



São Paulo, 10/15 de abril de 1972

GRUPOS DE ESTUDOS DA TRANSMISSÃO

ESTUDO TÉCNICO-ECONÔMICO PARA SELEÇÃO DO
CABO CONDUTOR E DO CABO-GUARDA PARA LINHAS
DE TRANSMISSÃO DE 88 KV NO LITORAL

Engº Ithamar Penque

Engº Kazuhiro Ishimori

Centrais Elétricas de São Paulo S.A. - C E S P

1.0 - SELEÇÃO DO CABO CONDUTOR

Os dados deste trabalho foram tirados de estudo completo e minucioso, elaborado no Departamento de Transmissão da Diretoria Técnica da CESP, para a Linha de Transmissão de 88 kv - 100 km - Bertioga-S. Sebastião, no litoral norte do Estado de São Paulo.

1.1 - Considerações Preliminares:

A escolha do cabo condutor será feita com base nos seguintes fatores:

- Resistência à corrosão marítima
- Estudos mecânicos
- Efeito corona
- Potência a transmitir
- Custos

1.2 - Resistência à Corrosão Marítima

- a) Cabos ACSR: Por ser constituído de dois metais, a sua utilização não é recomendada, em virtude de estar altamente sujeito à corrosão eletrolítica, causada pela umidade e a presença de cristais de sal, trazidos pela brisa marítima.
- b) Cabos ASC : Resistentes à corrosão marítima.
- c) Cabos de liga de alumínio:--Tipo ARVIDAL ou similar: Por se tratar de cabos compostos de uma liga de alumínio, cujos componentes metálicos oferecem uma resistência maior à corrosão, estes cabos são bastante recomendados para a orla marítima, principalmente engraçados.
- d) Cabos ACSR-AW: Compostos de fios de alumínio com alma de fios de "alumoweld". Os fios de "alumoweld" / são fios de aço recobertos por uma espessa camada de alumínio, por um processo de caldeamento, que permite uma solda atômica controlada, entre os dois metais. Com isso, fica eliminada a possibilidade de corrosão eletrolítica entre o cabo e a alma.

Entre os cabos retrocitados, os cabos de liga de alumínio estão mais sujeitos à corrosão do tipo "stress corrosion", justamente por se tratar de uma liga de diferentes metais. Por este motivo não deverão ser sobre-tensionados, porque a vibração intensa do cabo impedirá que a camada de óxido de alumínio forme uma película contínua, que normalmente protege o cabo contra este tipo de corrosão.

1.3 - Estudos Mecânicos

Considerando que 60% da linha serão montados na encosta da Serra do Mar, em região de poucos e difíceis acessos, o cabo condutor deverá permitir o aproveitamento dos vãos longos. Deverá permitir também o melhor aproveitamento das estruturas, com relação à estabilidade elétrica da linha, e o balanço das cadeias de suspensão. Em virtude disto, eliminaremos os cabos de alumínio sem alma de aço-ASC e faremos o estudo comparativo somente entre os cabos ACSR-AW e ARVIDAL (liga de alumínio):

a) Vão médio máximo

QUADRO I

Cabo	Bitola	Seção (mm ²)		A ₂ /A _W	Vão máx (m)
		A ₂	A _W		
ACSR-AW	4/0 - AWG	107,23	17,87	6/1	765 *
ACSR-AW	277,7 MCM	135,16	22,07	6/1	850 *
ACSR-AW	356,0 MCM	170,45	39,8	4,3/1	975 *
ARVIDAL	383,6 MCM	194,4	-	-	500 * *

* De acordo com a VDE

** De acordo com a recomendação da ALCAN.

Para os trechos planos vamos admitir:

- Distância fase/terra (clearance) = 7 m
 - Flecha máxima (a 50°C) = 12 m
 - Comprimento total da cadeia = 1,50 m
- soma = 20,50 m

Vemos assim, que as torres deverão ser usadas com suas extensões, de modo que a altura entre o braço inferior e o solo seja de 21 m.

Partindo da condição de carga máxima de 33% da carga ruptura (CR) de cada cabo, com pressão de vento de 52,5 kg/m², vamos procurar o Vm / máximo, em função da flecha máxima admitida, e em seguida, verificar as condições do "everyday stress", a 28°C, sem vento.

QUADRO II

Cabo	Bitola	Carga Rupt. kg	Flecha (m) a 50°C					
			Vm 350 m	Vm 370 m	Vm 400 m	Vm 410 m	Vm 420 m	Vm 450 m
ACSR-AW	4/0 - AWG	3631	11,78	12,42			-	-
ACSR-AW	277,7 MCM	5180	9,59	10,13	11,80	12,39	-	-
ACSR-AW	356,0 MCM	6477	-	-	9,51	-	-	11,98
ARVIDAL	383,6 MCM	6010	-	-	11,07	11,62	12,18	-

QUADRO III

Cabo	Bitola	Vm max (m)	Temp. °C	Tração (kg)	% CR	Flecha (m)
ACSR-AW	4/0 - AWG	370	28	609	16,77	11,58
ACSR-AW	277,7 MCM	410	28	959	18,51	11,40
ACSR-AW	356,0 MCM	450	28	1711	21,36	10,90
ARVIDAL	383,6 MCM	420	28	1070	17,80	10,98

Obs.: - As estruturas serão projetadas em função do cabo escolhido, isto é, serão projetadas para cabos ACSR-AW - 277-MCM, no caso de ser escolhida esta bitola ou a 4/0-AWG, e para cabos ACSR-AW-356,0, no caso desta bitola ou da 383,6-MCM, do ARVIDAL.

Em virtude disto, não se pode inferir que o menor número de estruturas conseguidos com o cabo ACSR-AW bitola 356,0 seja mais econômico que o número de estruturas conseguidas com a bitola 4/0-AWG do mesmo cabo.

b) Balanco da cadeia de suspensão - Estabilidade Elétrica

Admitamos que as torres de suspensão sejam projetadas para um vão médio de 400 m e que o ângulo de balanço máximo seja:

$$\alpha = 70^\circ.$$

Sabemos que:

$$V_g = \frac{E_{vc}}{p \cdot \text{tg} \alpha} \cdot V_m - \frac{p \cdot \text{tg} \alpha - E_{vi}}{2 p \cdot \text{tg} \alpha}, \text{ e que}$$

$$V_g = \text{Vão gravante}$$

$$E_{vc} = \text{Esforço do vento sobre o cabo}$$

$$E_{vc} = c \cdot q \cdot d \quad (\text{kg}) \quad c = 1 \text{ para cabos com } \phi > 15,8 \text{ mm}$$

$$c = 1,1 \text{ p/cabos } c/15,8 \text{ mm} > \phi > 12,5 \text{ mm}$$

$$q = \frac{v^2}{16} = 40,0 \text{ kg/m}^2$$

$$v = 90 \text{ km/hora a } 10^\circ \text{C}$$

$$d = \text{diâmetro do cabo}$$

p = peso unitário do cabo (kg/m)

α = ângulo de balanço

p_i = peso da cadeia completa = ~60 kg (p/88 kV)

E_{vi} = Esforço do vento sobre a cadeia = ~15 kg.

QUADRO IV

Cabo	Bitola	Diâmetro (m)	Peso Unit kg/m	$\frac{E_{vc}}{p \cdot tg\alpha}$	θ
ACSR-AW	4/0 - AWG	0,01430	0,412	0,555	29° 03'
ACSR-AW	277,7 MCM	0,01631	0,5203	0,456	24° 30'
ACSR-AW	256,0 MCM	0,01831	0,737	0,362	19° 55'
ARVIDAL	383,6 MCM	0,01805	0,533	0,493	26° 15'

Obs.: - Os valores de θ encontrados permitirão bom aproveitamento das estruturas.

1.4 - Efeito Corona

A fim de evitarmos as consequências do efeito corona, limitaremos o gradiente da tensão superficial dos condutores a :

$$g = \frac{e}{m \cdot r \cdot d \cdot \eta \cdot \frac{D_{eq}}{r}}, \text{ onde :}$$

g = gradiente de tensão superficial

e = 50,805 kV (fase/neutro)

m = 0,8 - para o alumínio após alguns anos

r = variável - raio do condutor

d = densidade do ar = 1 nível do mar

D_{eq} = 479 cm - admitindo 3 m entre fases e 560 m entre os 2 circuitos verticais.

QUADRO V

Cabos	Bitola	r (cm)	g kV/cm	Obs.
ACSR-AW	4/0 - AWG	0,715	10,31	< 15
ACSR-AW	277,7 MCM	0,816	9,77	< 15
ACSR-AW	356,0 MCM	0,916	8,86	< 15
ARVIDAL	383,6 MCM	0,902	9,71	< 15

1.5 - Potência a transmitir

A linha deverá atender a uma demanda vegetativa, que deverá estar em torno de 20 MVA, em 10 anos.

QUADRO VI

Cabo	Bitola	Formação	Diâmetro (mm)			Seção mm ²	Resist. ohm/km
			Cabo	A2	AW		
ACSR-AW	4/0 - AWG	6 x 1	14,30	4,77	4,77	125,10	0,257
ACSR-AW	277,7 MCM	26 x 7	16,31	2,57	2,00	157,23	0,206
ACSR-AW	356,0 MCM	30 x 7	18,82	2,70	2,70	210,26	0,161
ARVIDAL	383,6 MCM	19	18,05	3,61	-	194,40	0,202

QUADRO VII

		R total ohm	X ₁ total ohm	X _c total ohm	Z total
ACSR-AW	4/0 - AWG	12,85	27,01	1457,9	12,85 + j 27,01
ACSR-AW	277,7 MCM	10,3	23,3	1426,5	10,3 + j 23,3
ACSR-AW	356,0 MCM	8,4	22,68	1392,2	8,4 + j 22,68
ARVIDAL	383,6 MCM	10,1	23,2	1402,7	10,1 + j 23,2

QUADRO VIII

Cabo	Bitola	Reg.5%	Reg.6%	Reg.7%	Perdas kW		
					Reg.5%	Reg.6%	Reg.7%
ACSR-AW	4/0 - AWG	18,0	21,0	23,6	537	758	988
ACSR-AW	277,7 MCM	21,0	24,6	27,4	592	841	1127
ACSR-AW	356,0 MCM	23,6	27,4	30,9	615	857	1116
ARVIDAL	383,6 MCM	21,6	25,0	28,5	674	853	1144

1.6 - Custos

Com base em valores fornecidos pelos fabricantes e dados de concorrências, chegamos aos seguintes custos unitários:

Cabo	Bitola	Cr\$/ t
ACSR-AW	4/0 - AWG	5.900,00
ACSR-AW	277,7 MCM	6.200,00
ACSR-AW	356,0 MCM	6.000,00
ARVIDAL	383,6 MCM	6.600,00

1.7 Resumo

QUADRO IX

Item	DESCRIÇÃO	1	2	3	4
01	Cabo	ACSR-AW	ACSR-AW	ACSR-AW	ARVIDAL
02	Bitola	4/0-AWG	277,7MCM	356,0MCM	383,6MCM
03	Código	Penguin	Partridge	Oriole	Oriole
04	Formação	6x1	26x7	30x7	19
05	Diâmetro do cabo (mm)	14,30	16,31	18,82	18,05
06	Diâmetro dos fios de Al (mm)	4,77	2,57	2,70	3,61
07	Diâmetro dos fios de AW (mm)	4,77	2,00	2,70	-
08	Seção do cabo (mm ²)	125,1	157,23	210,26	194,4
09	Resistência Unitaria (ohms/km)	0,257	0,206	0,161	0,202
10	Resistência total (-ohms)	12,85	10,30	8,4	10,1
11	X _L total (ohms)	27,01	23,30	22,68	23,2
12	X _C total (ohms)	1.457,9	1.426,5	1.392,2	1.402,7
13	Potência c/Reg. 5% (MVA)	18,0	21,0	23,6	21,6
14	Potência c/Reg. 6%	21,0	24,6	27,4	25,0
15	Potência c/Reg. 7%	23,6	27,4	30,9	28,5
16	Gradiente de Potencial (kV/cm)	10,91	9,77	8,86	9,71
17	Vão máximo (m)	765	850	975	500
18	Vão máximo - terr. / plano (m)	370	410	450	420
19	"Everyday stress" (kg)	609	959	1.711	1.070
20	"Everyday stress"%CR	16,77	18,51	21,36	17,80
21	Custo Unitário Cr\$/t	5.900,	6.200,	6.000,	6.600,
22	Peso total do cabo (t)	260	330	465	340
23	Custo total do cabo Cr\$	1.534.000,	2.046.000,	2.790.000,	2.244.000,

2.0 - SELEÇÃO DO CABO-GUARDA

2.1 - Considerações Preliminares

Por se tratar de região litorânea, os cabos de aço galvanizado ficam eliminados. A seleção será feita com base nos seguintes fatores:

- Resistência à corrosão
- Características mecânicas
- Custos
- Nº de cabo-guarda e bitola

2.1.2 - Resistência à corrosão

Sobre este aspecto poderemos selecionar os seguintes cabos: ASC, ARVIDAL (liga de Al), "Alumoweld" e "Copperweld".

2.1.3 - Características Mecânicas

Ainda que o cabo ARVIDAL fosse escolhido para cabo condutor, nem o cabo ASC, nem uma bitola menor do próprio cabo / ARVIDAL poderiam ser escolhidos como cabo-guarda, porque suas características mecânicas limitam os vãos, obrigando o projetista a localizar as torres com base nas condições do cabo-guarda.

2.1.4 - Custo

Com a eliminação dos cabos ASC e ARVIDAL restam / os cabos "Alumoweld" e "Copperweld". Os cabos "Alumoweld" custam 25% menos que os cabos "Copperweld", com o que a escolha do cabo-guarda recai naturalmente sobre êle.

2.1.5 - Número de cabo-guarda e bitola

Conforme verificamos em estudo à parte, é viável tecnicamente a adoção de apenas um cabo-guarda para proteção de linhas de circuito-duplo de 88 kV, o que permitirá substancial redução do custo.

3.0 - SELEÇÃO DA ESTRUTURA

Para esta linha, adotaremos estruturas metálicas, em aço / COR-TEN-A, para 2 circuitos verticais e um cabo-guarda.

Considerando que o emprego do aço COR-TEN-A proporciona uma redu

ção de peso de 20%, adotaremos as seguintes reduções de peso, em relação aos projetos elaborados para torres de 138 kV, 2 circuitos e 2 cabos-guarda:

- Para cabos ACSR-AW - 4/O-AWG e 277,7 MCM - 30%
- Para cabos ACSR-AW - 356,0 MCM e ARVIDAL 383,6 MCM -20%

4.0 - ESTIMATIVAS DE CUSTOS DA LINHA

4.1 - Custos dos Materiais

1ª hipótese: Cabo condutor ACSR-AW - 4/O-AWG.

I - <u>Estruturas:</u> Em caso COR-TEN-A para 2 circuitos verticais + 1 cabo-guarda: 243 un. - 700 t	
Custo total	Cr\$ 1.750.000,00
II - <u>Cabo condutor:</u> 260 t	Cr\$ 1.534.000,00
III - <u>Cabo-guarda:</u> "Alumoweld" - 3 x 7 AWG - 22 t	
Custo total	Cr\$ 132.000,00
IV - <u>Contra-peso:</u> Fio "Copperweld" - nº 4-AWG - 9 t	
Custo total	Cr\$ 72.000,00
V - <u>Ferragens do cabo condutor:</u>	
Cadeia de suspensão simples: 1260 conj.	
Cadeia de ancoragem simples: 396 conj.	
Custo total	Cr\$ 160.000,00
VI - <u>Isolador:</u> "Smog-type" - ϕ 10' - Vidro temp. / 8000 kg - Quantidade total: 10.500 Un.	
Custo total	Cr\$ 230.000,00
VII - Demais ferragens e acessórios	
Custo total	Cr\$ 97.000,00

2ª hipótese: Cabo condutor ACSR-AW - 277,7-MCM

I - <u>Estruturas:</u> Em aço COR-TEN-A p/ 2 circuitos verticais + 1 cabo-guarda: 235 Un. - 700 t	
Custo total	Cr\$ 1.750.000,00

II - <u>Cabo Condutor:</u>	315 t ~	Cr\$	1.950.000,00
III - <u>Cabo-guarda:</u>	"Alumoweld" 3 x 7-AWG - 22 t		
	Custo total	Cr\$	132.000,00
IV - <u>Contra-peso:</u>	Fio "Copperweld" nº 4 AWG ~ 8,2 t		
	Custo total	Cr\$	66.000,00
V - <u>Ferragens p/cabo condutor:</u>			
	Cadeia de suspensão simples = 1200 conj.		
	Cadeia de encoragem simples = 420 conj.		
	Custo total	Cr\$	156.000,00
VI - <u>Isolador:</u>	"Smog-type" ϕ 10' - 8.000 kg -		
	Quant.total = 10.200 Un. ~		
	Custo total	Cr\$	225.000,00
VII - <u>Demais ferragens e acessórios:</u>	~		
	Custo total	Cr\$	100.000,00

3ª hipótese: Cabo condutor ACSR-356,0-MCM

I - <u>Estruturas:</u>	Em aço COR-TEN-A para 2 circuitos verticais + 1 cabo-guarda: 235 Un. ~ 800 t		
	Custo total	Cr\$	2.000.000,00
II - <u>Cabo condutor:</u>	465 t ~	..Cr\$	2.800.000,00
III - <u>Cabo-guarda:</u>	"Alumoweld" - 3 x 7 AWG - 22 t		
	Custo total	Cr\$	132.000,00
IV - <u>Contra-peso:</u>	Fio "Copperweld" nº 4 AWG - 8,2t		
	Custo total	Cr\$	66.000,00
V - <u>Ferragens do cabo condutor:</u>	Idem 2ª hipótese		
	Custo total	Cr\$	156.000,00
VI - <u>Isolador:</u>	Idem 2ª hipótese	CR\$	225.000,00
VII - <u>Demais ferragens e acessórios:</u>			
	Custo total	Cr\$	110.000,00

4ª hipótese: Cabo condutor: ARVIDAL 383,6 MCM

I - <u>Estruturas</u> : Em aço COR-TEN-A para 2 circuitos verticais + 1 cabo-guarda: 250 Un. ~ 850 t	
Custo total	Cr\$ 2.125.000,00
II - <u>Cabo condutor</u> : 340 t ~	Cr\$ 2.250.000,00
III - <u>Cabo-guarda</u> : Idem 3ª hipótese	
Custo total	Cr\$ 132.000,00
IV - <u>Contra-peso</u> : Fio "Copperweld" nº 4 AWG ~ 10,5t	
Custo total	Cr\$ 84.000,00
V - <u>Ferragens do cabo condutor</u> :	
Cadeia de suspensão simples = 1260 conj.	
Cadeia de ancoragem simples = 480 conj.	
Custo total	Cr\$ 167.000,00
VI - <u>Isolador</u> : "Smog-type" - Vidro temp. ϕ 10' - 8.000 kg - Quant.total = 1.100 Un.	
Custo total	Cr\$ 242.000,00
VII - <u>Demais ferragens e acessórios</u> :	
Custo total	Cr\$ 110.000,00

4.2 - Custos da Mão-de-Obra:

1ª e 2ª hipóteses	Cr\$ 3.100.000,00
3ª e 4ª hipóteses	Cr\$ 3.500.000,00

4.3 - Custos Globais

Item	MATERIAL	CUSTO Cr\$ 1.000,00			
		1 ^a hip.	2 ^a hip.	3 ^a hip.	4 ^a hip.
I	Estrutura	1.750,	1.750,	2.000,	2.125,
II	Cabo condutor	1.534,	1.950,	2.800,	2.250,
III	Cabo-guarda	132,	132,	132,	132,
IV	Contra-peso	72,	66,	66,	84,
V	Ferragens cabo condutor	160,	156,	156,	167,
VI	Isolador	230,	225,	225,	242,
VII	Demais Ferragens e acessórios	95,	100,	110,	110,
		3.973,	4.379,	5.489,	5.110,
	Valores arredondados	4.000,	4.400,	5.500,	5.100,
	Mão-de-Obra	3.100,	3.100,	3.500,	3.500,
	Custos Globais	7.100,	7.500,	9.000,	8.600,

5.0 - CONCLUSÕES5.1 - Seleção do cabo condutor:

Se admitirmos correta a previsão da demanda em torno de 20 MVA, até 1980, poderíamos escolher o cabo ACSR - 4/0-AWG, que proporcionará o menor custo global, para construção da linha.

Todavia, elegemos para cabo condutor o cabo ACSR - 277,7 MCM (Partridge), cujo custo global da construção da linha será apenas 5% superior ao da bitola 4/0-AWG, e que permitirá demandas superiores, com menores perdas de potência.

5.2 - Seleção do caboguarda:

A escolha foi feita por eliminação, sendo eleito o cabo "Alumoweld", bitola 3 x 7 AWG, com carga de ruptura de 3910 kg e peso unitário 0,210 t/km.

São Paulo, fevereiro de 1972.