

CONSIDERAÇÕES ECONÓMICAS SOBRE O PROJECTO DE SUBESTAÇÕES DE MUITO ALTA TENSÃO(*)

O advento da muito alta tensão (EHV), aplicada aos sistemas convencionais, propõe ao engenheiro uma série de problemas porventura singulares, relativamente às experiências passadas. A sua resolução exige que o técnico da subestação evolua e actue de acordo com parâmetros da engenharia prática, económica e académica, acentuadamente diferentes dos do passado.

A diversidade de assuntos a que o engenheiro de uma subestação de EHV se vê obrigado a dedicar-se inclui, não somente as características eléctricas internas do equipamento de EHV, as componentes do sistema que influem nos fenómenos de choque e transitórios, mas também, e particularmente, os factores de coordenação do isolamento e os esquemas do projecto da subestação que conduzam à melhor economia. É destes dois factores que se irá tratar.

COORDENAÇÃO DOS ISOLAMENTOS

A coordenação dos isolamentos nas subestações de EHV constitui, invariavelmente, um assunto de considerável interesse. Conquanto seja o mais importante de entre os problemas básicos do planeamento de uma subestação, o desenvolvimento de um sistema ou método universal, que abarque integralmente todos os factores, nas bases que suportam as decisões finais, tem-se processado com relativa lentidão. O assunto pode dividir-se em duas partes essenciais:

- 1) a que respeita ao isolamento interno, como o dos transformadores e disjuntores;
- 2) a que implica isolamentos de porcelana ou de ar.

Os passos necessários para o estabelecimento das relações entre as tensões suportáveis pelo isolamento interno e os níveis de protecção dos pára-raios, no âmbito da EHV, são semelhantes aos que se realizam no caso de tensões relativamente mais baixas. Contudo, existem diferenças, especialmente no que respeita à existência e à determinação de dados e valores a utilizar nesses passos.

Antes do mais, os choques provocados pelos relâmpagos e a escolha dum pára-raios exigem extensos estudos do curto-circuito e do funcionamento do sistema. Para fazer esses estudos no domínio de tensões muito altas, tem-se observado que:

- 1 — As relações de curto-circuito do gerador e as impedâncias geradoras equivalentes podem ser inferiores às que se esperam.
- 2 — As impedâncias avaliadas em grandes transformadores, quando não sejam rigorosamente especificadas, podem diferir consideravelmente dos valores finais obtidos experimentalmente.

- 3 — As tensões máximas à terra durante os defeitos podem variar largamente entre o sistema final e as primeiras fases do seu desenvolvimento.

As considerações relativas à variação máxima da tensão no pára-raios, para a descarga do impulso devido aos relâmpagos, e as margens a escolher entre o nível de protecção do pára-raios e as tensões suportáveis pelo isolamento interno exigem estudos suplementares. Esses estudos implicam o projecto das linhas de transporte e os valores de crista máxima e inclinação média das ondas de choque que possam entrar na subestação. Foi só ultimamente que os dados para a execução de linhas de transporte de 345 kV começaram a sugerir certos tipos de normas. Em 500 kV não existem ainda praticamente nenhuma. Para 345 kV, umas têm sido mais eficientes do que outras. Quer parecer que o emprego da chamada probabilidade do método da A. I. E. E. e dos seus factores de funcionamento exige considerações adicionais, sobretudo quando se trate de sistemas que empreguem postes muito altos.

No respeitante a choques provocados por manobra de disjuntores e isolamento interno, evidencia-se a necessidade de se confiar, em larga medida, nos fabricantes de transformadores e pára-raios, para se definirem adequadamente as características correspondentes. A indústria deverá acelerar o seu desenvolvimento, bem como o fornecimento de indicações relativas aos choques de origem interna baseadas na experiência.

ISOLAMENTO EXTERNO

Quanto à escolha do restante isolamento necessário numa subestação de 500 kV, e, particularmente, aos isoladores e afastamentos, entre a linha e a terra e entre as fases, pode dizer-se que nos Estados Unidos esse isolamento se analisa segundo bases diversas. Não quer isso dizer que as selecções finais resultem inconvenientes, mas que, por vezes, é difícil conservar tais bases na memória por muito tempo, em todos os seus pormenores.

Existe certo número de métodos de selecção de isolamentos, usados em 345 kV. São, geralmente, de natureza matemática e têm con-

(*) Tradução devidamente autorizada do artigo *Economics of extra high voltage substation design*, de G. E. Hertig publicado na pre-publication issue da revista «Energy International» de Outubro de 1963.

duzido, até ao presente, a conclusões eficientemente estudadas. Os mais usados neste país serão, talvez:

- 1) o método de Vancouver;
- 2) o método de Bellaschi;
- 3) o método de Hertig.

A todos eles é comum o conceito fundamental de que, na ausência de pára-raios muito próximos do isolamento em questão, os níveis básicos de isolamento (BIL) poderão pouco ou nada influir na determinação do isolamento a empregar. Nesses casos, as tensões reais de contornamento dos isoladores e espaços livres de ar constituem bases de comparação mais eficazes do que os valores de tensão suportáveis escolhidos arbitrariamente. Outra premissa comum é a de que os choques de origem interna deverão considerar-se como a base principal para essa escolha de isolamento.

QUADRO I

Método para a determinação de dados relativos ao nível do isolamento num sistema de 500 kV pela técnica chamada de «factor engineering».

FACTOR	Porcelana		Ar	
	Impulso	60 ciclos Húmido	Impulso	60 ciclos Húmido
A. Conversão da tensão suportável para contornamento	1,12	1,12	1,12	1,12
B. Conversão de choques internos em impulsos	1,175	—	1,12	—
C. Arco por impulso com humidade	1,11	—	1,11	—
D. Amplitude do choque interno	3,54	—	3,54	—
E. Tensão máxima de operação	1,05	1,05	1,05	1,05
F. Contaminação	1,10	1,35	1,10	1,15
G. Sobre-tensão por defeito	—	1,20	—	1,20
H. Coroa	—	—	1,15	1,15
I. Causas desconhecidas	1,05	1,25	1,05	1,25
J. Base 500/1,73	304,	304,	304,	304,

Produto dos factores-Condições de descarga equivalentes — kV	1910	721	2090	710
--	------	-----	------	-----

QUADRO II
COLUNAS ISOLADORAS

Dados relativos a colunas de isoladores. A coluna de dez unidades deve ser escolhida a partir das condições de descarga equivalente calculada no quadro I.

N.º de unidades	Arco por impulso (kV)		Impulso suportável (kV) 1,5 × 400
	Positivo	Negativo	
7	1410	1650	1300
8	1610	1880	1470
9	1810	2050	1640
10	2000	2240	1800

No quadro I indica-se esquematicamente o resumo de um dos métodos aplicados a 500 kV. Neste caso, enumeram-se todos os factores que influem na escolha do isolamento, ponderando-os individualmente. Acham-se os produtos sucessivos dos valores ponderados, e o produto resultante é multiplicado por uma base apropriada. Assim se obtém uma condição de choque máximo de origem interna entre fase e a terra. Esta técnica, por vezes denominada «factor engineering», não é nova, exceptuando, talvez, no que respeita à sua aplicação ao caso presente. Os factores, determinados por extensos estudos e acumulação de dados, são, em certos casos, arbitrários. A vantagem da técnica reside em que ponderações diferentes, aplicadas aos factores arbitrados dentro de gamas possíveis, não afectam apreciavelmente os resultados finais⁽¹⁾.

Neste exemplo se vê que as condições de impulso correspondentes são de 1910 kV para porcelana e de 2090 kV para o ar entre fase e terra. Para as condições de 1910 kV, torna-se necessária a instalação de uma coluna de isoladores. Pelo quadro II se conclui que uma coluna de 10 unidades, com uma tensão de contornamento positiva de 2000 kV, suportará as condições calculadas. O afastamento mínimo para a condição de 2090 kV é dado por curvas derivadas do A. I. E. E. n.º 4, Hagerguth e outros dados. Na fig. 1 apresentam-se estas curvas e conclui-se que o afastamento equivalente é de 154 polegadas (3,91 m).

Os afastamentos entre fases são determinados baseando-se em que as tensões de contornamento dos isoladores deverão constituir a base para a escolha do afastamento. Mais ainda, considera-se preferível que os arcos ocorram por contornamento das colunas de isoladores das subestações por serem estas as de mais fácil substituição. Supondo uma cadeia máxima provável de 28 elementos, com uma tensão de contornamento positiva de 2314 kV, o afastamento no ar correspondente é de 166 polegadas (4,22 m). O relatório da Comissão da A. I. E. E. (TP 54-80) sugere que esse valor seja multiplicado por dois factores, 1,10 e 1,12, sendo o primeiro um factor de segurança e o segundo um factor de eléctrodo interfásico. O resultado é de 204 polegadas (5,18 m) de metal a metal.

Note-se que, desde que se tenha escolhido um nível de choque de origem interna 2,5 vezes superior a E_{L-N} baseado no arco de ponta a plano, se torna necessário um isolador com uma distância de contornamento pelo menos aproximadamente igual a 148,5 polegadas (3,772 m), entre ponta e plano. Esse isolador consiste numa coluna de 10 unidades com separadores de 3,5 polegadas (0,89 m). As cadeias das subestações deverão ter uma distância de contornamento equivalente, superior em 10% à da coluna de isoladores, para que o arco se estabeleça através desta. Isso atinge cerca de 166 polegadas (4,22 m),

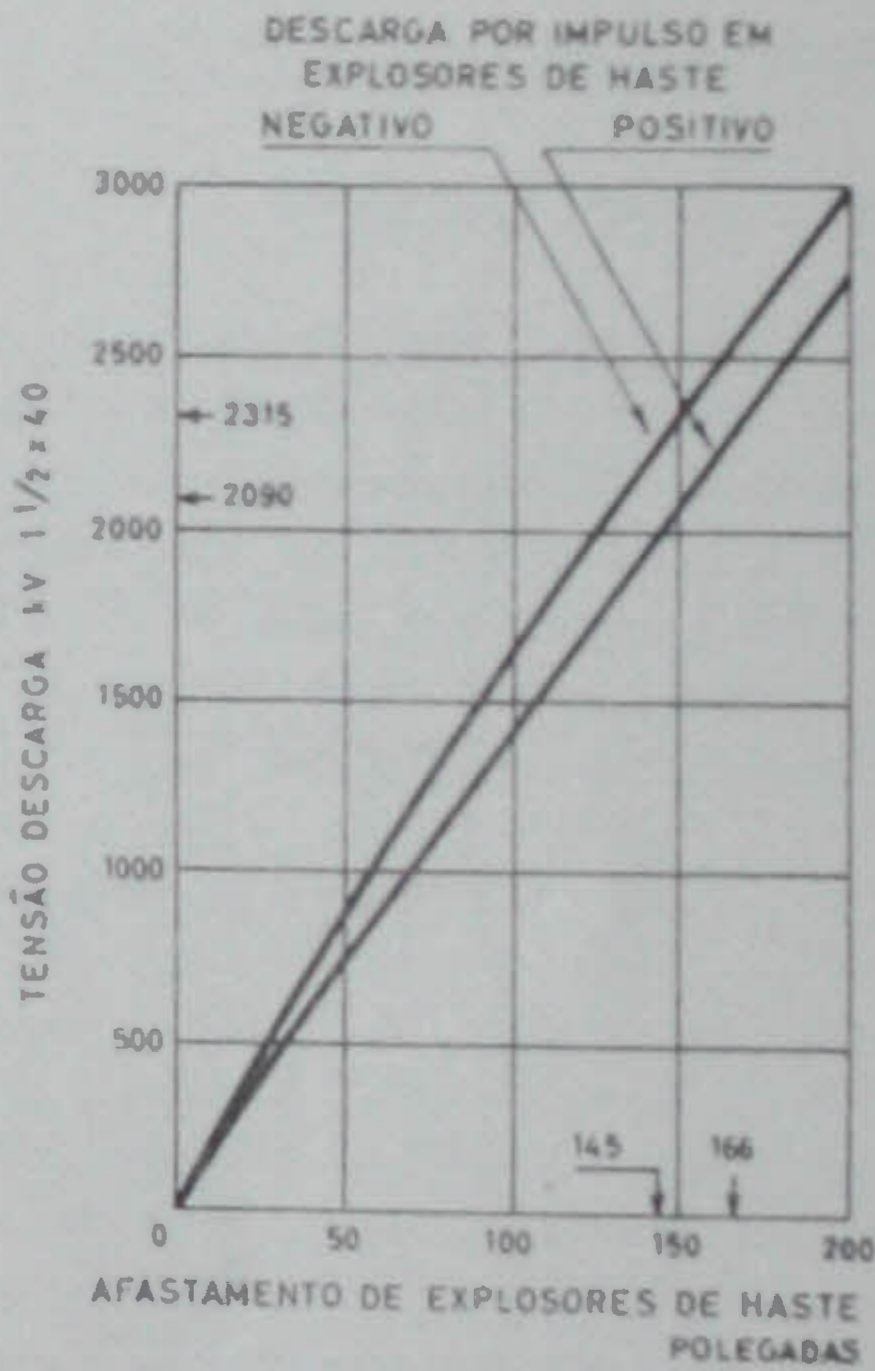


Fig. 1 — Curvas de selecção de afastamentos mínimos no ar para as condições de descarga calculadas

(1) A título explicativo, note-se que o factor (B) «Conversão de choque de origem interna em impulso» é necessário para que os dados experimentais existentes para 1 1/2 — 40 ms para impulsos se possam usar directamente como equivalentes, uma vez que não existem dados completos relativos a esses choques. Também no factor (D), «Amplitude dos choques de origem interna», o valor 3,54 resulta do produto de um valor escolhido para essa amplitude (neste caso, 2,5 vezes a tensão nominal entre a fase e a terra) pelo factor de ponta 1,414.

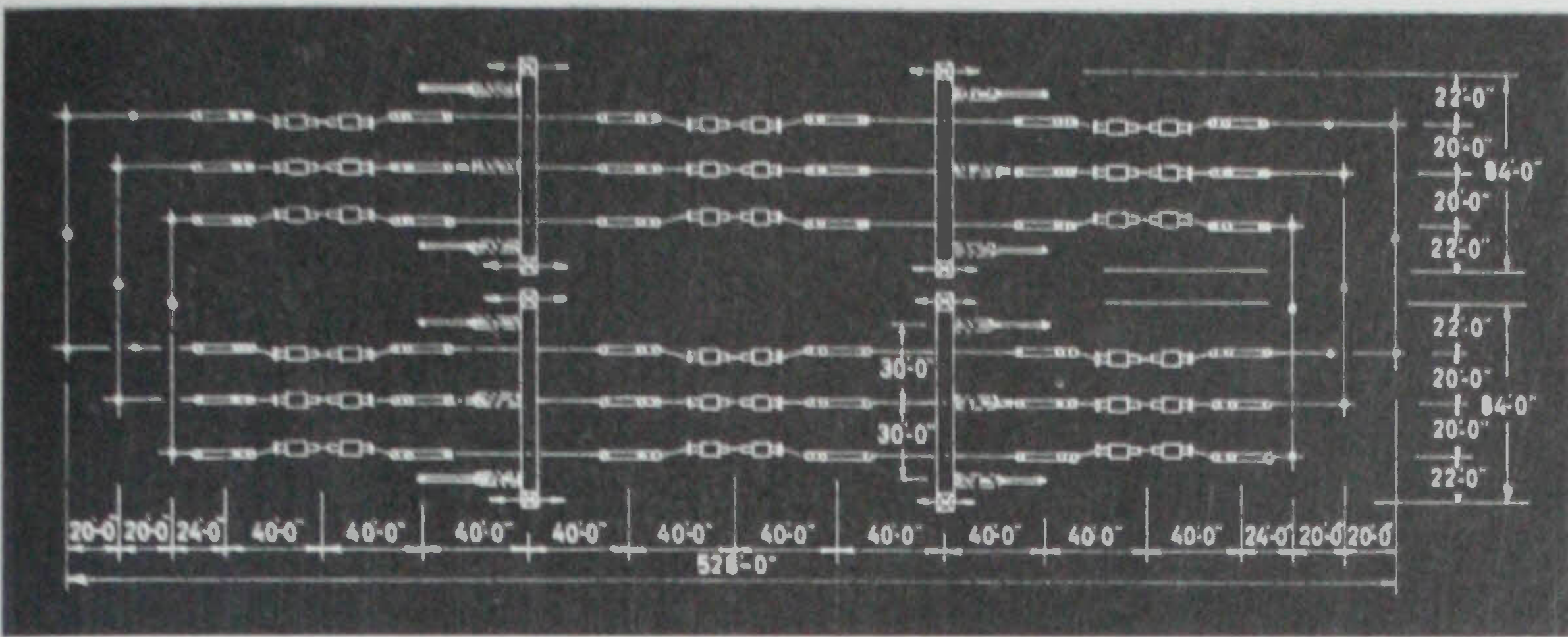


Fig. 2 — Disposição de «disjuntor e meio» para subestação de 500 kV

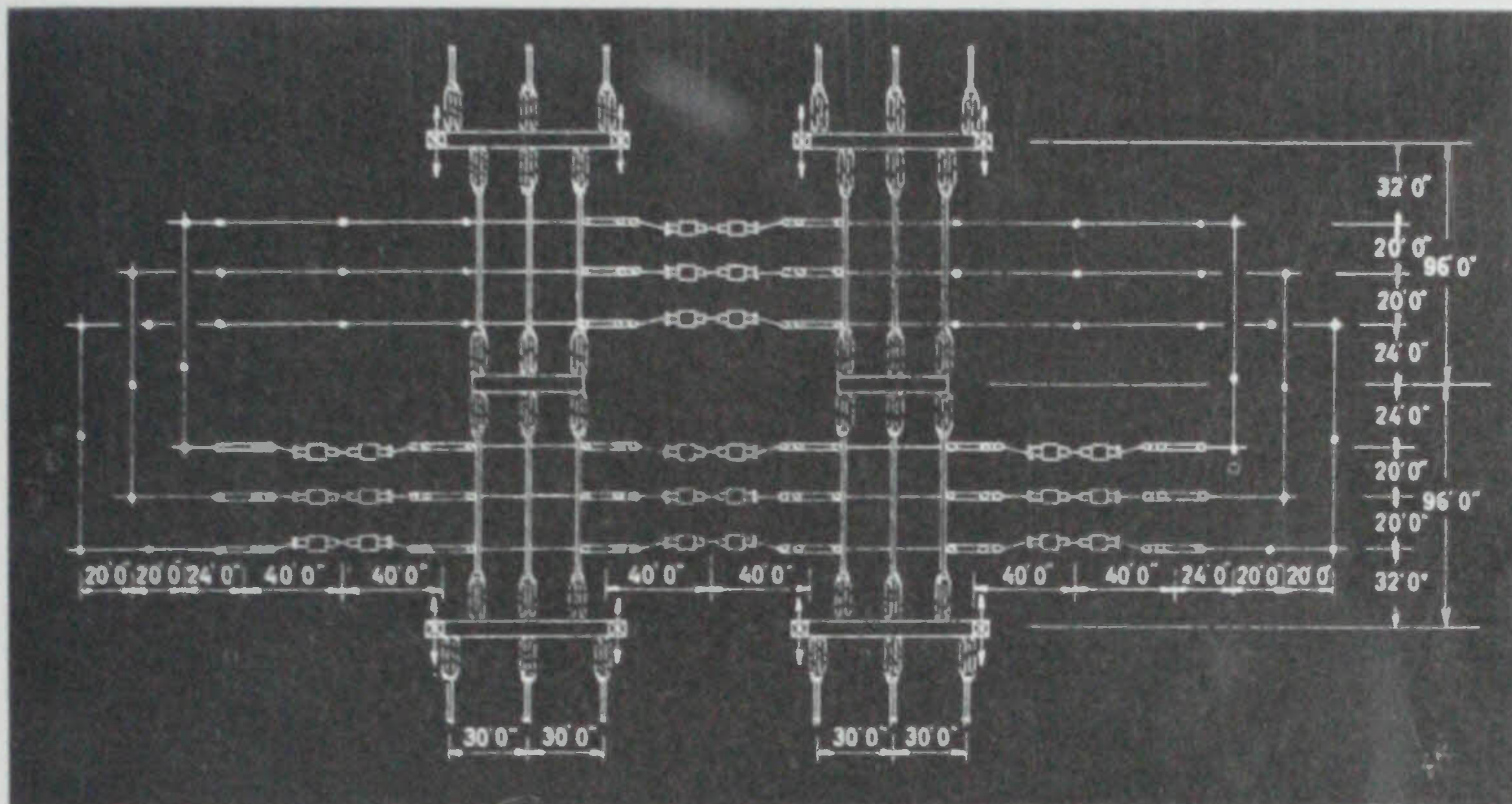


Fig. 3 — Disposição de «barramento em anel» para subestação de 500 kV

tística. Infelizmente, uma vez entrado no caminho da complexidade, torna-se difícil regressar a esquemas mais simples e menos dispendiosos (devido a uniformizações e outros compromissos), na expansão dos sistemas.

Com o fim de cobrir uma certa gama de esquemas possíveis, escolheram-se três para efeitos de comparação:

- 1) disjuntor e meio;
- 2) barramento em anel;
- 3) disjuntor único, barramento único.

A fig. 2 indica o sistema de disjuntor e meio. Utiliza a disposição em pedestal ou bastidor. O afastamento das fases é de 20 pés (6,09 m). A altura do barramento baseia-se na altura dos terminais dos disjuntores especificados para 500 kV. Admite-se que a altura dos disjuntores de outros tipos seja susceptível de variações consideráveis. Note-se que as linhas terminam directamente nos pórticos internos, eliminando-se pórticos intermédios exteriores a cada barramento.

Na fig. 3 apresenta-se um esquema de barramento em anel. Também neste caso existem, inicialmente, quatro circuitos. Porém, usam-se

valor multiplicado pelos dois factores, para que se atinja o afastamento de fase e correspondente a uma coluna de 27 a 28 unidades. Todos os demais dados indicados corroboram esses resultados no caso de se escolher um nível de choque interno de $2,5 E_L - N$.

Saliente-se o facto de que, quando se opte por limitar o nível desses choques a 2,3 vezes $E_L - N$, poderá usar-se uma coluna de nove unidades e, conseqüentemente, cadeias de suspensão mais curtas. Porém, quando se utilize, para esse nível, um valor de 2,0 a 2,1, uma coluna de 8 unidades não se torna muito eficiente. A chave do problema é, pois, o número mágico: — «Qual será o nível dos choques internos do sistema? 2,5, 2,3 ou 2,1?».

FACTORES DE CUSTO

O que acima se disse é o preâmbulo do projecto concreto de subestações de EHV. Quanto aos esquemas, é difícil indicar alguma preferência. A escolha só pode ser feita por cada empresa no seu caso particular. Acontece, porém, que os custos unitários, no âmbito da EHV, são muito altos e podem fazer-se consideráveis economias na primeira fase do projecto da subestação. Uma das vantagens mais importantes no caso da muito alta tensão é a crescente simplicidade dos esquemas. A acrescentar às razões de economia, existe, ainda, a crescente confiança que tem merecido o equipamento fornecido para essas tensões. Por exemplo, até há poucos anos, quase todas as subestações de 345 kV tinham pelo menos a complexidade dos esquemas de «disjuntor e meio», por precaução contra as avarias dos disjuntores. Se esse receio era justificável é uma questão de esta-

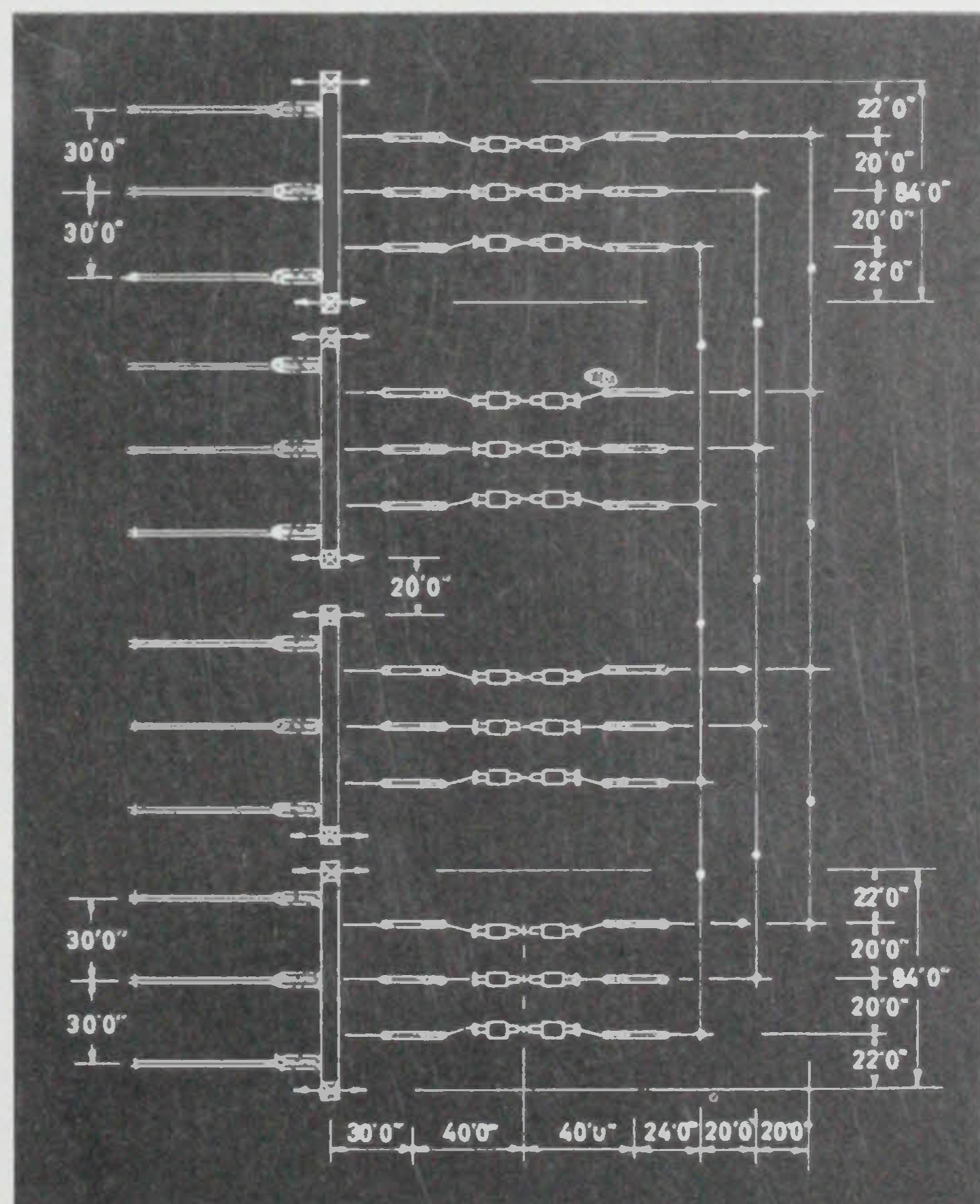


Fig. 4 — Disposição de «barramento único» para subestação de 500 kV

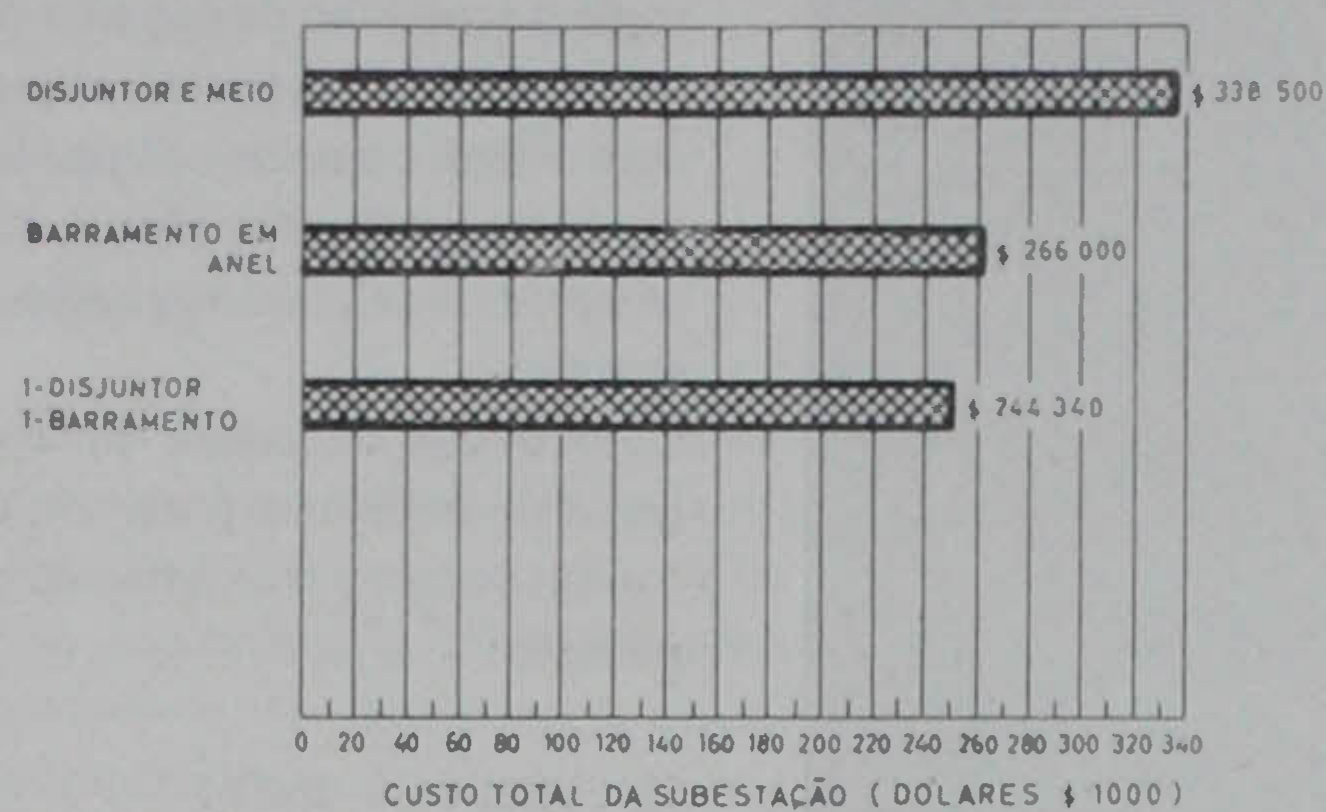


Fig. 5 — Comparação dos custos totais dos esquemas das figs. 2, 3 e 4

barramentos tendidos nos cruzamentos. Neste tipo de subestação, isso permite uma considerável economia.

A fig. 4 é o esquema de barramento único, uma subestação de custo mínimo mas contudo aparentemente popular.

Na fig. 5 confrontam-se graficamente os custos dos três tipos de subestações. Não se incluíram os custos dos transformadores, disjuntores, pára-raios, condensadores e bobinas de alta frequência. Em ordem decrescente de custos, temos: disjuntor e meio, com dólares \$338 500; barramento em anel, com dólares \$266 000; e barramento único, com dólares \$244 500.

O equipamento incluído nestes custos totais foi dividido nas seguintes parcelas:

- 1) aço;
- 2) seccionadores;
- 3) suportes para barramentos;
- 4) acessórios dos barramentos, condutores e diversos.

Na fig. 6 comparam-se essas parcelas, nos três casos. Nesta fase económica desta análise, cumpre salientar que o custo dos seccionadores constitui uma parcela importante em todos os esquemas, variando entre 60% a 70% do custo total da subestação. Mesmo verificando-se consideráveis diferenças entre os custos do restante equipamento nos três esquemas, o custo total dessas subestações é fundamentalmente uma função do número de seccionadores empregados. Existem, também, variações nos parâmetros técnicos que irão influenciar em certa medida, o custo unitário. Por exemplo, os cálculos de estruturas usadas basearam-se em tensões de 25 000 lb (11 340 kg) por

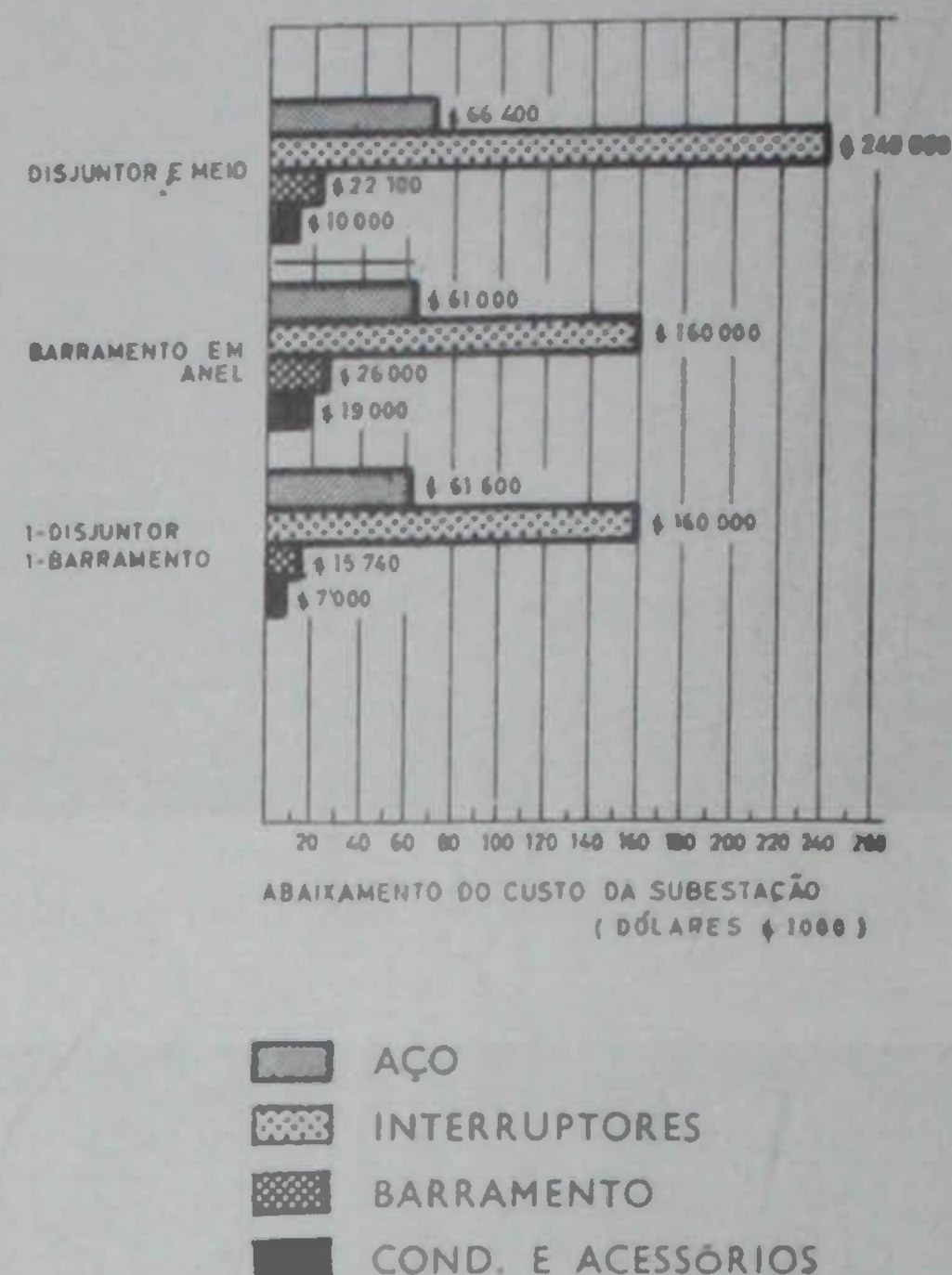


Fig. 6 — Parcelamento dos custos dos três esquemas. Os seccionadores concorrem para a maior parte dos custos totais

condutor. O peso das estruturas poderá aumentar consideravelmente com cada aumento da tensão dos condutores. Caso se tivessem usado barramentos tendidos em lugar de tubulares em alguns esquemas, ter-se-iam economizado cerca de dólares \$6000 em cada barramento com quatro saídas. Porém, quando haja só duas saídas, o custo do barramento diminui de dólares \$4000. O emprego de outros tipos de seccionadores, como as duas colunas de isoladores, também terá no custo uma influência apreciável, possivelmente de cerca de 20%.

CONCLUSÕES

- 1) As principais economias nas subestações de EHV verificam-se na escolha do esquema.
- 2) Economias secundárias são possíveis mediante a variação dos parâmetros técnicos e dos tipos de equipamento.
- 3) O desenvolvimento de técnicas especiais é essencial para que a estimativa e a comparação de custos de subestações de EHV se possa efectuar com facilidade e rapidez.