

# ESTUDO DO CONJUNTO ESTRUTURA/FUNDAÇÃO PARA LINHAS DE TRANSMISSÃO DE 500 KV COM FEIXE EXPANDIDO

## A STUDY OF JOINT STRUCTURE/FOUNDATIONS FOR LINES OF 500 KV TRANSMISSION WITH EXPANDED BEAM

Geraldo Martins Tavares<sup>1</sup> Jorge Amon Filho<sup>2</sup>  
Nelson Henrique Costa Santiago<sup>3</sup>  
Alexandre dos Santos Rigueira<sup>4</sup> P.C.P.S. Junior<sup>5</sup>  
Rodrigo Gonçalves Noel<sup>6</sup> Márcio Zamboti Fortes<sup>7</sup>

Data de entrega dos originais à redação em: 24/12/2014  
e recebido para diagramação em: 23/09/2016

*É uma preocupação das empresas concessionárias de energia encontrarem custos ótimos em seus projetos mantendo a confiabilidade dos sistemas. Em sistemas de transmissão de energia elétrica, os parâmetros elétricos e mecânicos são pontos focais dos projetos. Este artigo apresenta estudo para otimização de projetos de linhas de transmissão de 500 kV, destacando a tecnologia com feixe expandido e avaliando o conjunto estrutura/fundação\*. Como resultados, apresentam-se diversas análises focadas em estudos de caso.*

*Palavras-chave: Linhas de Transmissão. Otimização Estrutura/Fundação.*

*It is a great concern for electric utilities companies to find optimal costs on their projects while maintaining the system reliability. In energy transmission systems, electrical and mechanical parameters are focal points of projects. This paper presents a study for the optimization of a project on 500 kV transmission lines, highlighting the technology with expanded beam, by expanding and evaluating the whole structure/foundation. As results, we present different analyzes focused on case studies.*

*Keywords: Energy Transmission Lines. Structure/Foundation Optimization.*

\* Este trabalho foi desenvolvido no âmbito do Programa de Pesquisa e Desenvolvimento Tecnológico do Setor de Energia Elétrica regulado pela ANEEL e apoiado por FURNAS S.A. no âmbito do seu Programa de P&D.

## 1 INTRODUÇÃO

Existem alguns aplicativos que podem ser utilizados para apoiar projetos de linhas de transmissão (LT) ou parte dos projetos. Uma análise de um destes aplicativos está descrita em (XIAO-YAN e XIAN-LONG, 2012), a aplicação do Método de Monte Carlo para seleção de condutores em (BERYOZKIMA et al., 2014), software de simulação de proteção atmosférica de linhas em (KARAMPELAS et al., 2011), análise por elementos finitos para avaliação do carregamento de ventos em (LI et al., 2012) e a avaliação da proteção em (ISTARDI et al., 2009) onde é focado colapso de tensão.

Outras ferramentas utilizadas frequentemente por equipes de projetos são os softwares para previsão de custos em que a técnica de mineração de dados está sendo explorada (PENG et al., 2008), além de técnicas de análise de riscos (TUMMALA e BURCHETT, 1999) e pesquisas para melhor localização de linhas em (FRENCH et al., 2008)

Quando se avaliam tecnologias que possam ser aplicadas a linhas de transmissão, a pesquisa de (CARRINGTON, 1998) traz um resumo para linhas de 230 kV e uma aplicação de otimização do uso de aço em torres é destacado no trabalho de (CHUNMING et al., 2012). Destaca-se a pesquisa de (KISHORE e

SINGAL, 2014) com uma revisão de planejamento ótimo com aspecto econômico, em que uma visão geral de projetos de linhas de transmissão está apresentada, incluindo alguns dados do Brasil.

Para os diversos aspectos relacionados a projetos de linhas de 500 kV em especial, citam-se as pesquisas de: (HAWKINS et al., 2008), (WHITE, 1993) e (CASTRO, 1995).

Este artigo objetiva apresentar o desenvolvimento de uma metodologia para otimização de LT's com a inclusão das fundações no processo de otimização, como item adicional, passando estas a serem investigadas em conjunto com as estruturas, explorando-se assim mais ainda as possibilidades de redução do custo global das LT's sem prejuízo da confiabilidade, nem do meio ambiente. Foram considerados diversos tipos de estruturas autoportantes e estaiadas e, também, tipos de fundações normalmente empregadas.

Ressalta-se que embora este projeto enfatize linhas de transmissão de 500 kV com feixe expandido, a metodologia desenvolvida é de aplicação genérica, o que amplia os horizontes de aplicação deste estudo.

Apresenta-se neste artigo a condensação das avaliações das vantagens econômicas que podem ser

1 Departamento de Engenharia Elétrica - Universidade Federal Fluminense.

2 Furnas Centrais Elétricas.

3 Fluxo Engenharia.

4 A. Rigueira Consultoria.

5 Fluxo Engenharia.

6 Fluxo Engenharia.

7 Universidade Federal Fluminense.

alcançadas na implantação de linhas de transmissão, quando se procede a otimização do conjunto estrutura/fundação, através da pesquisa do melhor ângulo de inclinação dos montantes das estruturas autoportantes ou dos estais nas estruturas estaiadas, ou em outras palavras, quando se promove a variação dos pontos de conexão estrutura/fundação.

A série de estruturas considerada como referência é composta dos seguintes tipos de estruturas.

- GSE1 – estaiada leve
- GSE2 – estaiada pesada
- GS1 – suspensão autoportante leve
- GS2 – suspensão autoportante pesada
- GS3 – suspensão autoportante para ângulo médio
- GST – transposição
- AD1 – ancoragem leve AD2 – ancoragem média
- AD3 – ancoragem pesada e fim de linha

Os pesos de todas as estruturas da série para cada valor de EDS são: 18, 20, 23 e 26%, bem como os quantitativos de materiais e serviços para construir as fundações, considerando os conjuntos estrutura/fundação não otimizados, correspondentes às estruturas e fundações em (RIGUEIRA et al., 2004) e (AMON FILHO et al., 2009), considerado como Caso Base, e os correspondentes conjuntos de estruturas/fundações otimizados. Os resultados que demonstram os ganhos econômicos com o procedimento descrito são apresentados com duas vertentes de consideração que serão descritas neste artigo.

## 2 PRIMEIRA VERTENTE

No que diz respeito à comparação dos conjuntos estrutura mais fundação, do Caso Base com os conjuntos otimizados, foram selecionadas como mais representativas, para apresentação em gráficos nesse atual relatório, as estruturas GSE2, GS2 e AD2.

Com base nos resultados encontrados para os pesos das estruturas e dos estais, obtidos nas análises estruturais otimizadas para as estruturas GSE2, GS2 e AD2 em função da variação do carregamento de EDS e da variação de abertura dos pontos de apoio e com base nos resultados encontrados para os respectivos quantitativos de fundações, foi possível analisar o comportamento do conjunto estrutura/fundação através do levantamento dos seus custos. Para isso, de acordo com os custos unitários de materiais e serviços das estruturas e das fundações levantados, foram determinados os custos totais do conjunto estrutura/fundação para os casos estudados.

Pode-se observar o comportamento do custo total em relação à abertura/fechamento (variação do ângulo de inclinação) dos montantes/estais, custo esse que se mostrou variável e com um ponto de otimização.

Inicialmente nessa demonstração consolidada, estão apresentados de forma resumida os pesos das estruturas e os respectivos quantitativos de volumes de fundação em função do carregamento de EDS.

Finalmente na última seção serão apresentados os custos das estruturas isoladamente e do conjunto estrutura/fundação para cada tipo de estrutura em função do carregamento de EDS e da abertura dos pontos de apoio sob a forma de tabelas e gráficos.

### A) Peso das Estruturas

Os pesos das estruturas apresentados nos gráficos são exemplos resultantes das análises estruturais otimizadas em função da abertura dos montantes/estais para os três tipos de estruturas selecionadas para análise, considerando os quatro carregamentos de EDS dos cabos condutores, sendo o caso base o correspondente aos ângulos das estruturas e dos estais referentes à variação nula. As variações positivo-negativas foram feitas em relação à inclinação das estruturas do projeto citado em (RIGUEIRA et al., 2004).

A Figura 1 e Tabela 1 apresentam os resultados para o caso ESTRUTURA GSE2: MASTRO+ 4 x ESTAIS.

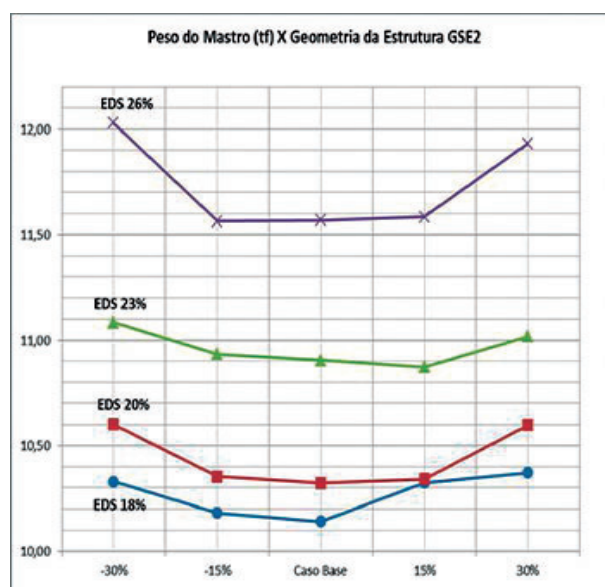


Figura 1 – Resposta para o Mastro Central na Estrutura GSE2

Tabela 1 – Comparação do Peso do Mastro por abertura

Estrutura GSE2 - Abertura	Peso do Mastro (tf)			
	EDS 18%	EDS 20%	EDS 23%	EDS 26%
-30%	10,33	10,60	11,09	12,03
-15%	10,18	10,35	10,94	11,56
Caso Base	10,14	10,32	10,91	11,57
15%	10,32	10,34	10,87	11,58
30%	10,37	10,60	11,02	11,93

A Figura 2 e Tabela 2 apresentam a avaliação dos pesos nos estais.

Os resultados com outro exemplo de estrutura AD2 estão apresentados na Figura 3 e Tabela 3.

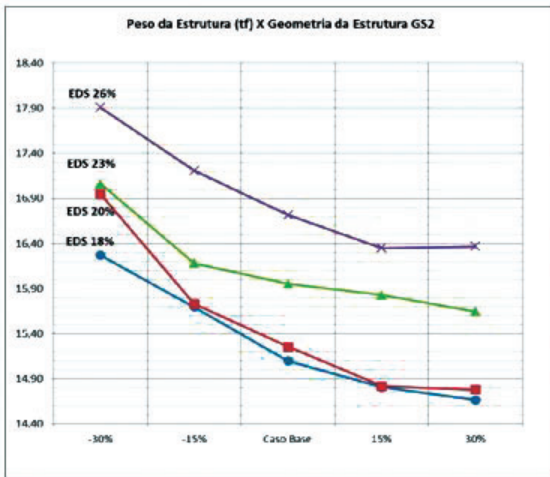


Figura 2 – Resposta para os Estais na Estrutura GSE2

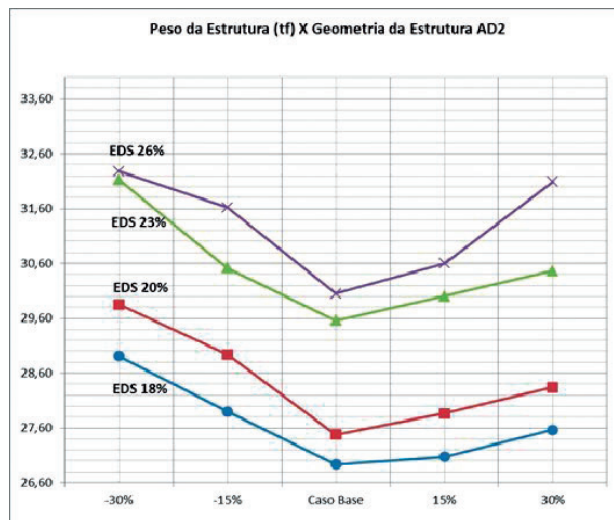


Figura 3 – Resposta para os Estais na Estrutura AD2

Tabela 2 – Comparação do Peso da estrutura para diferentes EDS's

Peso da Estrutura (tf)			
EDS 18%	EDS 20%	EDS 23%	EDS 26%
16,27	16,95	17,06	17,91
15,70	15,73	16,18	17,21
15,10	15,26	15,95	16,71
14,81	14,82	15,83	16,35
14,67	14,78	15,65	16,37

Tabela 3 – Comparação do Peso da estrutura na Estrutura AD2

Estrutura AD2 - Abertura	Peso da Estrutura (tf)			
	EDS 18%	EDS 20%	EDS 23%	EDS 26%
-30%	28,91	29,85	32,13	32,28
-15%	27,90	28,94	30,52	31,62
Caso Base	26,93	27,48	29,56	30,05
15%	27,07	27,86	30,00	30,60
30%	27,56	28,34	30,47	32,09

### B) Quantitativo das Fundações

Os quantitativos das fundações obtidos a partir das reações resultantes no topo das fundações para os três tipos de estruturas em análise em função da abertura dos montantes/estais sob ação dos quatro carregamentos de EDS são apresentados nas Tabelas 4 e 5.

Tabela 4 – Comparação para concreto

Abertura	Concreto (m³)											
	GSE2				GS2				AD2			
	18%	20%	23%	26%	18%	20%	23%	26%	18%	20%	23%	26%
Caso -30%	13,28	13,38	13,38	13,56	23,00	23,00	23,28	23,28	42,88	41,52	49,96	54,20
Caso -15%	12,93	13,03	13,03	13,12	18,12	19,56	19,80	19,68	36,84	39,12	42,08	45,60
Caso Base	12,87	12,98	12,98	13,22	17,36	17,00	17,12	17,60	33,44	35,00	38,32	40,88
Caso +15%	12,76	12,76	13,08	13,08	15,16	15,16	16,44	16,56	32,00	33,56	36,60	37,52
Caso +30%	12,63	12,86	13,08	13,18	14,52	14,36	14,76	14,76	31,28	32,40	34,72	37,16

Tabela 5 – Comparação para Escavação

Abertura	Escavação (m³)											
	GSE2				GS2				AD2			
	18%	20%	23%	26%	18%	20%	23%	26%	18%	20%	23%	26%
Caso -30%	15,87	15,97	15,97	16,50	22,24	22,24	22,48	22,48	41,52	40,16	48,60	52,84
Caso -15%	15,35	15,45	15,45	15,36	17,36	18,80	19,04	18,92	35,48	37,76	40,72	44,24
Caso Base	14,96	15,06	15,06	15,46	16,60	16,24	16,36	16,84	32,08	33,64	36,96	39,56
Caso +15%	14,66	14,66	15,16	15,16	14,40	14,40	15,68	15,80	30,64	32,20	35,24	36,16
Caso +30%	14,21	14,77	15,16	15,26	13,76	13,60	14,00	14,00	29,92	31,04	33,36	35,80

Como os volumes de escavação são função direta e proporcional dos volumes de concreto para as fundações analisadas, os comentários realizados para os volumes de concreto são válidos para os volumes de escavação.

As Tabelas 6 e 7 apresentam os valores comparativos em armadura e área de forma.

Tabela 6 – Comparação para Armadura

Armadura (kg)												
Abertura	GSE2				GS2				AD2			
	18%	20%	23%	26%	18%	20%	23%	26%	18%	20%	23%	26%
Caso -30%	815,73	822,03	849,67	862,51	732,63	732,63	776,76	776,76	1567,53	1703,15	2021,23	2303,81
Caso -15%	824,49	831,04	834,12	844,73	698,66	698,66	715,65	732,72	1599,56	1683,89	1948,71	2355,57
Caso Base	836,25	842,91	842,91	851,31	689,77	681,59	689,77	706,12	1598,55	1742,06	2044,85	2365,41
Caso +15%	835,11	848,93	860,66	863,62	663,89	663,89	679,61	687,47	1711,97	1800,24	2173,06	2437,40
Caso +30%	844,24	852,88	860,66	870,41	653,10	645,56	668,19	668,19	1768,18	1982,71	2206,10	2577,45

Tabela 7 – Comparação para Área de Forma

Área de fôrmas (m²)													
Abertura	GSE2				GS2				AD2				
	18%	20%	23%	26%	18%	20%	23%	26%	18%	20%	23%	26%	
Caso -30%	4,57	4,57	4,57	4,65	3,39	3,39	3,39	3,39	4,52	4,52	4,52	4,52	
Caso -15%	4,49	4,49	4,49	4,49	3,39	3,39	3,39	3,39	4,52	4,52	4,52	4,52	
Caso Base	4,41	4,41	4,41	4,49	3,39	3,39	3,39	3,39	4,52	4,52	4,52	4,52	
Caso +15%	4,33	4,33	4,41	4,41	3,39	3,39	3,39	3,39	4,52	4,52	4,52	4,52	
Caso +30%	4,25	4,33	4,41	4,41	3,39	3,39	3,39	3,39	4,52	4,52	4,52	4,52	

**c) Custo Estrutura:**

**Casos de Carregamento x Geometria da Estrutura**

Para cada caso de abertura dos montantes/ estais, em função de cada caso de carregamento de EDS analisado para as estruturas GSE2, GS2 e AD2, foi calculado inicialmente o custo das estruturas isoladamente, sendo alguns desses resultados apresentados, como exemplo, em forma de gráficos nas Figuras 4, 5 e 6 que são específicas para a estrutura GSE2.

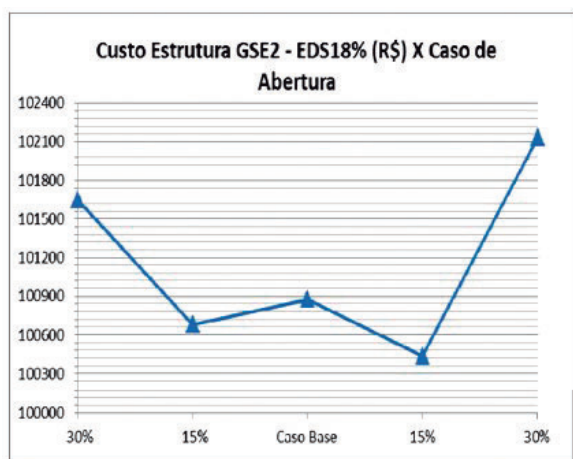


Figura 4 – Análise Custo para GSE2 – EDS 18%

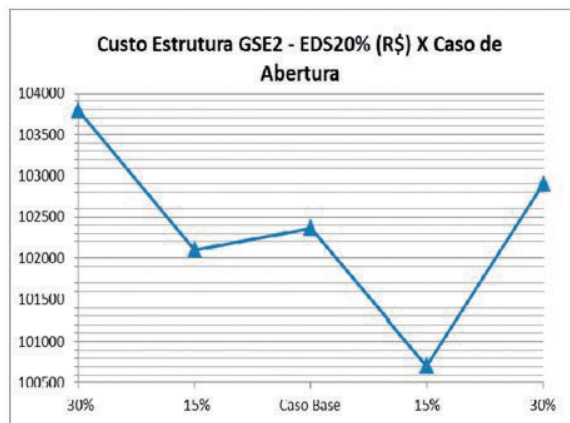


Figura 5– Análise Custo para GSE2 – EDS20%

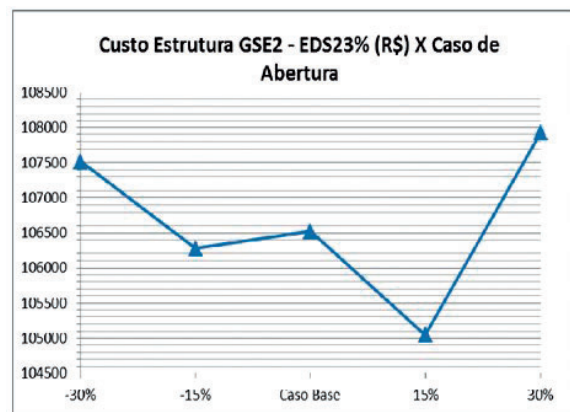


Figura 6– Análise Custo para GSE2 – EDS23%

**d) Custo Conjunto Estrutura/Fundação:**

**Casos de Carregamento x Geometria da Estrutura**

Para cada caso de abertura dos montantes/ estais, em função de cada caso de carregamento de EDS analisado para as estruturas GSE2, GS2 e AD2, foi calculado o custo do conjunto estrutura/fundação. Apresenta-se na Figura 7 um dos gráficos que representam estes resultados.



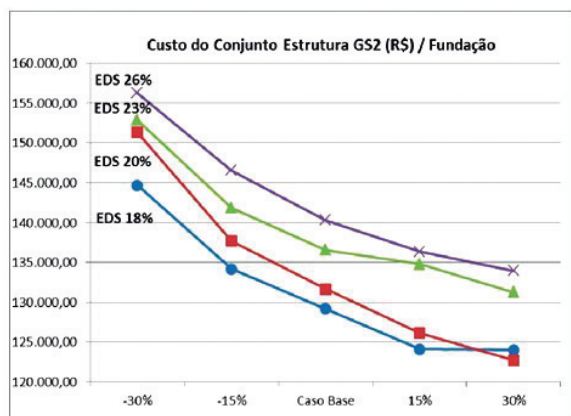


Figura 7 – Exemplo de Resultados para Estrutura GS2

### 3 SEGUNDA VERTENTE

Com relação a Segunda Vertente, o objetivo do presente artigo é apresentar de forma consolidada o impacto do custo otimizado do conjunto estrutura/fundação no custo de implantação das estruturas e, conseqüentemente, das linhas de transmissão, considerando diferentes carregamentos de EDS e diferentes morfologias de terreno para os modelos de estruturas já informados.

Foram consideradas plotações para quatro carregamentos de EDS e três morfologias de terreno, envolvendo custos do conjunto estrutura/fundação com e sem otimização.

Cumprе ressaltar que, como custo de implantação das estruturas de uma LT, foi aqui considerado o relativo a estruturas mais fundações mais isoladores mais ferragens e cabo contrapeso. Os custos relativos a cabos condutores, cabos para-raios, sistema de amortecimento e outros, não foram levados em consideração, por serem independentes da otimização do conjunto estrutura/fundação.

#### A. DADOS CONSIDERADOS NAS PLOTAÇÕES

##### A1 Morfologia do Terreno

De modo a se ter uma avaliação o mais abrangente possível da influência da otimização do conjunto estrutura/fundação no custo de implantação de uma linha de transmissão, foram analisados terrenos com as seguintes morfologias:

Perfil plano: 51 km  
ondulado: 51 km  
Perfil acidentado: 51 km

De modo a se considerar o impacto das deflexões no custo de implantação, utilizou-se, ao longo do traçado, aproximadamente uma deflexão a cada cinco quilômetros, variando as deflexões entre 2° e 45°.

##### A2 Carregamentos de EDS

Foram considerados na análise os seguintes carregamentos de EDS: 18%; 20%; 23% e 26%, da mesma forma que para o Caso Base. **Fundações**

Para cada estrutura da série e para cada carregamento de EDS, foram calculados os quantitativos

de fundação considerando os conjuntos estrutura/fundação não otimizados (Caso Base) e otimizados (Caso Otimizado).

#### A3 Outros Parâmetros

Cabo condutor: 5x CAA 636 kCM – 24/7, Rook;  
Cabo para-raios: Aço galvanizado EHS 3/8" – 7 Fios;  
Distância mínima condutor – solo: 10 metros.

#### B. CUSTO CONSIDERADO COMO DE IMPLANTAÇÃO DAS ESTRUTURAS

Com base nos pesos das estruturas, quantitativos de fundação, isoladores e ferragens e cabo contrapeso e nos custos unitários de materiais e serviços, foi calculado o custo de implantação desse conjunto, aqui denominado "custo de implantação de estrutura", para cada estrutura da série referente ao Caso Base e ao Caso Otimizado, considerando os diversos carregamentos de EDS. Os custos globais por estrutura fizeram parte dos dados de entrada do programa computacional PLS-CADD (POWER LINE SYSTEMS, 2016), que foi o utilizado na plotação das estruturas nos três perfis considerados.

#### C. RESULTADOS DAS PLOTAÇÕES

Foram elaboradas vinte e quatro plotações de estruturas em perfil, considerando:

- Três tipos de morfologia de terreno: plano, ondulado e acidentado;
- Quatro carregamentos de EDS: 18%, 20%, 23% e 26% carga de ruptura do cabo condutor e;
- Dois casos de conjunto estrutura/fundação (Caso Base e Caso Otimizado).

Na figura 8, são apresentados os custos por quilômetro para os Casos Base e Otimizado, do conjunto estrutura mais fundação, envolvendo os três tipos de terreno e os quatro carregamentos de EDS.

Ressalta-se que não foram incluídos, nesses custos, aqueles referentes a cabos condutores, cabos para-raios, amortecedores, espaçadores e outros, visto que tais custos são iguais para os dois casos e, assim sendo, na comparação se anulariam.

Ressalta-se, também, que embora esteja escrito no gráfico "Custo de Implantação das Estruturas", tal custo engloba os relativos a estruturas mais fundações mais isoladores mais ferragens e cabo contrapeso.

### 4 CONCLUSÕES

Para a análise do comportamento dos custos do conjunto estrutura/fundação em função da variação da abertura dos pontos de apoio das estruturas, foi aproximada e ajustada uma curva de tendência, de forma a simplificar e facilitar um estudo discreto com alguns pontos de controle.

Diante dos resultados encontrados em função dos diversos casos de inclinação dos estais/montantes e sob ação dos quatro casos de carregamento de EDS (18%, 20%, 23% e 26%) para as estruturas GSE2, GS2 e AD2, conclui-se:

- a) Através da análise do peso das estruturas quanto à variação de inclinação dos estais/

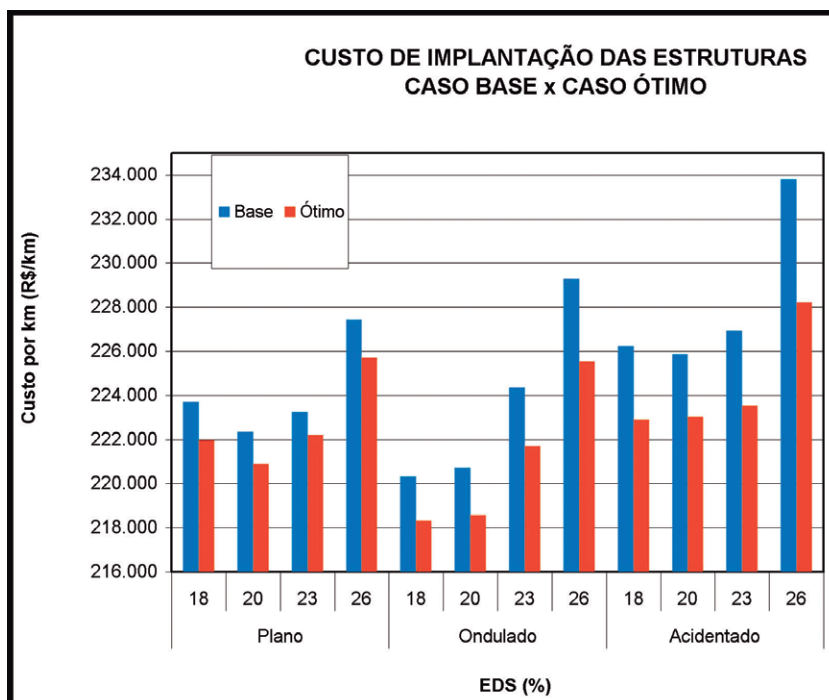


Figura 8 – Resultados

montantes em função dos vários carregamentos de EDS considerados, pode-se observar que os comportamentos dos três tipos de estruturas representativas, GSE2, GS2 e AD2, são diferentes.

- b) A estrutura GS2 apresenta um comportamento bem definido para a variação de peso da estrutura, em função da variação da abertura dos montantes para os casos de EDS. Pode-se observar que do caso de abertura -30% até o caso +30% há um decréscimo do peso da estrutura, sendo que quase há uma leve estabilização entre os casos de abertura +15% e +30%. Dessa forma, de acordo com o comportamento dos pesos das estruturas no gráfico, percebe-se que as curvas estimadas para todos os casos de EDS não permitem concluir que passam por um valor mínimo. A partir desta observação, pode-se afirmar que o ponto ótimo não está próximo da abertura dos montantes referente ao caso base.
- c) O comportamento do peso da estrutura AD2 em função da variação da abertura dos montantes apresenta-se de forma bem definida e completa, demonstrando-se quase que do mesmo modo para todos os casos de EDS e transparecendo um ponto mínimo de peso da estrutura bem caracterizado nas curvas estimadas em torno do caso base. Observa-se nos gráficos que do caso -30% até o caso base há um decréscimo do peso da estrutura, enquanto que do caso base até o caso +30% ocorre um comportamento contrário.
- d) Para o mastro da estrutura estaiada GSE2, houve uma tendência, em todos os casos de EDS, de o peso da estrutura decrescer entre os casos -30% e -15%, estabilizar entre os casos -15% e 15%, e crescer entre os casos +15% e +30%. Observa-se que os valores mínimos de peso do mastro para os diversos casos de carregamento situam-se em

torno do caso base. Já para os estais da estrutura esse comportamento do peso é mais definido, sendo possível observar um crescimento constante do caso -30% até o caso base. A partir do caso base há uma mudança na bitola do estai para todos os casos de carregamento até o caso de abertura +15%, resultando, portanto, em uma redução no peso dos estais. A partir do caso +15% até o caso +30%, em virtude da mudança da bitola do estai do caso de EDS 18%, existe uma tendência de estabilização, enquanto que para os demais casos de EDS apresentam novamente um crescimento constante do peso dos estais em função do aumento do seu comprimento real.

e) Os volumes de concreto para as fundações em tubulão com base alargada para as estruturas autoportantes GS2 e AD2 apresentaram um crescimento na medida em que a abertura dos montantes foram reduzidas, ou seja,

quanto menor o ângulo real dos montantes com a vertical. Contudo, para as estruturas estaiadas GSE2, esse comportamento não ocorreu. Como já foi mencionado, as fundações das estruturas estaiadas GSE2 são compostas por uma sapata para o mastro central e quatro tubulões sem base alargada para os estais. Com a abertura dos estais, esses dois tipos de fundações responderam de formas diferentes frente às reações neles. Enquanto as sapatas apresentaram uma diminuição do volume de concreto com o aumento da abertura dos estais devido a redução das reações de compressão no mastro central, os tubulões dos estais, por sua vez, apresentaram um aumento do volume, devido principalmente ao acréscimo das reações horizontais. Desse modo, ao combinar ambos, observou-se que, apesar de próximos, os valores dos quantitativos de concreto apresentaram uma pequena oscilação, não demonstrando um comportamento bem definido.

- f) Observa-se que, para as estruturas estaiadas GSE2, há uma tendência no aumento do peso da armadura das fundações na medida em que a abertura dos estais também aumenta. Isto também é válido para a estrutura em ancoragem AD2, onde o aumento da abertura dos montantes resulta num aumento do peso de armadura da fundação em tubulão. Isto pode ser explicado pelo aumento significativo das reações horizontais no topo das fundações para estas estruturas. Em contrapartida, nas estruturas autoportantes em suspensão GS2, o peso de aço da fundação variou de forma inversa ao das estruturas GSE2 e AD2, ou seja, na medida em que se aumentou a abertura dos montantes, os quantitativos de armaduras diminuí.
- g) Para as fundações em tubulão com base alargada para estruturas autoportantes GS2 e AD2, os quantitativos de fôrmas permaneceram constante

- em função da abertura dos montantes, devido a elas somente serem necessárias no afloramento da fundação. Já para as estruturas estaiadas GSE2, houve uma pequena variação na área de fôrmas, devido a fundação em sapata para o mastro, que teve seus valores reduzidos na medida em que se aumentou a abertura dos estais.
- h) Para a estrutura tipo GSE2, observou-se que o caso de abertura dos estais que resulta no menor custo do conjunto estrutura/fundação foi de +15% em relação ao caso base. Entretanto, a diferença do custo final em relação ao caso base não foi significativo. Já para a estrutura autoportante em suspensão GS2, verificou-se que, de acordo com o comportamento dos gráficos resultantes, o caso ótimo se situa próximo à abertura de +30%, demonstrando que o caso base de abertura dos montantes foi escolhido de forma inadequada. A redução no custo final pode chegar a aproximadamente R\$ 5.000,00 por estrutura. Diferentemente das estruturas anteriores citadas, a estrutura AD2 apresentou nos seus resultados que o caso base é o próprio caso de abertura dos montantes que resulta no menor custo estrutura/fundação;
- j) A análise conjunta dos itens estrutura/fundação permitiu identificar que o caso de abertura ótimo para os estais da estrutura GSE2 deveria ser de +15% em relação ao caso base. Caso fosse avaliado somente o peso da estrutura, formada pelo mastro central e os quatro estais, o resultado seria outro, sendo possivelmente adotado o próprio caso base. Por outro lado, para as estruturas autoportantes GS2 e AD2, os gráficos resultantes do custo final estrutura/fundação seguiram a mesma tendência dos gráficos gerados a partir do peso das estruturas. Através de uma análise mais detalhada, observou-se que o custo dos materiais e serviços da estrutura resultou em aproximadamente 70% do custo total do conjunto estrutura/fundação. Entretanto, observa-se que essa proporção é diretamente influenciada pelas características geológico/geotécnicas adotadas para o solo típico adotado, bem como o tipo de fundação. Caso fosse adotado um solo com características geotécnicas inferiores ao solo argiloso rijo adotado neste estudo, o custo da fundação resultaria bem mais significativo em relação ao custo final do conjunto estrutura/fundação, podendo inclusive influenciar na escolha dos casos ótimos;
- k) Para as estruturas GS2, as curvas plotadas a partir dos custos estrutura/fundação para os cinco casos de abertura dos montantes sob ação das reações de apoios apresentaram uma mesma tendência, ou seja, uma redução dos custos finais a medida que a abertura dos montantes aumenta. A partir desse comportamento das curvas, pode-se inferir que o caso ótimo está próximo ao caso de abertura +30% em relação ao caso base, inclusive com uma abertura dos montantes ainda maior em relação ao caso base. Adotando a abertura de +30% como o caso ótimo para fins de avaliação dos custos finais em relação ao caso base estudado, chega-se a uma

economia média de aproximadamente R\$ 5.000,00 por estrutura.

- l) Assim como ocorrido para as estruturas GSE2 e GS2, o comportamento dos gráficos com o custo total da estrutura e fundação foi semelhante para os diversos casos de carregamento de EDS em função da abertura dos montantes da estrutura AD2. Salienta-se que o menor custo do conjunto estrutura/fundação ocorreu para o caso base, ressaltando que para aberturas dos montantes inferiores ou superiores ao caso base resultam em custos finais maiores.

Conclui-se, portanto, que é recomendável em termos econômicos, que se analisem, nos projetos de linhas de transmissão, os conjuntos de estrutura/fundação, variando-se o ângulo de inclinação dos montantes/estais.

- m) O custo de implantação das estruturas (o relativo a estruturas mais fundações mais isoladores mais ferragens e cabo contrapeso) do Caso Otimizado apresentou uma redução entre 0,5% e 2,4% em relação ao do Caso Base, ressaltando-se que, nesses custos, não estão incluídos os custos referentes a cabos condutores e para-raios, espaçadores e amortecedores e outros:

O fato de as reduções de custo encontradas não serem mais significativas se devem ao seguinte:

- n) Os conjuntos estrutura/fundação do Caso Base já se apresentavam razoavelmente otimizados, principalmente para os grupos de estruturas estaiadas e autoportantes em ancoragem que compõem a série de estruturas da LT;
- o) Foi adotado para o projeto das fundações um terreno com solo tipo I, com características geotécnicas de um solo competente, resultando em um menor impacto no custo total do conjunto estrutura/fundação.

Com base no exposto, ressalta-se que os estudos de otimização de estruturas de linhas de transmissão devem ser conduzidos levando-se em consideração, além do peso das estruturas, o impacto do custo da fundação, realizando assim uma análise conjunta estrutura/fundação.

## REFERÊNCIAS

AMONFILHO, J. et al.. Otimização de Linha de Transmissão não Convencional de Alta Capacidade em 500 kv. **Proceedings of 13th Encontro Regional Ibero Americano de Cigre**, artigo B2-23, 2009.

BERYOZKINA, S. et al. The Stochastic approach for conductor selection in transmission line development projects. **Proceedings of 2014 IEEE International Energy Conference**, 2014, pp. 557-564.

CARRINGTON, R. J. New Technologies for Transmission Line Up rating. **Proceedings of IEEE 8th International Conference on**

**Transmission, Distribution, Construction, Operation and Live-Line Maintenance**, 1998, p.311-318.

CASTRO, R. D. Overview of the transmission line design process. **Electric Power Systems Research**, v. 35, 1995, pp. 109-118.

CHUNMING, W. et al. Research on the Optimal Layout of High-Strength Steel in the Transmission Line. **Physics Procedia**, v. 33, 2012, pp. 619-625.

FRENCH, S. et al. EPRI-GTC Tailored Collaboration Project: A Standardized Methodology for Siting Overhead Electric Transmission Lines. **Proceedings of 8 th International Symposium Environment Concerns in Rights-of-Way Management**, 2008, pp. 221-235.

ISTARDI, D. et al. Understanding power system voltage collapse using ARISTO: effects of protection. **Proceedings of 2009 IEEE Bucharest Power Tech**, 2009, p. 1-7.

KARAMPELAS, P et al. LPAT: An Interactive simulation tool for assessing the lightning performance of Hellenic high voltage transmission lines. **Applied Soft Computing**, v.11, 2011 pp. 1380-1387.

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

HAWKINS, D et. al. An Environmental Strategic Siting Study and Public Process for a 500kV Transmission Line Project in the Desert Southwest. **Proceedings of 8th International**

**Symposium Environment Concerns in Rights-of-Way Management**, 2008, pp. 211-219

LI, Q.; JUNJIAN, Y; WEI, L. Random Wind-induced Response Analysis of Transmission Tower- Line System. **Energy Procedia**, v. 16, 2012, pp. 1813-1821.

PENG, G. et al. Study on Cost Forecast Method of Power Projects Based on Data Mining Technology. **Proceedings of 4th International Conference on Wireless Communication, Networking and Mobile Computing**, 2008, p. 1-5.

POWER LINE SYSTEMS: **Computer Aided Design and Drafting**, version 2015. Madison: Power Line Systems, Inc., 2016. Conjunto de programas. 1 Arquivo Digital.

RIGUEIRA, A. S. et al. Estudo do Comportamento Dinâmico dos Feixes Expandidos submetidos a Carregamentos Mecânicos Elevados. **Relatório Eletrobrás/Furnas**. [P&D ciclo 2003/2004], 2004.

TUMMALA, V. M. R. ;BURCHETT, J. F. Applying a Risk Management Process (RMP) to manage cost risk for an EHV transmission line project. **International Journal of Project Management**, v.17, n. 4, 1999, pp. 223-235.

WHITE, H. B. Guyed structures for transmission lines. **Engineering Structures**, v. 15, n. 4, 1993, pp. 289-302.

XIAO-YAN, H.; XIAN-LONG, L. Automatic Design of Transmission Lines Using Object ARX Technology. **Proceedings of 2012 International Conference on Control Engineering and Communication Technology (ICCECT)**, 2012, p. 581-585.