

**METODOLOGIA DE LOCAÇÃO DE TORRES DE LINHAS DE TRANSMISSÃO BASEADA EM PROGRAMAÇÃO DINÂMICA**

Giulia Oliveira Santos Medeiros  
Rodolfo Mendes de Lima  
Anderson Rodrigo de Queiroz  
Camilo Raimundo Silva Pereira  
Afonso Henriques Moreira Santos  
Reinis Osis  
Renato A. dos Santos  
Luiz Czank Junior  
Eden Luiz Carvalho Junior

***Universidade Federal de Itajubá  
IX Estudos e Projetos Ltda. - EPP  
School of Business at North Carolina Central University  
Transmissoras Brasileiras de Energia - TBE***

**RESUMO**

A busca pela otimização dos recursos do sistema elétrico brasileiro tem estimulado os estudos para redução dos custos de energia, desde a sua geração, passando pela transmissão e distribuição. No caso da transmissão, a aplicação de modelos de otimização permite uma previsão quanto ao custo de construção de linhas de transmissão (LTs), de forma a auxiliar processos de tomada de decisão das concessionárias quanto a viabilidade na participação em leilões de energia. O presente trabalho propõe uma metodologia de locação otimizada das estruturas de transmissão por meio da modelagem de dados característicos do local de estudo, utilizando programação dinâmica, de maneira que o empreendimento proposto apresente o menor custo. Esse trabalho apresenta também um estudo de caso que compara os resultados obtidos pela metodologia proposta com a configuração do projeto real associado a LT Machadinho-Campos Novos.

Palavras-chave: linhas de transmissão, locação ótima de torres, programação dinâmica, leilões de transmissão de energia.

**ABSTRACT**

The pursuit for resource optimization associated with the Brazilian electric power system has encouraged studies seeking to provide means for energy costs reduction, considering generation, transmission

and distribution systems. On the transmission area, specifically, the application of optimization models allows companies to have an enhance predictability of costs linked to the construction of transmission lines (TLs), supporting them to evaluate their participation in long-term energy auctions. This paper points out an optimal location of transmission towers through the modeling of site characteristics data, by using of dynamic programming, in a way that project reaches out the lowest possible cost. It also presents a case study that compares the results obtained by the proposed methodology with a the real configuration of the TL Machadinho-Campos Novos.

Keywords: transmission line, optimal location of transmission towers, dynamic programming, electric transmission auctions.

## 1. INTRODUÇÃO

O sistema de transmissão possui um importante papel na estabilidade e operação do sistema elétrico de potência (SEP), visto que a finalidade da rede básica é o fornecimento contínuo de energia ao consumidor final localizado, geralmente, longe da geração de energia. O estímulo a investimentos no sistema de transmissão não cessa, pois, a capacidade de transmissão deve operar sempre em paralelo com a capacidade de geração. Caso a geração tenha capacidade maior que a transmissão o SEP pode ficar subutilizado, deixando de fornecer energia elétrica, a preços mais baixos (KISHORE e SINGAL, 2014). Então, a construção de linhas de transmissão (LT), para integrar novas fontes geradoras, possibilita a otimização dos recursos do SEP, o aumento de concorrência na geração e menores tarifas (WU et al., 2006).

Consequentemente, a otimização dos recursos destinados à investimentos no setor eletro-energético tem sido uma tendência mundial. Isso é evidenciado por avanços tecnológicos na produção, no transporte à longas distâncias, nas redes de distribuição inteligentes, na necessidade do atendimento à crescente demanda de energia, entre outros fatores. Para melhor utilização dos recursos destinados aos sistemas de transmissão, modelos de otimização matemática são aplicados na busca pelo equilíbrio entre a máxima eficiência operacional e custos mais baixos (BISNATH et al., 2005).

O processo de otimização de uma LT agrega desde a definição de estruturas e componentes, até a definição do traçado e locação das torres. Nessa análise, diversos fatores podem ser considerados, tais como: tensão, número de circuitos, tipo de condutor, aspectos climáticos, topográficos, ambientais, sociais, normativos e legais, etc. (KIESSILING

et al., 2003). No caso do projeto mecânico, que envolve a distribuição dos suportes ao longo do perfil topográfico, o objetivo da otimização visa a redução dos custos de implantação, considerando restrições técnicas.

Para considerar esses requisitos e obter todas as possibilidades de locação é necessário incorporar o conceito de recursividade ao problema pela utilização de programação dinâmica (PD), baseada no princípio de Bellman (BELLMAN, 1954). A recursividade está diretamente relacionada com a posição e altura das torres que antecedem e precedem uma determinada posição no perfil (FIGUEIREDO E GONZAGA, 2003).

Ranyard e Wreir (1967) e Mitra e Wolfenden (1968) apresentam uma discussão sobre locais e alturas que devem ser consideradas na locação de torres. Os autores destacam dois tipos de torres: as torres de passagem, que devem suportar somente as forças verticais feitas pelo peso dos cabos, e as torres de ancoragem, que devem suportar as forças verticais do peso dos cabos e as forças horizontais causadas pelos desníveis do perfil topográfico. Ambos já consideram o custo mínimo de locação de torres como o objetivo da análise. Em Mitra e Wolfenden (1968), quando o uso de torre de passagem é impossível, a metodologia detecta e monitora a situação, retornando até o ponto do percurso que uma torre de ancoragem deve ser locada para se alcançar uma solução ótima.

Em Olbrycht (1982) e Vieira e Toledo (2006) além da altura e local, o tamanho do vão também é avaliado como uma variável na otimização. Em Olbrycht (1982) é feito um detalhamento matemático do processo, mas os testes são simplificados devido as limitações computacionais da época. Já em Vieira e Toledo (2006) são apresentados os resultados obtidos sem um detalhamento quanto ao modelo de otimização. Figueiredo e Gonzaga (2003) apresenta uma formulação diferente para o processo de locação de torres, onde seu modelo é baseado na teoria dos grafos que elimina caminhos pela relação de preferência entre nós ainda não utilizados, a fim de melhorar a eficiência na determinação da LT de custo mínimo. As variáveis de decisão neste modelo são os locais e alturas.

No entendimento dos autores nenhum trabalho anterior apresenta uma metodologia detalhada que pode ser aplicada em caso de estudos reais de LTs. Dessa forma, o objetivo principal do presente trabalho é contribuir para a literatura existente apresentando um modelo detalhado de locação de torres baseado em PD que pode ser aplicado em estudos de caso reais para locação de torres considerando recursividade, diferentes tipos e alturas de torres, declividade do terreno, classe geotécnica, distância mínima entre o condutor e o solo e os critérios de vão médio e vão gravante mínimo e máximo. O modelo de

otimização proposto neste trabalho para locação das torres busca alcançar o custo mínimo de implantação das torres e fundações da LT.

O restante do trabalho é segmentado da seguinte forma, o Capítulo 2 apresenta a metodologia proposta baseada em PD para locação de torres de transmissão. O Capítulo 3 a definição do estudo de caso para a LT 525 kV Machadinho – Campos Novos. O Capítulo 4 apresenta os resultados do estudo de caso e o Capítulo 5 apresenta as conclusões do trabalho.

## 2. METODOLOGIA

A metodologia de locação ótima de torres baseia-se na técnica de PD seguindo conceitos apresentados em Olbrycht (1982), em que o objetivo é encontrar a distribuição de torres (locais, tipos e alturas) de menor custo, respeitando-se restrições técnicas definidas. A principal entrada para o algoritmo de otimização é uma lista de pontos referente ao perfil topográfico do traçado da LT com as seguintes informações: cota, declividade, deflexão, tipo de solo e altura de segurança. Além disso, para cada tipo de torre são definidos os seguintes parâmetros: deflexão máxima, vão médio máximo (VMM), vão gravante mínimo (VGmin), vão gravante máximo (VGmax), custo de fundação por tipo de solo e custo da estrutura por altura.

### 2.1 Representação do problema de locação de torres

A representação matemática do problema é feita por meio de três locais de teste, identificados por coordenadas bidimensionais  $(x,y)$ . A coordenada  $x$  representa a localização do local na rota que vai do local da torre de ancoragem inicial até o local da torre de ancoragem final da LT. Esses três locais estão representados pelas coordenadas  $(r,p)$ ,  $(i,j)$ ,  $(s,t)$ , que correspondem às especificações do local anterior, local atual e local posterior, respectivamente, conforme apresentado na Figura 1.

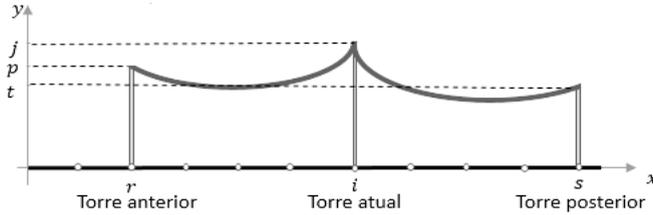


Figura 1 - Representação dos locais de testes

Segundo Olbrycht (1982) a utilização de três referências para locais é uma maneira de se obter o ótimo global para o problema em questão utilizando PD, uma vez que, para se obter a melhor possibilidade para o local atual é necessário testar todas as associações com o local anterior e com o local posterior. A determinação da coordenada  $x$  do local atual ( $i$ ) é obtida em relação a coordenada do local posterior ( $s$ ) menos um passo  $l$ , ou seja,  $i=s-l$ , onde  $l \in L$  que representa o conjunto de passos que definem as distâncias possíveis entre  $s$  e  $i$ . A coordenada  $x$  do local anterior ( $r$ ) é obtida em relação a coordenada do local atual menos um passo  $k$ , ou seja,  $r=i-k$ , onde  $k \in K$  representa o conjunto de passos que definem as distâncias possíveis entre  $i$  e  $r$ .

Conclui-se, portanto, que estabelecendo um valor para  $s$  e testando os passos  $l$  e  $k$  possíveis são obtidas as coordenadas  $x$  para  $i$  e  $r$ . Desta forma, todo o problema de otimização pode ser estruturado com relação a torre posterior  $s$ .

## 2.2 Processo de locação de torres

Para os vértices da LT a posição é fixa, já que são pontos associados a deflexão do traçado ou travessias específicas (rios, rodovias, etc.), onde a locação de uma torre é obrigatória. Para esses locais a otimização se dá na seleção da melhor combinação de tipo a altura. Para os pontos inicial e final da LT, além da posição, o tipo também é fixo, uma vez que as restrições e particularidades associadas a interligação com a subestação exigem tipos específicos de torres.

Para os demais locais a locação se dá por duas formas diferentes: a locação sem recursividade (LSR) e a locação com recursividade (LCR). A LSR é a realizada entre os primeiros locais de teste da LT e o local inicial. Nesta locação não é possível estabelecer recursividade, pois o único passo de associação possível é a distância entre o local de teste e o local inicial. A LCR, por outro lado, trata da locação conside-

derando a posição da torre anterior e posterior ao local em análise. Assim, para que se estabeleça uma LCR é necessário que ao menos uma LSR já tenha sido avaliada. Na Figura 2 são representados os possíveis testes de locação para LSR e LCR, utilizando uma única altura e com vão determinados pelos passos  $l$  e  $k$ , onde os valores atribuídos aos vãos mínimo e máximo permitidos entre torres são, respectivamente, 8 e 10.

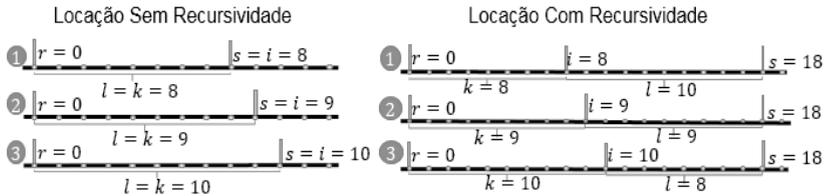


Figura 2 – Ilustração da locação sem e com recursividade

### 2.3 Locação sem recursividade

Nesta locação não é feita a verificação para VM e VG, pois na LSR a análise é feita apenas para duas torres e o cálculo do VM e VG para uma torre é feito considerando as torres a frente e a ré. Dessa forma, apenas um valor de vão máximo para teste é fixado, neste caso o valor de VMM.

Para cada combinação de torres é verificado se a distância mínima entre o condutor e solo ( $d_{min}$ ) é respeitada. Caso essa distância seja respeitada, um custo parcial  $f_p(p)$  é definido em função somente da altura da torre de ancoragem terminal (1). Caso o  $d_{min}$  não seja respeitado para uma altura  $p$ , o  $f_p(p) = \infty$ .

$$f_p(p) = fund(CG_r) \times CD(decliv_r) + CT(tipo_{anc,p}) \quad (1)$$

Onde  $fund(CG_r)$  é o custo de fundação devido a classe geotécnica do local  $r$  ( $CG_r$ );  $CD(decliv_r)$  representa um fator multiplicador do custo de fundação relacionado a declividade do local  $r$  ( $decliv_r$ ); e  $CT(tipo_{anc,p})$  representa o custo associado ao tipo de torre de ancoragem inicial ( $tipo_{anc}$ ), único tipo permitido para a LSR, testado para o local  $r$  e com certa altura  $h_p$ .

Após a definição do primeiro  $f_p(p)$ , uma segunda altura  $p$  é testada e um outro  $f_p(p)$  definido, até que todas as alturas disponíveis para serem testadas para o local  $r$  e seus, respectivos,  $f_p(p)$  sejam determinados.

Levantados todos os custos de associações de uma altura  $p$  para uma certa altura de  $j = t$  em  $i = s$ , não é necessário realizar o armazenamento de todas essas informações, por isso pega-se para cada altura testada em  $s = i$  somente o menor valor de  $f_p(p)$  conforme indicado por (2). O valor da altura da torre  $p$  utilizada para obtenção do menor  $f_p(p)$  também deve ser armazenada na função definida por (3), pois é preciso o valor desta altura para a definição da rota ótima ao final da LT.

$$F(s, t, l, tipo) = \min_{p \in H} f_{parcial}(p) \quad (2)$$

$$altura(s, t, l, tipo) = \min_{h_p \in F(s, t, l, tipo)} h_p \quad (3)$$

Onde  $F(s, t, l, tipo)$  é o custo acumulado da locação de torres até o local  $s$  e altura  $(s, t, l, tipo)$  é a altura da torre  $h_p$  que apresenta o menor custo acumulado no local  $s$  para uma torre de altura  $h_t$  com um passo de  $l$  e do tipo especificado. Note que o custo acumulado  $F(s, t, l, tipo)$  vai até a torre anterior ao local  $s$ , de forma que o custo da torre em  $s$  só será avaliado quando este ponto for o objeto de estudo, ou seja, para um local  $i$  na LCR onde  $s \neq i$ .

## 2.4 Locação com recursividade

A LCR é a associação entre torres no meio do trecho de locação. Este tipo de associação é representada pelas 3 coordenadas  $(r, p)$ ,  $(i, j)$ ,  $(s, t)$  (Figura 3) e os passos  $l \in L$  e  $k \in K$  que interligam essas 3 coordenadas. Todas as possibilidades de associação entre os locais  $s$  e  $i$  são testadas, para as quais é feita a verificação da distância mínima entre condutor e solo, VMM, VG mínimo e VG máximo.

Para que todas as possibilidades de associação de torres (diferentes alturas) sejam testadas é necessário variar as alturas das torres no local  $s$  e  $i$ . Porém, as alturas disponíveis para o local  $i$  estão ligadas às suas possíveis associações com o local  $r = i-k$ , para todo  $k \in K$  e aos custos parciais dessas associações. Logo, na verificação do requisito da LCR é possível que sejam levantados custos acumula-

dos não somente para os diferentes passos  $l$  que associam o local posterior  $s$  com o local atual  $i$ , mas também para os diferentes passos  $k$  que associam o local atual  $i$  com o local anterior  $r$ . O procedimento é repetido até que todos os locais tenham todos os requisitos verificados. Se todos os requisitos forem satisfeitos para os pontos entre  $s$  e  $i$ , então o  $f_p(j, k, tipo_i)$  associado é obtido pela Equação (5), caso contrário  $f_p(j, k, tipo_i) = \infty$ .

$$f_p(j, k, tipo_i) = fund(CG_i) \times CD(decliv_i) + CT(tipo_i, i) + F(i, j, k, tipo_i) \quad (5)$$

Onde  $f_p(j, k, tipo_i)$  é o custo acumulado para o local  $s$ . Os demais parâmetros são definidos com relação aos atributos de  $(i, j)$  ao invés de serem associados aos atributos de  $(r, p)$  (Equação (1)).

Após a definição de um  $f_p(j, k, tipo_i)$  para a associação de  $h_i$  com o atual  $h_j$ , o passo  $k$  é atualizado e todos os procedimentos são refeitos até que todas as associações de  $i$  com  $r$  sejam levantadas. Somente depois de realizado todos os testes para os diferentes passos  $k$  é que o valor de  $h_j$  é redefinido e os cálculos refeitos. Este raciocínio é repetido até que todas as alturas disponíveis para o local  $i$  sejam testadas e seus respectivos valores de  $f_p(j, k, tipo_i)$  sejam determinados.

Levantados todos os custos de associações de uma altura  $h_t$  com todas as alturas  $h_j$  para todos os passos  $k$ , é armazenado o menor  $f_p(j, k, tipo_i)$  que  $t$  apresentou dentre todas as possibilidades, expresso por (6) e o valor da altura da torre utilizada para obtenção do menor  $f_p(j, k, tipo_i)$  armazenados conforme (7).

$$F(s, t, l, tipo) = \min_{j \in H} \left\{ \min_{k \in K} \left[ \min_{tipo_j \in T/PO} f_p(j, k, tipo_j) \right] \right\} \quad (6)$$

$$altura(s, t, l, tipo) = h_j \in F(s, t, l, tipo) \quad (7)$$

## 2.5 Custo Final Total

Após definidos os custos mínimos de todas as associações de torres, o menor custo da LT deve ser determinado e, por consequência, a rota ótima para esse menor custo. Lembrando que o custo mínimo até o local  $s$  não inclui seus custos associados, um procedimento deve

ser realizado para definição da rota ótima onde a soma do custo da locação da torre de ancoragem no local final é somado ao  $F(s,t,l,tipo)$ , obtendo um custo mínimo para cada altura testada e o menor desses custos acumulados é o menor custo de construção da LT. O custo total e a altura da torre de ancoragem final são representado, respectivamente pelas Equações (9) e (10).

$$CTotal = \min_{t \in H} [F(s,t,l,tipo) + CT(tipo,t) + fund(CG_s) * CD(decliv_s)] \quad (9)$$

$$altura_f = h_t \in CT \quad (10)$$

Onde  $CTotal$  é o custo total de construção da LT,  $altura_f$  é a altura da torre final e os demais parâmetros em vez de relacionados a  $(r,p)$ , são com relação a  $(s,t)$ .

### 3. ESTUDO DE CASO

A LT de circuito simples e 525kV Machadinho – Campos Novos foi selecionada como estudo de caso para avaliação da metodologia proposta. Esta LT possui 83 torres autoportantes e liga a UHE Machadinho (RS) até a subestação de Campos Novos (SC). Atravessa terrenos de rochas basálticas e solos argilosos, com diferentes configurações de relevo, com níveis de planaltos de topografia suave bordas com vales dissecados com altas declividades.

A aplicação da metodologia foi feita considerando a mesma família de torres utilizada no projeto executivo (Tabela 1) e alturas das torres variando em incrementos de cinco metros dentro dos limites estabelecidos. Para o perfil topográfico (tabela de pontos) utilizou-se resolução média de 30 metros. Ou seja, o traçado da LT foi dividido em pontos igualmente espaçados de 30 metros. Para modelagem da curva do condutor foram utilizadas as trações de referência 1944 e 2199 kgf para temperatura máxima e mínima, respectivamente. O uso do solo no traçado foi determinado por classificação de imagens de satélite Landsat 8 e fotointerpretação de imagens de satélite de alta resolução (Google Earth). Os valores de altura de segurança foram determinados segundo a NBR5422 (ABNT, 1985) de acordo com o uso do solo (8,5m para água, floresta, pastagem; 9m para agricultura e 10,5 para ruas e avenidas). Os dados de cota e declividade foram obtidos do modelo

digital de elevação WorldDEM com resolução especial de 12 metros e precisão vertical absoluta menor que 10 metros.

Tabela 1 - Características das torres da LT 525kV Machadinho – Campos Novos

Torre	Altura - h [m]		DM [°]	VMM [m]	VGmin [m]	VGmax [m]	CE=a.h+b [R\$]		CF [R\$]	
	Mín.	Máx.					a	b	Solo I	Solo II
SS - Suspensão Simples	15	35	3	450	300	600	2.753	36.263	48.637	90.434
SR - Suspensão Reforçada	15	40	3	560	300	700	3.158	30.675	64.410	119.803
SA - Suspensão em Ângulo	15	40	10	700	350	850	3.554	32.495	82.434	153.327
AM - Ancoragem meio de linha	15	55	25	1.000	-300	1.120	6.329	165.442	103.893	193.241
AT - Ancoragem Terminal	20	45	56	1.400	-300	1.300	7.048	182.149	129.702	241.246

Legenda: DM - Declividade máxima; VMM - Vão Médio Máximo; VG - Vão Gravante; CE - Custo da estrutura; CF - Custo de fundação; Solo I - Solos de boa qualidade que não exigem fundações especiais; Solo II: Solos de baixa resistência que exigem fundações especiais como estacas e sapatas especiais. Obs.: Custos de estrutura e fundações calculados a partir de informações de projeto e planilha de orçamentos de transmissão da ANEEL (ANEEL, 2017).

#### 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A definição dos parâmetros de entrada e restrições foi feita de forma bastante criteriosa, para permitir a comparação dos resultados com o traçado real da linha de transmissão. É importante destacar as incertezas dos dados de entrada do modelo, principalmente em relação a topografia, resolução do perfil e incremento de altura para as torres. Mesmo assim, foi possível verificar grande semelhança entre os arranjos de torres real e o gerado pelo modelo (Figura 3).

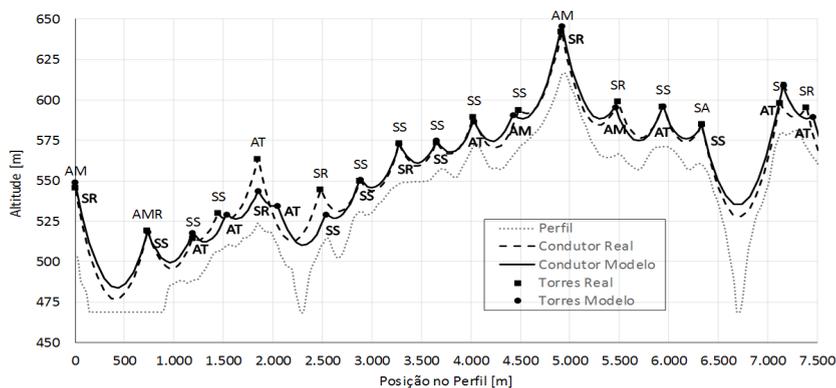


Figura 3 – Comparação do arranjo de estruturas em perfil para o resultado do modelo e a LT real nos 7,5 primeiros quilômetros da LT

O modelo resultou em um arranjo com 4 torres a mais que o projeto, porém com altura média e vãos médios ligeiramente menores (Tabela 2). Em relação ao custo total (torres e fundações), o arranjo obtido pelo modelo apresentou valor 3,83% menor que o custo estimado para a LT real.

Tabela 2 – Resultados do modelo por tipo de torre

Torre	Número		Altura média [m]		Vão Médio [m]		Custo (Torre + fundação) [R\$]	
	Modelo	Real	Modelo	Real	Modelo	Real	Modelo	Real
SS	36	27	24	24	410	404	5.464.927	4.063.600
SR	22	23	29	32	509	505	4.113.245	4.491.005
SA	8	11	34	30	622	631	1.896.871	2.417.597
AM	9	11	28	34	455	521	4.363.110	5.626.474
AT	10	9	22	30	400	435	4.633.926	4.688.593
<b>LT(Total)</b>	<b>85</b>	<b>81</b>	<b>27</b>	<b>29</b>	<b>459</b>	<b>483</b>	<b>20.472.080</b>	<b>21.287.268</b>

## 5. CONCLUSÕES

O presente trabalho apresentou uma metodologia detalhada para locação de torres de linhas de transmissão baseada em programação dinâmica. Os resultados da modelagem de locação de torres para a LT 525 kV Machadinho – Campos Novos, se mostraram coerentes em relação ao projeto real da LT, com número de torres, altura média e vão médio muito próximos.

Considerando as incertezas dos dados de entrada utilizados para a modelagem, principalmente em relação a topografia, resolução do perfil e incremento de altura para as torres, os resultados demonstram que o modelo apresenta boa capacidade para representar as restrições técnicas associadas ao problema de locação de torres. Além disso, o custo total do arranjo de torres gerado pelo modelo apresentou 3,83% menor que o custo estimado para o projeto real, demonstrando que o modelo foi eficiente em otimizar a distribuição de torres no perfil.

Esses resultados indicam a potencialidade de aplicação do modelo como ferramenta de tomada de decisão em leilões de transmissão, tanto pela coerência ao modelar o problema quanto pela capacidade de gerar resultados otimizados em relação ao custo. Além disso, destaca-se o potencial de aplicação do modelo como ferramenta de auxílio a elaboração de projetos básico e executivo, dada a coerência técnica na representação das restrições.

## AGRADECIMENTOS

Este trabalho integra as atividades do Projeto de Pesquisa e Desenvolvimento (P&D ANEEL) intitulado “Desenvolvimento de Metodologia de Otimização de Traçado e Projeto de Linhas de Transmissão Empregando Técnicas Quantitativas em Sistema de Informações Geográficas” (PD-2651-0012/2016), contratado pelas empresas EATE, EBTE, ECTE, ENTE, ERTE, ESDE, ETEP, ETSE e LUMITRANS, gerenciado pela TBE e executado pela iX Estudos e Projetos Ltda. – EPP.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

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

ANEEL. Agência Nacional de Energia Elétrica. Base de Preços de Referência ANEEL – Ref. 06/2017. <http://www2.aneel.gov.br/cedoc/atreh2009758.pdf>.

BELLMAN, R. The Theory of Dynamic Programming, Bulletin of the American Mathematical Society, 60(6): 503-515, 1954.

BISNATH, S.; BRITTEN, A. C.; CRETCHLEY, D. H.; MUFTIC, D.; PILLAY, T.; VAJETH, R. The planning, design and construction of overhead power lines. Eskom Holdings Ltd. Crown Publications, Bedford Gardens, Johannesburg. 2005.

FIGUEIREDO, J. N.; GONZAGA, C. C. Aplicação de métodos de busca em grafos com nós parcialmente ordenados à locação de torres de transmissão. Pesquisa Operacional, vol. 23 (1), pp. 209-220, 2003.

KIESSLING, F.; NEFZGER, P.; NOLASCO, J. F.; KAJINTZYK, U. Overhead Power Lines: Planning, Design, Construction. Springer – Verlag Berlin Heidelberg 2003.

KISHORE, T. S.; SINGAL, S. K. Optimal economic planning of power transmission lines: A review. Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol. 39, pp. 949-974, 2014.

MITRA, G. e WOLFENDEN, K. A Computer Technique for Optimizing the Sites and Heights of Transmission Line Towers – A Dynamic Programming Approach. The Computer Journal, Vol. 10 (4), p 347 – 351, 1968.

OLBRYCHT, L. A Contribution to the Methods of Optimizing the Spotting of Transmission Line Towers. *Electric Power Systems Research*, vol. 5, pp. 163-171, 1982.

RANYARD, J. C.; e WREIR, A. The optimum arrangement of towers in an electric power transmission line. *Oxford Journals – The Computer Journal*, vol.10 (2), pp. 157-161, 1967.

VIEIRA, F. R. e TOLEDO, J. H. Optimal Location of Power Transmission Lines Towers Using Reformulated Dynamic Programming. *IEEE PES Transmission and Distribution Conference and Exposition Latin America*, Venezuela, 2006.

WU, F. F.; ZHENG, F. L.; WEN, F. S. Transmission investment and expansion planning in a restructured electricity market. *Energy*, vol. 31, pp. 954-966, 2006.

