



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

BR/GLT/15
13 a 16 de Outubro de 2013
Brasília - DF

GRUPO – III

GRUPO DE ESTUDO DE LINHAS DE TRANSMISSÃO – GLT

AValiação Técnica e Econômica na Otimização da Plotação de Torres em Projetos de Novas LTS via Diagrama de Interação Versus Gráficos de Aplicação (Método Simplificado)

**Luiz Seiti Hatashita(*) Marcio Tonetti
COPEL GERAÇÃO E TRANSMISSÃO S.A**

**Felippe L.R. Casagrande
COPEL DISTRIBUIÇÃO S.A**

RESUMO

Este trabalho tem como objetivo apresentar projetos de LTs com otimização automática da plotação de torres com o uso do Método 2, tais como a LT 138 kV Pato Branco – Chopinzinho (circuito simples) e a LT 138 kV Bateias – Almirante Tamandaré (circuito duplo) onde estes serão comparados com o projeto destas mesmas LTs obtidos pelo Método 1. Comparar os quantitativos obtidos (nº de estruturas, peso total das torres da LT), mostrar os gráficos de aplicação existentes das torres no M1, diagramas de interação para o M2 e a vantagem econômica obtida através do M2.

PALAVRAS-CHAVE

Projeto de LTs, Otimização, Método 1, Método 2, Comparação econômica M1 versus M2

1.0 - INTRODUÇÃO

Em função da crescente necessidade de maximização dos recursos econômicos, a COPEL implantou o Método 2 (Método do Diagrama de Interação) quando da plotação otimizada (optimum spotting) de torres em projetos de novas LTs, pois pode-se obter vantagens econômicas quando comparadas com o Método 1 (Método simplificado).

Tanto o Método 1 como o 2 descrevem a resistência das estruturas (torres). O Método 1 é a forma mais simplificada onde a resistência da estrutura é descrita apenas por um par ordenado (vão médio, vão gravante) e teve como sua origem ainda quando os projetos das LTs eram obtidos manualmente. A concessionária define os requisitos básicos de projeto das torres para cada tipo de estrutura (suspensão, ancoragem, vão médio, vão gravante, etc.) e através destas premissas são elaboradas árvores de carregamento, onde serão projetadas as torres.

O Método 2 é uma forma mais completa de descrição da resistência da estrutura, onde são determinados não só um único par ordenado de vão médio e vão gravante, mas sim por um conjunto de pares ordenados, os quais são balizados por hipóteses de carregamento mais representativas no projeto da estrutura.

Para a viabilização da plotação otimizada via Método 2 é necessário a obtenção Diagramas de Interação das séries de torres a serem utilizadas em projetos de novas LTs.

2.0 - OBTENÇÃO DOS DIAGRAMAS DE INTERAÇÃO DAS SÉRIES DE TORRES

Foram obtidos Diagramas de Interação para todos os tipos de torres que compõe a série. As séries mais utilizadas nas LTs 138 kV da Copel são as séries “S” circuito simples e “D” circuito duplo. Estas séries existentes foram

(*) R. José Izidoro Biazetto, 158 - Bloco A – CEP 81.200-240 Curitiba, Paraná, – Brasil
Tel: (+55 41) 3331-2674 – Fax: (+55 41) 3331-3959 – Email: luiz.seiti@copel.com

projetadas na década de 80 de acordo com as recomendações da norma NBR 5422 e as mesmas foram modeladas no software Tower.

2.1. Modelagem das Torres no software Tower

A Modelagem de todos os tipos de Torres no *software* Tower (desenvolvido por Powerline Systems Inc.) da série "S" e "D" para fins de Cálculo Estrutural deverá ser completo, incluindo a correta especificação dos nós, cantoneiras, parafusos, estais, ligas de aço utilizadas, valores limites, etc. Esta modelagem é elaborada para todas as alturas previstas no projeto original da torre. Na Tabela 1 a seguir são apresentadas as quantidades de modelagens por tipo de torre.

Tabela 1 – Quantidade de Modelagens por Tipo de Torre de cada Série

Série S		Série D	
tipo	quantidade	tipo	quantidade
S1	18	D1	24
S2	18	D2	24
S3	20	D3	48
S4	40	D4	28
SA	36	D5	20
FA	32	D6	40

2.2 Obtenção da Modelagem das Torres com Diagrama de Interação

Com o *software* Tower é possível obter Diagramas de Interação para os diversos tipos de torres, o qual representa o Método 2 – M2, considerando-se hipóteses de carregamento atualizadas. Para cada hipótese de carregamento e cada tipo de torre devem ser especificados os dados constantes na Tabela 2 (caso típico para uma estrutura de circuito duplo com um cabo pára-raios) mostrada logo a seguir. Com estas informações, o Diagrama de Interação será determinado considerando-se todas as hipóteses simultaneamente.

As hipóteses de carregamento mínimas consideradas para determinação dos Diagramas de Interação para cada tipo de torre são discriminadas abaixo:

Vento Extremo a 90°, 75°, 60° e 45°; Ruptura de para raio sem vento; Ruptura de 1 condutor individualmente (torre suspensão) sem vento; Ruptura de todos os cabos (torre de ancoragem) sem vento; Manutenção no para raios; Manutenção nos condutores.

Tabela 2 – Dados do Arquivo com Extensão "LIC"

Load Point	Vert. Load Unit Length	Wind Load Unit Length	Back Span Cab.Tension	Ahead Span Cab.Tension	Constant Vert. Load	Constant Wind Load
	N/m	N/m	N	N	N	N
PR	7,7346	15,5100	30375	30375		
ESQ SUP	15,3303	24,3686	47955	47955	471	465
ESQ CEN	15,3303	24,3686	47955	47955	471	465
ESQ INF	15,3303	24,3686	47955	47955	471	465
DIR SUP	15,3303	24,3686	47955	47955	471	465
DIR CEN	15,3303	24,3686	47955	47955	471	465
DIR INF	15,3303	24,3686	47955	47955	471	465
Wind Pressure (N/m ²) =		550				

Os dados da tabela são relacionados abaixo:

Load Point – ponto de aplicação da carga; PR – Carga aplicada no pára-raios; ESQ SUP – Condutor esquerdo superior; ESQ CEN – Condutor central; ESQ INF – Condutor inferior; DIR – Condutores à direita

Vert. Load – Carga vertical por unidade de comprimento nos cabos;

Wind Load – Carga transversal por unidade de comprimento devido ao vento nos cabos;

Back Span – Tração longitudinal no Vão a ré dos condutores e pára-raios;

Ahead Span – Tração longitudinal no Vão a vante dos condutores e pára-raios;

Constant Vert. Load – Carga vertical constante devido ao peso da cadeia de isoladores;

Constant Wind Load – Carga transversal devido a pressão de vento nas cadeias de isoladores;

Wind Pressure – Pressão de Vento (IEC 60826) de 10 minutos a 10m de altura.

Os dados da Tabela 2, para cada hipótese e tipo de estrutura, são obtidos através de algoritmo desenvolvido pela Copel, que é executado numa fase de pré-processamento, desenvolvido em outra plataforma computacional. Este algoritmo atualiza os dados da Tabela 2 de forma automática, quando se faz uma modificação das premissas de cálculo, tais como: alteração do tipo de rugosidade do terreno, velocidade básica do vento, temperatura mínima e máxima, tração EDS, tipo do condutor e pára-raios. Quando estas alterações afetam a tração longitudinal dos cabos, a equação de mudança de estado é recalculada, a fim de se obter as novas trações.

Após a obtenção do arquivo tipo “LIC” com todas as hipóteses consideradas, pode-se executar o Tower com a estrutura em estudo considerando a opção *Create a Method 2 File for PLS-cadd* (Figura 1) obtendo-se assim o arquivo a ser utilizado no PLS-cadd com o respectivo Diagrama de Interação. Este arquivo possibilitará a locação automática (*Optimum Spotting*) e também fará a interface *PLS-cadd* e *Tower*, permitindo a verificação estrutural via *PLS-cadd* com o carregamento mecânico real em cada situação específica de projeto.

As séries de torres “S” e “D” foram projetadas com critérios da NBR 5422 há quase 30 anos atrás. Durante a re-avaliação estrutural destas torres para obtenção dos Diagramas de Interação, considerando-se critérios atuais de projeto, teve como consequência a necessidade de reforços estruturais, afim de que se obtivesse aplicações das torres compatíveis com os dos projetos originais.

A seguir se apresentarão os reforços que foram implementados nas séries de torres.

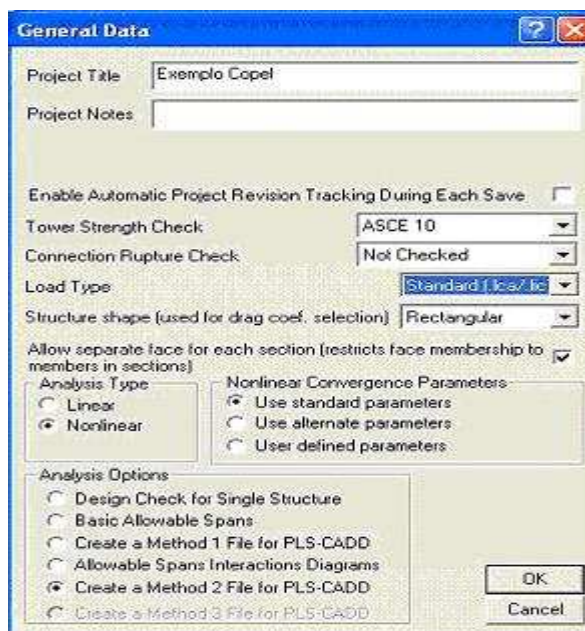


Figura 1 – Menu do Tower para escolha da opção de Análise

2.3 Reforços estruturais nas série de torres “S” e “D”

Na verificação estrutural procurou-se manter as características originais de projeto, porém os carregamentos foram atualizados para critérios atuais. Nos projetos atuais tem-se adotado a IEC 60826 e também foram utilizados mapeamentos de vento atualizados pelo SIMEPAR (Sistema Meteorológico do Paraná). Em função destas adequações foram necessários alguns reforços nas torres, porém reforços de pequena monta que não inviabilizaram as séries de torres. A seguir serão expostos um resumo dos reforços por tipo de torre:

Tabela 3 – Reforços Estruturais Torres Série Circuito Simples

Torre S1		Torre S2	
Reforço Adotado	Posições	Reforço Adotado	Posições
Substituição perfil L 44 x 3,2 por L 44 x 4,8	148,149, 150,151 pontos pé 9.0 m	Substituição perfil L 44 x 3,2 por L 51 x 4,8	332,333, 334,335 pontos pé 9.0 m
Substituição perfil L 51 x 3,2 por L 51 x 4,8	122 e 123 extensão 6.0 m	Substituição perfil L 50 x 4,0 por L 50 x 5,0	122 e 123 extensão 6.0 m

Torre SA		Torre FA	
Reforço Adotado	Peça	Reforço Adotado	Peça
Substituição perfil L 38 x 3,2 por L 44 x 3,2	94,95,96,123,124,98 parte superior comum	Substituição perfil L 64 x 4,8H por L 64 x 6,4H	408,409,400,401 torre básica

Tabela 4 – Reforços Estruturais Torres Série Circuito Duplo

Torre D1		Torre D2	
Reforço Adotado	Posições	Reforço Adotado	Posições
Substituição perfil L 44 x 3,2 por L 50 x 4,0	167 e 168 extensão 4.0 m	Substituição perfil L 38 x 3,2 por L 50 x 4,0	136 extensão 4.0 m

Torre D3		Torre D4	
Reforço Adotado	Peça	Reforço Adotado	Peça

Substituição perfil L 45 x 4,0 por L 51 x 4,8	185 extensão 8.0 m	Substituição parafusos de ½" por 5/8"	32H torre básica
Inserção de barras de contraventamento	139 torre básica	Substituição perfil L 38 x 3,2 por L 44 x 3,2	18H e 19H atrás torre básica

2.4 Arquivos para o Método 2 para uso no PLS-CADD

Com as modelagens das torres devidamente reforçadas conforme mostrado nas tabelas 3 e 4 e as hipóteses de carregamento inseridas no software *Tower*, obteve-se os arquivos das torres com diagrama de interação para todas combinações de alturas por tipo de torre, o qual representa o M2. De posse destes arquivos, os mesmos são carregados no PLS-CADD e a otimização automática é executada normalmente como é feita no M1. Para efeito de ilustração serão apresentados a seguir figuras contrastando o gráfico de aplicação do Método 1 versus o Diagrama de Interação do Método 2.

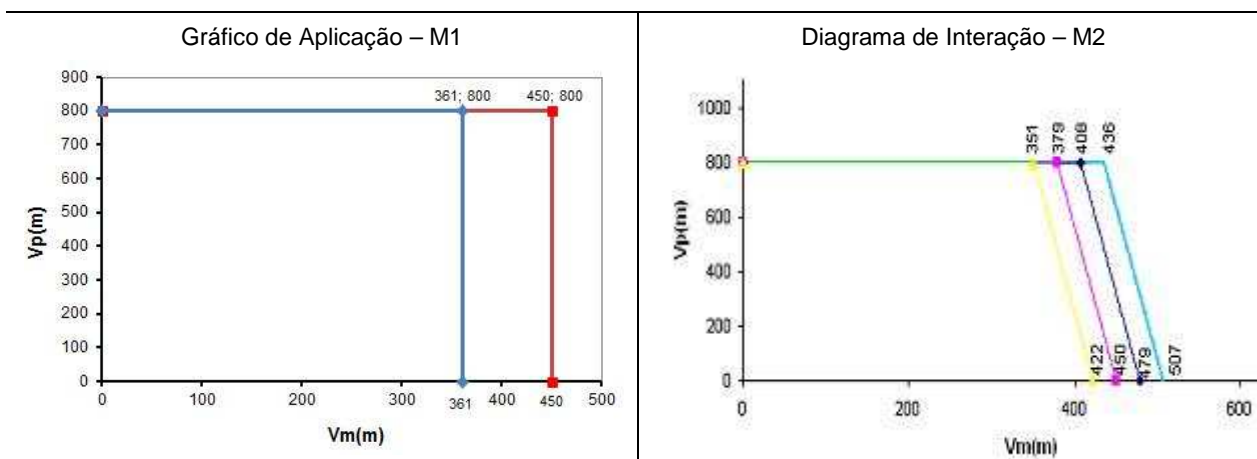


Figura 2 - Gráfico de Aplicação x Diagrama de Interação - Torre S1 – 138 kV Circuito Simples – Suspensão até 3º

Gráfico de Aplicação – M1

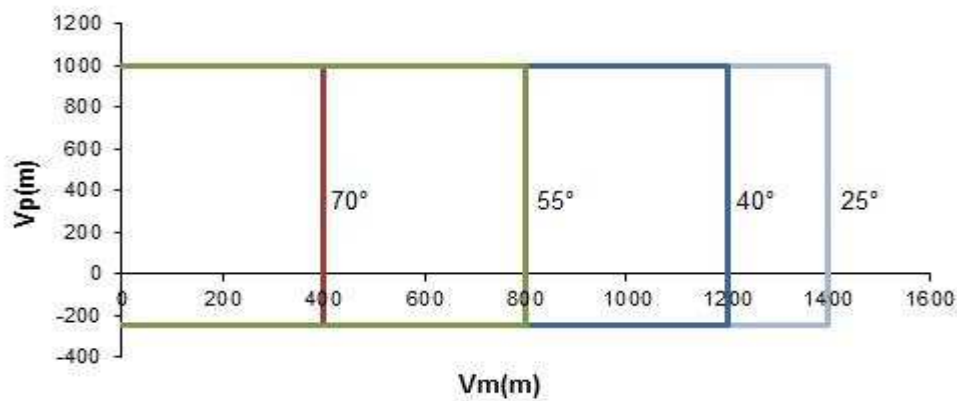


Diagrama de Interação – M2

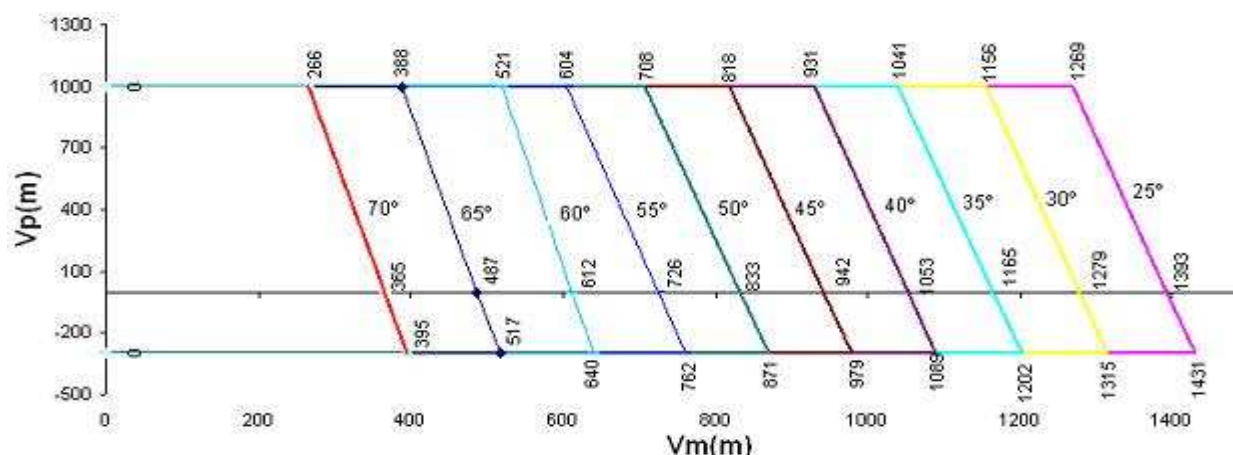


Figura 3 – Gráfico de Aplicação versus Diagrama de Interação - Torre FA – 138 kV Circuito Simples – Ancoragem

Observa-se que tanto na Figura 2 como na 3 que o gráfico de aplicação do M1, o vão médio permanece constante com a variação do vão de peso em alinhamento ou com deflexão máxima permitida para a torre. Por outro lado, o Diagrama de Interação do M2, o vão médio aumenta com a redução do vão gravante. Isto eleva as possibilidades na hora da otimização da plotação das torres no projeto da LT.

3.0 - PROJETO DE LTS COM PLOTAÇÃO OTIMIZADAS DAS ESTRUTURAS PELO MÉTODO 2 (M2)

3.1 Projeto da LT 138 kV Pato Branco – Chopinzinho (Circuito Simples)

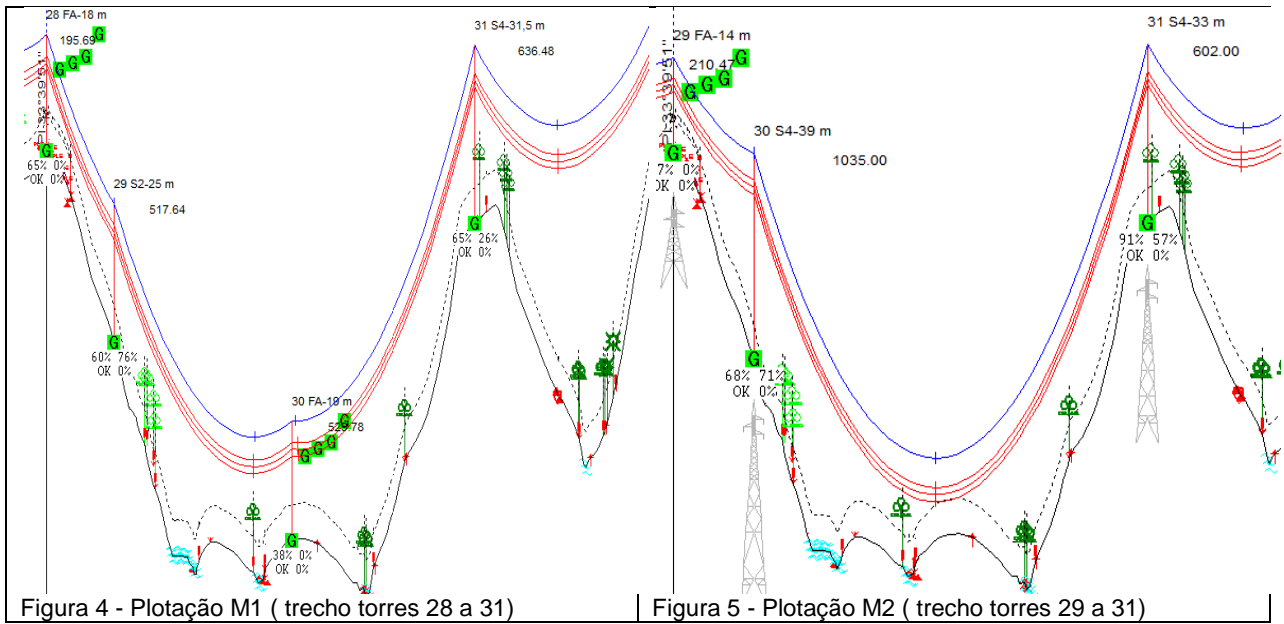
A plotação da LT foi executada de acordo com dois métodos denominados M1 e M2. Em ambos os casos a série de estruturas utilizada foi a série “S” constituída por estruturas metálicas em suspensão e ancoragem, circuito simples e autoportantes. Segue abaixo a tabela resumo da quantidade e peso por tipos de torres obtidas utilizando ambos os métodos:

Tabela 5 – Resultado Plotação Otimizada M1 versus M2

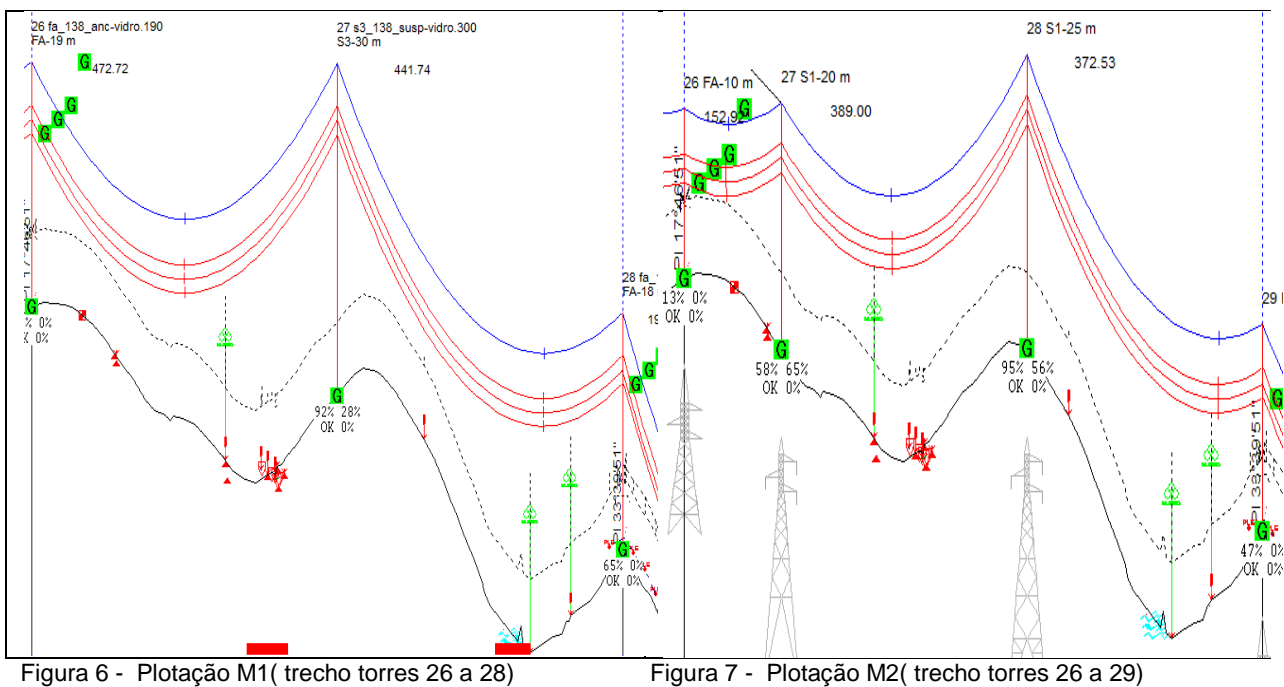
Tipos	Metodo 1		Metodo 2		Diferença M1-M2 (kg)
	Nº de Torres	Peso (kg)	Nº de Torres	Peso (kg)	
cf	2	13396	1	6698	6698
fa	19	85965	17	70460	15505
s1	28	69664	47	109281	-39617
s2	23	70835	14	42114	28721
s3	9	43726	8	41680	2046
s4	5	32205	7	44510	-12318
sa	12	46747	10	37825	8922
Total	98	362538	104	352568	9970

Observa-se que apesar do número de estruturas do M2 ter sido superior em 6 estruturas, porém o peso total foi inferior a 2.83 % com relação a M1.

Considerando toda a LT, mesmo que o M2 tenha plotado mais estruturas que o M1, em alguns tramos da LT o M2 reduziu o número de estruturas criando vãos maiores possibilitando uma maior otimização no carregamento das estruturas, conforme figuras a seguir:



Percebe-se nas figuras acima, que o M2 possibilitou a utilização de vãos maiores, retirando uma estrutura de ancoragem no meio do vão e também a estrutura 31 (s4) passou de 65% de utilização no M1 para 91% no M2. Outra vantagem obtida com o Método 2, foi a plotação de estruturas mais leves ao longo de alguns trechos da LT, mesmo com o aumento da quantidade de estruturas. Podemos comparar nas Figuras 6 e 7 abaixo que enquanto o M1 coloca estruturas mais reforçadas e com mais altura, o M2 aumenta o número de estruturas, porém, com menores alturas e conseqüentemente mais leves.



No M1 o tramo é composto de 3 torres sendo 2 ancoragens fa e uma suspensão s3 de 30 m (Figura 6). No M2 é composto por 2 fa e 2 suspensões (1 s1 de 20 m e 1 s1 de 25 m) conforme Figura 7.

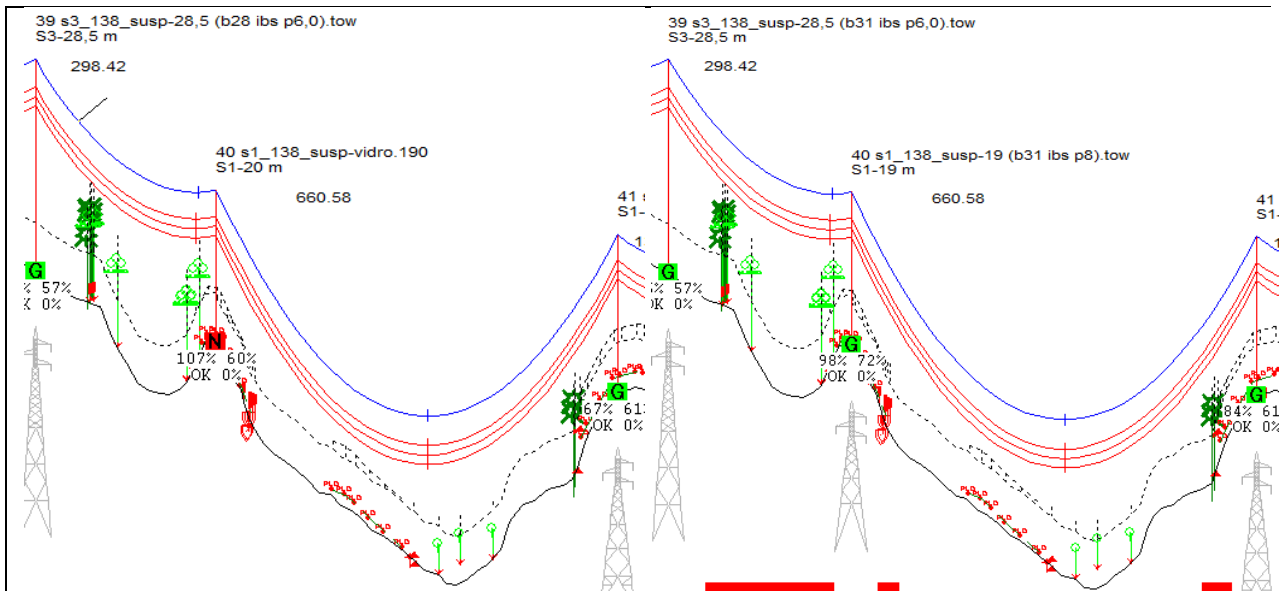


Figura 8 - Plotação M1(trecho torres 39 a 41)

Figura 9 - Plotação M2(trechos torres 39 a 41)

Na Figura 9 a torre S1 plotada via M2 esta com uma utilização de 98%. Se a mesma torre fosse plotada via M1 ficaria com utilização de 107%, ou seja, não seria possível sua aplicação neste ponto. Isto se deve, pois a torre S1 apresenta vão médio $vm = 480$ e vão de peso $vg = 285$ m para condição de vento extremo neste ponto. A condição de aplicação da S1 no M1 é de $vm = 450$ e $vg = 800$ m e para o M2, $vm = 490$ e $vg = 285$ m, conforme se vê na Figura 2. Deste modo o M2 possibilita maiores situações de utilização da torre.

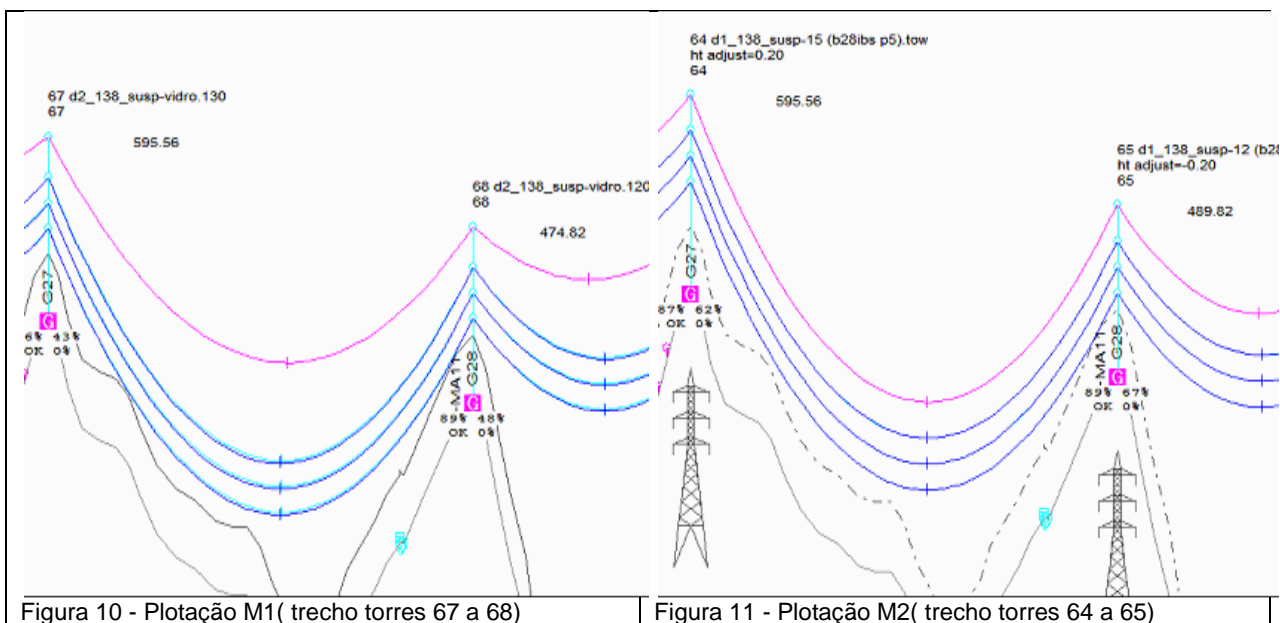
3.2 Projeto da LT 138 kV Bateias - Almirante Tamandaré (Circuito Duplo)

Assim como feito na LT circuito simples, a LT 138 kV Bateias – Almirante Tamandaré (Circuito Duplo) foi plotada em ambos os métodos M1 e M2. Segue abaixo a tabela resumo da quantidade e peso por tipos de torres obtidas utilizando ambos os métodos:

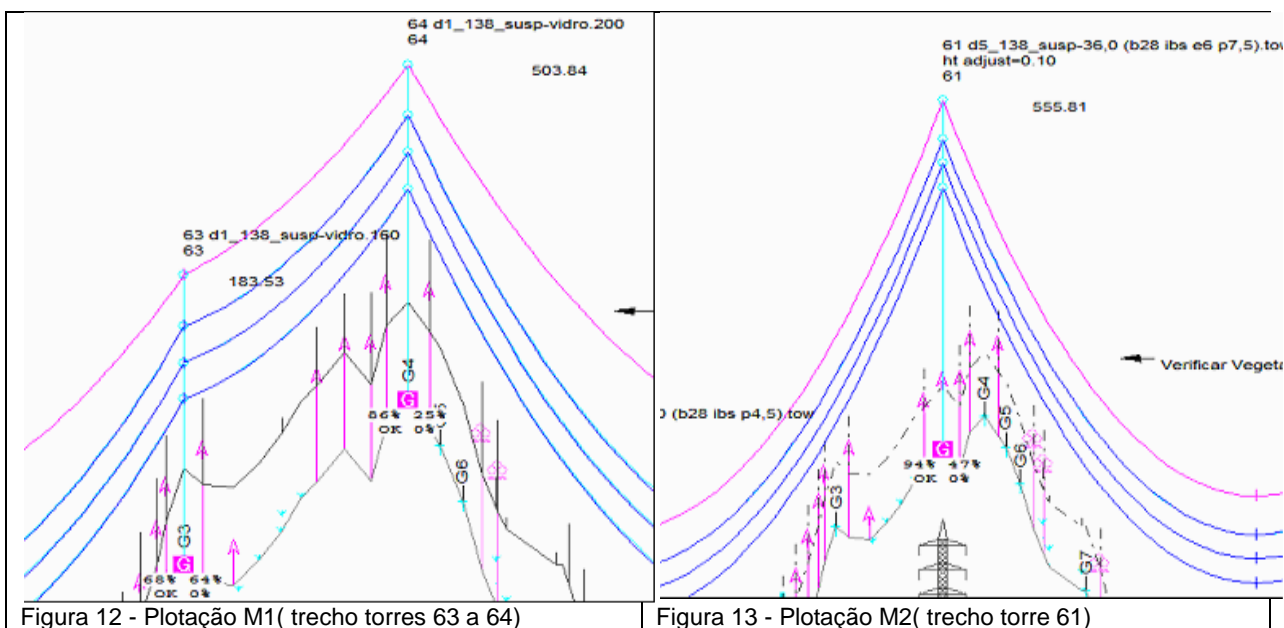
Tabela 6 – Resultado Plotação Otimizada M1 versus M2

Tipos	Metodo 1		Metodo 2		Diferença M1-M2 (kg)
	Nº de Torres	Peso (kg)	Nº de Torres	Peso (kg)	
cr	2	18000	3	28752	-10752
d1	31	106122	31	109410	-3288
d2	5	18421	2	6930	11491
d3	6	30507	5	26818	3689
d4	22	139396	20	126772	12624
d5	16	78435	17	84923	-6488
d6	3	26860	3	23663	3197
Total	85	417741	81	407268	10473

Na comparação entre os dois métodos de plotação de estruturas (M1 e M2), observa-se que no primeiro caso houve a utilização de maior número de estruturas e, conseqüentemente, maior valor em peso total para as mesmas, representando em uma diferença de 2.57% a mais em peso do M1 em relação ao M2. Para o método 1 obteve-se 85 estruturas na totalidade, quatro estruturas a mais que no método 2, que apresentou 81 estruturas.



Nas figuras acima, nota-se que no M2 (Figura 11) utilizou-se a aplicação de duas estruturas “d1” (torres 64 e 65) em substituição a duas estruturas “d2” (torres 67 e 68) aplicadas pelo M1 (Figura 10). Isto contribui para a redução do peso total das estruturas, uma vez que as estruturas “d1” nas alturas de 15 e 12 metros (5,139 toneladas), são mais leves que as estruturas “d2” nas alturas de 13 e 12 metros (5,405 toneladas)



Nas figuras acima onde no M1 foram utilizadas duas estruturas tipo “d1” e, no M2 na mesma região do perfil, estas duas estruturas foram substituídas por uma torre tipo “d5”, acarretando também em uma redução no peso total em torres da LT.

4.0 - CONCLUSÃO

- O método 2 (M2) se mostrou mais econômico com relação ao M1 nos projetos analisados. Na LT 138 kV Pato Branco – Chopinzinho (Circuito Simples) uma redução de peso total da LT de 2.82% e na LT 138 kV Bateias – Almirante Tamandaré (Circuito Duplo) uma redução de peso de 2.57%;
- A redução de peso do M2 em relação ao M1, justifica-se pelas soluções de otimização diferenciadas utilizadas por ambos os métodos. O M2 em certas situações proporcionou em redução do número de torres em um mesmo tramo da LT. Isto se deve, pois o Diagrama de Interação proporciona uma maior flexibilidade

de aplicação da torre em função das diversas combinações de vão médio e vão de peso quando comparadas com o M1;

- A obtenção dos Diagramas de Interação para as séries de torres “S” e “D”, os quais foram projetadas segundo a NBR 5422 de 1985, acarretou em reforços de pequena monta, pois foram utilizados critérios atuais de projeto, tais como da norma IEC 60286;
- A obtenção dos diagramas de interação para série de torres existentes, tais como “S” e “D” é viável utilizando o recurso computacional disponível do software Tower, porém recomenda-se a aplicação do recurso para torres que foram projetadas a partir da norma NBR 5422, pois quando re-avaliadas estruturalmente por critérios atuais, os reforços necessários se mostraram poucos.

5.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) INTERNATIONAL STANDARD. Design criteria of overhead transmission lines .IEC 60826.
- (2) HATASHITA, L.H. Padronização das Hipóteses de Carregamento das Estruturas Metálicas da Copel. COPEL Nº34310-001.
- (3) Mapeamento de Isótopas – Simepar
- (4) ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Projeto de Linhas Aéreas de Transmissão de Energia Elétrica - NBR 5422/1985. Brasil.

6.0 - DADOS BIOGRÁFICOS



Nome: Luiz Seiti Hatashita

Local e ano de nascimento: Pompéia/SP – 1963

Graduação:

Engenharia Elétrica – 1985 - Centro Federal de Educação Tecnológica do Paraná.

Engenharia Mecânica – 2004 – Centro Federal de Educação Tecnológica do Paraná.

Pós Graduação:

Especialização em Gestão Técnica de Concessionária de Energia Elétrica – 1998 – Universidade Federal do Paraná

Mestrado em Engenharia Mecânica – 2007 – Pontifícia Universidade Católica do Paraná.

Experiência Profissional:

Trabalha a 28 anos na Copel (área de planejamento, medição de energia, estudos eletromecânicos de lts).

Publicações:

2011:

XXI Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica – “Metodologia para Ensaio de Caracterização e Fadiga em Amortecedor Stockbridge” – Florianópolis – Sc.

2010:

IEEE 2010 PES Transmission and Distribution – “Combined Use of PLS-CADD and TOWER Softwares for Transmission Line Design - The Experience and Methodology of COPEL for Tower Analysis” – New Orleans, EUA;

2009:

XIII Encuentro Regional Iberoamericano de Cigré – “Uso Conjugado dos Softwares Pls-Cadd e Tower em Projetos

de Linhas de Transmissão - Experiência e Metodologia da Copel na Avaliação Estrutural de Torres” - Puerto Iguazú, Argentina;

XXIX Congresso Ibero Latino Americano de Métodos Computacionais em Engenharia, “Análise de Confiabilidade de Torres Metálicas quando Sujeitas a Ventos Fortes via Método Analítico FORM.” - Maceió – Al.

XX Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica- “Uso Conjugado dos Softwares Pls-Cadd e Tower em Projetos de Linhas de Transmissão - Experiência e Metodologia da Copel na Avaliação Estrutural de Torres” - Recife, Pe.

Nome: Márcio Tonetti

Local e ano de nascimento: Curitiba/PR – 1976

Graduação:

Engenharia Elétrica – 2007 – Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR)

Pós Graduação: 2009 - Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR)

Experiência Profissional:

9 anos como Projetista de instalações elétricas prediais / industriais em BT e MT, 4 anos como Projetista de redes de distribuição urbana / rural na Copel e 3 anos como Projetista Eletromecânico de Linhas de Transmissão na Copel.

Nome: Felipe Lima Ramalho Casagrande

Local e ano de nascimento: Curitiba/PR – 1981

Graduação:

Engenharia Elétrica – 2008 – Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR)

Experiência Profissional:

7 anos como Projetista Eletromecânico de Linhas de Transmissão na Copel.