

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS

FACULDADE DE ENGENHARIA

Departamento de Eletrotécnica

ALOCAÇÃO ECONÔMICA DE POSTES

EM LINHAS DE TRANSMISSÃO

ALCINDO ANTONIASSI

DEZ/75

Orientador: DRUMOND XAVIER C. LIMA

Tese apresentada à Faculdade de Engenharia da Universidade Estadual de Campinas como parte dos requisitos para obtenção do título de "MESTRE EM CIÊNCIAS".

**UNICAMP**  
BIBLIOTECA CENTRAL

SUMÁRIO

A alocação econômica de postes em linhas de transmissão pode ser visualizada como um processo de decisões sequenciais. O estreitamento das faixas de procura da solução é uma opção para reduzir o tempo de processamento, que é crítico.

ÍNDICE

INTRODUÇÃO . . . . .	3
CAPÍTULO I - CÁLCULO MECÂNICO DOS CONDUTORES . . . . .	4
1.1 Equação de Equilíbrio . . . . .	4
1.2 Variação da Tensão ao Longo do Condutor . . . . .	5
1.3 Hipóteses de Cálculo e Coeficiente de Segurança . . . . .	6
1.4 Organização dos Cálculos . . . . .	8
1.5 Curvas de Tração x Vão Equivalente . . . . .	12
1.6 Escolha do Parâmetro . . . . .	12
1.7 Determinação dos Coeficientes da Equação de Equilíbrio . . . . .	13
CAPÍTULO II - DIMENSIONAMENTO ELETROMECHANICO DE ESTRUTURAS E SUPORTES . . . . .	15
2.1 Introdução . . . . .	15
2.2 Hipóteses de Cálculo . . . . .	15
2.3 Coeficientes de Segurança . . . . .	19
2.4 Dimensionamento Geométrico dos Suportes . . . . .	20
2.5 Escolha das Estruturas . . . . .	22
2.6 Dimensionamento dos Postes . . . . .	23
CAPÍTULO III - ALGORITMO DE ALOCAÇÃO . . . . .	25
3.1 Introdução . . . . .	25
3.2 Programação Dinâmica . . . . .	25
3.3 Algoritmo Proposto . . . . .	28
3.4 Descrição do Programa de Simulação . . . . .	29
3.5 Informações Básicas para o Projeto . . . . .	30
3.6 Execução do Programa . . . . .	30
3.7 Aplicações e Perspectivas do Programa . . . . .	32
3.8 Diagrama de Bloco Simplificado . . . . .	33
CAPÍTULO IV - RESULTADOS E CONCLUSÕES . . . . .	37
4.1 Introdução . . . . .	37
4.2 Análise do Perfil I . . . . .	37
4.2.1 Comparação com a solução ótima . . . . .	37
4.2.2 Sensibilidade do custo para variações da distância mínima ao solo . . . . .	44

4.3	Análise do Perfil II . . . . .	46
4.3.1	Comparação com a solução ótima . . . . .	46
4.4	Conclusões . . . . .	48
ANEXO I	. . . . .	49
ANEXO II	. . . . .	50
ANEXO III	. . . . .	54
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	. . . . .	58

## INTRODUÇÃO

O posicionamento de estruturas de transmissão pelo método manual (utilização de curvas gabaritos) apresenta limitações tais como: pessoal com experiência de manuseio, tempo de execução do projeto, dificuldades de análise dos resultados, etc.

Alguns trabalhos foram feitos (7 - 8) simulando o método manual no computador digital, com bons resultados.

As referências (5 - 11) tratam do problema de alocação econômica de torres em linhas de transmissão, usando programação dinâmica que garante a solução ótima.

O algoritmo proposto encontra uma solução sub-ótima, num tempo de processamento bastante reduzido.

Como dados de entrada tem-se o perfil do terreno sob a forma de abcissas, ordenadas, uma variável de controle para especificar restrições do perfil, número de alturas disponíveis e seus valores líquidos e os custos estimados correspondentes.

Da saída deverão constar os pontos de locação - (abcissa, ordenada), alturas utilizadas, comprimentos dos vãos e o custo total do trecho.

CAPÍTULO I

CÁLCULO MECÂNICO DOS CONDUTORES

1.1 - EQUAÇÃO DE EQUILÍBRIO

Um condutor homogêneo, flexível, inextensível, suspenso por dois pontos A e B e sujeito apenas ao seu próprio peso, descreve uma catenária (figura 1) ( 1 ) :

$$y = h \cosh (x/h) + K_2 \quad (1.1)$$

onde

$$h = T_H/w = \text{parâmetro do condutor} \quad (\text{m})$$

$$T_H = \text{componente horizontal da tração no condutor no ponto C, ou seja, para } y = y_{\min} \quad (\text{Kgf})$$

$$w = \text{peso por unidade de comprimento do condutor} \quad (\text{Kgf/m})$$

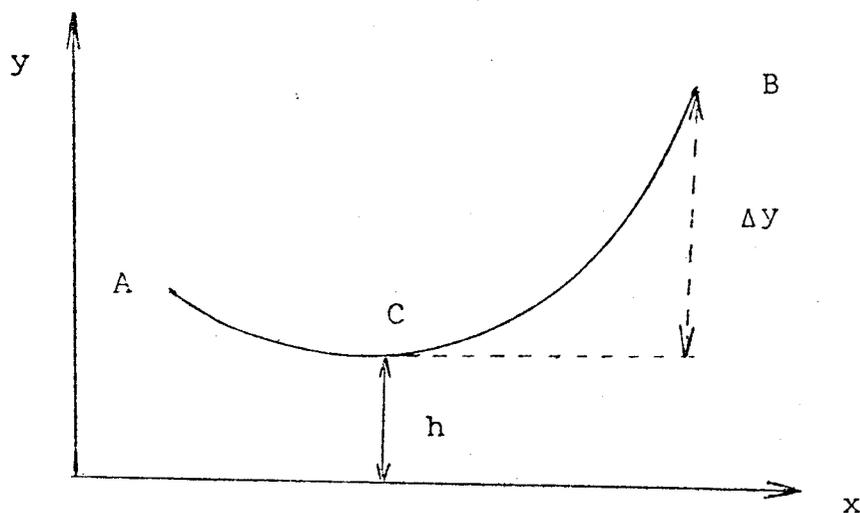


Fig. 1 - Curva Catenária

Definindo um sistema de coordenadas passando pelo eixo de simetria da catenária ( $x=0, y=h$ ),  $K_2=0$ , teremos:

$$y = h \cosh (x/h) \quad (1.2)$$

Desenvolvendo (1.2) em série de Taylor em torno da origem, tem-se :

$$y = h \left( 1 + \frac{x^2}{2!h^2} + \frac{x^4}{4!h^4} + \dots \right) \quad (1.3)$$

Desde que o vão não seja demasiadamente grande e, tomando-se a origem do sistema de coordenadas no ponto C, podemos aproximar (1.3) por :

$$y \cong \frac{x^2}{2h} \quad (1.4)$$

### 1.2 - VARIAÇÃO DA TENSÃO AO LONGO DO CONDUTOR

A tensão T num ponto B(x,y) do condutor (figura 1) é da forma ( 1 ) :

$$T = T_H \cosh (x/h) \quad (1.5)$$

Com a equação (1.2) e lembrando que  $T_H = w \cdot h$ , podemos escrever :

$$T = w \cdot y = w ( h + \Delta y ) \quad (1.6)$$

Na prática a diferença entre T e  $T_H$  é pequena, desde que o vão não seja demasiadamente grande e desnivelado.

#### EXEMPLO :

Para	w	=	0,432	Kgf/m
	h	=	1204	metros
	vão (2x)	=	200	metros

$$T_H = w h$$
$$= 0,432 \times 1204 = 520,128 \text{ Kgf}$$

$$T = w h \left( 1 + \frac{x^2}{2h^2} \right)$$
$$= 0,432 \times 1204 \left( 1 + \frac{100^2}{2 \times 1204^2} \right) = 521,131 \text{ Kgf}$$

Logo, a tração mecânica no condutor varia entre o valor mínimo  $T_H$  e um valor máximo  $T$  no ponto de fixação de maior ordenada. As normas estabelecem uma tração máxima para cada tipo de condutor e para cada hipótese de cálculo ( temperatura e velocidade do vento). Como vimos, para vãos não demasiadamente grande e desnivelados, a diferença entre  $T_H$  e  $T$  é para todos os efeitos, desprezível.

### 1.3 - HIPÓTESES DE CÁLCULO E COEFICIENTE DE SEGURANÇA

Segundo as normas ABNT ( 2) o Brasil é dividido em regiões :

- Região A - Compreende os Estados do Rio Grande do Sul, Santa Catarina e Paraná.
- Região B - Compreende os Estados de São Paulo, Minas Gerais, parte de Mato Grosso e Goiás.
- Região C - Compreende os Estados do Rio de Janeiro, Espírito Santo e Bahia.
- Região D - Compreende os Estados de Sergipe, Alagoas Pernambuco, Ceará e parte do Piauí.

Para cada região, na falta de elementos mais precisos, deverão ser consideradas constantes as condições atmosféricas dadas na tabela 1 :

TABELA 1

Região	Condições Atmosféricas				
	Veloc.	Temperatura			
	vento max.	Mais provável qdo da ocor. vento máximo	Média	Mín.	Máx.
	Km/h	°C	°C	°C	°C
A	130	15	15	5	40
B	110	10	20	0	50
C	110	15	20	5	50
D	105	20	25	15	50

As hipóteses de cálculo de acordo com as normas ABNT ( 2 ), são as seguintes :

- Hipótese A : temperatura mínima, vento nulo.
- Hipótese B : temperatura mais provável quando da ocorrência do vento máximo, vento máximo.
- Hipótese C : temperatura média, vento nulo.
- Hipótese D : temperatura máxima, vento nulo.

Os coeficientes de segurança determinam a tração mecânica máxima que o cabo pode suportar, para cada uma das hipóteses de cálculo que cabe considerar.

As normas ABNT ( 2 ) estabelecem :

"A verificação do esforço de tração dos cabos condutores e para-raios deve ser feita segundo as seguintes condições:

Na pior condição, a carga atuante num cabo deve ser, no máximo, igual a 40% da sua carga de ruptura para cabos de alumínio ACSR e 50% para cabos de cobre.

Na condição de trabalho de maior duração, a carga atuante no cabo deve ser, no máximo, 25% de sua carga de ruptura.

Nota : Os limites acima citados são baseados no uso de dispositivos especiais para evitar falhas por fadigas e desgaste do cabo por atrito com grampos. Se tais práticas não são seguidas, tensões menores devem ser empregadas."

A experiência adquirida na operação de linhas elétricas permite concluir que, quanto mais elevada for a tração mecânica no cabo, tanto maiores as possibilidades do aparecimento de fenômenos de vibração. Donde se conclue pela conveniência de se manter a tração mecânica dentro de certos limites.

A referência ( 3 ) fixa a tração máxima admissível na hipótese C em :

18% da tração de ruptura para cabos ACSR

13% da tração de ruptura para cabos de aço.

Ainda segundo a referência ( 3 ), conclui-se que, respeitados estes limites, minimiza-se o perigo das vibrações e a necessidade de dispositivos antivibratórios. Se, uma vez a linha construída, aparecem fenômenos de vibração, muito provavelmente eles podem ser eliminados com a instalação de dispositivos antivibratórios.

#### 1.4 - ORGANIZAÇÃO DOS CÁLCULOS

Conhecendo-se as características mecânicas do cabo e as hipóteses de cálculo, calculam-se os diferentes pontos da curva de tração em função do vão equivalente para um dado parâmetro na hipótese D. Para isto, usa-se a equação dita " de mudança de estado " ( 1 ) .

$$T_1^2 \left( T_1 + \frac{E S a^2}{24} \frac{w_0^2}{T_0^2} + E S \alpha (\theta_1 - \theta_0) - T_0 \right) = \frac{E S a^2}{24} w_1^2 \quad (1.7)$$

- $T_0$  = Tração inicial (Kgf)  
 $T_1$  = Tração final (Kgf)  
 $E$  = Módulo de elasticidade (Kgf/mm<sup>2</sup>)  
 $\alpha$  = Coeficiente de dilatação linear (°C<sup>-1</sup>)  
 $w_0$  = Peso por unidade de comprimento no estado inicial (Kgf/m)  
 $w_1$  = Peso por unidade de comprimento no estado final (Kgf/m)  
 $S$  = Área da secção transversal do cabo (mm<sup>2</sup>)  
 $a$  = Vão equivalente (m)  
 $\theta_0$  = Temperatura inicial (°C)  
 $\theta_1$  = Temperatura final (°C)

O parâmetro na hipótese D é dado por :

$$h = \frac{T_0}{w_0}$$

- $h$  = Parâmetro à 60 °C, vento nulo (m)  
 $T_0$  = Tração no cabo à 60 °C, vento nulo (Kgf)  
 $w_0$  = Peso por unidade de comprimento do cabo (Kgf/m)

A escolha de um parâmetro na hipótese D determina a tração inicial  $T_0 = h w_0$ , a partir da qual se calcula, para cada vão equivalente, as trações finais nas hipóteses A, B e C. A hipótese D condiciona a flecha máxima e a disposição e altura dos suportes para um dado perfil de terreno.

Admite-se que as variações de tração, a partir do estado inicial definido pelo parâmetro na hipótese D são, dentro de certos limites, as mesmas que seriam produzidas em circunstâncias iguais, em um vão hipotético dito "vão equivalente".

O vão equivalente de um tramo de linha compreendido entre duas estruturas de amarração, é expresso por :

$$a = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n a_i^3}{\sum_{i=1}^n a_i}} \quad (1.8)$$

$a_1, a_2, \dots, a_n$  são os comprimentos dos vãos do tramo.

Para a hipótese B, o peso por unidade de comprimento do cabo deve incluir a sobrecarga devida ao vento ( 2 ).

#### EXEMPLO :

Consideremos o cabo 4/0 ACSR, cujas características são fornecidas no anexo 1.

$w_0$  = peso ( próprio ) por unidade de comprimento = 0,432 Kgf/m

A pressão exercida pelo vento sobre o cabo é calculada pela expressão :

$$P = 0,0045 V^2 \alpha$$

P = Pressão do vento em quilograma-força por metro quadrado

V = velocidade do vento em quilômetros por hora

$\alpha$  = Coeficiente de efetividade da pressão do vento

Para  $V = 130 \text{ Km/h}$  e  $\alpha = 0,8$ ;  $P = 60,84 \text{ Kgf/m}^2$

O vento é considerado agindo horizontalmente e, em geral, em direção perpendicular ao eixo da linha.

O esforço do vento ( $w_v$ ) é obtido considerando a área da superfície cilíndrica projetada por unidade de comprimento :

$$S = D.l$$

$D$  = Diâmetro do cabo ( 14,31 mm )

$l$  = Comprimento unitário do cabo ( 1 m )

Portanto,

$$\begin{aligned}w_v &= P.S \\ &= 0,8706 \quad (\text{Kgf/m})\end{aligned}$$

O peso ( aparente ) por unidade de comprimento é obtido somando-se vetorialmente o peso próprio ( $w_o$ ) ao esforço horizontal do vento ( $w_v$ ) :

$$\begin{aligned}w &= \sqrt{w_o^2 + w_v^2} \\ &= \sqrt{0,432^2 + 0,8706^2} \\ &= 0,972 \quad (\text{Kgf/m})\end{aligned}$$

### 1.5 - CURVAS DE TRACÇÃO X VÃO EQUIVALENTE

São dadas no anexo 2 as curvas de tração para o cabo 4/0 ACSR em função do vão equivalente, para as hipótese de cálculo e parâmetros na hipótese D, variando entre 1000 e 1300 metros.

As hipótese que consideraremos são as seguintes :

- Hipótese A : temperatura 0 °C, vento nulo
- Hipótese B : temperatura 10 °C, vento 130Km/h
- Hipótese C : temperatura 20 °C, vento nulo
- Hipótese D : temperatura 60 °C, vento nulo

### 1.6 - ESCOLHA DO PARÂMETRO

Para as hipóteses de cálculo e coeficientes de segurança admitidos, a limitação do vão equivalente mínimo se deve à hipótese C, condição de trabalho de maior duração.

#### EXEMPLO :

Parâmetro 1204 m

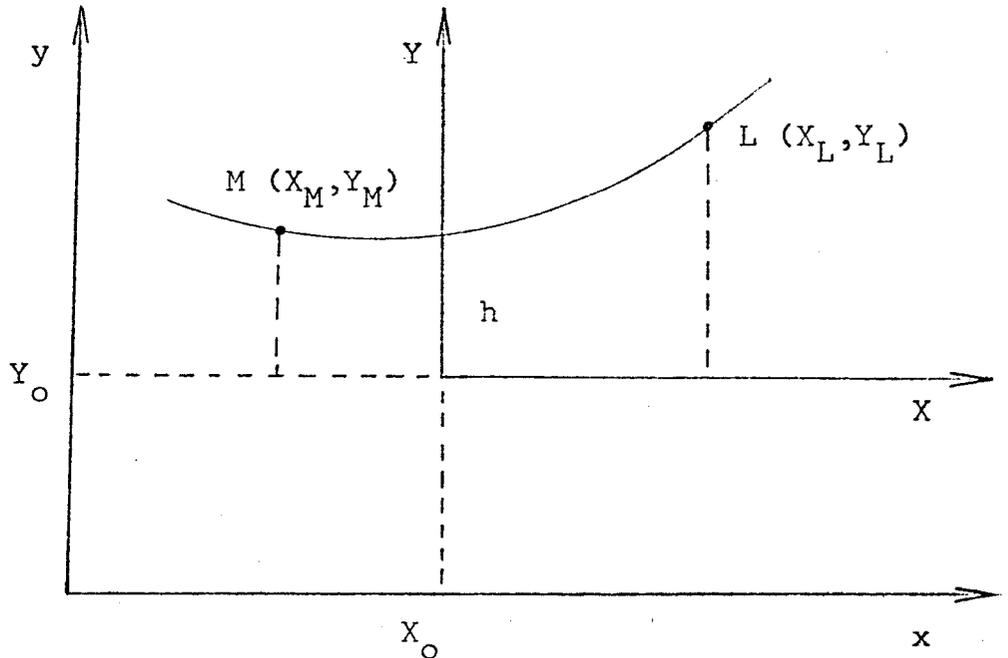
Cabo 4/0 ACSR

- Tração máxima admissível nas hipóteses A e B  
 $0,40 T_{ruptura} = 0,40 \times 3820 = 1528 \quad (\text{Kgf})$
- Tração máxima admissível na hipótese C  
 $0,25 T_{ruptura} = 0,25 \times 3820 = 955 \quad (\text{Kgf})$

Na curva do anexo 2 correspondente, verificamos que a hipótese C limita o vão equivalente mínimo à aproximadamente 130 metros.

O parâmetro na hipótese D será escolhido por tentativas de modo a não ultrapassar a tensão máxima admissível na hipótese C, considerando o vão equivalente do tramo.

1.7 - DETERMINAÇÃO DOS COEFICIENTES DA EQUAÇÃO DE EQUILÍBRIO



Para um sistema de coordenadas YX, passando pelo eixo de simetria da catenária, com  $Y = h$  para  $X = 0$ , a equação de equilíbrio do condutor pode ser aproximada por :

$$Y = h + \frac{X^2}{2h} \quad (1.9)$$

O levantamento topográfico do perfil do terreno fornece um conjunto de pontos relativos a um sistema de coordenadas yx. Escrevendo a equação (1.9) referida a este sistema de coordenadas :

$$y = \left( \frac{1}{2h} \right) x^2 - \left( \frac{X_0}{h} \right) x + \left( \frac{X_0^2}{2h} + Y_0 + h \right)$$

onde  $X_0$  e  $Y_0$  são determinados impondo-se a condição dos pontos M e L pertencerem à curva, resulta :

$$y = \left( \frac{1}{2h} \right) x^2 + \left( \frac{y_L - y_M}{x_L - x_M} - \frac{1}{2h} (x_L - x_M) \right) x$$
$$+ \left( \frac{1}{2h} x_L x_M + \frac{y_M x_L - y_L x_M}{x_L - x_M} \right)$$

(1.10)

## CAPÍTULO II

### DIMENSIONAMENTO ELETROMECAÂNICO DE ESTRUTURAS E SUPORTES

#### 2.1 - INTRODUÇÃO

Apresentamos as normas brasileiras para o dimensionamento eletromeecânico de estruturas e suportes de linhas de transmissão. As linhas de 69 KV, no Brasil, são em geral construídas com postes e estruturas de concreto do tipo triângulo canadense.

Os cálculos dos esforços são, nestes casos, muito simplificados e, dentro de certas hipóteses, podem ser eliminados do processo de locação.

#### 2.2 - HIPÓTESES DE CÁLCULO

A norma ABNT ( 2 ) estabelece em seu artigo 16:

"Cargas atuantes nos suportes

No projeto e cálculo dos suportes devem ser levadas em consideração as seguintes cargas :

Cargas Verticais :

- a) Componentes verticais dos esforços de tração dos cabos condutores e para-raios.
- b) Peso dos acessórios de fixação dos cabos (isoladores e ferragens ).
- c) Peso próprio do suporte e eventuais cargas verticais devido ao estaiamento.
- d) Sobrecargas de montagem, manutenção e/ou outras eventuais.

Cargas Horizontais Transversais

- a) Ação do vento sobre os cabos e respectivos a

cessórios de fixação.

- b) Ação do vento sobre o suporte, na direção normal à linha.
- c) Componentes horizontais transversais dos esforços de tração dos cabos e eventuais esforços horizontais introduzidos pelo estaiamento.

#### Cargas Horizontais Longitudinais

- a) Componentes horizontais longitudinais dos esforços de tração dos cabos e eventuais esforços introduzidos pelo estaiamento.
- b) Ação do vento sobre o suporte na direção da linha.

Todas as cargas devem ser consideradas agindo sobre o suporte nos pontos reais de aplicação. Entretanto, para simplificar o cálculo podem ser admitidas hipóteses aproximadas com relação aos esforços devidos ao peso próprio e à ação do vento sobre o suporte.

Na determinação das cargas atuantes nos suportes em ângulo, pode-se considerar o vento agindo na direção da bissetriz do ângulo, e no mesmo sentido da resultante dos esforços de tração dos condutores adjacentes ao suporte considerado. "

No que se refere às cargas verticais, cabe verificar se a componente dos esforços de tração dos cabos é dirigida para cima, na hipótese mais desfavorável de temperatura (Hipótese A). A escolha de um poste maior, a adoção de uma estrutura de amarração e o uso de contrapesos, são soluções a serem consideradas na ordem citada. Quando a componente dos esforços de tração dos cabos é dirigida para baixo, a compressão máxima admissível para a estrutura e o poste deve ser respeitada.

As cargas horizontais transversais são calculadas para a velocidade do vento máximo de 130 Km/h. O cálculo da pressão do vento sobre superfícies planas e sobre cabos visto no capítulo I, é objeto do artigo 11 da norma ABNT ( 2 ).

A componente horizontal longitudinal dos esforços de tração dos cabos é calculada para a hipótese mais desfavorável ( Hipótese A ou B ). Considera-se que estes esforços se anulam quando a estrutura é de suspensão, devido ao deslocamento da cadeia de isoladores. Para suportes em ângulos, a resultante destes esforços se soma a ação do vento máximo sobre os cabos, suportes e acessórios de fixação de acordo com a norma ABNT ( 2 ).

Resumimos o método de verificação das cargas atuantes nos suportes e estruturas como se segue :

a) Suportes em Alinhamento

O esforço horizontal transversal  $W_v$ , devido à ação do vento máximo sobre um cabo, expresso em quilogramas força por metro de comprimento :

$$W_v = 0,0045 V^2 \alpha D$$

V = velocidade do vento máximo em Km/h

$\alpha$  = coeficiente de efetividade da pressão do vento ( 0,8 )

D = diâmetro do cabo em metros.

O vão a considerar para o cálculo da carga resultante é, em cada caso, a média aritmética dos vãos adjacentes ao suporte.

Ação do vento sobre o suporte e acessórios de fixação expressa em quilogramas força :

$$F_s = 0,0075 V^2 A$$

A = área da superfície plana oferecida pelo suporte e acessórios ( m<sup>2</sup> ) .

b) Suportes em Ângulo

Resultante, em quilogramas força, dos esforços de tração dos cabos adjacentes ao suporte considerado :

$$R_T = 2T \operatorname{sen} \frac{\delta}{2}$$

T = tração dos cabos na hipótese mais desfavorável ( Kgf )

$\delta$  = ângulo suplementar formado pelos vãos adjacentes  $a_1$  e  $a_2$  ( fig. 2 ) .

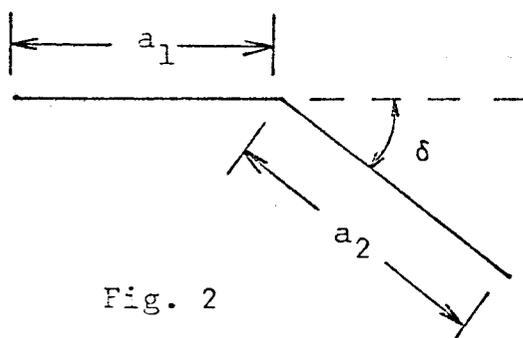


Fig. 2

À resultante  $R_T$ , soma-se o esforço resultante da ação do vento sobre os cabos, suporte e acessórios de fixação de acordo com as normas ABNT ( 2 ).

c) Suporte em Amarração

Considera-se a ação do vento sobre os cabos, suporte e acessórios de fixação e, a resultante da componente horizontal longitudinal de tração dos cabos.

Em fim de linha, o suporte de amarração deve ser previsto para a ruptura simultânea dos cabos de um mesmo lado, na hipótese mais

desfavorável de tração ( Hipótese A ou B ).  
Isto pode eventualmente ser considerado na  
determinação de suportes em amarração enqua-  
drando um vão excepcionalmente grande.

### 2.3 - COEFICIENTES DE SEGURANÇA

A norma ABNT ( 4 ) estabelece em seu artigo 2 :

Valor nominal de uma grandeza é o valor indicado  
para esta grandeza pelo fabricante.

Plano de aplicação dos esforços - plano trans  
versal, onde se aplicam os esforços definidos  
nesse capítulo e situado a 30 cm do topo.

Carga útil numa direção e sentido considerados  
- força contida no plano de aplicação das car-  
gas, na direção e sentido considerados, passan-  
do pelo eixo do poste, garantida pelo fabrican-  
te e que provocará na secção superior do engas-  
tamento momento fletor que não prejudique as  
qualidades do material.

Carga nominal - é a carga útil aplicada na direç  
ão e sentido do momento resistente máximo.

"Carga máxima permissível na direção e sentido  
considerados - igual a 1,65 vezes a carga útil  
ou nominal na direção e sentido considerados".

"A carga de ruptura não deve ser inferior a 2,4  
vezes a carga útil ou nominal na direção e sen-  
tido considerados ".

"Todos os postes devem apresentar, em qualquer  
direção e sentido uma carga útil no mínimo i-  
gual a 1/3 de sua carga nominal ".

Para os esforços normais, resultantes da aplicação das hipóteses de cálculo A ou B, o poste deve ser dimensionado de acordo com a sua carga nominal. O coeficiente de segurança, fixado a partir da carga de ruptura, sendo maior ou igual a 2,4.

Para a hipótese de ruptura dos cabos, é usual tomar um coeficiente de segurança de  $2,4/1,65 \approx 1,45$ , fixado também a partir da carga de ruptura.

As estruturas devem apresentar o mesmo coeficiente de segurança para os esforços normais. Elas não são normalmente previstas para a hipótese de ruptura dos cabos, salvo em fim de linha ou enquadramento de vãos excepcionalmente grandes.

#### 2.4 - DIMENSIONAMENTO GEOMÉTRICO DOS SUPORTES

A norma ABNT ( 2 ) estabelece em seu artigo 3 :

Distância de partes vivas às partes aterradas dos suportes.

Nas linhas com isoladores de suspensão, as distâncias mínimas, em metros, na condição de máximo deslocamento, dos condutores e seus acessórios sob tensão ( ferragens, chifres, anéis de proteção etc. ) às partes aterradas dos suportes são calculadas pela fórmula :

$$D = 0,06 + 0,006 D_U$$

sendo  $D_U$  a distância, em metros, numericamente igual à tensão nominal da linha, em quilovolts.

#### Distância entre os condutores no suporte

Nos suportes com cadeias de ancoragem, as distâncias mínimas, em metros, entre os condutores na condição de trabalho de maior duração, são

verificadas pelas fórmulas :

a) Para cabos de secção nominal menor que 34 mm<sup>2</sup>

$$D_F = \frac{D_U}{130} + 0,175 \sqrt{13f - 8}$$

Com um mínimo de  $D_F = 0,40$  m

b) Para cabos de secção maior ou igual a 34 mm<sup>2</sup>

$$D_F = \frac{D_U}{130} + 0,200 \sqrt{13f}$$

sendo :

$D_F$  = Distância entre os condutores no suporte, em metros;

$D_U$  = Distância, em metros, numericamente igual à tensão nominal da linha, em quilovolts;

$f$  = Flecha do condutor de maior flecha, na condição de trabalho de maior duração.

Nos suportes com cadeia de suspensão, as distâncias horizontais mínimas calculadas pelo item anterior deverão ser mantidas, considerando -se uma das cadeias deslocada em direção à outra, na condição de máximo deslocamento, estando esta última na sua posição de repouso.

Portanto, para linhas de 69 KV a distância mínima de partes vivas às partes aterradas dos suportes é de 0,474m.

Esta distância deve ser respeitada na condição de máximo deslocamento das cadeias de isoladores, ou seja, correspondente à aplicação da hipótese B.

De acordo com a norma ABNT ( 2 ) a distância entre os condutores nos pontos de fixação aos suportes é calculada para a hipótese C.

## 2.5 - ESCOLHA DAS ESTRUTURAS

As estruturas são determinadas pela sua configuração geométrica e esforços admissíveis. As estruturas em concreto usadas em linhas de 69 KV podem ser classificadas como segue ( ver anexo 3 ) :

### Estrutura de Suspensão

A disposição em triângulo canadense é típica para a suspensão em alinhamento. A distância mínima entre fases pode ser estimada supondo um vão máximo e uma tração mínima na hipótese C. Seja o vão máximo de 250 m e a tração mínima de 15% da tração de ruptura para o cabo 4/0 ;

$$T = 0,15 \times 3820 = 573 \text{ Kgf}$$

a flecha neste caso será ( 3 ) :

$$f = \frac{w a^2}{8 T}$$
$$= \frac{0,432 \times 250^2}{8 \times 573}$$

$$\cong 5,9 \text{ m}$$

$$D_F = \frac{D_U}{130} + 0,2 \sqrt{13f} + L$$

$$D_F = \frac{69}{130} + 0,2 \sqrt{13 \times 5,9} + 1,3$$

$$D_F \cong 3,58 \text{ m}$$

portanto, menor que a distância mostrada na figura correspondente do anexo 3 . L é o comprimento da cadeia de isoladores.

### Estrutura Para Pequenos Ângulos ou Amarração Em Alinhamento

Pode ser usada a disposição triângulo canadense ou uma outra disposição em triângulo, ambas previstas para amarração. A distância mínima entre fases, para um vão máximo de 300 metros e tração na hipótese C de, no mínimo, 15% da tração de ruptura é neste caso, 2,6 metros.

### Estruturas de Grandes Ângulos

Suporta o esforço resultante da tração dos cabos na hipótese mais desfavorável, somado ao esforço do vento.

Por isto, deve ser prevista para um ou dois postes, dependendo do esforço calculado. A distância mínima entre fases é a correspondente a uma estrutura de amarração.

### Estrutura Terminal

Deve suportar o esforço resultante da aplicação da hipótese mais desfavorável com todos os cabos rompidos de um mesmo lado. A este esforço se soma o esforço do vento. Prevista para dois ou quatro postes dependendo do esforço resultante.

Todas as estruturas devem permitir um ângulo máximo de cobertura do cabo guarda fixado em  $30^{\circ}$  com a vertical.

## 2.6 - DIMENSIONAMENTO DOS POSTES

Para ilustrar a técnica de alocação econômica de postes em linhas de transmissão, adotaremos, num projeto de 69 KV, postes e estruturas de concreto do tipo triângulo canadense.

Este tipo de estrutura provoca um aproveitamento ruim da altura dos postes. Aos preços do mercado, a linha de mínimo custo usa postes de um comprimento tal que o seu esforço nominal não é ultrapassado (esforço devido ao vento na hipótese B) .

A estrutura de alinhamento, conforme verificamos acima, pode enquadrar vãos de até 250 metros, que muito raramente ocorrem.

O algoritmo desenvolvido especialmente para este tipo de projeto pode, no entanto, ser facilmente adaptado para levar em conta os esforços transversais devido ao vento na hipótese B, bem como detectar violação da distância entre condutores.

## CAPÍTULO III

### ALGORITMO DE ALOCAÇÃO

#### 3.1 - INTRODUÇÃO

A referência ( 5 ) focaliza a alocação econômica de torres em linhas de transmissão, usando programação dinâmica. O algoritmo que foi desenvolvido pode ser entendido através desta abordagem mais geral.

O método da programação dinâmica garante a solução ótima; o algoritmo proposto encontra uma solução sub-ótima com um tempo de processamento reduzido.

#### 3.2 - PROGRAMAÇÃO DINÂMICA

O levantamento topográfico do caminho resulta num conjunto de pontos, perfil da linha, dados pelas abcissas (x) e as alturas (y(x)) em relação a um dado referencial ( fig. 3-1.a ).

O ponto inicial  $x_0$  e o final  $x_K$  da linha são fixados. São, por exemplo, saídas de subestações, pontos de ângulo, de interligações, etc.

É necessário localizar no perfil as regiões onde não se é possível colocar uma torre; cruzamentos com estradas, rios, etc.

Vamos supor que existem  $K - 1$  pontos, entre  $x_0$  e  $x_K$ , onde se é possível localizar uma torre ( fig. 3-1.b ).

Sejam  $m$  diferentes tipos de torres, cada uma caracterizada pela altura, esforço nominal e distância entre condutores nos pontos de fixação. São conhecidos os custos de cada torre, bem como o custo de sua instalação, que pode depender da localização no perfil da linha.

Uma torre do tipo  $j$  localizada no ponto  $x_k$  é representada por  $T_{jk}$ . Sejam dois pontos  $x_k$  e  $x_r$  com  $r < k$ . Se uma torre  $j$  é colocada em  $x_k$ , pode ou não ser possível localizar uma torre adjacente  $T_{ir}$ . É possível lançar um vão entre  $T_{ir}$  e  $T_{jk}$  se

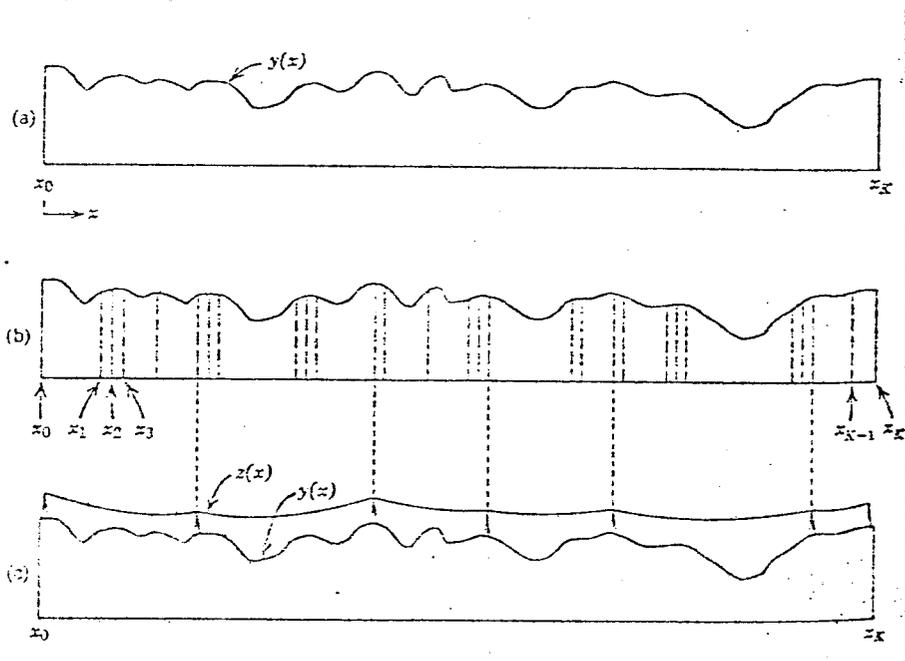


Fig. 3-1 Perfil da linha de transmissão

as seguintes condições são simultaneamente satisfeitas:

- 1) É possível localar  $T_{ir}$
- 2) A diferença entre a altura do condutor  $z(x)$  e o perfil  $y(x)$  seja maior ou igual à distância mínima fixada pelas normas.
- 3) A distância entre os condutores e os esforços mecânicos na torre não violam os coeficientes de segurança.

A condição 3 só pode ser verificada com o conhecimento dos dois vãos adjacentes à torre. No entanto, para linhas de 69 KV com estruturas do tipo triângulo canadense e postes de concreto, esta condição é em geral satisfeita.

Para cada  $T_{jK}$  possível, existe um conjunto  $S_{jK}$  de elementos  $T_{ir}$  possíveis, com as seguintes propriedades:

- 1)  $0 \leq r \leq K \leq K$
- 2)  $T_{ir}$  é possível
- 3) A diferença entre a altura do condutor e o perfil para  $x_r \leq x \leq x_K$ , é maior ou igual à distância mínima fixada pelas normas.

O conjunto  $S_{jK}$  de elementos  $T_{ir}$  se situa à es-  
da de  $x_K$  e contém todas as soluções possíveis para se chegar a  
 $T_{jK}$ . O objetivo do projeto é construir uma linha de custo mínimo  
entre  $x_0$  e  $x_K$ , satisfazendo as condições de carga e distância de  
segurança.

Seja  $f(T_{jK})$  o custo da locação de uma torre  $j$   
em  $x_K$ , e seja  $F(T_{jK})$  o custo mínimo da linha que inicia em  $x_0$  e  
e finaliza em  $x_K$ , dado que se use uma torre  $j$  em  $x_K$ .

Consideremos a solução "forward". Naturalmente,  
 $F(T_{j0}) = f(T_{j0})$ ; para  $F(T_{j1})$  tem-se:

$$F(T_{j1}) = \text{mínimo} ( f(T_{j1}) + f(T_{i0}) )$$
$$T_{i0} \in S_{j1}$$

$$F(T_{j1}) = f(T_{j1}) + \min ( f(T_{i0}) )$$
$$T_{i0} \in S_{j1}$$

Se houvéssemos fixado o tipo de torre em  $x_0$ ,  
 $T_{v0}$ , o conjunto  $S_{j1}$  teria, no máximo, um elemento  $T_{v0}$ . O custo  
mínimo  $F(T_{j2})$  pode ser visto como consistindo de duas parcelas :  
um custo fixo  $f(T_{j2})$  para local a torre  $j$  em  $x_2$  e, um custo acu-  
mulado das torres locadas até  $x_2$ , excluída a torre  $T_{j2}$ .

Seja o conjunto  $S_{j2}$  de elementos  $T_{ir}$ , para  $r=0$ ,  
1 e para  $i=1,2,\dots,m$ . Um elemento deste conjunto  $\hat{T}(T_{j2})$  se liga  
a  $T_{j2}$  com um custo mínimo  $F(T_{j2})$ . A condição para a determinação  
de  $F(T_{j2})$  é, portanto,

$$F(T_{j2}) = f(T_{j2}) + F ( \hat{T}(T_{j2}) ) \leq$$

$$f(T_{j2}) + F(T_{ir})$$

para todo  $T_{ir}$  contido em  $S_{j2}$ , o que equivale à :

$$F(T_{j2}) = f(T_{j2}) + \min F(T_{ir})$$
$$T_{ir} \in S_{j2}$$

Em geral, tem-se a relação de recorrência :

$$F(T_{jK}) = f(T_{jK}) + \min_{T_{ir} \in S_{jK}} F(T_{ir}) \quad (3.1)$$

$$K = 1, 2, \dots, K$$

### 3.3 - ALGORITMO PROPOSTO

O cálculo de  $F(T_{jK})$  da relação ( 3.1 ) obriga a um número de comparações iguais à  $N(S_{jK})$  de elementos contidos em  $S_{jK}$ .

No estágio K este número de comparações é :  $\sum_{j=1}^m N(S_{jK})$ . O número total de comparações é :

$$N_T = \sum_{K=1}^K \sum_{j=1}^m N(S_{jK})$$

Por exemplo, se em média  $N(S_{jK}) = 50 m$ , então  $N_T = 50 K m^2$  e, se  $K = 2000$  e  $m = 5$ , teremos  $N_T = 50 \times 2000 \times 25 = 25 \times 10^5$  comparações.

Para reduzir o tempo de processamento, desenvolveu-se um algoritmo que difere do exposto na determinação de  $S_{jK}$ ; para cada  $T_{jK}$  possível, existe um conjunto  $S_{jK}$  de elementos  $T_{ir}$  possíveis, com as seguintes propriedades:

- 1)  $0 \leq r \leq K \leq K$
- 2)  $T_{ir}$  é possível
- 3) A diferença entre a altura do condutor e o perfil para  $x_r \leq x \leq x_K$ , é igual à distância mínima fixada pelas normas.

Desta maneira  $N(S_{jK}) = m$  e, com os dados acima  $N_T = K m^2 = 5 \times 10^4$ , o que reduz consideravelmente o número de operações a efetuar.

### 3.4 - DESCRIÇÃO DO PROGRAMA DE SIMULAÇÃO

Consiste basicamente de um programa principal e de várias subrotinas especiais.

O programa principal controla as subrotinas de modo a considerar as diversas combinações de alturas de postes, garante a distância de segurança, armazena pontos locados, associando-lhes a diferença inteira entre as abcissas de locação e a abcissa inicial de referência ( tolerância de um metro ).

Para pontos coincidentes, faz-se a opção pela alternativa que apresente menor custo por quilômetro locado.

Dá-se a seguir uma breve descrição das subrotinas desenvolvidas especialmente para o programa.

#### Subrotina LOOP

Esta subrotina procura localizar o vão no perfil. Este consiste obviamente de pontos discretos e quando se lança um vão de magnitude máxima permitida, a partir de uma estrutura já locada, pesquisa-se sua extremidade.

#### Subrotina RETA

Esta subrotina determina a equação de reta por dois pontos (aproximação linear) quando do lançamento do vão, pela não coincidência com pontos levantados no perfil.

Obtém-se como saída a abcissa e a ordenada do ponto extremo do vão lançado, entre dois do perfil.

#### Subrotina PARAB

Através desta subrotina é que se determina a equação da parábola por dois pontos (aproximação parabólica para a curva descrita pelo condutor) na forma  $y = A x^2 + B x + C$  onde os coeficientes B e C são calculados e o A, função das características do condutor, é um dado de entrada.

#### Subrotina DIST

Esta subrotina calcula a distância parábola perfil para cada ponto dentro da região coberta pelo vão máximo e

guarda a menor delas. O deslocamento é feito no sentido estrutura móvel à fixa (caminha-se em direção à origem) até que se consiga a distância de segurança normalizada.

#### Subrotina LOCA

Caracterizada a locação do poste de menor altura e determinada a equação parabólica, tenta-se posicionar as  $m-1$  outras alturas de postes restantes, entre esta mesma curva parabólica e os pontos do perfil, assegurando-se com isso a distância de segurança.

Obtêm-se como saída as abcissas e ordenadas dos  $m-1$  postes locados.

Na impossibilidade de se ajustar alturas entre a parábola e os pontos do perfil devido a restrições, persistirá a abcissa da locação anterior e a ordenada correspondente à opção menor custo.

### 3.5 - INFORMAÇÕES BÁSICAS PARA O PROJETO

O perfil por onde passará a linha de transmissão deve conter todas as restrições do traçado (ferrovias, rodovias, rios, cruzamentos com outras linhas, pontos de ângulos, etc) já que constituem a base para a computação da distância de segurança e a locação propriamente dita.

Os espaçamentos entre pontos do perfil variam segundo as características do terreno; geralmente uma distância maior entre pontos para perfis planos e relativamente próximos para perfis acidentados, de tal modo que a distância de segurança seja mantida bastante próxima dos valores normalizados.

Para áreas onde estruturas não podem ser locadas, os pontos correspondentes são abaixados artificialmente de pelo menos 50 metros (constantes do perfil).

### 3.6 - EXECUÇÃO DO PROGRAMA

Com o perfil caracterizado, armazenam-se os dados iniciais do projeto: abcissa, ordenada, a magnitude do vão máximo de lançamento, as demais alturas disponíveis e os custos estimados correspondentes.

Com o parâmetro  $h$  definido, tem início a locação propriamente dita, dos postes no terreno.

Lança-se o vão máximo a partir de uma estrutura inicial fixa e a subrotina LOOP se encarrega de localizar seu valor extremo entre os pontos do perfil. Em caso de não coincidência (ocorrência normal), dispõe-se da subrotina RETA para ajustar a posição do ponto de locação entre dois do perfil.

Caracterizado o ponto (abscissa e ordenada), adiciona-se a primeira altura de poste à ordenada correspondente.

A subrotina PARAB é então chamada para a obtenção da equação parabólica para o condutor (coeficiente  $A$  conhecido).

As distâncias de segurança são agora testadas e armazenadas pela subrotina DIST, para os pontos do perfil internos ao vão lançado e no sentido estrutura móvel à fixa. O ponto final de locação será obtido quando a menor das distâncias de segurança armazenada no trecho (DMIN) satisfizer aos valores normalizados.

Isto posto, reinicializa-se o processo com novo lançamento a partir do primeiro poste locado, obtendo-se novas locações e assim sucessivamente.

A medida que os postes vão sendo posicionados, associa-se aos pontos de locação, uma numeração inteira (tolerância de um metro na locação); associação feita mediante a diferença (inteira) entre a abscissa de locação propriamente dita e a abscissa inicial de referência.

Ocorrendo coincidências (pontos locados na mesma posição), faz-se a opção pela alternativa que apresente menor custo e o processo segue normalmente.

No final do trecho proposto, calcula-se o custo final como a razão do custo total das alturas pelo vão equivalente e faz-se a reconstituição do caminho ótimo.

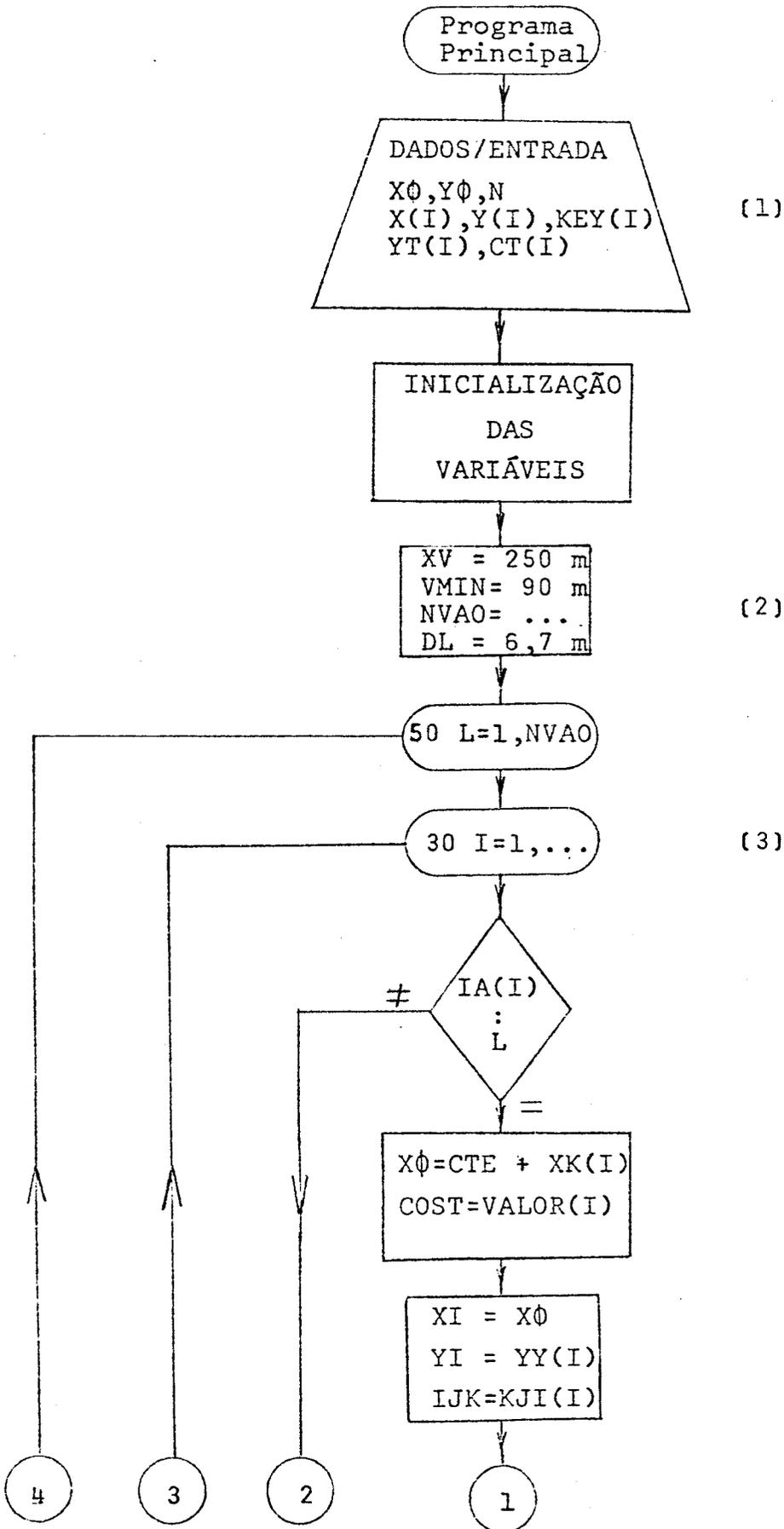
### 3.7 - APLICAÇÕES E PERSPECTIVAS DO PROGRAMA

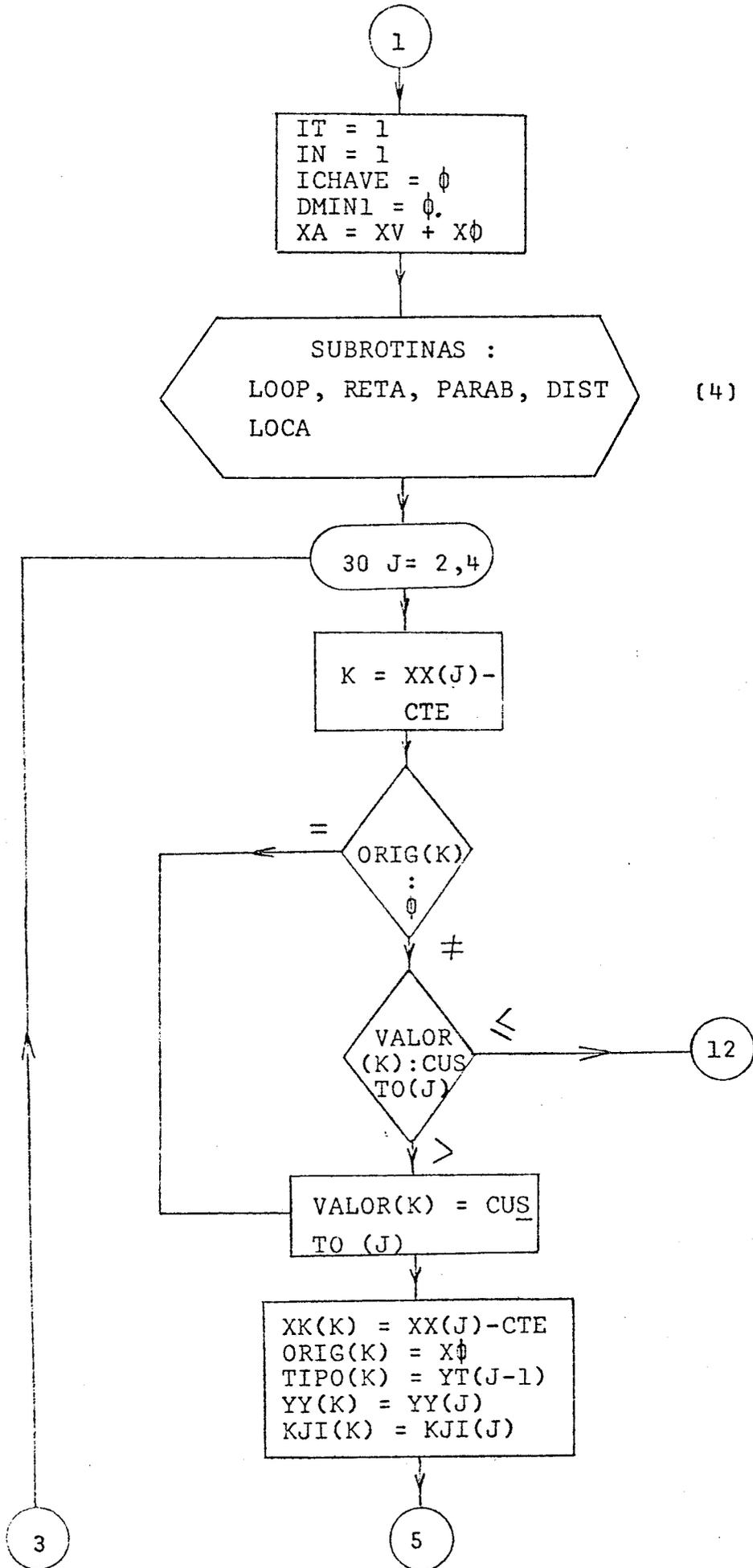
Utilizou-se apenas tres alturas mas o programa pode considerar um maior número delas.

Embora não se considerou pontos de locação obrigatória (ângulos, etc), estes são facilmente introduzidos no programa, assim como o cálculo dos esforços nas estruturas já abordados anteriormente.

A maior ou menor extensão do trecho a ser locado varia segundo a disponibilidade de memória de computador.

3.8 - DIAGRAMA DE BLOCO SIMPLIFICADO





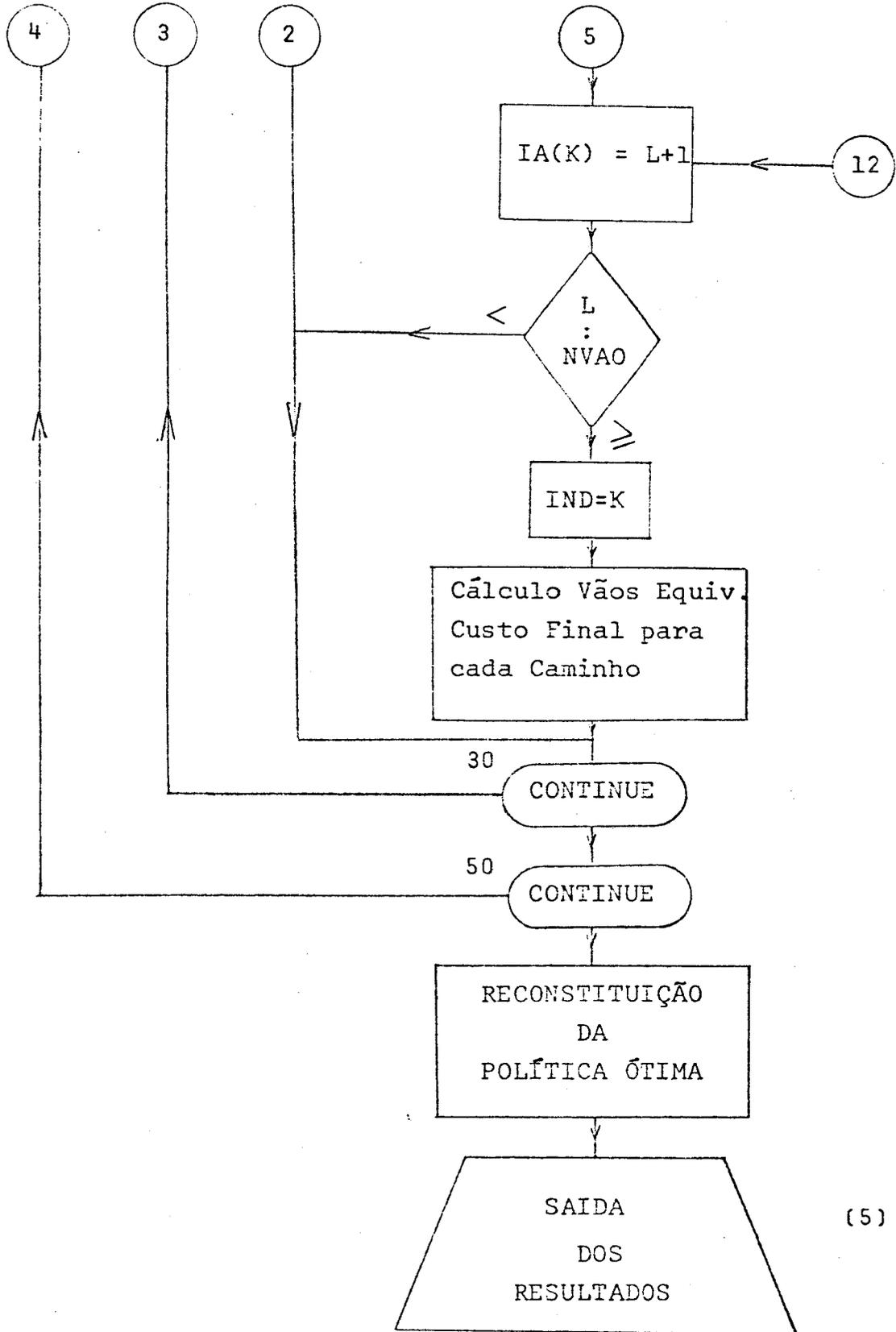


DIAGRAMA DE BLOCO SIMPLIFICADO

- (1) - Leitura dos dados de entrada: abcissa e ordenada iniciais, número de pontos do perfil, pontos do perfil (abcissas, ordenadas e variável de controle para possíveis restrições), valores líquidos das alturas e custos estimados correspondentes.
- (2) Vão Máximo, vão mínimo, número de vãos e distância de segurança (condutor-perfil).
- (3) Limites de pontos do perfil (trecho)
- (4) Obtém-se como saída normal: 3 abcissas, 3 ordenadas, 3 alturas e os custos correspondentes.
- (5) Obtém-se como saída final: caminho, abcissas, ordenadas, alturas e vãos de locação, vão equivalente, custo final etc.

## CAPÍTULO IV

### RESULTADOS E CONCLUSÕES

#### 4.1 - INTRODUÇÃO

Usaremos dois tipos de perfis para ilustrar o algoritmo de otimização proposto.

O perfil I (fig. 4.1) corresponde a um caminho, em geral plano, de 1500 metros. O perfil II (fig. 4.2) foi idealizado para demonstrar as vantagens do algoritmo de programação dinâmica (11); caminho muito acidentado de 865 metros.

As linhas projetadas partem todas do ponto de abscissa 1 metro e chegam numa faixa entre 5 metros antes do final do trecho e o final. A distância mínima ao solo foi fixada em 6,7 metros e os parâmetros utilizados foram 1100 e 1200 metros.

As hipóteses de cálculo para o condutor 4/0 estão indicadas no item 1.5 e as curvas de tração x vão equivalente estão no anexo 2.

A discretização do perfil é de 1 metro e para o cálculo da distância condutor-perfil é de 10 metros.

Usaremos 3 alturas de postes: 14, 16 e 18 metros. Com a estrutura de alinhamento do anexo 3, o ponto de suspensão do condutor mais baixo fixa, respectivamente, a 6.49, 8.29 e 10.09 metros do solo.

Os preços correspondentes foram estimados em ... Cr\$ 2500,00, Cr\$ 5500,00 e Cr\$ 8500,00.

#### 4.2 - ANÁLISE DO PERFIL I

##### 4.2.1 - Comparação com a solução ótima

As tabelas 1 e 2 mostram a linha projetada através do algoritmo proposto e da programação dinâmica, para o parâmetro 1100. O custo mínimo coincide em Cr\$ 75000,00. O vão equivalente vale aproximadamente 139 metros.

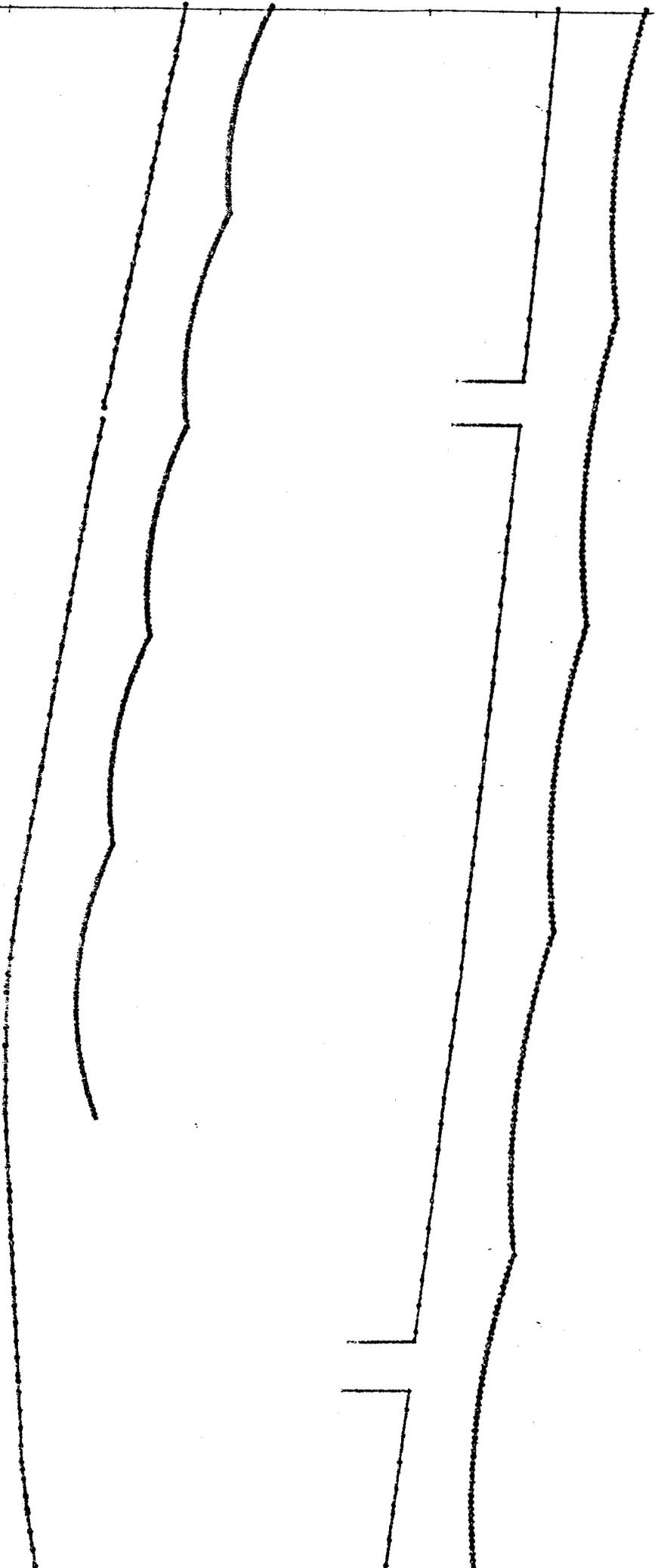


Fig. 4.1 - Perfil I  
Parâmetro 1200  
Algoritmo Proposto

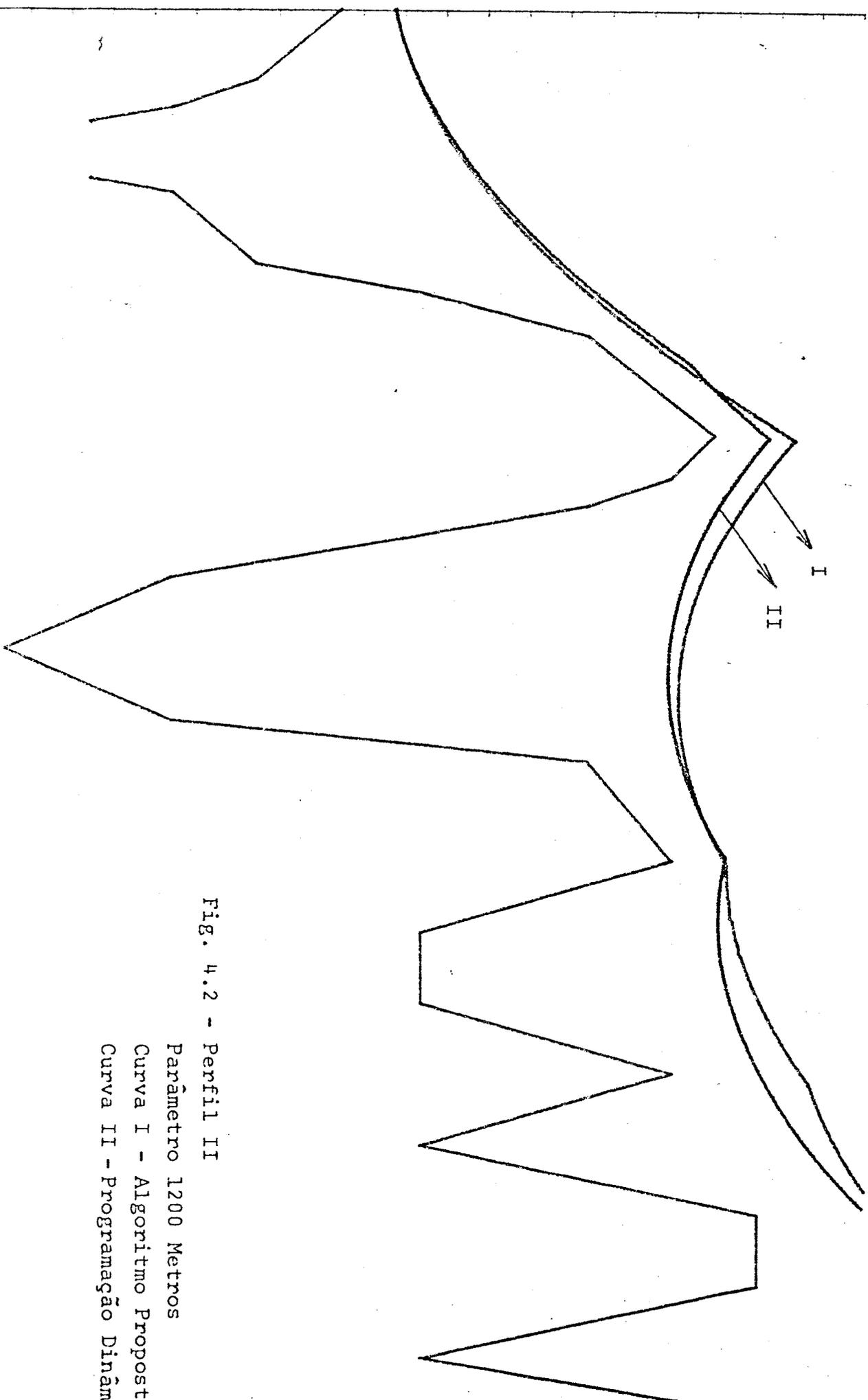


Fig. 4.2 - Perfil II  
Parâmetro 1200 Metros  
Curva I - Algoritmo Propost  
Curva II - Programação Dinâm

TABELA 1

ALGORITMO PROPOSTO

<u>CUSTO MÍNIMO</u>	-	Cr\$ 75000,00
<u>PARÂMETRO</u>	-	1100 METROS
<u>VÃO EQUIVALENTE</u>	-	139,20 METROS

<u>ABCISSA</u> ( m )	<u>ALTURA</u> (tipo)	<u>ABCISSA</u> ( m )	<u>ALTURA</u> (tipo)	<u>VÃO</u> ( m )
1	2	117	2	116
117	2	233	2	116
233	2	349	2	116
349	2	494	3	145
494	3	640	2	146
640	2	758	2	118
758	2	906	3	148
906	3	1054	2	148
1054	2	1221	3	167
1221	3	1367	2	146
1367	2	1498	2	131

TABELA 2

PROGRAMAÇÃO DINÂMICA

<u>CUSTO MÍNIMO</u>	-	Cr\$ 75000,00
<u>PARÂMETRO</u>	-	1100 METROS
<u>VÃO EQUIVALENTE</u>	-	138,70 METROS

<u>ABCISSA</u> ( m )	<u>ALTURA</u> (tipo)	<u>ABCISSA</u> ( m )	<u>ALTURA</u> (tipo)	<u>VÃO</u> ( m )
1	2	117	2	116
117	2	233	2	116
233	2	349	2	116
349	2	493	3	144
493	3	639	2	146
639	2	757	2	118
757	2	905	3	148
905	3	1053	2	148
1053	2	1187	2	134
1187	2	1339	3	152
1339	3	1497	2	158

Do anexo 2, curva de parâmetro 1100, verificamos as trações segundo as hipóteses de cálculo A, B e C.

Hipótese	Tração ( Kgf )	Tração Máx. Permitida ( Kgf )	% Tração Máx. Perm. ( % )
A	1070	1528	70
B	1260	1528	82
C	815	955	85

As tabelas 3 e 4 mostram a linha projetada com parâmetro 1200. O custo mínimo coincide em Cr\$ 71500,00. O vão equivalente vale aproximadamente 126 metros.

TABELA 3

ALGORITMO PROPOSTO

CUSTO MÍNIMO - Cr\$ 71500,00  
PARÂMETRO - 1200 METROS  
VÃO EQUIVALENTE - 126,30 METROS

<u>ABCISSA</u> ( m )	<u>ALTURA</u> (tipo)	<u>ABCISSA</u> ( m )	<u>ALTURA</u> (tipo)	<u>VÃO</u> ( m )
1	2	122	2	121
122	2	244	2	122
244	2	366	2	122
366	2	492	2	126
492	2	596	2	104
596	2	720	2	124
720	2	845	2	125
845	2	968	2	123
968	2	1090	2	122
1090	2	1241	2	151
1241	2	1363	2	122
1363	2	1500	2	137

TABELA 4

PROGRAMAÇÃO DINÂMICA

<u>CUSTO MÍNIMO</u>	-	Cr\$ 71500,00
<u>PARÂMETRO</u>	-	1200 METROS
<u>VÃO EQUIVALENTE</u>	-	125,80 METROS

<u>ABCISSA</u> ( m )	<u>ALTURA</u> (tipo)	<u>ABCISSA</u> ( m )	<u>ALTURA</u> (tipo)	<u>VÃO</u> ( m )
1	2	121	2	120
121	2	243	2	122
243	2	365	2	122
365	2	491	2	126
491	2	595	2	104
595	2	719	2	124
719	2	843	2	124
843	2	965	2	122
965	2	1087	2	122
1087	2	1237	2	150
1237	2	1359	2	122
1359	2	1495	2	136

Do anexo 2, curva de parâmetro 1200, verificamos as trações segundo as hipóteses de cálculo A, B e C.

Hipótese	Tração ( Kgf )	Tração Máx. Permitida ( Kgf )	% Tração Máx.Perm. ( % )
A	1280	1528	84
B	1360	1528	89
C	955	955	100

4.2.2 - Sensibilidade do Custo para Variações da Distância Mínima ao Solo

Fixando a distância mínima ao solo em 6,6 metros obtemos através do algoritmo proposto, os resultados evidenciados nas tabelas 5 e 6.

TABELA 5

ALGORITMO PROPOSTO

CUSTO MÍNIMO - Cr\$ 75000,00  
PARÂMETRO - 1100 METROS  
VÃO EQUIVALENTE - 143,70 METROS

<u>ABCISSA</u> ( m )	<u>ALTURA</u> (tipo)	<u>ABCISSA</u> ( m )	<u>ALTURA</u> (tipo)	<u>VÃO</u> ( m )
1	2	145	3	144
145	3	317	3	172
317	3	463	2	146
463	2	565	2	102
565	2	684	2	119
684	2	805	2	121
805	2	930	2	125
930	2	1055	2	125
1055	2	1225	3	170
1225	3	1401	3	176
1401	3	1500	1	99

TABELA 6

ALGORITMO PROPOSTO

<u>CUSTO MÍNIMO</u>	-	Cr\$ 72000,00
<u>PARÂMETRO</u>	-	1200 METROS
<u>VÃO EQUIVALENTE</u>	-	139,10 METROS

<u>ABCISSA</u> ( m )	<u>ALTURA</u> (tipo)	<u>ABCISSA</u> ( m )	<u>ALTURA</u> (tipo)	<u>VÃO</u> ( m )
1	2	145	3	144
145	3	297	2	152
297	2	447	3	150
447	3	583	2	136
583	2	709	2	126
709	2	838	2	129
838	2	965	2	127
965	2	1091	2	126
1091	2	1246	2	155
1246	2	1401	3	155
1401	3	1500	1	99

Comparando a tabela 1 com a 5 e a tabela 3 com a 6, verificamos que o custo é pouco sensível às pequenas variações na distância mínima ao solo.

O aumento do parâmetro acarreta uma diminuição do custo. O parâmetro ótimo (1200 metros) é, neste caso, aquele que conduz a uma utilização plena da resistência mecânica do condutor. A hipótese C é a condicionante.

As tabelas 1 e 3 mostram uma variação de 4,7% no custo e de 15% na tração, hipótese C, para uma variação de 9,1% no parâmetro.

#### 4.3 - ANÁLISE DO PERFIL II

##### 4.3.1 - Comparação com a Solução Ótima

As tabelas 7 e 8 mostram a linha projetada para o parâmetro 1100 metros. O custo mínimo é 12% menor que o encontrado.

TABELA 7

##### ALGORITMO PROPOSTO

CUSTO MÍNIMO - Cr\$ 21500,00  
PARÂMETRO - 1100 METROS  
VÃO EQUIVALENTE - 262,00 METROS

<u>ABCISSA</u> ( m )	<u>ALTURA</u> (tipo)	<u>ABCISSA</u> ( m )	<u>ALTURA</u> (tipo)	<u>VÃO</u> ( m )
1	1	296	3	295
296	3	601	1	305
601	1	759	1	158
759	1	865	2	106

TABELA 8

##### PROGRAMAÇÃO DINÂMICA

CUSTO MÍNIMO - Cr\$ 19000,00  
PARÂMETRO - 1100 METROS  
VÃO EQUIVALENTE - 289,00 METROS

<u>ABCISSA</u> ( m )	<u>ALTURA</u> (tipo)	<u>ABCISSA</u> ( m )	<u>ALTURA</u> (tipo)	<u>VÃO</u> ( m )
1	1	295	3	294
295	3	597	1	302
597	1	865	2	268

Para parâmetro 1200, as tabelas 9 e 10 mostram u ma diferença de 26% no custo.

TABELA 9

ALGORITMO PROPOSTO

CUSTO MÍNIMO - Cr\$ 21000,00  
PARÂMETRO - 1200 METROS  
VÃO EQUIVALENTE - 230,00 METROS

<u>ABCISSA</u> ( m )	<u>ALTURA</u> (tipo)	<u>ABCISSA</u> ( m )	<u>ALTURA</u> (tipo)	<u>VÃO</u> ( m )
1	1	240	1	239
240	1	303	3	63
303	3	602	1	299
602	1	758	1	156
758	1	860	1	102

TABELA 10

PROGRAMAÇÃO DINÂMICA

CUSTO MÍNIMO - Cr\$ 15500,00  
PARÂMETRO - 1200 METROS  
VÃO EQUIVALENTE - 267,00 METROS

<u>ABCISSA</u> ( m )	<u>ALTURA</u> (tipo)	<u>ABCISSA</u> ( m )	<u>ALTURA</u> (tipo)	<u>VÃO</u> ( m )
1	1	249	2	248
249	2	301	1	52
301	1	597	1	296
597	1	865	1	268

Portanto, com um perfil muito acidentado, o algoritmo proposto é ineficiente para determinar o ótimo. O pequeno comprimento do trecho projetado também contribue para acentuar a diferença no custo.

Para este tipo de perfil a tração máxima no condutor não é ultrapassada. O limite para o vão máximo provém do esforço resultante no poste e do espaçamento da estrutura.

#### 4.4 - CONCLUSÕES

As soluções encontradas com o algoritmo proposto se aproximam tanto mais da solução ótima, quanto mais regular for o perfil e a linha longa.

Nestes casos, o vão máximo permitido para a estrutura e para o poste não é, em geral, ultrapassado. O parâmetro é ajustado visando a utilização plena da tração máxima permitida para os condutores.

Para este ajuste de parâmetro, o algoritmo é muito eficiente; realiza um projeto tal qual o do perfil I, em 40 segundos de CPU, enquanto o da programação dinâmica exige 3 minutos.

Para perfis acidentados e de pequeno comprimento o algoritmo proposto fornece soluções que demarcam no terreno, os limites por onde deve passar a solução ótima ( fig.4.2 ).

Pode se notar que estes pontos possibilitam estreitar a faixa de procura da solução ótima. O ajuste inicial do parâmetro através do algoritmo, fornece as faixas de terreno por onde provavelmente passará a solução ótima.

O tempo necessário para a determinação da solução ótima, a partir destas faixas, é somente uma pequena parcela do que seria necessário. No caso do perfil II, com as faixas 230-310, 590-610 e 740-760, ou seja, um total de 103 pontos, a economia em tempo de processamento seria de 86% pois, normalmente deveríamos procurar em aproximadamente, 750 pontos.

ANEXO 1

Características Mecânicas do Cabo 4/0 AWG em Alumínio com Alma de Aço.

Formação : 6/1

Área da secção transversal : 125,1 mm<sup>2</sup>

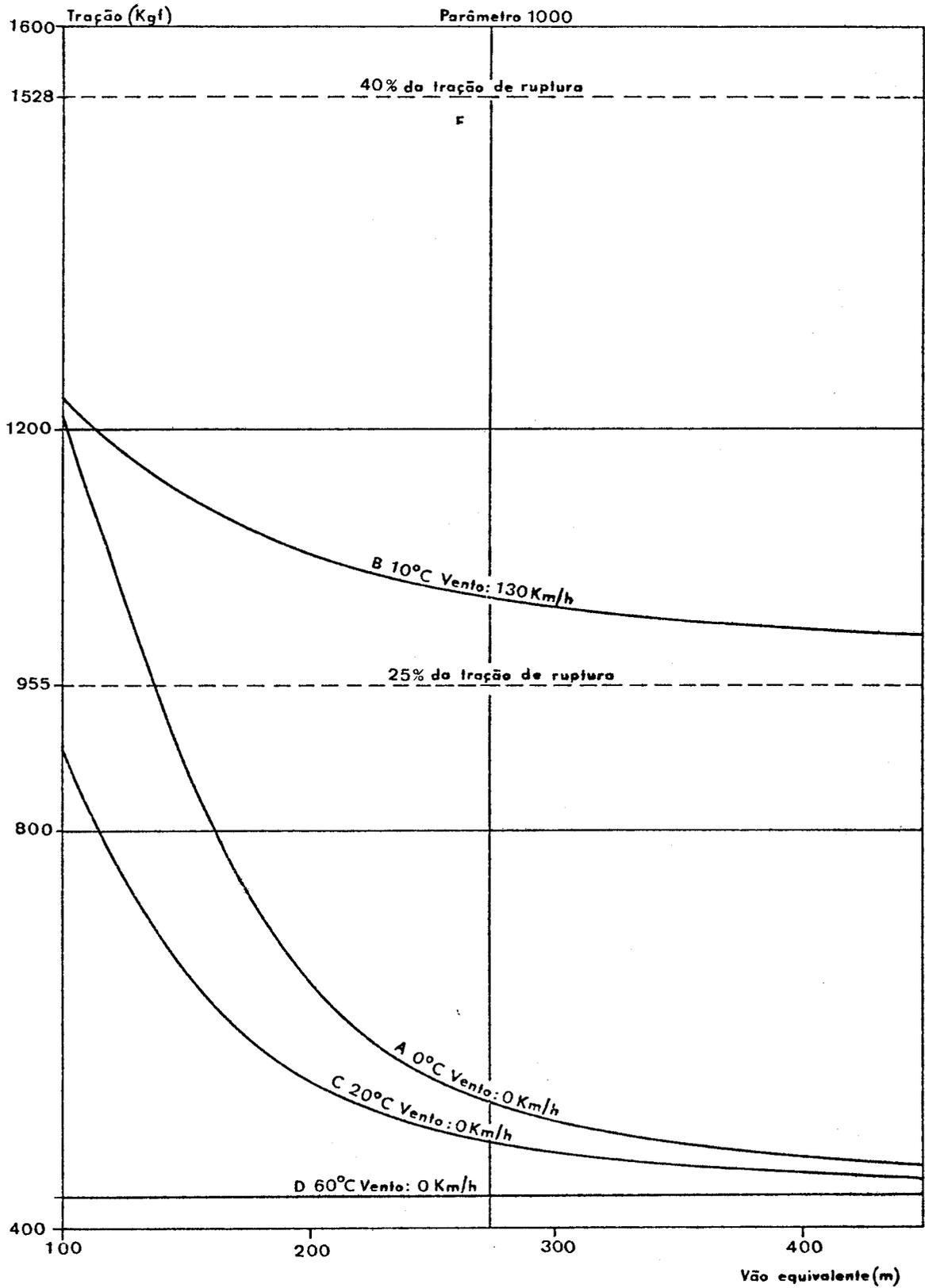
Peso por unidade de comprimento : 0,432 Kg/m

Módulo de elasticidade : 8000 Kg/mm<sup>2</sup>

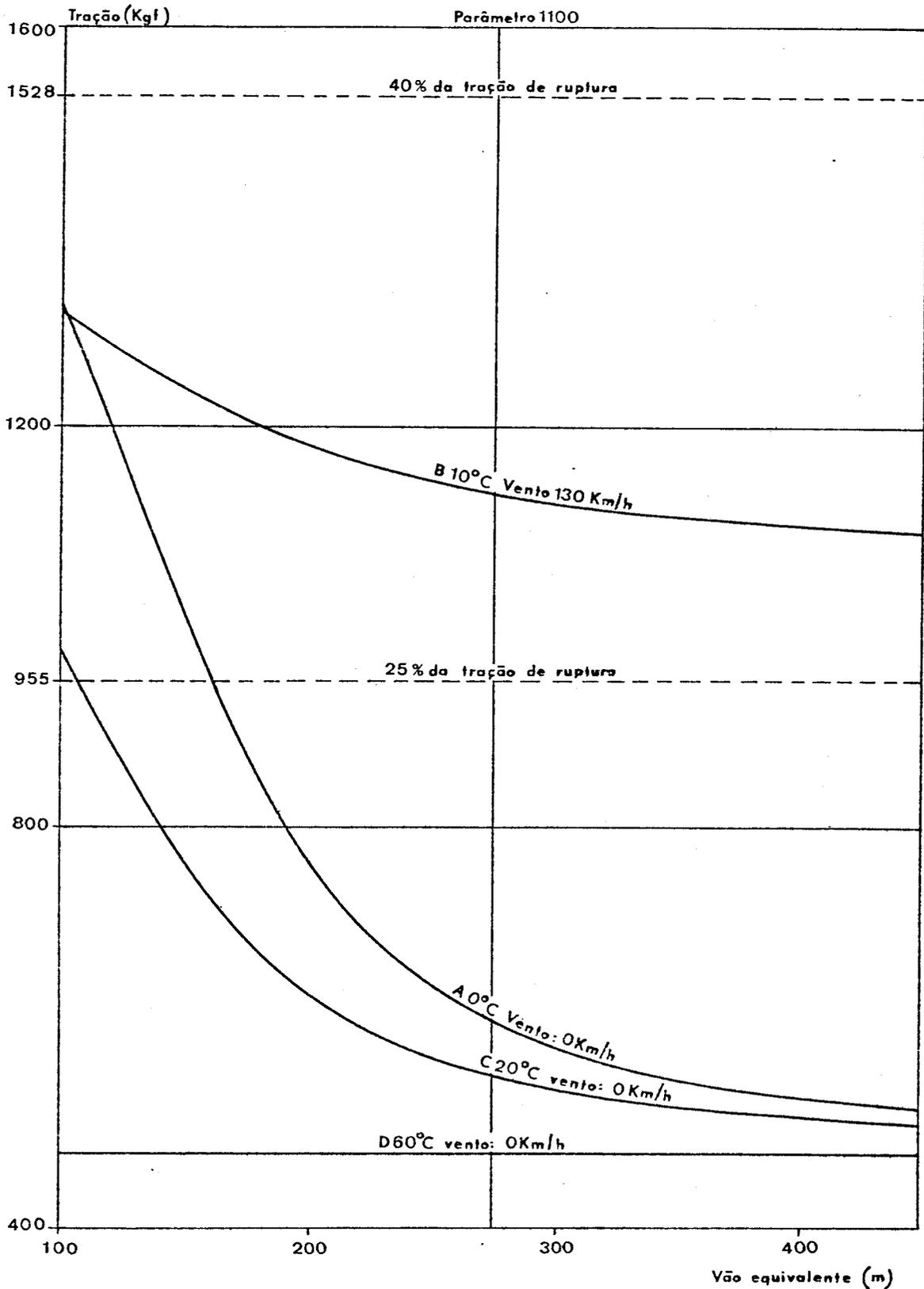
Coefficiente de dilatação linear : 19,1 x 10<sup>-6</sup> °C<sup>-1</sup>

Carga de Ruptura : 3820 Kg

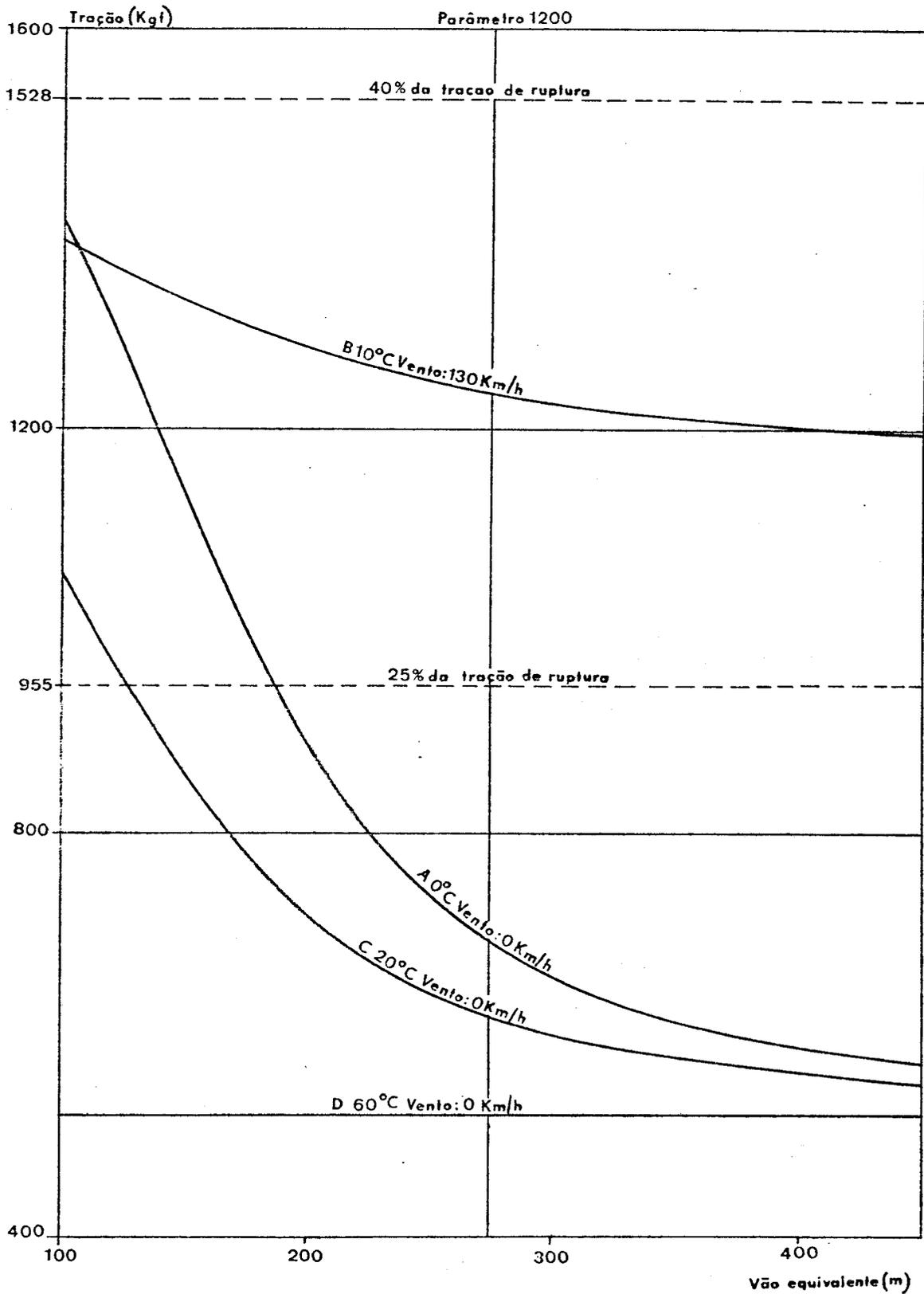
ANEXO 2



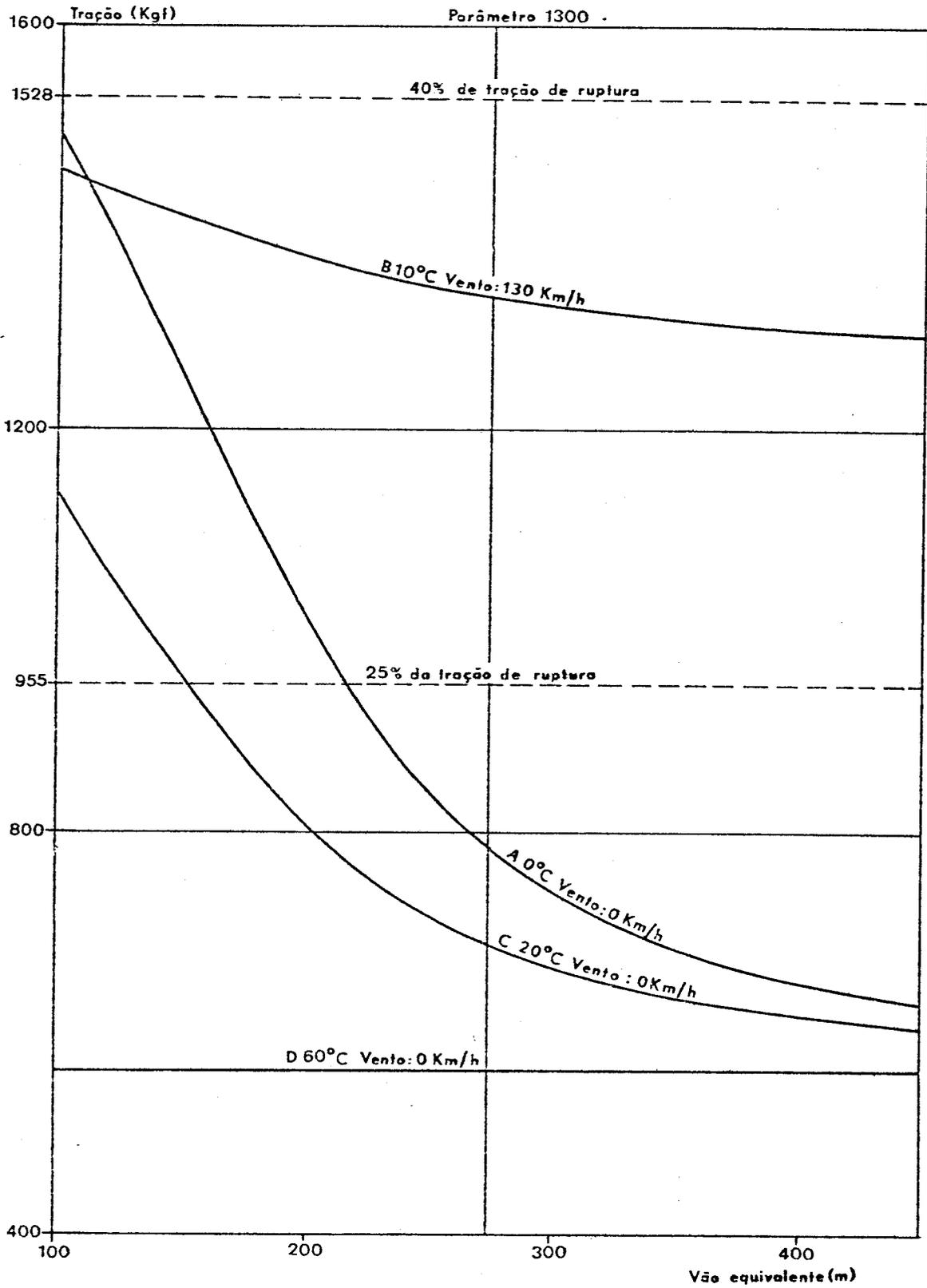
Linhas de Transmissão 69 KV  
Cabo 4/0 AWG ACSR 6/1



Linhas de Transmissão 69 KV  
Cabo 4/0 AWG ACSR 6/1

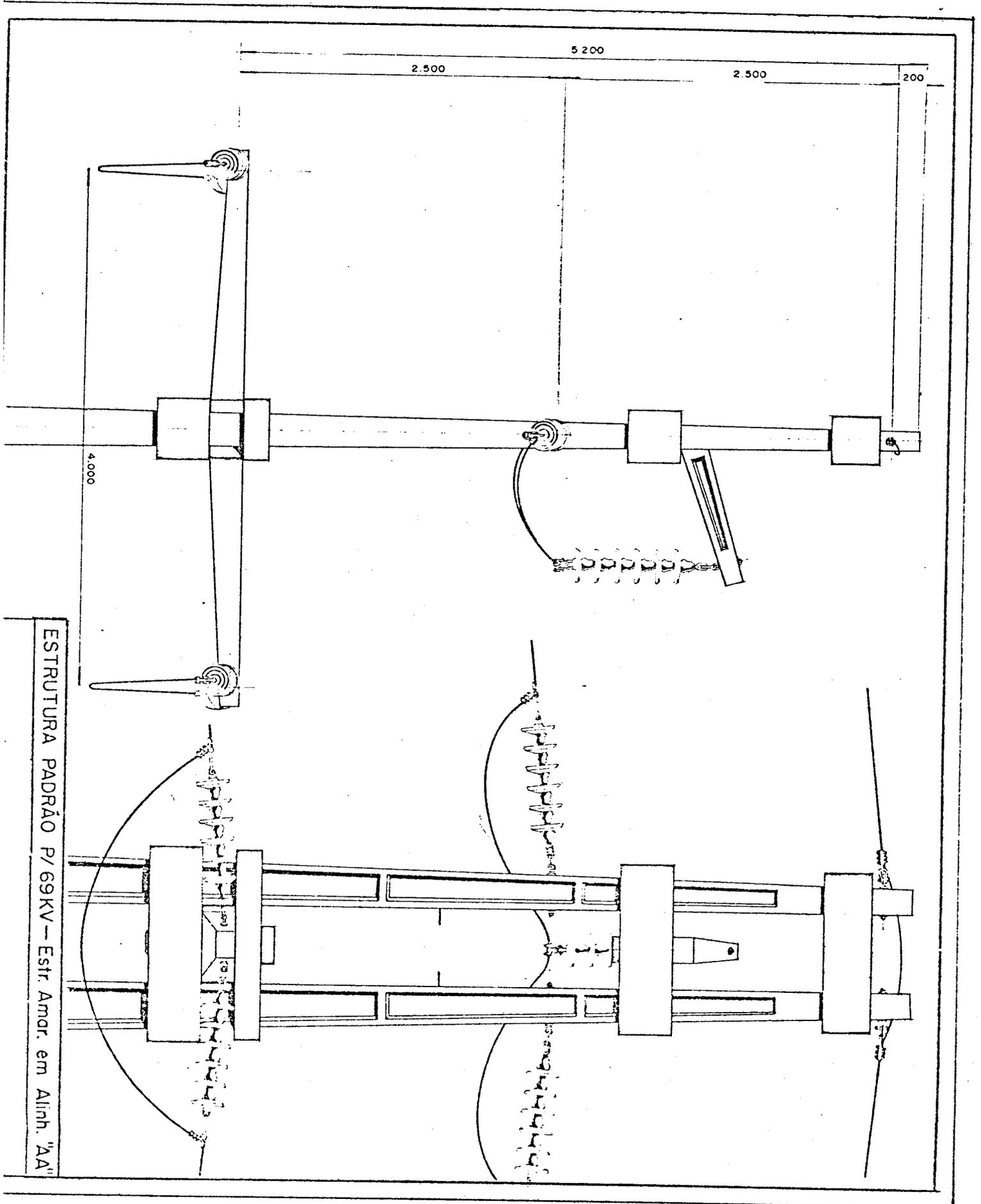


Linhas de Transmissão 69 KV  
Cabo 4/0 AWG ACSR 6/1

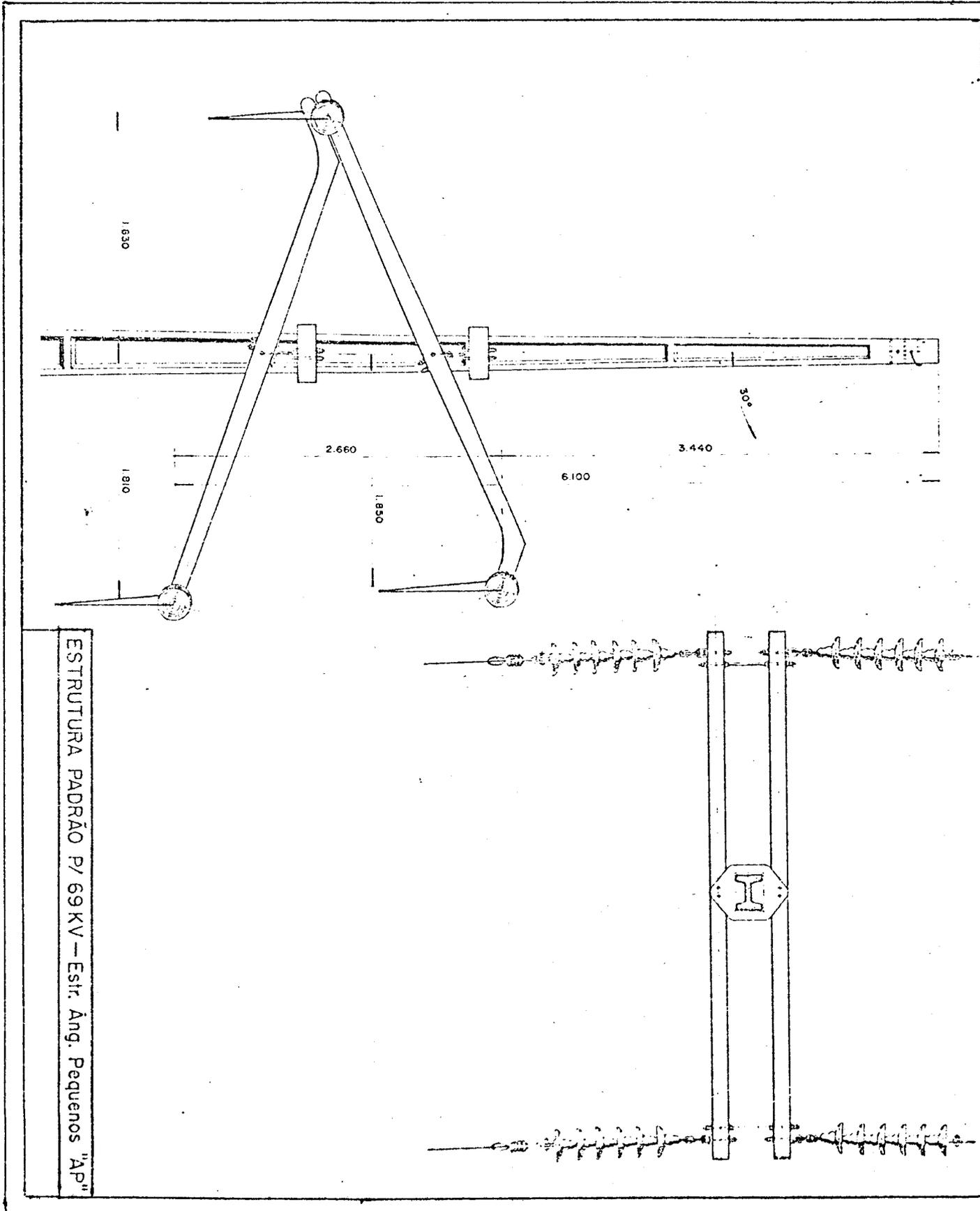


Linhas de Transmissão 69 KV  
Cabo 4/0 AWG ACSR 6/1

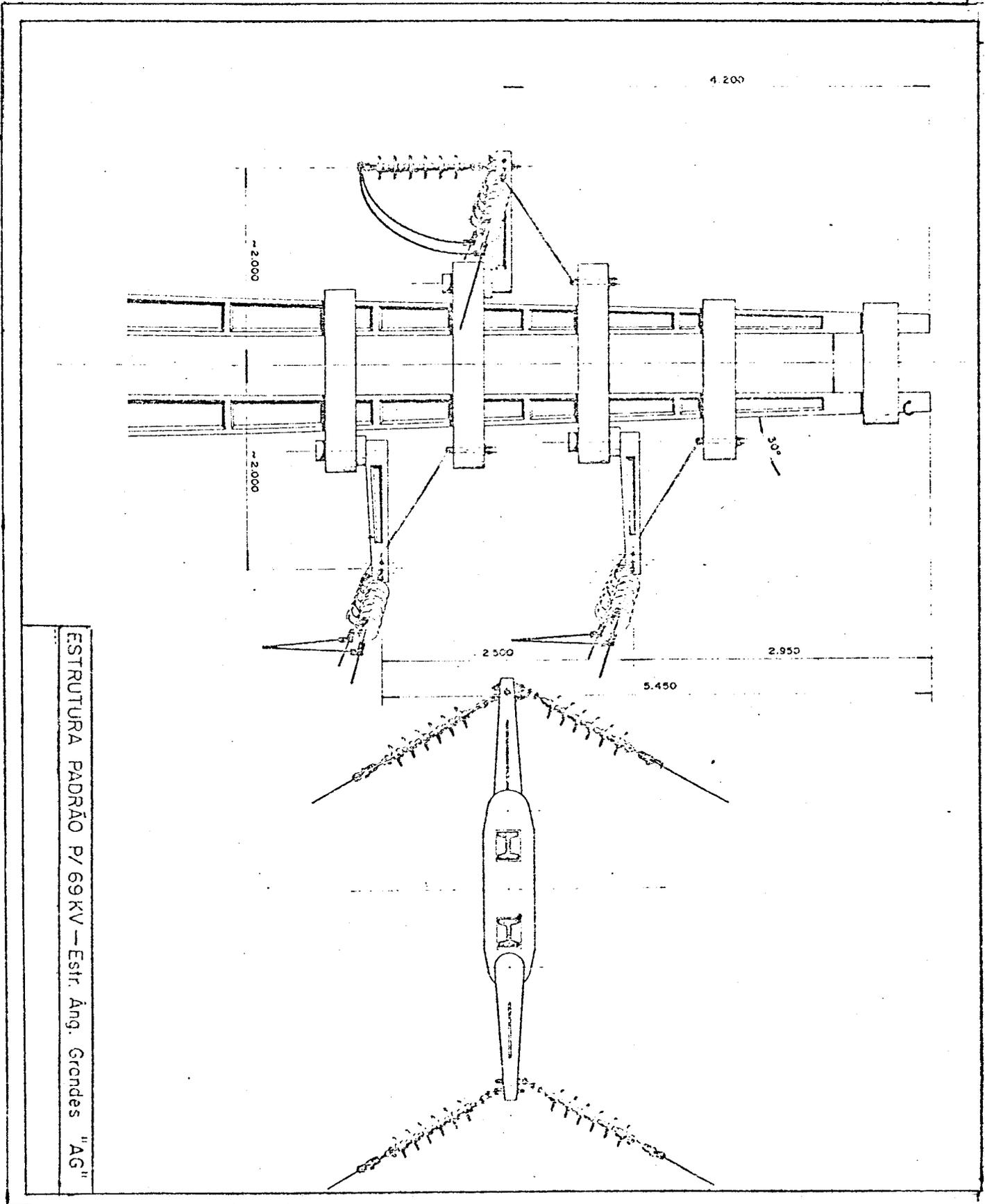




ESTRUTURA PADRÃO P/ 69KV — Estr. Amar. em Alinh. "AA"



ESTRUTURA PADRÃO P/ 69 KV — Estr. Ang. Pequenos "AP"



REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. LECORNU, J. - "Calcul mécanique et économique des lignes aériennes". In: - Calcul de lignes électriques: calcul mécaniques et économique; notes de cours de. Toulouse, université de Toulouse, 1966- tome 1.
2. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. - Projeto de linhas aéreas de transmissão e subtransmissão de energia elétrica. Rio de Janeiro, 1972.
3. CHECA, L.M. - Lineas de transporte de energia elétrica. Barcelona, Boxareu Editores Marcombo, 1973.
4. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Postes de concreto armado. Rio de Janeiro, 1958.
5. PIERRE, D.A. Optimization theory with applications. New York, Wiley, 1969. (Series in decision and control)
6. ELECTRICITÉ DE FRANCE. Extrait des directions pour l'étude - des ouvrages des lignes à très haute tensions. (Direction de l'équipement du réseau de transport)
7. POP, R.E.; DABEKIS, C.J.; FULLERTON, F.M. "Electronic computer program permits optimized spotting of electrical transmission tower". IEEE Trans. Power Apparatus Systems, New York, v. 82 : 360-365, Jun., 1963.
8. CONVERTI, V.; HYLAND, E.J.; TICKLE, D.E. "Optimized transmission tower spotting on digital computer". IEEE Trans. Power Apparatus Systems, New York, v. 81:55-63, Apr.; 1962,
9. KNOWLTON, A.E. Manual standard del ingeniero electricista. Barcelona, Labor, 1962. tomo 1-2.

10. ANDRADE, M.D. Transmissão de energia elétrica. Belo Horizonte, Escola de Engenharia UMG, 1961. v.2.
11. CAVALCANTI LIMA, D.X.; ANTONIASSI, A. "Alocação econômica de postes em linhas de transmissão, utilizando programação dinâmica". (a ser publicado).