distância entre fase e suporte do circuito na torre (m):

é o número de vezes que a distância entre fases do circuito deve ser considerada:

é o número de vezes que a distância horizontal de separação entre subcondutores da mesma fase deve ser considerada:

e é a distância horizontal (m) entre fases do circuito; o cálculo desta distância é mostrado na seção E. O cálculo da largura da torre é estrutural e escapa do escopo dessa modelagem; assume-se que este parâmetro pode ser estimado a partir das disposições dos cabos dos circuitos na torre, baseando-se na experiência da proprietária da linha em projetos semelhantes. Os parâmetros e em (22) têm os mesmos significados de (17).

Quanto aos demais parâmetros do cálculo de (20), [8], onde é como em (17), e é igual ao valor de (39).

### Esforços sobre as estruturas

A função refere-se aos esforços mecânicos *E* nas estruturas. Menores esforços levam a estruturas mais compactas, de modo que esta função deve ser minimizada. De forma análoga ao que foi feito em [1], os esforços verticais são desprezados e minimiza-se os esforços transversais e longitudinais totais:

onde se considerou a tração máxima exercida pelos cabos dos circuitos e é dado por

com (força [N/m] resultante da pressão do vento). Para , ver (45).

### Custo dos circuitos

O custo da linha corresponde à função , cuja necessidade de minimização é óbvia. Formalmente:

onde é o custo do circuito (R$), dado por , onde é o peso (kg) dos cabos do circuito . Este peso é dado por , em que é o comprimento total de um cabo da linha de . Este comprimento corresponde ao somatório de todas as catenárias entre torres adjacentes [1]:

. (29)

Para , ver (34).

## Funções de restrição

As funções de restrição dividem-se em restrições relativas a faixas de valores, restrições relativas às correntes nos cabos, restrições da altura cabo solo e a restrição relativa à largura da faixa de segurança.

### Restrições relativas às faixas de valores

Estas restrições procuram garantir que todas as variáveis de otimização tenham valores dentro das faixas permitidas:

* As funções a procuram garantir que as variáveis que indicam os cabos utilizados nos circuitos tenham valores dentro da faixa . Formalmente:
  + : ;
  + : .
* As funções a procuram garantir que as variáveis que indicam os números de subcondutores nos cabos dos circuitos tenham valores dentro da faixa . Formalmente:
  + : ;
  + : .
* As funções a procuram garantir que as variáveis que indicam a disposição dos cabos condutores nos circuitos tenham valores dentro da faixa . Formalmente:
  + : ;
  + : .
* A função procura garantir uma altura mínima para a fixação do cabo inferior do circuito nas torres, reduzindo o espaço de busca pela eliminação de valores que claramente violariam a altura mínima de posicionamento dos cabos. Formalmente:
  + : .

### Restrições relativas às correntes nos cabos

As funções a procuram garantir que o cabo (ou feixe de cabos) selecionado para o circuito seja capaz de transportar a corrente projetada, evitando o sobredimensionamento utilizando um coeficiente de segurança , assegurando que (onde a corrente total projetada foi dividida entre os cabos do circuito ). Formalmente:

* : ;
* : ;

onde é a corrente projetada para o circuito :

### Restrições relativas à altura cabo solo

As funções de restrição a procuram garantir que todos os tramos da linha respeitem, para todos os circuitos , a altura mínima cabo solo estipulada por [8]. Para isso exige-se que o desvio de cada tramo, correspondendo à diferença entre a altura cabo solo e o valor mínimo , nunca seja positivo. Formalmente:

com , com e como em (17). O cálculo de é:

onde é a altitude de fixação do cabo do circuito na estrutura anterior (m) e é a flecha (m) do cabo do circuito no ponto crítico (ponto no qual o cabo está mais próximo ao solo) relativo à torre . O cálculo de é (fazendo ) [9]

Para o cálculo da altitude de fixação do cabo tem-se

com

### Restrição relativa à largura da faixa de segurança

A função procura garantir que a largura da faixa de segurança esteja dentro dos valores mínimos exigidos por [8]. Esta norma menciona vários parâmetros que influenciam no cálculo dessa largura. Esses cálculos são complexos e computacionalmente caros. Por simplicidade, a comparação é feita com os valores mínimos adotados pelas concessionárias (ver [11]). Formalmente:

## Funções auxiliares

Esta seção descreve o cálculo de algumas funções auxiliares que são necessários às funções de otimização e restrição das seções anteriores.

### Distância horizontal entre fases

Para determinar a distância (21) entre o eixo do suporte da torre ao cabo mais afastado do circuito , é necessário calcular a distância horizontal entre fases :

onde (m) é uma distância básica e (m) é uma correção nesta distância devido ao deslocamento provocado pela ação do vento ([8], seção 10.2.1.1). A distância básica é [8]:

onde e são como na equação (17) e é a flecha do cabo do circuito relativa à torre (33).

O cálculo da correção do vento é [8]

onde é o ângulo de deslocamento devido à ação do vento [8]:

com a correção da ação do vento em função da velocidade de projeto do vento (42) e o ângulo de balanço teórico [8]:

Para , ver (45).

### Velocidade do vento de projeto

A velocidade do vento de projeto (m/s), relativa à torre na altura do circuito , é definida pela em [8] e pode ser calculada por

onde é a altura do circuito na torre :

(com e definidos como em (12) e (16)) e é a velocidade do vento corrigida em função do tempo de retorno [8]:

onde é o período de retorno em anos.

### Pressão do vento

A pressão do vento () relativa ao circuito e torre é [1]

onde é a velocidade de projeto do vento (42) e é a massa específica do ar [1]:

onde é a altitude média de implantação da linha (que pode ser obtida a partir das altitudes das torres).

# Análise crítica do Modelo

A ideia básica deste trabalho tem como principal mérito abordar o problema de compactação das LTs de forma inovadora e agressiva: a utilização dos mesmo elementos estruturais para suportar múltiplos circuitos com diferentes níveis de tensão pode levar a uma redução de espaço que não pode ser obtida apenas com as estratégias utilizadas com outras abordagens. O modelo desenvolvido procura contemplar diversos aspectos técnicos e econômicos que influenciam na obtenção da configuração mais eficiente. Entretanto, esse modelo possui diversas limitações e pontos que poderiam ser aprimorados.

A principal limitação é a restrição do modelo à abordagem apenas das características dos cabos condutores. Outros aspectos não foram considerados, tais como os elementos estruturais (estrutura, configuração e características mecânicas das torres), configuração e esforços mecânicos dos cabos para-raios e outros componentes das linhas, como ferragens e isoladores.

Além disso, mesmo alguns aspectos envolvendo os condutores poderiam ser aprimorados:

* as condições de funcionamento dos circuitos sob situações de emergência;
* o estudo dos efeitos de ruído audível, campos eletromagnéticos e rádio interferência (isto foi feito de forma muito simplificada; ver [11]);
* a disposição dos cabos subcondutores nos feixes das fases dos circuitos (foram utilizadas apenas as configurações tradicionais; outras configurações poderiam ter efeitos relevantes na redução do espaço entre fases);
* a disposição das fases dos circuitos (novamente, considerou-se apenas as disposições tradicionais; trabalhos como [4] e [7] sugerem que outras disposições podem ter influências importantes na redução do espaço.

# Conclusões

A utilização de LTs compactas suportando múltiplos circuitos pode ter um papel importante na capacidade de atender as futuras demandas de energia do país. Suprir essa demanda, de modo a manter o país competitivo no cenário internacional, atendendo simultaneamente a critérios econômicos e ambientais e de sustentabilidade, é um desafio extremante complexo, que leva a questões técnicas que devem tratar objetivos conflitantes e cuja solução não é passível de obtenção por métodos analíticos e determinísticos.

Neste sentido, a construção de um modelo matemático que possa ser utilizado por métodos de otimização é uma etapa importante na busca por soluções. Dentro das limitações mencionadas na seção anterior, este trabalho procura ser um passo nesse sentido.

Referências

*Basic format for books:*

1. R. S. Cavassin e T. S. P. Fernandes, “Uma Abordagem Multicritérios para Recapacitação de Linhas de Transmissão,” *Revista Controle & Automação*, vol. 23 n. 6, pp. 749–765, Dez. 2012.
2. J. Douglass, “Introduction to Compact Lines,” in *EPRI Transmission Line reference Book – 115-345kV Compact Line Design.* Eletric Power Research Institute, 2008.
3. M. O. B. C. Melo, E. Fontana, e S. R. Naidu, “Electric and Magnetic Fields of Compact Transmission Lines,” *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 14 n. 1, pp. 200–204, Jan. 1999.
4. P. Villa, A. Bertazzi, e M. Leva. (2002). Compact Transmission Line with Inverted Delta Configuration. Cigré. [Online]. Disponível: http://joa.csee.org.cn/Public/DownloadFile.aspx?FileStorageId=ab2a5d4b-82f2-48d7-96b0-7e2adc43494b
5. I. M. Dranka Júnior, “Linhas de Transmissão Compactas Urbanas – A Adequação de uma Evolução Tecnológica a Parâmetros de Licenciamento Ambiental Existentes,” dissertação de mestrado, PRODETEC, IEP, Curitiba, PR, 2009.
6. H. C. Coelho. (Out, 2003). “Nova LT – Um Novo Conceito de Linha de Transmissão.” Apresentado no XVII SNPTEE. [Online]. Disponível: http://www.linhadetransmissao.com.br/artigos/nova\_lt.pdf.
7. N. M. K. Abdel-Gawad, “An Investigation into Magnetic Field Management under Power Transmission Lines using Delta Configurations,” *The Open Environmental Engineering Journal*, vol. 2, pp. 50–67, 2009.
8. ABNT, *NBR 5422 – Projeto de Linhas Aéreas de Transmissão de Energia Elétrica.* Fev 1985.
9. R. S. Cavassin, “Uma Abordagem Multicritérios para Recapacitação de Linhas de Transmissão,” dissertação de mestrado, PPGEE, UFPR, Curitiba, PR, 2011.
10. R. L. F. P. Silva, “Estudo da Capacidade de Transporte em Linhas de Transmissão Utilizando Ferramentas de Otimização,” dissertação de mestrado, DEE, UnB, Brasília, DF, 2008.
11. C. J. Souza, “Determinação da Largura de Faixa de Segurança de Linhas de Transmissão: um Estudo Paramétrico,” dissertação de mestrado, PPGEE, UFMG, Belo Horizonte, MG, 2012.

1. Artigo escrito como primeiro trabalho da disciplina Computação Evolucionária do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Minas Gerais, ministrado pelo Prof. João Antônio de Vasconcelos no primeiro semestre de 2015. [↑](#footnote-ref-1)