

Cezar Piedade Jr\*  
Sérgio H. Benez\*\*  
Wesley J. Freire\*\*

## RESUMO

A realização de maiores vãos reguladores para os projetos de linhas de eletrificação rural é uma forma de se reduzir estruturas e a conseqüente obtenção de economia, pois estas se constituem na parcela mais onerosa.

Para a execução dos projetos são utilizados gabaritos elaborados segundo critérios de cálculo das concessionárias ou da Associação Brasileira de Normas Técnicas. (ABNT).

No presente trabalho foram elaborados projetos em terrenos de declividades uniformes com gabaritos da Companhia Paulista de Força e Luz e para linhas leves e médias da ABNT.

Pesquisou-se a função  $V_r = f(H)$  onde  $V_r$  é o vão regulador obtido em cada projeto e  $H$  a altura do poste selecionado. Essa análise foi conduzida através de ajustagens de regressões que mostram que a função hiperbólica foi a que representou melhor os ensaios.

Pode-se estabelecer, para as condições examinadas, um confronto entre os diversos projetos, fato que mostrou serem os critérios de cálculo mecânico sugeridos pela CPFL, o que conduz aos projetos mais onerosos.

## SUMMARY

The research was carried out using several kinds of usual sag template in mechanical design of overhead line construction for country areas in São Paulo - Brazil.

It was an attempt to study behavior of several kinds of sag template.

The comparison between the three functions  $V_r = f(H)$ , where  $V_r$  is the ruling span and  $H$  the length of pole, led to conclusion that line construction made with the sag template of Companhia Paulista de Força e Luz, imposes more severe conditions to the mechanical design.

## INTRODUÇÃO

A realização de maiores vãos reguladores para os projetos de linha de eletrificação rural é uma forma de se reduzir estruturas e a conseqüente obtenção de economia, pois as estruturas se constituem na parte mais onerosa.

Para a execução dos projetos são utilizados gabaritos elaborados segundo critérios de cálculos onde são considerados os parâmetros de temperatura, veloci

---

(\*) Professor Livre Docente do Departamento de Engenharia Rural da Faculdade de Ciências Agronômicas - Campus de Botucatu - UNESP - SP

(\*\*) Professores Doutores do Departamento de Engenharia Rural da Faculdade de Ciências Agronômicas - Campus de Botucatu - UNESP - SP.

dade do vento e dimensões e material condutor.

No presente trabalho foram pesquisados em terrenos de declividade uniforme o comportamento da função  $V_r = f(H)$  onde  $V_r$  é o vão regulador,  $H$  a altura dos postes. Os gabaritos utilizados foram os da ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS para linhas leves e média e o da COMPANHIA PAULISTA DE FORÇA E LUZ.

## MATERIAIS E MÉTODOS

A tendência atual para o cálculo mecânico de linhas aéreas de eletrificação é dividir os países em regiões dentro das quais a uniformidade das condições meteorológicas permitem estabelecer uma hipótese de cálculo segura para as linhas FINK & CARROL (1969) apresenta para os Estados Unidos a divisão dos distritos de carga estabelecidos pela NATIONAL ELECTRICAL SAFETY CODE, onde aquele país é subdividido em três regiões: leve, média e pesada.

No Brasil, a ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (1972) considera as regiões de carga existentes no País. É usual utilizar-se as hipóteses de cálculo de linhas leves e médias e em algumas situações normas específicas de concessionárias, como é o caso da COMPANHIA PAULISTA DE FORÇA E LUZ (1960).

A linha aérea, sendo constituída de condutores distribuídos sobre uma posteação, cujos vãos são variáveis, deve-se estabelecer qual o vão característico do traçado que assegura a tensão mais adequada no trecho. Esse vão é designado pela ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (1971) por Vão Regulador ( $V_{reg}$ )

$$V_{reg} = V_{med} + \frac{2}{3} (V_{max} - V_{med}) \quad (1)$$

onde:

$V_{med}$  = vão médio, média aritmética do vão existente no trecho considerado.

$V_{max}$  = vão máximo, maior dos vãos existentes no trecho considerado.

Um maior conhecimento do comportamento mecânico das estruturas e métodos de projetos é de fundamental importância para que se consiga linhas mais econômicas. A eliminação de estruturas com a consequente adoção de maiores vãos, conforme estudos de EBIN (1961) é uma forma de se reduzir os investimentos.

Esses fatos demonstram que o aumento do vão regulador constitui-se num dos principais objetivos para tornar mais econômico um projeto de linha rural. Tendo presentes essas considerações, foram elaborados projetos onde a altura dos postes e a inclinação do terreno variavam.

Os projetos foram elaborados com gabaritos da COMPANHIA PAULISTA DE FORÇA E LUZ (1960) e com o da ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (1971), para linhas leves e médias. Considerou-se a extensão de 1 km em tangente, sendo que a declividade máxima foi selecionada pelo traçado da curva de 50° do gabarito.

Atendendo às disposições de normas de concessionárias, os vãos iniciais dos projetos foram de 70 metros. As demais estruturas foram locadas tomando-se o cuidado de se evitar as condições de arrancamento. Considerando-se a tendência natural existente no País, todos os projetos executados para cabos CAA e as escalas empregadas foram: Horizontal 1:5000 e Vertical 1:500. Cada projeto foi executado com três repetições.

Pesquisou-se a função  $V_r = f(H)$  onde  $H$  é a altura dos postes, assumidas como sendo 9,10 e 11 metros. Cada projeto considerou altura iguais de postes.

Com os dados dos projetos foram elaborados gráficos preliminares objetivando definir a tendência da função. A seguir, foram desenvolvidos mediante uma série de estudos de regressões, ajustagens específicas, mediante programações FORTRAN IV, realizados no Centro de Computação de Dados do Instituto Básico de Biologia Médica e Agrícola, do "Campus" de Botucatu - UNESP.

## RESULTADOS OBTIDOS

Os dados obtidos são apresentados nos Quadros 1, 2 e 3. Esses resultados permitiram estabelecer as equações de regressões constantes dos Quadros 4, 5 e 6.

No tabelamento desses resultados, adotou-se a seguinte notação:

- C.V. = Coeficiente de variação
- $r^2$  = Coeficiente de determinação
- $t_D$  = Teste t para os parâmetros das regressões lineares, hiperbólicas e exponenciais
- $t_{B e t_C}$  = teste t para os parâmetros das regressões quadráticas
- \*\* = Significativo ao nível de 1%
- \* = Significativo ao nível de 5%
- G = Equação de regressão ajustada para a totalidade dos dados.

As equações de regressão são apresentadas nos Quadros, obedecendo a seguinte ordem:

Hiperbólica:  $Y = A/x^B$  (1)

Linear:  $Y = A + Bx$  (2)

Exponencial:  $Y = A \cdot B^x$  (3)

Quadrática:  $Y = A + Bx + Cx^2$  (4)

QUADRO 1 - Vão Regulador contra a Altura do Poste em Projetos elaborados com Galbaritos da CPFL

Altura do Poste (m)	Inclinação (%)	Vão Regulador (m)		
9	0 <sup>0</sup>	67,50	73,80	67,50
	5 <sup>0</sup>	74,47	78,30	72,47
	10 <sup>0</sup>	78,97	71,80	73,80
	15 <sup>0</sup>	78,97	78,97	77,14
	20 <sup>0</sup>	66,27	66,27	67,50
10	0 <sup>0</sup>	103,33	108,66	98,96
	5 <sup>0</sup>	108,66	108,00	105,33
	10 <sup>0</sup>	108,66	109,33	110,00
	15 <sup>0</sup>	106,00	108,00	106,60
	20 <sup>0</sup>	80,97	80,97	80,97
11	0 <sup>0</sup>	131,66	133,00	120,37
	5 <sup>0</sup>	131,66	131,66	133,66
	10 <sup>0</sup>	131,66	131,66	133,66
	15 <sup>0</sup>	122,37	123,70	122,37
	20 <sup>0</sup>	87,11	87,11	87,11

QUADRO 2 - Variação do Vão Regulador contra a Altura do Poste para Projetos com Gabaritos da ABNT linhas leves.

Altura do Poste (m)	Inclinação (%)	Vão Regulador (m)		
9	0	106,66	106,66	115,03
	5	121,03	121,02	120,37
	10	106,66	106,66	106,66
	15	106,66	106,66	106,66
10	0	138,33	138,33	138,33
	5	141,66	141,66	141,66
	10	138,33	138,33	138,33
	15	120,37	120,37	123,70
11	0	164,29	164,29	164,29
	5	164,28	164,28	167,61
	10	155,00	155,00	155,00
	15	138,33	138,33	138,33

QUADRO 3 - Variação do Vão Regulador contra a Altura do Poste para Projetos com Gabaritos da ABNT, linhas médias.

Altura do Poste (m)	Inclinação (%)	Vão Regulador (m)		
9	0	87,76	87,76	92,15
	5	93,63	87,76	95,23
	10	103,33	96,96	103,33
10	0	117,03	117,03	116,90
	5	120,37	117,03	117,03
	10	123,70	120,37	123,37
11	0	138,33	140,00	138,33
	5	138,33	140,33	140,33
	10	150,95	141,66	150,95

QUADRO 4 - Equações de Regressões para o Confronto entre o Vão Regulador e a Altura do Poste em Projetos Elaborados com Gabaritos da CPFL.

Inclinação do Terreno (%)	Equações de Regressão	C.V.	r <sup>2</sup>	t <sub>D</sub>	t <sub>B</sub>	t <sub>C</sub>
0	$\ln V_r = \ln 4,74 + H \ln 1,35$	0,07	0,94	10,79**		
	$V_r = - 188,52 + 28,87 H$	5,36	0,96	13,18**		
	$\ln V_r = \ln 0,09 + 3,21 \ln H$	0,06	0,95	11,85**		
	$V_r = - 702,90 + 132,44H - 5,18 H^2$	4,96	0,97		1,89ns	1,47ns
5	$\ln V_r = \ln 5,99 + H \ln 1,33$	0,04	0,97	15,12**		
	$V_r = - 181,13 + 28,62 H$	2,62	0,99	25,54**		
	$\ln V_r = \ln 0,15 + 2,84 \ln H$	0,04	0,98	17,62**		
	$V_r = - 541,57 + 101,16H - 3,63 H^2$	2,00	0,99		3,40*	2,44ns
10	$\ln V_r = \ln 5,92 + H \ln 1,33$	0,05	0,96	12,23**		
	$V_r = - 181,85 + 28,74 H$	3,52	0,98	18,93**		
	$\ln V_r = \ln 0,14 + 2,86 \ln H$	0,05	0,97	13,91**		
	$V_r = - 751,85 + 143,50H - 5,74 H^2$	2,15	0,99		4,47**	3,57*
15	$\ln V_r = \ln 9,46 + H \ln 1,27$	0,05	0,94	10,45**		
	$V_r = - 128,78 + 23,09 H$	4,04	0,96	13,71**		
	$\ln V_r = \ln 0,44 + 2,37 \ln H$	0,05	0,95	11,78**		
	$V_r = - 838,19 + 165,92H - 7,14 H^2$	1,65	0,99		6,96**	6,00**
20	$\ln V_r = \ln 20,43 + H \ln 1,14$	0,04	0,93	9,96**		
	$V_r = 23,90 + 10,22 H$	2,83	0,95	11,32**		
	$\ln V_r = \ln 3,56 + 1,34 \ln H$	0,04	0,95	11,24**		
	$V_r = 428,69 + 91,72 H - 4,08 H^2$	0,52	0,99		15,82**	14,07*
G	$\ln V_r = \ln 7,99 + H \ln 1,28$	0,13	0,72	10,62**		
	$V_r = - 140,87 + 23,90 H$	12,70	0,72	10,50**		
	$\ln V_r = \ln 0,32 + 2,48 \ln H$	0,13	0,73	10,84**		
	$V_r = - 652,64 + 126,94H - 5,15 H^2$	12,59	0,73		1,62ns	1,31ns

QUADRO 5 - Equações de Regressões para o Confronto do Vão Regulador Contra a Altura de Poste em Projetos Elaborados com Gabaritos da ABNT - Linhas Leves.

Inclinação do Terreno (%)	Equações de Regressão	C.V.	r <sup>2</sup>	t <sub>D</sub>	t <sub>B</sub>	t <sub>C</sub>
0	$\ln V_R = \ln 177,20 + H \ln 1,23$	0,02	0,98	17,34**		
	$V_R = - 136,84 + 27,42 H$	1,97	0,99	24,89**		
	$\ln V_R = \ln 1,27 + 2,03 \ln H$	0,02	0,98	19,26**		
	$V_R = -281,87 + 56,62 H - 1,46 H^2$	2,03	0,99		1,43ns	0,74ns
5	$\ln V_R = \ln 29,42 + H \ln 1,17$	0,05	0,99	58,92**		
	$V_R = - 80,28 + 22,29 H$	0,91	0,99	41,99**		
	$\ln V_R = \ln 3,88 + 1,56 \ln H$	0,05	0,99	54,14**		
	$V_R = 62,74 - 6,5 H + 1,44 H^2$	0,79	0,99		6,51**	1,44ns
10	$\ln V_R = \ln 20,33 + H \ln 1,2$	0,03	0,95	11,72**		
	$V_R = - 108,37 + 24,17 H$	3,01	0,97	14,77**		
	$\ln V_R = \ln 1,78 + 1,87 \ln H$	0,03	0,96	13,52**		
	$V_R = - 853,38 + 174,17H - 7,50 H^2$	0,34	0,99		275,70**	237,54**
15	$\ln V_R = \ln 33,11 + H \ln 1,14$	0,01	0,99	37,78**		
	$V_R = - 36,19 + 15,84 H$	3,01	0,99	33,37**		
	$\ln V_R = \ln 6,19 + 1,30 \ln H$	0,01	0,99	34,93**		
	$V_R = 64,63 - 4,47 H + 1,02 H^2$				0,28ns	1,29ns
G	$\ln V_R = \ln 24,34 + H \ln 1,18$	0,05	0,82	12,60**		
	$V_R = - 9,42 + 22,43 H$	6,59	0,82	12,44**		
	$\ln V_R = \ln 2,71 + 1,69 \ln H$	0,05	0,83	12,76**		
	$V_R = - 251,95 + 54,95 H - 1,63 H^2$	6,66	0,82		0,87ns	0,51ns

QUADRO 6 - Equações de Regressão para o Confronto Entre o Vão Regulador e a Altura do Poste em Projetos Elaborados com Gabaritos da ABNT - Linhas Médias

Inclinação do terreno (%)	Equações de regressão	C.V.	r <sup>2</sup>	t <sub>D</sub>	t <sub>B</sub>	t <sub>C</sub>
0°	$\ln V_r = \ln 12,37 + H \ln 1,25$	0,03	0,98	17,59**		
	$V_r = - 133,28 + 24,83 H$	1,86	0,99	2,85*		
	$\ln V_r = \ln 0,69 - 2,21 \ln H$	0,02	0,98	21,04**		
	$V_r = - 424,50 + 83,47 H - 2,93 H^2$	1,36	0,99		3,76**	2,64*
5°	$\ln V_r = \ln 14,38 + H \ln 1,23$	0,03	0,97	15,39**		
	$V_r = - 120,61 + 23,73 H$	2,30	0,96	2,15ns		
	$\ln V_r = \ln 0,97 - 2,08 \ln H$	0,02	0,97	17,17**		
	$V_r = - 339,98 + 67,89 H - 2,20 H^2$	2,24	0,98		1,83ns	1,20ns
10°	$\ln V_r = \ln 18,38 + H \ln 1,20$	0,02	0,97	16,06**		
	$V_r = - 109,38 + 23,32 H$	3,05	0,97	15,13**		
	$\ln V_r = \ln 1,59 - 1,88 \ln H$	0,02	0,97	15,89**		
	$V_r = 94,24 - 17,67H + 2,05 H^2$	3,15	0,97		0,32ns	0,74ns
G	$\ln V_r = 14,84 + H \ln 1,23$	0,04	0,93	18,88**		
	$V_r = - 121,09 + 23,96 H$	4,08	0,95	21,01**		
	$\ln V_r = \ln 1,02 - 2,05 \ln H$	0,04	0,94	19,50**		
	$V_r = - 223,40 + 44,56H - 1,03 H^2$	4,14	0,95		1,11ns	0,51ns

Os dados obtidos com os projetos, para a função  $V_r = f(H)$ , permitem pelo confronto dos valores do teste  $t$ ,  $r^2$  e  $CV$  selecionar  $V_r$  para as alturas individuais dos postes, assim como para as funções ajustadas para a totalidade dos dados, regressões hiperbólicas como as mais representativas.

Essas curvas obtidas para a totalidade dos dados estão mostradas na Figura 1, onde se pode observar que o acréscimo de altura dos postes confere, ao projeto, um vão regulador maior e que esse vão se torna maior para as linhas leves da ABNT e menor para os projetos elaborados com o gabarito da CPFL.

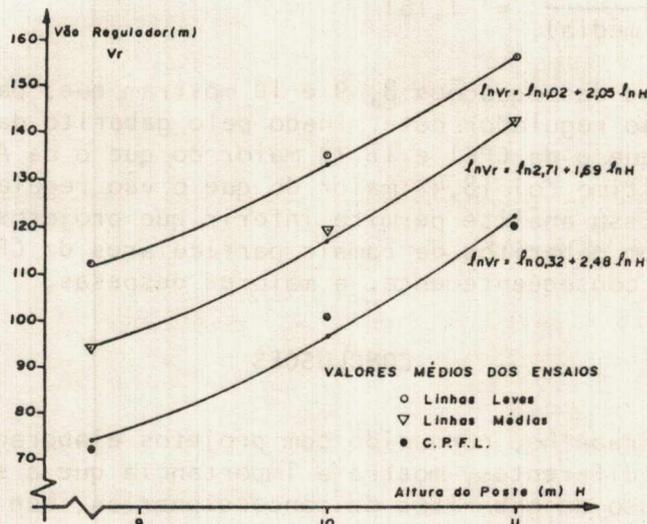


FIGURA 1 – Curvas de regressão para as funções  $V_r = f(H)$

A possibilidade de equacionar, de forma uniforme, os três conjuntos de projetos através da função  $V = f(H)$ , cuja expressão geral é  $V = A_i / H^{k_i}$ , onde  $A_i$  e  $K_i$  são constantes fornecidas pelas funções gerais ajustadas, permite uma forma simples de quantificar os efeitos dos gabaritos na execução de projetos. Para tanto, será considerado o confronto de dois projetos genéricos identificados com os índices 1 e 2 e tendo o mesmo comprimento. Para os vãos reguladores tem-se:

$$V_{r1} = \frac{A_1}{H^{k1}} \quad (5)$$

$$V_{r2} = \frac{A_2}{H^{k2}} \quad (6)$$

Dividindo-se membro a membro as expressões 5 e 6, obtém-se:

$$\frac{V_{r1}}{V_{r2}} = K H^{(k2 - k1)} \quad (7)$$

onde:

$$K = \frac{A_1}{A_2}$$

Substituindo-se os valores de  $A_i$  e  $k_i$  pelos parâmetros das equações  $h_i$  perbólicas gerais, pode-se definir a relação entre os vãos reguladores. Tomando-se como referência o poste de 10 metros de altura, obtêm-se:

$$\frac{V_r \text{ (ABNT - leve)}}{V_r \text{ (CPFL)}} = 1,375 \quad (8)$$

$$\frac{V_r \text{ (ABNT - leve)}}{V_r \text{ (CPFL)}} = 1,184 \quad (9)$$

$$\frac{V_r \text{ (ABNT - leve)}}{V_r \text{ (ABNT - média)}} = 1,161 \quad (10)$$

Os resultados das equações 8, 9 e 10 mostram que, para o poste de 10 metros de altura, o vão regulador determinado pelo gabarito da ABNT - linhas leves foi 37,5% maior do que o da CPFL e 16,1% maior do que o da ABNT - linhas médias, enquanto que este último foi 18,4% maior do que o vão regulador calculado pelo gabarito da CPFL. Essa análise permite inferir que projetos mecânicos de linhas rurais conduzidos com gabaritos de ramais particulares da CPFL levam a menores vãos reguladores e, conseqüentemente, a maiores despesas.

### CONCLUSÕES

O presente trabalho, conduzido com projetos elaborados com 3 (três) conjuntos de gabaritos diferentes, mostra a importância que a seleção dos mesmos deve merecer, pois o uso de gabaritos de concessionárias, que muitas vezes obedecem a padrões e normas importados, levam à elaboração de projetos mais onerosos.

Dos gabaritos examinados: ABNT linhas leves, ABNT linhas médias e CPFL, este último conduziu a vãos reguladores menores, quando os resultados foram analisados, mediante curvas de regressão.

### AGRADECIMENTOS

O presente trabalho foi realizado com auxílio financeiro da Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (Processo FAPESP 75/887).

### LITERATURA CITADA

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, Rio de Janeiro. *EB-293*: cabos de alumínio (CA) e cabos de alumínio com anêlio com alma de aço (CAA) para fins elétricos. Rio de Janeiro, 1972. 17 p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, Rio de Janeiro. *PB-45*: linhas aéreas de distribuição de energia elétrica, tensão primária da classe 15 kV. Rio de Janeiro, 1971. 58 p.
- COMPANHIA PAULISTA DE FORÇA E LUZ. *Caderno de linhas rurais particulares*, 1960. 79 p.
- EBIN, L.E. Experience in the of various standards for design of rural electric power networks with the object of selecting the design promising the greatest economic and technical efficiency. In: UNITED NATIONS, *Economic Commission for Europe, Geneva*. Rural electrifications. Geneve, v. 5, p 1-52. 1961.
- FINK, D.G. & CARROL, J.M. *Standart handbook for electrical engineers*. 10ª ed. New York, McGraw-Hill. 1969. 1702 p.