

Dimensionamento dos Condutores e Cabos Eléctricos



Capítulo II

2.1 - Escolha da Tensão

As indicações que se seguem precisam a maneira de definir a tensão, para a qual a camada isolante dos cabos deve ser dimensionada, em função das características da instalação considerada.

Entre os principais termos usados para caracterizar a tensão, distinguem-se:

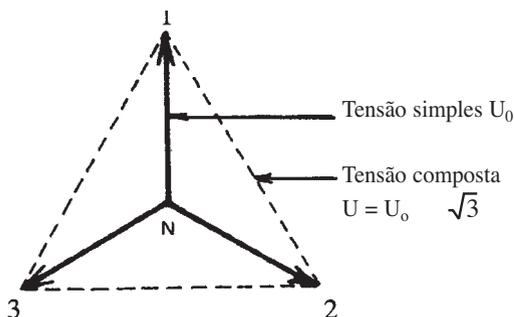
- Os termos que se referem à **instalação ou à rede**:
 - **tensão nominal**: é a tensão pela qual a instalação (ou parte da mesma) é designada e à qual estão referidas determinadas características de funcionamento;
 - **tensão de serviço ou de regime**: é a diferença de potencial que existe, em regime normal, entre dois condutores, quer ao nível do utilizador quer na origem da instalação. Considera-se, na prática, o valor médio desta tensão, tendo em conta particularmente, as variações da tensão de alimentação.

Desde que se trate de uma rede em tensão alternada, as tensões referidas são representadas pelos seus valores eficazes.

Numa rede trifásica distinguem-se:

- **tensão simples**: é a tensão entre uma fase e o potencial de referência, écran metálico ou terra;
- **tensão composta**: é a tensão entre duas fases.

Em regime equilibrado, a razão entre a tensão composta e a tensão simples é igual a $\sqrt{3}$.



- Os termos que se referem **aos condutores ou cabos** que equipam a instalação:

Trata-se, essencialmente **da tensão estipulada**, que é o valor em função do qual são definidas as condições dos ensaios dieléctricos do condutor ou cabo e, por conseguinte, da espessura do isolamento. Os ensaios dieléctricos do condutor ou cabo acima referidos, são principalmente:

 - ensaio de tensão à frequência industrial;
 - eventualmente, ensaio de comportamento à onda de choque.

2.1.1 - Instalações de Baixa Tensão

Os condutores e cabos que equipam estas instalações são caracterizados pela sua tensão nominal. O termo «tensão estipulada» é raramente empregue.

Em tensão alternada, a tensão nominal do cabo deve ser pelo menos igual à tensão nominal da instalação. Além disso, é de notar que se considera, geralmente, que a tensão de serviço de uma instalação pode exceder em permanência a sua tensão nominal em 10%. Por outro lado, em tensão contínua, admite-se que a tensão nominal da instalação possa atingir 1,5 vezes a tensão nominal do cabo.

As tensões nominais dos cabos, mais usadas, são: 250 V ou 300 V (valor reservado a certas gamas de cabos flexíveis), 500 V, 750 V, 1 000 V.

Precisa-se, ainda, a este respeito que:

- os condutores e cabos de tensão nominal 1000 V podem ser usados em todas as instalações eléctricas de baixa tensão;
- os condutores e cabos de tensão nominal 500 ou 750 V só podem ser utilizados em instalações em que a tensão nominal é, no máximo, igual a 500 ou 750 V, respectivamente;
- os cabos flexíveis de tensão nominal 250 ou 300 V não podem ser utilizados, a não ser nas partes da instalação onde a tensão nominal não ultrapasse os 250 V, seja ela alternada ou contínua.

Por outro lado, se numa instalação de neutro isolado (ver capítulo IV), o condutor de neutro estiver distribuído, os cabos ligados entre uma fase e o neutro devem ser isolados para a tensão entre fases.

2.1.2. Instalações de Média e Alta Tensão

A tensão estipulada, para a qual um cabo é concebido, exprime-se por um conjunto de três valores, em kilovolt, sob a forma $U_0/U (U_m)$, com:

- U_0 = tensão entre um condutor e um potencial de referência (écran ou terra);
- U = tensão entre dois condutores de fase;
- U_m = tensão máxima que pode aparecer entre fases da rede, em condições normais de exploração. Este valor, essencialmente, considerado no âmbito da compatibilidade com a aparelhagem e os transformadores.

A escolha da tensão estipulada dos cabos, que devem equipar uma instalação, é função das considerações seguintes.

1- Tipo de Cabo Escolhido

A expressão da tensão estipulada difere, conforme o cabo é de campo radial (secção 1.2.4) ou não. Num cabo de campo radial, U_0 é diferente de U , sendo a razão entre ambos geralmente igual a $\sqrt{3}$.

Pelo contrário, devido à sua constituição, um cabo de cintura apresenta um nível de isolamento equivalente entre duas fases e entre uma fase e o écran. Daí resulta que U_0 e U têm valores idênticos.

2 - Tensão Nominal da Instalação

O valor de U será, em princípio, superior ou igual à tensão nominal da instalação para a qual o cabo se destina. O quadro 32 indica as tensões nominais mais usuais para as redes trifásicas, em Portugal e no estrangeiro, segundo a publicação 38 da CEI. Nele figuram as tensões estipuladas, normalizadas, nas quais são empregues os cabos correspondentes, desde que os outros critérios de escolha, estudados a seguir, o permitam.

Para uma instalação alimentada com uma tensão de valor intermédio, será escolhida a tensão estipulada, correspondente à tensão normalizada imediatamente superior.

3 - Condições de Eliminação dos Defeitos à Terra

A tensão estipulada, escolhida, deve igualmente satisfazer a distribuição das tensões na rede, em caso de funcionamento anormal. Em particular, a tensão à qual o isolante é submetido durante um defeito, entre uma fase e a terra (defeito monofásico ou homopolar), depende do modo de ligação à terra do ponto neutro da rede:

- **Rede com neutro directamente ligado à terra:** o potencial do ponto neutro permanece próximo do potencial da terra. Por outro lado, a corrente de curto-circuito é suficientemente elevada, para provocar a actuação automática e rápida dos dispositivos de protecção da instalação. A diferença de potencial aplicada à camada isolante não é, por isso, susceptível de tomar valores proibitivos, durante um tempo prolongado, e a tensão estipulada pode ser escolhida em conformidade com o quadro 32.
- **Rede com neutro isolado:** se o isolamento em qualquer ponto da rede, fora do local do defeito, estiver em boas condições e se o defeito atingir uma só fase, o valor da corrente de defeito não justifica, geralmente, uma actuação instantânea. Por outro lado, para assegurar a continuidade do equilíbrio do

sistema trifásico, o potencial do ponto neutro, em relação à terra, torna-se igual (numa primeira aproximação) à tensão simples da rede; a tensão entre fases sãs e a terra torna-se igual à tensão composta. O isolamento dos condutores sãos é, portanto, submetido a uma tensão $\sqrt{3}$ vezes mais forte que em regime normal, durante um período que poderá ter uma duração importante.

- **Rede com neutro impedante:** o funcionamento, em caso de um defeito homopolar, depende do valor da impedância da ligação à terra do neutro. Neste caso, o valor da tensão entre fases sãs e a terra estará compreendido entre a tensão simples e a tensão composta da rede.

Para os cabos de campo radial, segundo a especificação técnica EDF HN 33-S 23 e para alta tensão, a correspondência estabelecida no quadro 32, entre a tensão nominal da rede e a tensão estipulada dos cabos, supõe que, na rede considerada, a eliminação dos defeitos à terra se efectua de forma automática, num tempo inferior a uma hora e que a duração total do tempo de funcionamento, com uma fase à terra, não ultrapassa as 12 horas por ano.

Se estas condições não são satisfeitas, escolhe-se, para a tensão especificada, um valor superior ao figurado no quadro 32, em função das condições particulares de eliminação dos defeitos.

4 - Sobretensões

A escolha da tensão estipulada dos cabos deve, por fim, ter em conta as sobretensões susceptíveis de afectar a instalação estudada e cuja origem pode ser devida a:

- um fenómeno atmosférico, transmitido por intermédio das linhas aéreas;
- um defeito de isolamento, relativamente às instalações de tensão nominal superior;
- manobras de aparelhagem;
- fenómenos de ressonância.

Não é possível, no entanto, estabelecer uma regra geral para a escolha. Em todos os casos de sobretensão eventual, particularmente importante nas canalizações de alta tensão, a tensão estipulada apropriada é determinada em função do valor e da forma da sobretensão, da sua duração, da sua probabilidade de ocorrência, dos dispositivos de protecção e do coeficiente de segurança desejado.

Quadro 32 - Determinação da Tensão Estipulada dos Cabos MT e AT

Tensão nominal composta da rede (1) kV	Tensão estipulada $U_0/U(U_m)$ (2)	
	U_0/U kV	U_m kV
3	1,8/3 e 3/3	3,6
6	3,6/6 e 6/6	7,2
10	6/10	12
15	8,7/15	17,5
20 - 22	12/20 ou 12,2/22	24
30 - 33	18/30 ou 19/33	36
45	26/45	52
63* - 66 - 69	36/60 ou 36/63*	72,5
70*	40,5/70*	82,5
90*	52/90*	100
110 - 115	64/110 ou 66/115	123
132 - 138	76/132 ou 80/138	145
150	87/150	170
220 - 225* - 230	130/220 ou 130/225*	245
400	230/400	420
500	290/500	525

(1) Segundo publicação CEI 38 (Tensões normais da CEI)

(2) Segundo publicação CEI 183 (Guia para a escolha dos cabos de alta tensão)

(*) Estes valores não figuram nas publicações CEI de referência. Correspondem, no entanto, a redes normalmente encontradas em Portugal e no Estrangeiro.

2.2 - Escolha da Secção da Alma Condutora

A escolha da secção da alma condutora dos cabos e condutores isolados, para transmissão de energia, é um dos problemas essenciais que o projecto de uma canalização eléctrica apresenta. Trata-se, com efeito, em estabelecer o melhor compromisso possível, entre numerosas considerações, sendo as principais:

- de ordem técnica: imperativos de funcionamento da canalização, no plano eléctrico, térmico e, por vezes, mecânico;
- de ordem económica: minimização do custo global da canalização, tendo em conta o custo de instalação e os encargos de exploração;
- relativas às condições de instalação: espaço disponível, ao longo do percurso e nas extremidades, limitações eventuais, relativas às dimensões e peso do cabo, comprimentos possíveis para entrega, etc.;
- relativas ao tempo de execução da canalização: disponibilidade do cabo em «stock» ou tempo de fabricação do mesmo.

As páginas seguintes tratam da **escolha da secção, do ponto de vista eléctrico e térmico**. O caminho a seguir inclui as três etapas seguintes:

1 - Determinar a Intensidade a Transmitir, em Função das Características dos Receptores a Alimentar (Ver 2.2.1)

2 - Determinar as Secções Mínimas que Permitam Respeitar as Condições Seguintes

- o **aquecimento da alma condutora** deve ser compatível com o permitido pelo isolante escolhido:
 - em serviço **normal**: o cálculo é, geralmente, baseado num serviço permanente ou contínuo (ver 2.2.2). Fornecemos, igualmente, algumas indicações relativas aos regimes de carga variável (ver 2.2.3).
 - em caso de **curto-circuito** (ver 2.2.4).
- a **queda de tensão**, verificada na canalização eléctrica, deve permitir um correcto funcionamento do equipamento alimentado: ver 2.2.5 .

3 - Escolher a Maior Secção das Diversas Secções assim Obtida.

Um exemplo de cálculo da secção da alma, destinado a facilitar a compreensão deste capítulo, é apresentado na secção 2.2.6.

Além disso, várias indicações destinadas a abordar o problema da optimização económica da secção, de modo a permitir a sua resolução nos casos simples, figuram na secção 2.2.7 deste capítulo.

2.2.1 - Determinação da Intensidade a Transmitir em Regime Normal

Em corrente contínua: $I = \frac{P}{U}$ A (ampere)

P = Potência absorvida pelos receptores, W (watt)

U = Tensão de serviço entre os condutores positivo e negativo, vista do lado do receptor, V (volt)

Em corrente alternada:

— monofásica $I = \frac{S}{U}$ A (ampere)

— trifásica $I = \frac{S}{U\sqrt{3}}$ A (ampere)

S = Potência aparente absorvida pelos receptores, VA (voltampere).

U = Tensão de serviço vista do lado do receptor, V (volt)*:

- monofásica: entre os dois condutores de alimentação,
- trifásica: entre dois condutores de fase (tensão composta).

I e S são expressos no seu valor eficaz.

A este propósito, ver os gráficos 1 e 2.

As indicações seguintes precisam como determinar a potência absorvida, que será a potência aparente, no caso de corrente alternada, em função das potências dos receptores alimentados, cuja expressão pode apresentar-se sob várias formas.

1 - Potência Absorvida

Teremos em conta, na presente situação, os seguintes elementos:

- crescimento previsível das necessidades em energia, da instalação e extensões futuras;
- coeficientes máximos de utilização do receptor e de simultaneidade são de considerar, respectivamente, logo que se possa pôr como hipótese que:
 - alguns receptores nunca serão utilizados à plena carga,
 - todos os receptores nunca funcionam simultaneamente.

Temos então:

Potência absorvida total =

Σ Potência instalada x coefic. de utilização x coefic. de simultaneidade.

Os valores destes coeficientes são calculados, em cada caso particular, em função das hipóteses de exploração pretendidas ou por comparação com uma instalação, similar já existente;

— rendimento dos receptores.

Se um receptor é caracterizado pela sua potência útil, isto é, a potência que fornece

*Se a tensão puder tomar vários valores, por exemplo, devido à regulação no secundário dos transformadores, considera-se o valor mínimo susceptível de se atingir ao longo de um tempo prolongado.

geralmente após transformação de energia eléctrica (por exemplo, potência mecânica disponível no veio de um motor), temos:

$$\text{Potência absorvida} = \frac{\text{potência útil}}{\text{rendimento}}$$

O rendimento é usualmente fornecido pelo fabricante do receptor. Em caso da ausência de informações, consideram-se, em primeira aproximação, para o rendimento dos motores, os valores indicados no quadro 33.

Quadro 33 - Rendimento dos motores

Potência		Rendimento
em Kw	em cavalos	
0 a 15	0 a 20	0,75 a 0,85
15 a 37	20 a 50	0,85 a 0,90
37 a 75	50 a 100	0,90 a 0,92
> 75	> 100	> 0,92

2 - Potência Aparente (caso de corrente alternada)

Desde que um receptor comporte elementos indutivos ou capacitivos e é alimentado em corrente alternada, é introduzido um esfasamento, entre os valores instantâneos da tensão e da corrente, nos terminais do receptor. Distinguem-se, então, as seguintes potências:

- potência activa ou real = potência aparente x cos φ, expressa em W (watt) ou em CV (cavalos) (1 CV = 736 W). É a potência directamente explorada pelo receptor, isto é, transformada, por exemplo, em potência mecânica ou térmica;
- potência reactiva = potência aparente x sin φ, expressa em VAr (voltampere reactivo). Esta potência não é transformável, mas é necessária ao funcionamento do receptor, nomeadamente, para assegurar a excitação magnética dos transformadores ou dos motores.

Devido à sua natureza, é geralmente a potência activa que é conhecida. Obteremos, então, a potência aparente dividindo aquela por cos φ, chamado factor de potência do receptor.

- para os receptores puramente resistivos (resistências de aquecimento, lâmpadas de incandescência, ...) cos φ = 1;
- para os outros tipos de receptores, o cos φ é, geralmente, fornecido pelo fabricante.

Convém ter em conta o uso eventual de baterias de condensadores, destinadas a melhorar o factor de potência.

Os valores normalmente encontrados para cos φ são:

- iluminação fluorescente com compensação: cos φ = 0,85
sem compensação: cos φ = 0,30 a 0,60
- motores eléctricos em funcionamento normal: cos φ = 0,75 a 0,92
em vazio : cos φ = 0,30 a 0,50

Na ausência de indicações, é usual considerar : cos φ = 0,80.

Gráfico 1 - Potência aparente transportada em Baixa Tensão

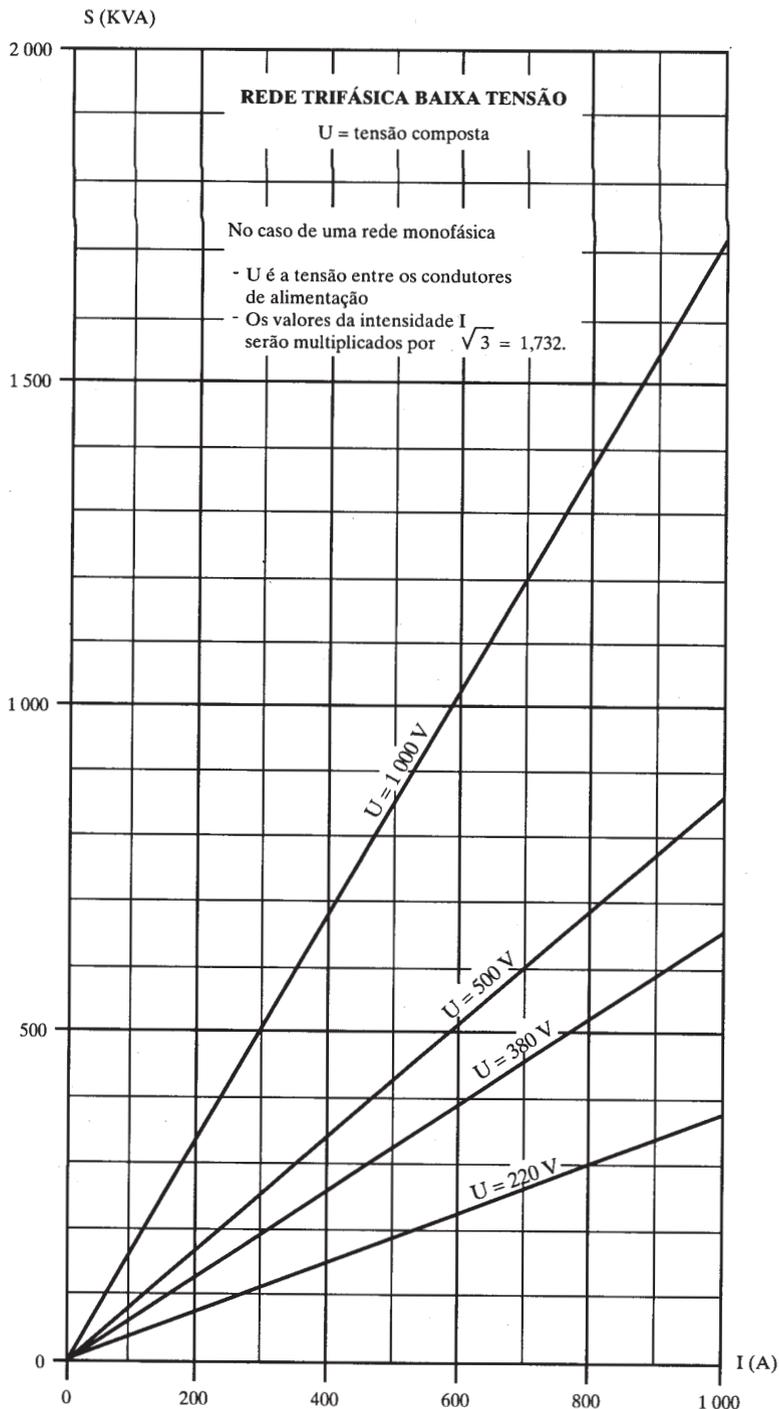
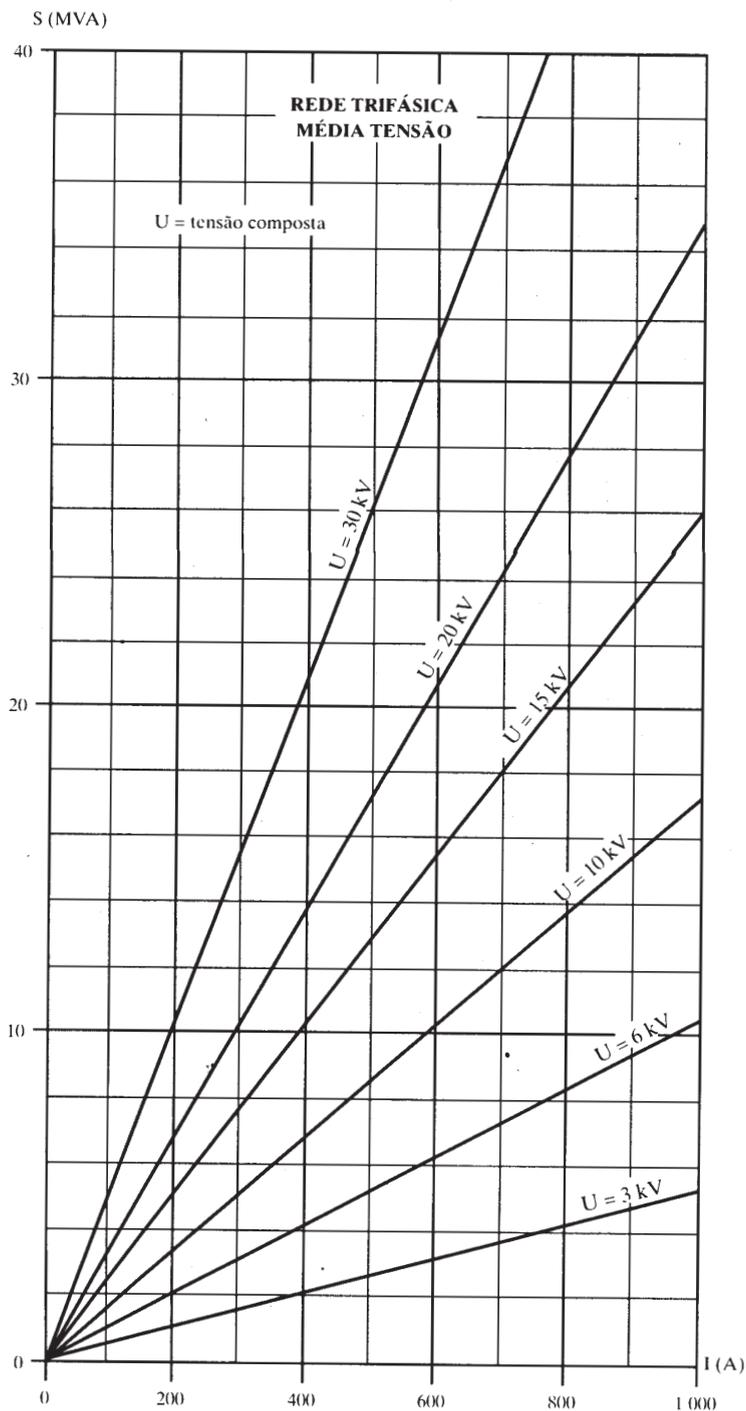


Gráfico 2 - Potência aparente transportada em Média Tensão



2.2.2 - Secção Necessária para o Aquecimento em Regime Permanente

1 - Introdução

A intensidade máxima admissível ou capacidade de transporte, em regime permanente, de uma canalização, é o valor da intensidade que provoca, no estado de equilíbrio térmico, o aquecimento da alma dos condutores até ao valor máximo permitido. Depende, essencialmente, das condições de instalação e do local no qual se encontra instalada a canalização, já que estas determinam directamente a dissipação das perdas térmicas (ver capítulo III). As temperaturas máximas, admissíveis em regime normal, para os isolantes que usamos correntemente, estão indicadas no quadro 17.

As capacidades de transporte, dos condutores e cabos de potência que fabricamos, estão indicadas nos quadros de características correspondentes. Salvo indicação em contrário, elas são estabelecidas nas condições seguintes, que são as geralmente tomadas como referência pelos documentos de normalização portugueses:

- canalização única, sem aquecimento mútuo com outras canalizações colocadas nas proximidades;
- canalização alimentada em permanência:
 - em corrente contínua ou monofásica: cabos com dois condutores,
 - em corrente trifásica: cabos com três, quatro ou cinco condutores, ou sistema de três cabos unipolares juntos (terno);
- colocação da canalização:
 - no solo a uma profundidade de 0,80 m, a temperatura e a resistividade térmica, consideradas para o solo, são normalmente de 20 °C e 1 K.m/W respectivamente, (é de notar que a resistividade térmica se exprime também em °C.cm/W e a sua equivalência é: 1 K.m/W = 100°C.cm/W),
 - em tabuleiros ao ar livre, ao abrigo das radiações solares, numa temperatura ambiente de 30 °C.

Os quadros do capítulo V indicam as intensidades admissíveis nos condutores e cabos de baixa tensão de emprego comum.

2 - Método de Cálculo

Na prática, é normal que as condições de instalação e do local difiram das consideradas como referência, para as intensidades admissíveis indicadas nas tabelas de características. Daí o caminho a seguir é o seguinte:

- definir, de maneira precisa, as condições de instalação e do local previsto, não omitindo nenhum factor susceptível de ter uma influência determinante;
- calcular a intensidade fictícia se essas condições são diferentes das de referência.

A intensidade fictícia é aquela que causaria o mesmo aquecimento da alma condutora que a intensidade a transmitir, se a canalização estivesse instalada, nas condições consideradas nos quadros de características.

Obtém-se, dividindo a intensidade a transmitir pelos coeficientes de correcção sucessivos, que traduzem a influência das diferenças relativas às condições de instalação e do local*.

As páginas seguintes precisam a influência destes factores e indicam os coeficientes de correcção a considerar, na grande parte dos casos encontrados.

Se as condições não divergirem das de referência, a intensidade fictícia é igual à intensidade a transmitir:

- retirar, do quadro de características do condutor ou cabo escolhido, a menor secção que permite transportar a intensidade fictícia. Isto é considerado apenas para os condutores realmente percorridos pela corrente, em regime normal, portanto excluindo o condutor neutro, em regime trifásico equilibrado, e o de condutor de protecção.

3 - Coeficientes de Correcção

Cabos Colocados no Solo

As capacidades de transporte indicadas nos quadros de características dos cabos, entendem-se geralmente, para um cabo multipolar ou um terno de cabos unipolares, dispostos em triângulo juntivo (cabos encostados), colocados, quer directamente no solo, quer numa caleira de betão cheia de areia, a 0,80m de profundidade, com uma temperatura do solo igual a 20° C e resistividade térmica 0,85 ou 1 K.m/W (ver página 69), sem aquecimento mútuo com outras canalizações de potência colocadas nas proximidades.

Portanto, os principais coeficientes de correcção traduzem:

- quer uma temperatura ou uma resistividade térmica do solo diferentes das de referência;
- quer proximidade térmica com outras ligações.

A - Temperatura do Solo

A temperatura do solo, à profundidade de colocação deve ser estimada com uma precisão suficiente, tendo particularmente em conta as variações sazonais, assim como a presença eventual no solo, de fontes de calor que não sejam as canalizações eléctricas (por exemplo, condutas de água quente). Desde que isso seja

* Inversamente, a intensidade que uma dada secção pode transmitir, em condições diferentes das de referência obtém-se multiplicando a capacidade de transporte, indicada nos quadros de características, pelos coeficientes de correcção apropriados.

possível, é desejável que essa estimativa esteja baseada em resultados de medidas efectuadas durante um período suficientemente longo.

Desde que a temperatura do solo tenha um valor diferente de 20 °C haverá lugar à aplicação de um coeficiente dado por:

$$k = \sqrt{\frac{\theta_p - \theta_o}{\theta_p - 20}}$$

Com θ_p = temperatura máxima admissível, em regime permanente, para o isolante escolhido °C.

θ_o = temperatura do solo, °C.

O valor deste coeficiente está indicado, no quadro 34, para diferentes valores de θ_p e θ_o .

Quadro 34 - Valores para o coeficiente κ

Temperatura do solo θ_o , °C	Temperatura admissível na alma condutora em regime permanente θ_p , °C								
	65	70	75	80	85	90	95	100	105
0	1,20	1,18	1,17	1,16	1,14	1,13	1,13	1,12	1,11
5	1,16	1,14	1,13	1,12	1,11	1,10	1,10	1,09	1,09
10	1,11	1,10	1,09	1,08	1,07	1,07	1,07	1,06	1,06
15	1,05	1,05	1,04	1,04	1,04	1,04	1,03	1,03	1,03
20	1	1	1	1	1	1	1	1	1
25	0,94	0,95	0,95	0,96	0,96	0,96	0,97	0,97	0,97
30	0,88	0,89	0,91	0,91	0,92	0,93	0,93	0,94	0,94
35	0,82	0,84	0,85	0,87	0,88	0,89	0,89	0,90	0,91
40	0,75	0,78	0,80	0,82	0,83	0,85	0,86	0,87	0,87
45	0,67	0,71	0,74	0,76	0,78	0,80	0,82	0,83	0,84
50	0,58	0,63	0,67	0,71	0,73	0,76	0,78	0,79	0,80

B - Profundidade de Colocação

A determinação da influência da profundidade de colocação, sobre a intensidade admissível, é delicada.

Por outro lado, a resistência térmica exterior, teórica, do cabo cresce com a profundidade, o que corresponde a uma diminuição da capacidade de transporte. Por outro lado, desde que a profundidade aumente, a temperatura do solo diminui e está menos sujeita às variações sazonais. Além disso, a humidade e a compacticidade do solo aumentam, o que se traduz por uma diminuição na resistividade térmica.

Podemos considerar que, a influência da profundidade de colocação é desprezável, no domínio de 70 a 120 cm, que é, geralmente, o usado. Para os cabos enterrados, perto da superfície do solo, a influência da temperatura torna-se importante. Devemos muitas vezes considerar, uma temperatura do solo superior a 20 °C, e então corrigir a intensidade a transportar em conformidade com o quadro acima.

C - Resistividade Térmica do Solo

É um elemento importante, na capacidade de transporte dos cabos enterrados, mas cujo valor é, por vezes, difícil de avaliar com precisão.

Com efeito, depende de numerosos factores, em particular da resistividade própria dos materiais que constituem o solo, e principalmente, da sua humidade. Esta é função:

- da constituição do terreno: natureza dos materiais, granulometria, compactagem;
- do nível do lençol freático;
- da estação e das condições locais de precipitação;
- do tipo e da densidade de vegetação;
- das características da superfície do solo (por exemplo, revestimento de asfalto ou de cimento).

A humidade é, além disso, susceptível de variar ao longo do tempo, em função da progressiva secagem do solo, devida ao calor libertado pela canalização eléctrica, principalmente, se estiver permanentemente em carga. A migração da humidade é tanto mais rápida e importante quanto mais fina for a granulometria do solo (areia por exemplo).

Em função destes diferentes factores, a resistividade térmica do solo pode variar, tal como o provam os valores indicados a seguir:

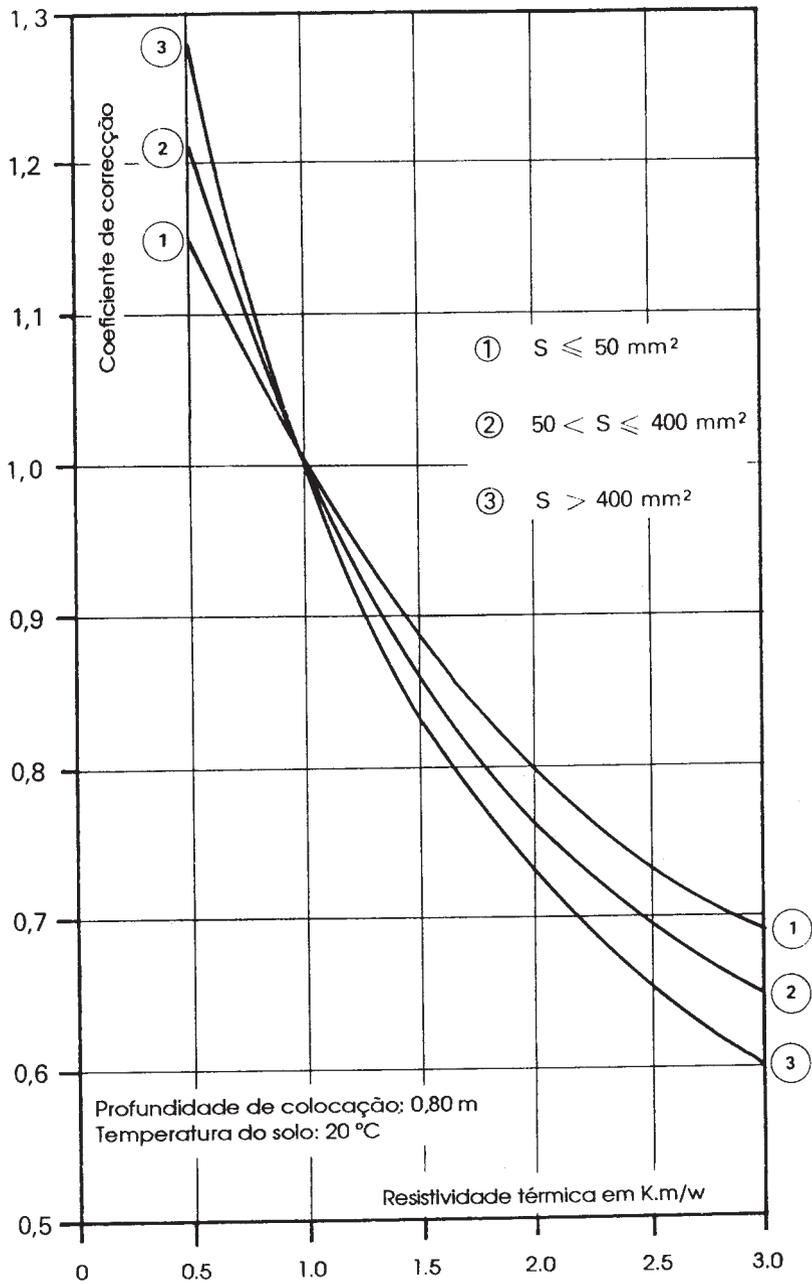
- | | |
|--|--------------------|
| • terreno muito húmido | : 0,4 a 0,5 K.m/W, |
| • areia húmida | : 0,5 a 0,7 K.m/W, |
| • calcário argila: terreno normal seco | : 0,7 a 1,0 K.m/W, |
| • terreno muito seco | : 1,5 K.m/W, |
| • areia seca | : 2,0 a 2,5 K.m/W, |
| • cinzas, escória | : 3,0 K.m/W. |

Durante o cálculo de canalizações que irão transportar potências importantes e, além disso, se é previsível a proximidade com outras fontes térmicas, é aconselhável efectuar uma medição, da resistividade térmica do solo, por um organismo especializado. Esta medição pode efectuar-se, no local ou em laboratório, com amostras nas quais é possível fazer variar a taxa de humidade.

Em certos casos, em que a resistividade térmica do solo é muito desfavorável, poderemos ser levados a substituir o terreno original, por materiais de características térmicas controladas e mais vantajosas. Em função das várias situações, esta medida é necessária durante a cobertura da zona, na proximidade imediata dos cabos, onde a influência do solo é preponderante.

O coeficiente de correcção a aplicar no cálculo da intensidade fictícia, depende, em particular, da dimensão exterior do cabo. Podemos, entretanto, considerar, com uma boa aproximação, os valores médios dados pelo gráfico 3.

Gráfico 3 - Coeficiente de Correção para uma Resistividade Térmica do Solo Diferente de 1 K.m/W



D - Proximidade Térmica com outras Canalizações de Potência

A consideração deste fenómeno, quando existe, é primordial para assegurar uma escolha apropriada da secção. Depende:

- das características das canalizações colocadas na proximidade da canalização em estudo, incluindo, eventualmente, o número de cabos colocados em paralelo, tipos, secções e dimensões dos mesmos, bem como intensidades transmitidas;
- da disposição relativa das canalizações nos locais onde mais se aproximam;
- das características térmicas do solo.

Podemos desprezar o aquecimento mútuo entre várias canalizações, colocadas lado a lado, se o intervalo entre elas for pelo menos igual a um metro. É prática corrente dispor as canalizações que estão colocadas num mesmo percurso, em esteira horizontal, com uma distância de 20 cm entre os bordos mais próximos de duas canalizações vizinhas (cabo multipolar ou terno de cabos unipolares). Esta distância constitui um compromisso que permite limitar:

- a largura da vala e portanto o custo das obras de engenharia civil;
- o aquecimento mútuo;
- os riscos de deterioração, das canalizações vizinhas, durante a colocação ou em caso de acidente.

Por razões económicas, não podemos, geralmente, espaçar os cabos mais de 30 a 50 cm, sobretudo quando se trata de uma esteira importante, já que obteríamos larguras das valas proibitivas. No entanto, em certos casos, é necessário um estudo económico, tendo em conta o melhoramento do coeficiente de proximidade com o afastamento dos cabos.

Indicamos, no quadro seguinte, o valor do coeficiente de correcção correspondente à colocação, em uma só esteira*, de vários cabos tripolares ou ternos de cabos monopolares idênticos, dispostos em triângulo juntivo, em função do intervalo livre deixado entre os bordos mais próximos de duas canalizações vizinhas. Considera-se um funcionamento em simultâneo e à plena carga, para todas as canalizações da esteira, o que dá uma certa margem de garantia. Os coeficientes são valores médios que podem, todavia, ser usados com uma boa aproximação na maior parte dos casos, geralmente, encontrados.

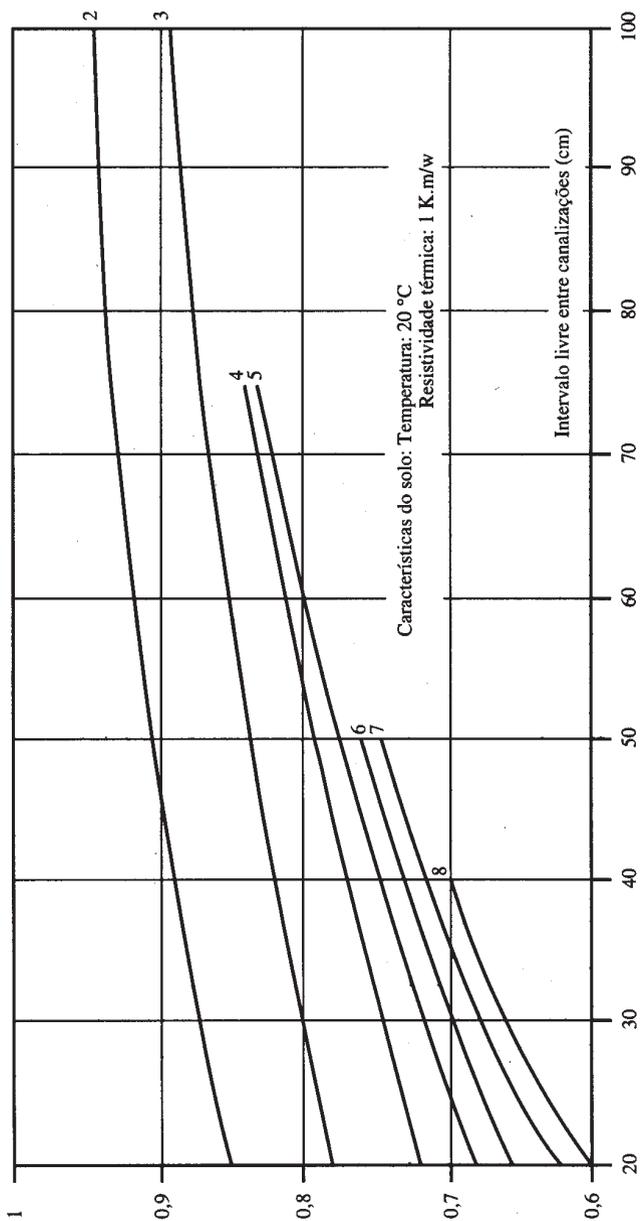
Desde que seja necessário um cálculo mais preciso, por exemplo, no caso de canalizações com especificações diversas ou com cargas de diferentes valores ou quando existem diferentes espaçamentos entre elas, o método descrito na publicação 60287 da CEI deverá ser utilizado.

*É desaconselhável a colocação dos cabos em várias camadas sobrepostas. Esta disposição é sempre desfavorável do ponto de vista térmico.

Torna, além disso, delicada toda a intervenção posterior sobre os cabos.

Gráfico 4 - Coeficiente de Correção para a colocação em Esteiras de Canalizações Trifásicas

(Cabos Tripolares ou Ternos de Cabos Unipolares)



Os números que figuram no fim de cada curva designam o número de canalizações colocadas em esteira.

Cabos Colocados ao Ar Livre

As capacidades de transporte, indicadas nos quadros de características de cabos, entendem-se, salvo indicação contrária, para:

- um cabo multipolar ou terno de cabos unipolares juntivos, colocados na superfície do solo, ou em suportes (tabuleiros, caminhos de cabos ...), ou fixos nas paredes, ao abrigo da radiação solar e sem aquecimento mútuo com outras canalizações situadas nas proximidades;
- uma temperatura máxima do ar livre de 30 °C.

A noção de «ar livre» significa, além disso, que as perdas térmicas são dissipadas, por convecção natural e irradiação, sem provocar aquecimento do ar ambiente. Isto supõe naturalmente:

- que o volume de ar e a ventilação natural são suficientes;
- que a circulação à volta dos cabos não é dificultada (prever, de preferência, o uso de tabuleiros perfurados, e deixar um intervalo de pelo menos 2 cm, em relação às paredes);

Os principais coeficientes de correcção a calcular traduzem, portanto:

- uma temperatura do ar ambiente diferente de 30 °C;
- exposição à radiação solar;
- proximidade térmica entre canalizações, ou entre espiras de uma mesma canalização enrolada num tambor;
- o confinamento do ar na vizinhança dos cabos (galeria de pequenas dimensões, caleira de betão).

A - Temperatura do Ar Ambiente

Deve ser calculada, tendo em conta quer as variações diárias quer as sazonais, assim como a presença eventual de fontes de calor no local da instalação.

O coeficiente de correcção, a aplicar desde que a temperatura do ar seja diferente de 30 °C, é dado por:

$$k = \sqrt{\frac{\theta_p - \theta_o}{\theta_p - 30}}$$

Com θ = temperatura máxima admissível em regime permanente para o isolante escolhido, °C

θ_o = temperatura do ar, °C.

O valor deste coeficiente está indicado no quadro seguinte, para diferentes valores de θ_p e θ_o .

Quadro 35 - Valores para o coeficiente κ

Temperatura do ar ambiente $\theta_0, ^\circ\text{C}$	Temperatura admissível na alma condutora em regime permanente $\theta_p, ^\circ\text{C}$								
	65	70	75	80	85	90	95	100	105
0	1,36	1,32	1,29	1,27	1,24	1,23	1,21	1,20	1,18
5	1,31	1,28	1,25	1,23	1,21	1,19	1,18	1,17	1,16
10	1,25	1,23	1,20	1,18	1,17	1,16	1,14	1,13	1,13
15	1,20	1,17	1,16	1,14	1,13	1,12	1,11	1,10	1,10
20	1,13	1,12	1,11	1,10	1,09	1,08	1,07	1,07	1,07
25	1,07	1,06	1,05	1,05	1,04	1,04	1,04	1,04	1,03
30	1	1	1	1	1	1	1	1	1
35	0,93	0,94	0,94	0,95	0,95	0,96	0,96	0,96	0,97
40	0,85	0,87	0,88	0,89	0,90	0,91	0,92	0,93	0,93
45	0,76	0,79	0,82	0,84	0,85	0,87	0,88	0,89	0,89
50	0,66	0,71	0,75	0,78	0,80	0,82	0,83	0,85	0,86
55	0,54	0,61	0,67	0,71	0,74	0,76	0,78	0,80	0,82
60	0,38	0,50	0,58	0,63	0,67	0,71	0,73	0,76	0,78
65		0,35	0,47	0,55	0,60	0,65	0,68	0,71	0,73
70			0,33	0,45	0,52	0,58	0,62	0,66	0,68
75				0,32	0,43	0,50	0,56	0,60	0,63
80					0,30	0,41	0,48	0,54	0,58
85						0,29	0,40	0,46	0,52
90							0,28	0,38	0,45
95								0,27	0,37
100									0,26

B - Exposição à Radiação Solar

O coeficiente de correcção correspondente depende da intensidade da radiação solar, da carga do cabo, da sua superfície de exposição, da reflexão eventual, etc. Pode considerar-se, em primeira aproximação, um coeficiente médio de $K = 0,85$.

Desde que seja necessário um cálculo preciso, podemos aplicar o método descrito na publicação 60 287 da CEI, que permite definir a intensidade admissível num cabo instalado ao ar livre e sujeito directamente à radiação solar.

Muitas vezes, é possível proteger os cabos da acção dos raios solares, pela interposição, por exemplo, de coberturas judiciosamente inclinadas, tendo o cuidado de que isso não provoque o confinamento do ar à volta dos cabos.

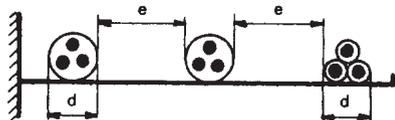
C - Proximidade Térmica com outras Canalizações de Potência

É aconselhável, do ponto de vista térmico, prever um intervalo livre entre canalizações adjacentes, a fim de permitir a circulação do ar. Além de assegurar aos cabos a possibilidade de efectuar movimentos de dilatação ou de contracção sucessivos, durante os ciclos de carga, favorece em larga medida a manipulação dos cabos durante a colocação ou em intervenções posteriores.

Considera-se que o aquecimento mútuo é desprezável, se o intervalo livre deixado entre canalizações adjacentes é superior a duas vezes o diâmetro exterior de um cabo multipolar, ou duas vezes a largura de um sistema de cabos unipolares.

Canalizações Colocadas à Superfície do Solo ou em Tabuleiros

- Canalizações não juntas,



$e \geq 2d$ $K=1$

- Canalizações Juntas,

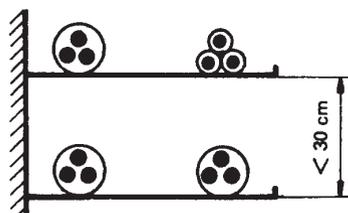


Quadro 36 - Coeficiente de Correção K

Número de cabos multipolares ou de ternos de monopulares	1	2	3	4	5	6	7	8	> 9
Colocação em pranchas ou tabuletas não perfuradas	1,0	0,85	0,79	0,75	0,73	0,72	0,72	0,71	0,70
Colocação no tecto	0,95	0,81	0,72	0,68	0,66	0,64	0,63	0,62	0,61
Colocação em tabuleiro perfurado	1,0	0,88	0,82	0,77	0,75	0,73	0,73	0,72	0,72
Colocação em consola	1,0	0,87	0,82	0,80	0,80	0,79	0,79	0,78	0,78

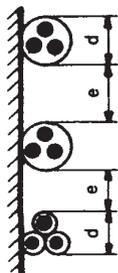
— Tabuleiros Sobrepostos

Considera-se que o aquecimento mútuo é desprezável ($K = 1$), se a distância entre tabuleiros é de pelo menos 30 cm. Este valor corresponde, além disso ao espaço que, na maior parte dos casos, permite uma manipulação fácil dos cabos. Se a distância entre tabuleiros é inferior a 30 cm, aplica-se um coeficiente de correção $K = 0,9$



— Canalizações Fixas nas Paredes

- Não juntas,



$e \geq 2d$ $K=1$

- Juntivas.

Quadro 37 - Coeficiente de Correção K



Número de cabos multipolares ou de ternos de monopolares	1	2	3	4	5	6	7	8	> 9
Colocação na parede	1,0	0,85	0,79	0,75	0,73	0,72	0,72	0,71	0,70
Colocação em tabuleiro	1,0	0,88	0,82	0,77	0,75	0,73	0,73	0,72	0,72

Canalizações Flexíveis para Alimentação de Aparelhos Móveis

- «Chariot» porta cabos

Quadro 38 - Coeficiente de Correção K

Número de cabos colocados, conjuntamente, no «chariot»	2	3	4	5
Coeficiente de correção	0,94	0,88	0,87	0,86

- Tambor de um enrolador

Em função do número de camadas e de espiras.

Quadro 39 - Coeficiente de Correção K

Tambor com uma só espira		Tambor com várias espiras		
Número de camadas	Coeficiente de correção	Número de camadas	Número de espiras juntivas	Coeficiente de correção
1	1,00	1	1	1,00
2	0,88		2	0,94
3	0,80		3	0,88
4	0,76		4	0,87
5	0,75		5	0,86
6	0,74		6	0,85
7	0,73		7 e mais	0,85
8	0,73	2	1 camada completa + 1	0,84
9	0,72		2	0,76
10	0,71		3	0,71
11	0,70		4	0,68
12	0,69		5	0,66
13	0,68	6 e mais	0,66	
14	0,68	3	2 camadas completas + 1	0,61
15	0,67		2	0,60
			3	0,59
			4	0,55
		5	0,53	
		6 e mais	0,53	

Notas:

- Desde que o número de camadas, num tambor com várias espiras, seja igual a 3, os coeficientes de correcção tendem para o valor 0,45;
- Durante o funcionamento do cabo em regime cíclico, é conveniente consultar a página 84, para estimar judiciosamente a secção desse cabo.

D - Confinamento do Ar na Vizinhança do Cabo

Desde que o volume de ar, que rodeia um cabo, seja reduzido, produz-se um aquecimento do ar, sob a acção das perdas térmicas dissipadas. É o caso das canalizações colocadas no interior de galerias técnicas de pequenas dimensões, não ventiladas, ou as caleiras de betão que existem, frequentemente nas fábricas, à superfície do solo, munidas de uma cobertura.

O aumento da temperatura do ar, acima do valor considerado na ausência dos cabos e, por consequência, a redução da intensidade admissível, dependem, essencialmente, da razão entre o volume de ar existente no canal e a soma das perdas térmicas.

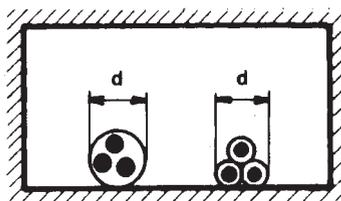
Poderemos, em primeira aproximação, aplicar à intensidade o coeficiente de correcção definido a seguir, em função do «coeficiente de ocupação do canal.»

$$\text{coeficiente de ocupação} = \frac{p}{\sum d}$$

- p (cm) = parte do perímetro do canal que participa na dissipação do calor para o meio envolvente. Devemos, nomeadamente, excluir as paredes vizinhas de fontes de calor, ou locais aquecidos, ou expostos à radiação solar directa;
- $\sum d$ (cm) = soma dos diâmetros das canalizações que se encontram no canal.

O atravancamento de uma canalização é:

- o diâmetro exterior para um cabo multipolar;
- duas vezes o diâmetro exterior de um cabo para um terno de unipolares.



Quadro 40 - Coeficiente de Correcção K

Coeficiente de ocupação	5	7	10	15	20	30	50
Coeficiente de correcção K, relativamente à colocação no ar livre	0,60	0,66	0,72	0,80	0,85	0,90	0,92

Desde que se mostre necessário um cálculo mais preciso, poderá o mesmo ser efectuado, por exemplo, segundo o método descrito na publicação 60287 CEI na qual:

$$\Delta\theta = \frac{W}{3p}$$

$\Delta\theta$ = aquecimento do ar acima do ambiente, ($^{\circ}\text{C}$),

W = potência total dissipada no canal, por metro de comprimento, (W/m),

p = parte do perímetro que participa na dissipação do calor, (m).

O coeficiente de correcção é, em seguida, determinado, em conformidade com o quadro 35, em função da temperatura do ar assim considerada.

Muitas vezes, é possível reduzir, em certa medida, o efeito desfavorável do confinamento, activando a ventilação natural do canal, por meio de dispositivos apropriados, por exemplo: chaminés de ventilação, com alturas desiguais, fecho das caleiras de betão com grades, etc. Em alguns casos, poderá ser mesmo necessário provocar uma ventilação forçada permanentemente, desde que as perdas térmicas não possam ser evacuadas pela dissipação natural.

Cabos Entubados

Por imperativos de colocação, é, muitas vezes, interessante ou mesmo necessário instalar os cabos no interior de tubos. Portanto, desde que o comprimento da passagem em tubos ultrapasse poucos metros, o confinamento do ar nos tubos pode originar uma diminuição não desprezável da capacidade de transporte.

Além dos coeficientes de correcção, indicados mais adiante, teremos em conta as seguintes indicações:

— Sistemas de Cabos Unipolares

No caso do emprego de tubos metálicos, magnéticos, é indispensável colocar todas as fases no interior de um mesmo tubo, a fim de evitar perdas magnéticas proibitivas. Uma tal disposição corresponde a condições térmicas desfavoráveis e pode tornar delicada a colocação, de comprimentos importantes, de cabos de grandes dimensões.

Pelo contrário, com tubos em material não magnético (termoplástico, fibro-cimento, etc), é preferível, do ponto de vista mecânico e térmico, colocar cada fase no interior de um tubo individual*.

* Se os tubos estão colocados no interior de um maciço de betão armado, as ferragens deste não devem fechar-se à volta de um único cabo, mas sobre o conjunto das fases, a fim de se evitarem perdas magnéticas suplementares.

Além disso, o efeito desfavorável do confinamento do ar pode ser combatido através de um espaçamento apropriado entre os tubos, permitindo uma diminuição do aquecimento mútuo entre as fases.

Assim para as travessias de ruas, por parte de ternos de cabos monopolares MT e AT, geralmente executadas por meio de tubos termoplásticos individuais, considera-se que não há redução da intensidade admissível, relativamente à parte restante da canalização enterrada, se deixarmos uma distância entre os eixos dos tubos de:

- 30 cm se os tubos estão dispostos em esteira;
- 35 cm se os tubos estão dispostos em triângulo.

— Cabos Multipolares

A redução da intensidade admissível é sensivelmente a mesma, quer seja um tubo metálico ou um tubo amagnético de material termoplástico, ou fibrocimento. Com efeito, se a ausência das perdas térmicas, nestes últimos, é um elemento favorável, os tubos metálicos oferecem, por sua vez, uma menor resistência à dissipação do calor, já que a sua espessura é, geralmente, inferior e a resistividade térmica dos metais é baixa.

A diminuição da capacidade de transporte depende de vários factores: secção da alma, temperatura admissível para o isolante, natureza e dimensões do tubo, etc.

Os coeficientes de correcção indicados a seguir são valores médios, permitindo uma avaliação aproximada do fenómeno.

Quadro 41 - Coeficiente de Correcção para uma Canalização Trifásica Entubada

Natureza da canalização	Terno de cabos unipolares		Cabo tripolar
	1 cabo por tubo amagnético	3 cabos no mesmo tubo	
			
Razão entre $\frac{\text{Ø interior do tubo}}{\text{Ø de um cabo}}$	$\geq 1,5$	$2,5 < R < 2,8$	$\geq 1,5$
Tubos enterrados ou colocados no interior de um maciço de betão			
Coefficiente de correcção relativamente à colocação no solo	0,95	0,85	0,80
Tubos ao ar			
Coefficiente de correcção relativamente à colocação ao ar livre			
$S \leq 150 \text{ mm}^2$		0,80	0,75
$150 < S \leq 630 \text{ mm}^2$		0,73	0,70
$S \leq 630 \text{ mm}^2$		0,68	

Proximidade Térmica entre Canalizações

Se for caso disso, convém aplicar, além dos coeficientes indicados no quadro anterior, os coeficientes de correcção seguintes:

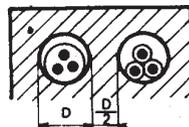
Quadro 42 - Várias canalizações trifásicas num mesmo tubo

Número de canalizações no mesmo tubo	2	3
Ternos de cabos unipolares.....	0,82	0,73
Cabos tripolares.....	0,88	0,78

— proximidade térmica entre tubos, enterrados ou no interior de um maciço de betão

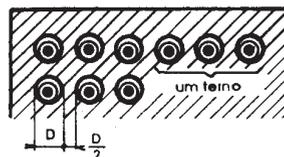
Os valores a seguir são considerados para um intervalo entre tubos igual ao seu raio.

Quadro 43 - Um Sistema Trifásico por Tubo (cabo tripolar ou terno)



Número de tubos sobrepostos	Número de tubos colocados lado a lado					
	1	2	3	4	5	6
1	1	0,87	0,77	0,72	0,68	0,65
2	0,87	0,71	0,62	0,57	0,53	0,50
3	0,77	0,62	0,53	0,48	0,45	0,42
4	0,72	0,57	0,48	0,44	0,40	0,38
5	0,68	0,53	0,45	0,40	0,37	0,35
6	0,65	0,50	0,42	0,38	0,35	0,32

Quadro 44 - Um Cabo Unipolar por Tubo (amagnético)



Número de tubos sobrepostos	Número de tubos colocados lado a lado					
	1	2	3	4	5	6
1	1	0,88	0,79	0,74	0,71	0,69
2	0,88	0,73	0,65	0,61	0,57	0,56
3	0,79	0,65	0,56	0,52	0,49	0,47
4	0,74	0,60	0,52	0,49	0,46	0,45
5	0,71	0,57	0,50	0,47	0,44	0,42
6	0,68	0,55	0,48	0,45	0,42	0,40

2.2.3 - Secção Necessária para o Aquecimento em Regime Variável

1 - Introdução

A determinação da secção necessária, desde que a carga aplicada a uma canalização seja variável no tempo, depende de numerosos factores, muitas vezes difíceis de definir, relativos, em particular, às condições de dissipação das perdas térmicas em regime transitório, no cabo e no meio envolvente. A secção não poderá, por isso, ser calculada através de um método simples e de âmbito geral. As indicações dadas, a seguir, destinam-se principalmente a precisar o problema e a permitir, em certos casos simples, um cálculo aproximado da secção.

A variação da carga numa canalização pode assumir duas formas:

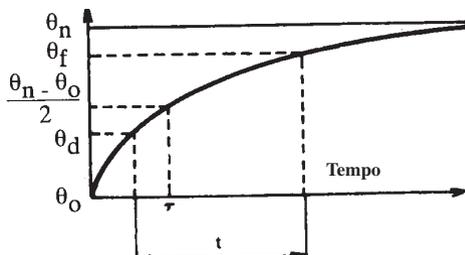
- **regime cíclico ou descontínuo:** variação da intensidade ao longo do tempo, segundo um ciclo determinado que se repete periodicamente, o qual podemos representar por um diagrama de cargas;
- **sobrecarga:** aumento da intensidade para além do valor máximo admissível em regime permanente, durante um tempo limitado. Não consideramos o caso dos curto-circuitos, que são situações acidentais de muita curta duração (≤ 5 s), tratados no ponto 4 da secção 2.2.3.

Nestes dois casos, é possível escolher uma secção inferior àquela que seria necessária para transmitir, em permanência, a intensidade de ponta do regime cíclico ou intensidade de sobrecarga, já que o aquecimento dos cabos não segue, instantaneamente, as variações de intensidade.

2 - Lei do Aquecimento de um Cabo

A sua determinação rigorosa é difícil, devido à complexidade do fenómeno da dissipação do calor, em regime transitório, e ao facto de que na prática, certos parâmetros só podem ser definidos com rigor, depois do cabo colocado nas condições próprias de instalação e do meio envolvente. Entre as possíveis representações simplificadas, a mais simples que permite, contudo, uma estimativa muito aproximada do fenómeno, consiste em representar o aquecimento da alma condutora, sob o efeito de uma intensidade constante, por um ramo de hipérbole:

Temperatura da alma condutora



$$\theta(t) - \theta_o = (\theta_n - \theta_o) \frac{t}{\tau + t}$$

θ_o = temperatura ambiente,

θ_n = temperatura alcançada no estado de equilíbrio para a intensidade considerada,

τ = tempo necessário para atingir 50% do aquecimento correspondente ao regime permanente. Depende, essencialmente, das condições de difusão do calor no cabo e da sua dissipação no meio envolvente.

A lei do aquecimento permite obter desta maneira a temperatura da alma θ_f devida à aplicação de uma intensidade dada, durante uma duração t , a partir de um estado inicial no qual a temperatura da alma é θ_a .

3 - Regime Cíclico

A - Princípio de Determinação da Secção

Consiste em estabelecer a curva de variação da temperatura da alma condutora, a partir do diagrama de cargas e das curvas de aquecimento, correspondentes às diferentes intensidades em jogo, permitindo assim verificar que a temperatura da alma condutora permanece compatível com a temperatura máxima admissível para o isolante escolhido.

B - Método Aproximado

Uma primeira aproximação da secção poderá ser obtida com a ajuda daquilo que podemos definir como intensidade quadrática. Esta é a intensidade fictícia cujo transporte em permanência provocaria, durante um ciclo completo, sensivelmente as mesmas perdas térmicas que o regime de carga em estudo, sendo dada por:

$$I_q = \sqrt{\frac{\sum I_i^2 t_i}{\sum t_i}}$$

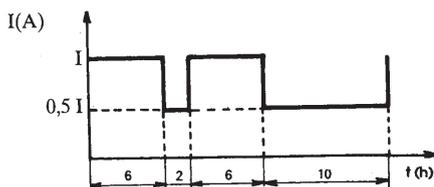
O I_i e t_i são respectivamente as intensidades e as durações correspondentes aos períodos sucessivos do ciclo.

A secção é calculada a partir de I_q , como indicado no ponto 2 da secção 2.2.2.

C - Exemplo: regime cíclico diário

ao ar livre: $I = I_p$

no solo: $I \approx 1,10 I_p$



I - intensidade admissível à plena carga do regime cíclico,

I_p - intensidade admissível em regime permanente.

4 - Sobrecarga

Princípio de cálculo: com a ajuda da lei do aquecimento correspondente à intensidade de sobrecarga, determina-se, a partir da temperatura da alma antes da aplicação da sobrecarga, a temperatura atingida no final da mesma. Esta não poderá ultrapassar o valor máximo admissível para o isolante.

Se admitirmos, como aproximação da lei do aquecimento, o ramo de hipérbole definido atrás, os vários parâmetros estão ligados pela seguinte relação:

$$\frac{t_s}{\tau} = \frac{(\theta_s - \theta_o) (\theta_f - \theta_d)}{(\theta_s - \theta_f) (\theta_s - \theta_d)}$$

t_s = duração da sobrecarga admissível, (minutos),

τ = tempo que demora a atingir 50% do aquecimento permanente, (minutos),

θ_d = temperatura da alma antes da sobrecarga, (°C),

θ_f = temperatura admissível na alma no final da sobrecarga, (°C),

θ_s = temperatura da alma correspondente à transmissão em permanência da intensidade de sobrecarga, (°C),

θ_o = temperatura ambiente, (°C).

Distinguem-se:

A - Sobrecargas Frequentes

Não se pode admitir uma temperatura da alma, no final de uma sobrecarga, superior ao valor admissível em regime permanente. Uma sobrecarga só é possível desde que o cabo esteja submetido, antes da sobrecarga, a uma carga inferior à admitida em permanência. Os quadros seguintes permitem calcular a intensidade de sobrecarga admissível, em função de diferentes valores da carga inicial e da duração da sobrecarga.

Observações: Os resultados que se apresentam a seguir são valores médios. O valor de τ varia em função da constituição e secção dos cabos e das suas condições de instalação (τ tem um valor geralmente compreendido entre 10 e 100 minutos). Por outro lado, supõe-se que, o intervalo de tempo, que separa duas sobrecargas sucessivas, é suficiente para que o cabo regresse ao estado de equilíbrio térmico correspondente à carga inicial (aproximadamente um dia).

Notações:

I_d = intensidade transportada em regime permanente antes da sobrecarga (A),

I_p = intensidade máxima admissível em regime permanente (A),

I_s = intensidade de sobrecarga admissível (A).

Quadro 45 - Cabos no Solo à Temperatura de 20 °C

$\frac{I_d}{I_p}$	$\frac{I}{I_p}$ em função da duração da sobrecarga							
	30 mn	45 mn	1 h	2 h	3 h	4 h	5 h	6 h
25%	1,40	1,29	1,22	1,12	1,08	1,06	1,05	1,04
50%	1,37	1,27	1,21	1,11	1,08	1,06	1,05	1,04
75%	1,30	1,22	1,18	1,10	1,07	1,06	1,05	1,04
90%	1,21	1,16	1,13	1,08	1,06	1,05	1,04	1,03

Quadro 46 - Cabos ao Ar Livre à Temperatura de 30 °C

$\frac{I_d}{I_p}$	$\frac{I}{I_p}$ em função da duração da sobrecarga							
	30 mn	45 mn	1 h	2 h	3 h	4 h	5 h	6 h
25%	1,71	1,51	1,41	1,22	1,15	1,12	1,10	1,08
50%	1,65	1,47	1,37	1,21	1,15	1,11	1,09	1,08
75%	1,50	1,38	1,30	1,18	1,13	1,10	1,08	1,07
90%	1,34	1,26	1,21	1,13	1,10	1,08	1,07	1,06

B - Sobrecargas Excepcionais (algumas por ano)

Podemos, neste caso, admitir que a alma atinja uma temperatura superior à admitida em regime permanente, sem ser de recear, no entanto, um envelhecimento prematuro do isolante. A majoração da temperatura permitida, que depende, essencialmente, do isolante escolhido e da duração da sobrecarga prevista, deverá ser calculada em cada caso particular. O cálculo da secção é, então, efectuado em função disso.

2.2.4 - Secção Necessária para o Aquecimento em Caso de Curto-Circuito

1 - Introdução

Em caso de curto-circuito, os cabos veiculam uma intensidade muito mais elevada que a sua capacidade de transporte em regime permanente. O tempo de passagem desta intensidade, correspondente ao tempo necessário ao corte pelos dispositivos de protecção da rede, é, no entanto, muito curto, não ultrapassando, no máximo, alguns segundos. Podemos, então, admitir que a alma seja levada a uma temperatura substancialmente superior àquela que é autorizada em regime normal, sem prejuízo para o isolante. As temperaturas máximas admissíveis são geralmente fixadas pelos documentos de normalização e figuram no quadro 17 para os diferentes isolantes que utilizamos.

O problema do comportamento em regime de curto-circuito levanta-se, com maior frequência, nas canalizações de média e alta tensão, nas quais a intensidade de defeito a veicular poderá ser particularmente elevada. Em baixa tensão, as condições de curto-circuito são geralmente menos severas, em virtude da redução da intensidade provocada pela impedância de todos os elementos da rede, colocados a montante do local do defeito (linhas aéreas, cabos, transformadores, ...).

2 - Método de Cálculo

Devido à curta duração dos curtos-circuitos, admite-se que as perdas térmicas originadas durante o defeito, só provocam o aquecimento da alma e que a dissipação progressiva das mesmas, para o resto do cabo e o meio envolvente, só acontece posteriormente. Esta hipótese (aquecimento adiabático) permite o cálculo da densidade de corrente admissível da alma, em função da duração do curto-circuito e das temperaturas limites.

A secção a escolher é o valor normalizado imediatamente superior a:

$$s = \frac{I_{cc}}{\delta}$$

I_{cc} = intensidade de curto-circuito a transmitir (A),

δ = densidade de corrente admissível (A/mm²).

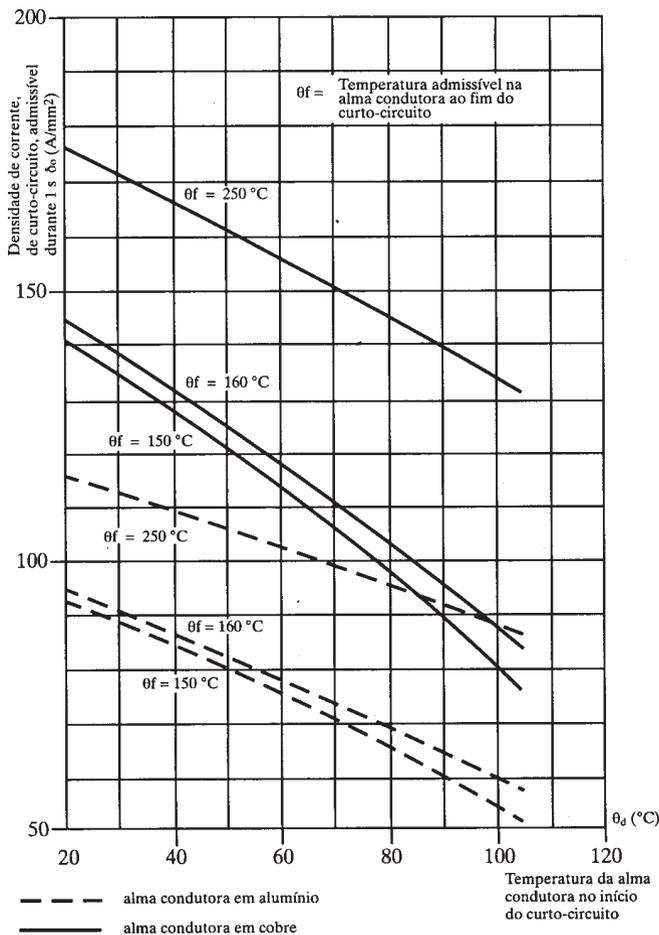
O gráfico seguinte indica o valor δ_o para uma duração do curto-circuito igual a um segundo, em função da:

- natureza do metal condutor;
- temperatura da alma antes do curto-circuito. Este valor poderá ser determinado, em função da carga da canalização, como se indicam nos gráficos 15 e 16;
- temperatura máxima admissível, para o isolante considerado, no final do curto-circuito (quadro 17).

Se a duração do curto-circuito t (segundos) é diferente de um segundo, sem, no entanto, exceder 5 segundos, o valor correspondente da densidade da corrente pode ser obtido por:

$$\delta = \frac{\delta_o}{\sqrt{t}}$$

Gráfico 5 - Curto-Circuito na Alma Condutora



3 - Método Aproximado

Uma boa aproximação da secção poderá ser obtida pela expressão:

$$S = \frac{I_{cc}}{K} \sqrt{\frac{t}{\theta_f - \theta_d}}$$

O coeficiente K é, teoricamente, função de θ_f , θ_d e da natureza do metal condutor.

Podemos, no entanto, adoptar, em primeira aproximação:

- para o alumínio: $K = 7$
- para o cobre : $K = 11$

2.2.5 - Secção Necessária para a Queda de Tensão

1- Introdução

A tensão disponível, em qualquer ponto da instalação de utilização, deve permitir um funcionamento satisfatório do ou dos receptores alimentados. Por outras palavras, a queda de tensão, produzida pela canalização, isto é, a diferença entre as tensões medidas, no ponto de alimentação da canalização e nesse ponto, não deve ultrapassar um determinado valor .

O problema coloca-se essencialmente em baixa tensão, já que a queda de tensão pode atingir uma percentagem não desprezável da tensão de alimentação. Isso acontece, desde que o comprimento da canalização seja importante ou o regime de funcionamento tenha períodos de intensidade elevada, mesmo que estes sejam muito breves para poder influenciar a escolha da secção do ponto de vista térmico.

2 - Valores Admissíveis para a Queda de Tensão

A queda de tensão, a não ultrapassar, depende em cada caso das características dos receptores alimentados.

Na ausência de informações precisas a este respeito, poderemos considerar, na maior parte dos cabos de instalações alimentadas directamente a partir de uma rede de distribuição pública em baixa tensão, os valores máximos indicados no Regulamento de Segurança de Instalações de Utilização de Energia Eléctrica. Estes, expressos em função da tensão nominal da instalação, são respectivamente:

- 3% para iluminação;
- 5% para outras utilizações.

Se a instalação é alimentada por um posto de transformação particular ou por um posto de transformação a partir de uma instalação de alta tensão, os limites acima podem ser elevados, se necessário, a 6% e 8% respectivamente. Para as redes de distribuição em baixa tensão, as variações de tensão em qualquer ponto da rede, não deverão ser superiores a $\pm 8\%$. Nas redes de distribuição em centros urbanos, recomenda-se que as variações de tensão em relação ao valor nominal não excedam $\pm 5\%$. Para as redes de distribuição de média tensão, considera-se uma queda de tensão, máxima admissível, inferior ou igual a 7%. Finalmente, é possível admitir em certos casos uma queda de tensão superior aos limites anteriores, nomeadamente, durante o arranque dos motores, que provoca perdas de corrente importantes.

O quadro seguinte indica, para redes correntes em baixa tensão, a correspondência entre o valor absoluto (em volt) e o valor relativo (em %) da queda de tensão.

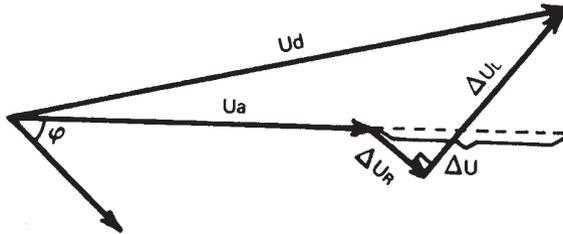
Quadro 47 - Quedas de Tensão

Tensão nominal na origem da instalação V	Queda de tensão, expressa em volt, correspondente a um valor relativo de:									
	1%	2%	3%	4%	5%	6%	7%	8%	9%	10%
220	2,2	4,4	6,6	8,8	11	13,2	15,4	17,6	19,8	22
380	3,8	7,6	11,4	15,2	19	22,8	26,6	30,4	34,2	38

3 - Fórmula Aproximada da Queda de Tensão

Devido ao reduzido comprimento das canalizações de energia, realizadas com cabos eléctricos despreza-se, geralmente, a influência da corrente capacitiva.

As diferentes tensões, em jogo podem representar-se pelo esquema seguinte:



- U_d = tensão na origem,
- U_a = tensão no ponto de utilização,
- ΔU_R = queda de tensão resistiva,
- ΔU_L = queda de tensão indutiva,
- $\cos \varphi$ = factor de potência do receptor.

Em primeira aproximação: $\Delta U = \Delta U_R \cos \varphi + \Delta U_L \sin \varphi$

Substituindo ΔU_R e ΔU_L pelo seu valor, a queda de tensão, em função do tipo de rede considerada, é dada por:

- em corrente contínua $\Delta U = 2 l R I$
- em corrente alternada monofásica $\Delta U = 2 l (R \cos \varphi + L \omega \sin \varphi) I$
- em corrente alternada trifásica $\Delta U = \sqrt{3} l (R \cos \varphi + L \omega \sin \varphi) I$

Em que:

- ΔU = queda de tensão em volt; no caso de corrente alternada trifásica, considera-se a tensão entre fases,
- l = comprimento da canalização, em km,
- I = intensidade transmitida pela canalização, em A,
- R = resistência aparente de um condutor, à temperatura de funcionamento, em ohm/km (ver ponto 3 da secção 3.1.1),
- L = indutância aparente de um condutor, em H/km (ver ponto 4 da secção 3.1.1),
- ω = $2 \pi f$ em que f é a frequência (Hz),
- φ = desfasamento introduzido, entre a corrente e a tensão, pelo receptor. Não deverá ser confundido com o desfasamento introduzido pela canalização.

4 - Determinação da Secção

A - Método Geral

a) Determinar, em função das características da instalação e das condições de funcionamento desejadas, os valores de ΔU admissível, I e $\cos\varphi$, tendo em conta as seguintes considerações:

- ΔU admissível: na maior parte dos casos, é suficiente considerar apenas a queda de tensão em regime normal. No entanto, desde que o regime de funcionamento comporte períodos de intensidade importante (arranque de motores, por exemplo), convém considerar, além disso, a queda de tensão admissível nestas condições;
- I : como no caso anterior, considera-se a intensidade transmitida pela canalização em regime normal e, eventualmente, em sobrecarga. Além disso, desde que tal se justifique, teremos em conta os coeficientes de simultaneidade e de utilização da instalação (ver secção 2.2.1);
- $\cos\varphi$: o factor de potência da instalação é determinado da mesma maneira que para o cálculo da intensidade a transmitir (ver ponto 2 da secção 2.2.1).

Convém ainda referir que, durante o arranque dos motores, o $\cos\varphi$ toma em geral um valor sensivelmente inferior ao do regime normal. Na ausência de indicações, a este respeito, escolhemos um valor para $\cos\varphi$, no arranque, à volta de 0,35.

b) Supondo já escolhido o tipo de cabo, que irá constituir a canalização, a secção a adoptar para a queda de tensão é a secção normalizada imediatamente superior aquela para a qual (usando as mesmas notações e unidades que anteriormente) se verifique:

$$\text{em corrente contínua: } R = \frac{\Delta U_{\text{admissível}}}{2I}$$

$$\text{em corrente alternada monofásica: } R \cos\varphi + L\omega \sin\varphi = \frac{\Delta U_{\text{admissível}}}{2I}$$

$$\text{em corrente alternada trifásica: } R \cos\varphi + L\omega \sin\varphi = \frac{\Delta U_{\text{admissível}}}{I\sqrt{3}}$$

B - Método Aplicável no Caso de Circuitos Alimentados em Tensão Alternada com $\cos\varphi = 0,8$

Os quadros com as características dos vários tipos de cabos, para os quais a queda de tensão poderá ser determinante na escolha da secção, indicam o valor da queda de tensão provocada pela passagem de 1 A num cabo de 1 km de comprimento, sendo o $\cos\varphi$ do receptor = 0,80.

O método a empregar, consiste no cálculo de $\frac{\Delta U_{\text{admissível}}}{\Pi}$ e, na escolha, no quadro das características do cabo em estudo, da secção mínima que permita respeitar o valor assim obtido.

Nota importante:

Salvo indicação contrária, as quedas de tensão unitárias indicadas nos quadros consideram que se trata de:

- tensão monofásica no caso de cabos com 2 condutores;
- tensão trifásica para os outros casos.

Além disso, o cabo é suposto no regime de equilíbrio térmico, correspondente à plena carga admissível. Para um cálculo preciso da queda de tensão unitária, no caso em que a alma condutora se encontre a uma temperatura diferente, poderemos corrigir a resistência com a ajuda dos coeficientes indicados no quadro 50.

C - Método Aproximado

Para um cálculo rápido da secção, podemos utilizar os gráficos que se seguem, que fornecem um valor aproximado da queda de tensão válida para a maioria das especificações de cabos de baixa tensão:

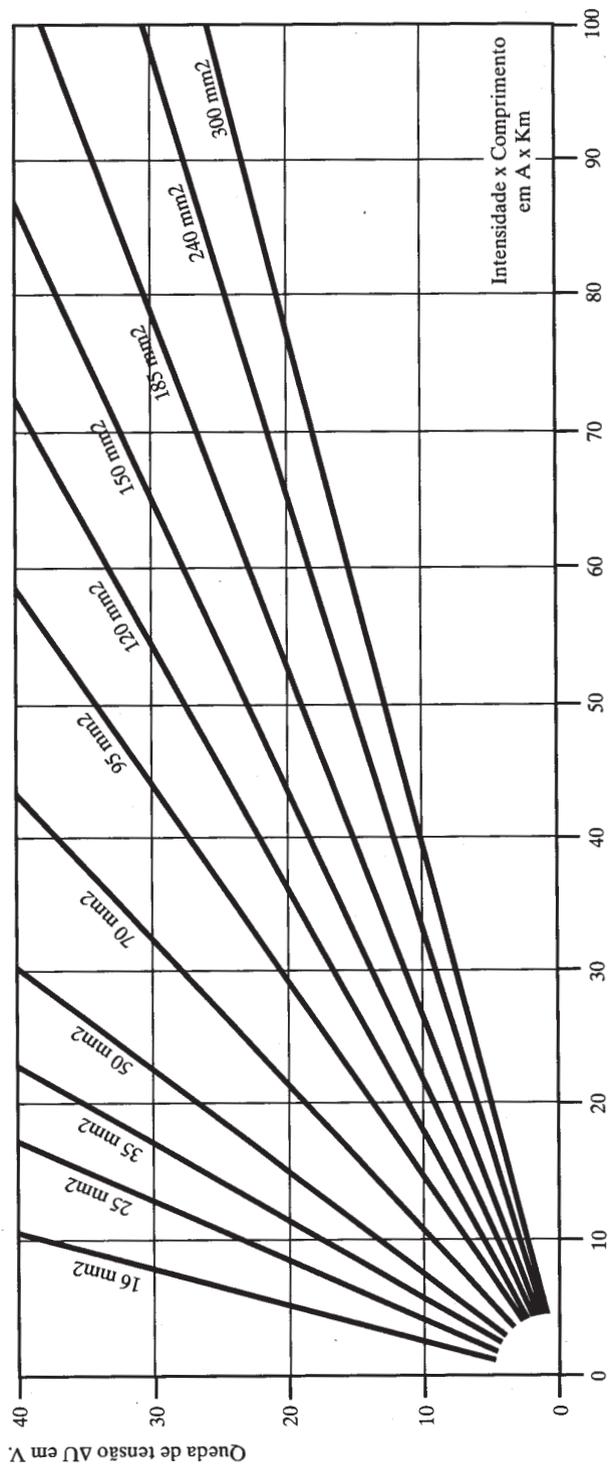
- em função do produto Π , da secção do condutor e do tipo alternada,
- para diferentes valores do factor de potência da instalação:
- $\text{Cos } \varphi = 0,9$ correspondendo sensivelmente a $\text{tg } \varphi = 0,4$, que é a hipótese considerada geralmente, para a rede de distribuição pública,
 - alma em alumínio, (gráfico 6),
 - alma em cobre, (gráfico 7),
- $\text{Cos } \varphi = 0,8$ valor geralmente usado na ausência de indicações,
 - alma em alumínio, (gráfico 8),
 - alma em cobre, (gráfico 9),
- $\text{Cos } \varphi = 0,35$ valor médio correspondente ao regime de arranque dos motores,
 - alma em alumínio, (gráfico 10),
 - alma em cobre, (gráfico 11).

Observações:

Por outro lado, os diferentes métodos indicados permitem determinar ainda, para cada secção, qual é o comprimento no qual uma dada intensidade pode ser transmitida, ou qual a intensidade que pode ser transmitida num comprimento dado, com respeito pelos valores máximos admissíveis para a queda de tensão.

**Gráfico 6 - Queda de Tensão entre Fases (Tensão Composta)
Cabos de Baixa Tensão com 3 condutores em Alumínio Cós $\varphi = 0,9$**

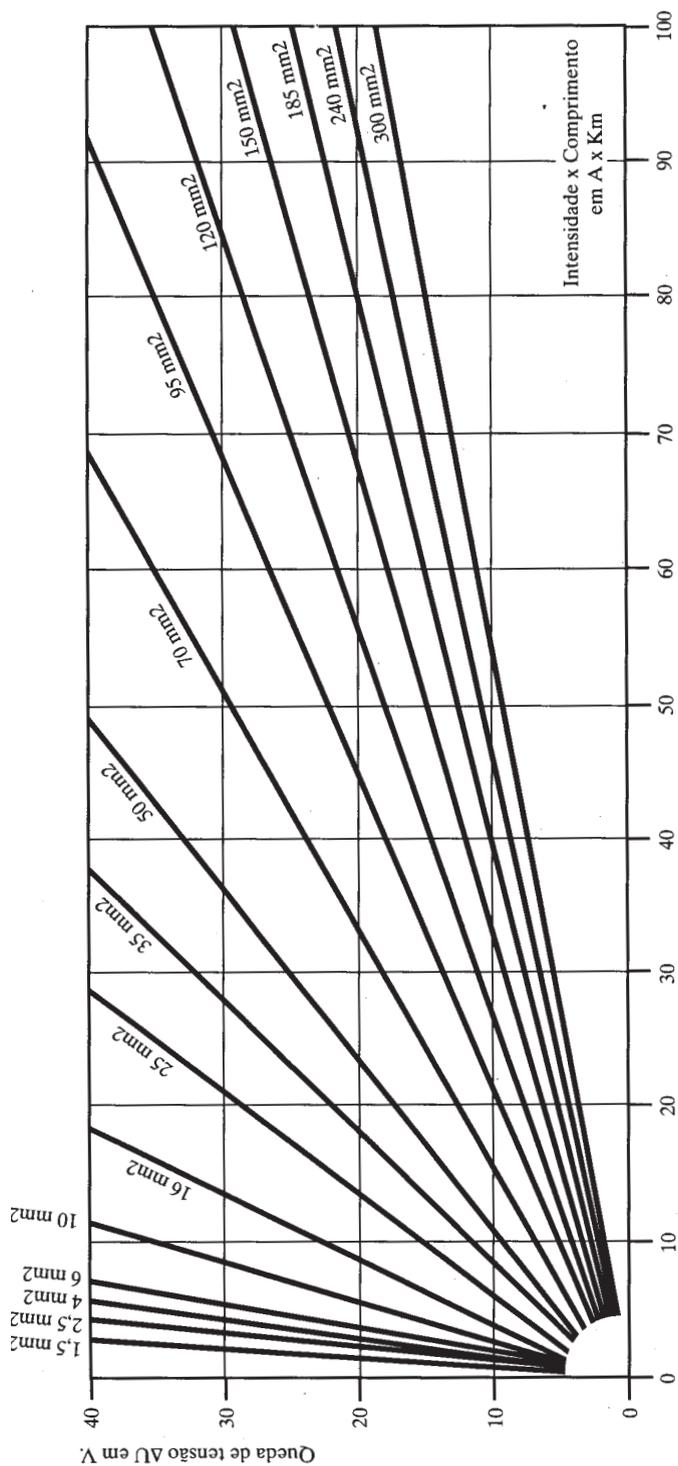
Frequência = 50 Hz



Para obter a queda de tensão simples (monofásica), multiplicar os valores de ΔU por 1,15

**Gráfico 7 - Queda de Tensão entre Fases (Tensão Composta)
Cabos de Baixa Tensão com 3 condutores em Cobre Cos $\phi = 0,9$**

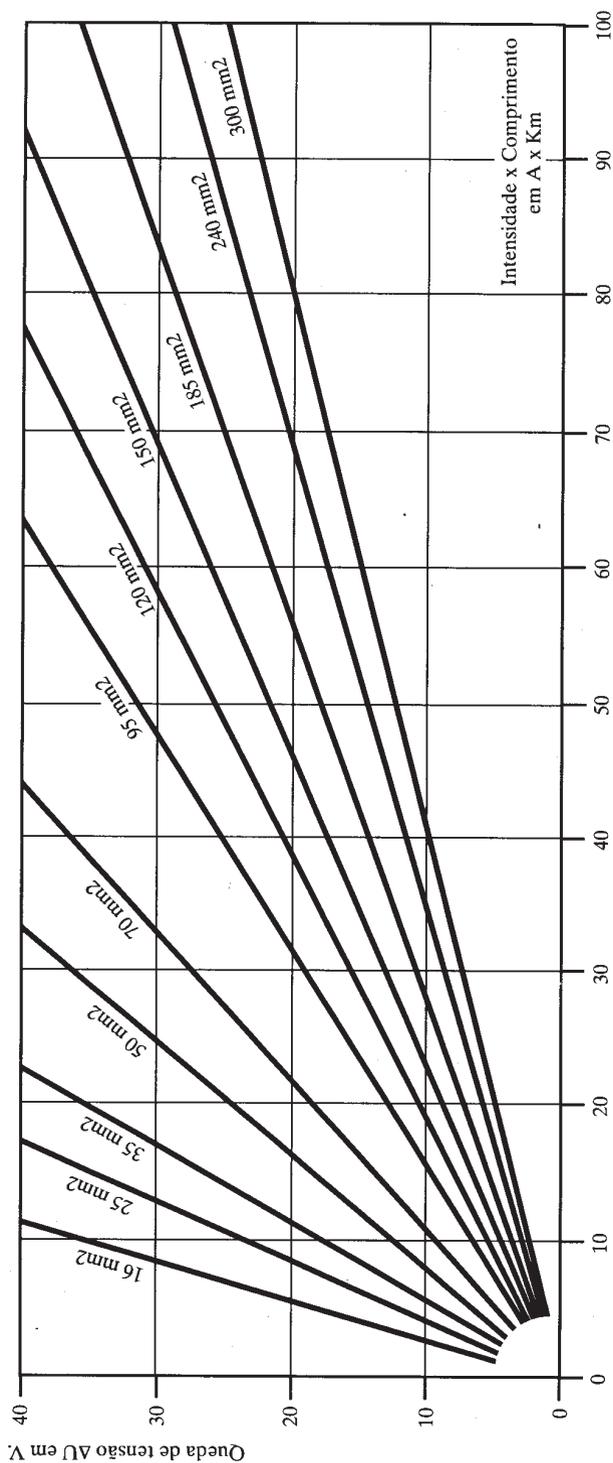
Frequência = 50 Hz



Para obter a queda de tensão simples (monofásica), multiplicar os valores de ΔU por 1,15

**Gráfico 8 - Queda de Tensão entre Fases (Tensão Composta)
Cabos de Baixa Tensão com 3 condutores em Alumínio Cos $\varphi = 0,8$**

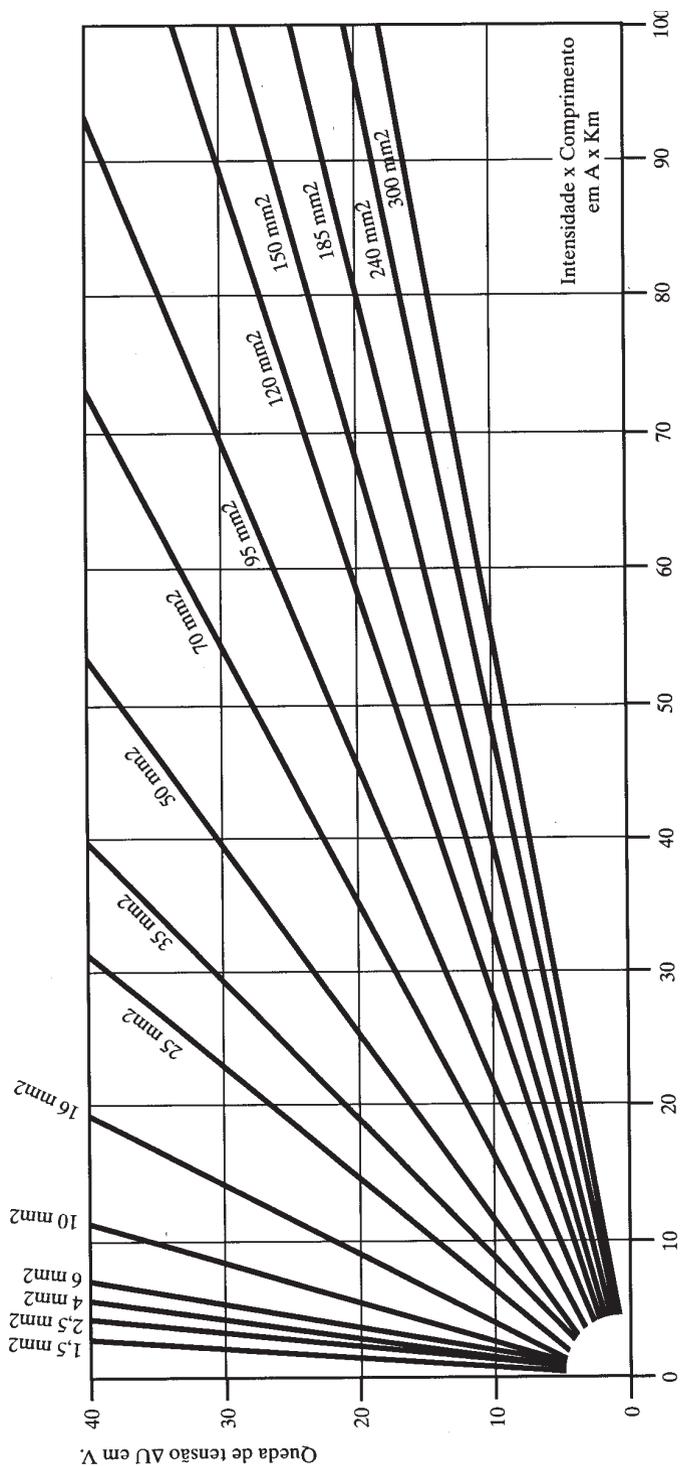
Frequência = 50 Hz



Para obter a queda de tensão simples (monofásica), multiplicar os valores de ΔU por 1,15

**Gráfico 9 - Queda de Tensão entre Fases (Tensão Composta)
Cabos de Baixa Tensão com 3 condutores em Cobre Cos $\varphi = 0,8$**

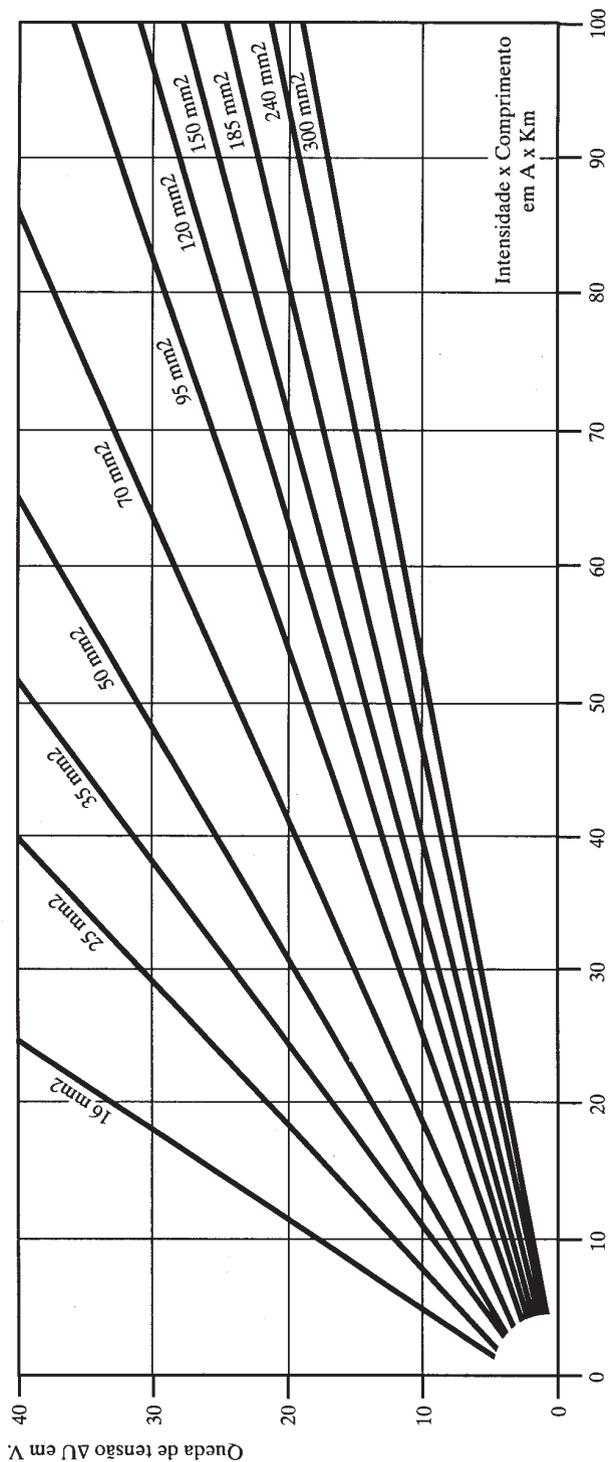
Frequência = 50 Hz



Para obter a queda de tensão simples (monofásica), multiplicar os valores de ΔU por 1,15

**Gráfico 10 - Queda de Tensão entre Fases (Tensão Composta)
Cabos de Baixa Tensão com 3 condutores em Alumínio Cos $\phi = 0,35$**

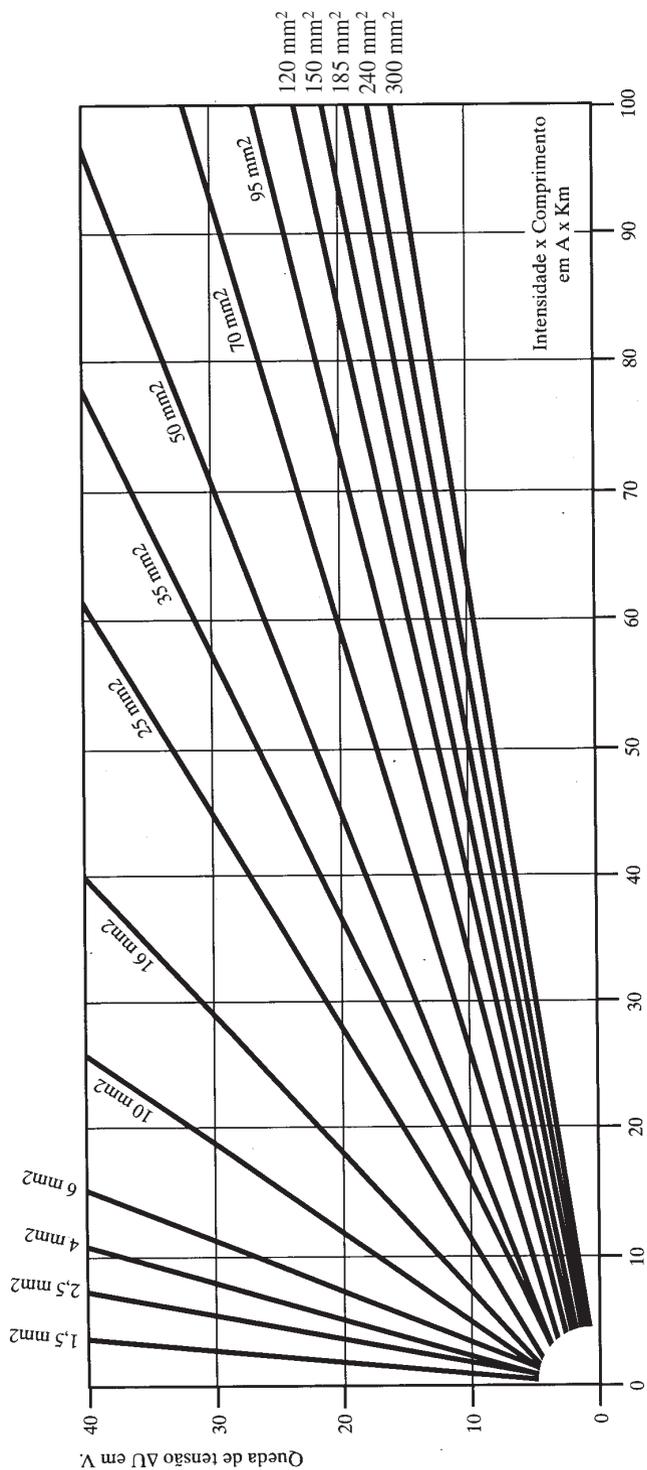
Frequência = 50 Hz



Para obter a queda de tensão simples (monofásica), multiplicar os valores de ΔU por 1,15

**Gráfico 11 - Queda de Tensão entre Fases (Tensão Composta)
Cabos de Baixa Tensão com 3 condutores em Cobre $\cos \varphi = 0,35$**

Frequência = 50 Hz



Para obter a queda de tensão simples (monofásica), multiplicar os valores de ΔU por 1,15

2.2.6 - Exemplo de Determinação da Secção Técnica

Dados:

— Comprimento da canalização:

- $l = 100\text{m}$;

— Tensão de alimentação entre fases (composta):

- $U = 380\text{V}$, trifásica;

— Receptores:

- 1 motor de potência aparente nominal 100 kVA, utilizado no máximo a 3/4 da sua potência,

- 1 motor de potência útil de 50 cavalos, com um rendimento igual a 0,92 utilizado à plena carga ($1\text{CV} = 736\text{W}$),

- $\cos \varphi = 0,8$,

- os motores funcionam simultaneamente e em permanência;

— Condições de instalação da canalização:

- caminho de cabos, ao ar livre e ao abrigo das radiações solares,

- temperatura ambiente $\theta_0 = 40\text{ }^\circ\text{C}$,

- 4 canalizações sobre um tabuleiro, sem intervalo de separação entre elas;

— Condições de curto-circuito:

- intensidade: $I_{cc} = 4\ 000\ \text{A}$,

- duração: $t = 2\ \text{segundos}$;

— Queda de tensão admissível em regime normal:

- 5%, ou seja, $\Delta U = 19\text{V}$;

— Tipo de cabo escolhido:

- cabo de alumínio, tripolar, LSVV (ver capítulo V.III).

No caso presente só iremos determinar a secção técnica; posteriormente, um outro exemplo será considerado para o cálculo da secção económica (ver ponto 5 da secção 2.2.7).

1 - Cálculo da Intensidade a Transmitir em Regime Normal (ver secção 2.2.1)

O primeiro motor, tendo em conta um coeficiente de utilização 0,75, absorve uma potência aparente: $S_1 = 0,75 \times 100 = 75\ \text{kVA}$

Tendo em conta o seu rendimento e o seu $\cos \varphi$ o segundo motor absorve uma potência aparente:

$$S_2 = \frac{50 \cdot 0,736}{0,92 \cdot 0,8} = 50 \text{ kVA}$$

Como não consideramos nenhum factor de simultaneidade, a potência aparente total absorvida é:

$$S = S_1 + S_2 = 125 \text{ kVA}$$

e a intensidade a transportar em permanência é:

$$I = \frac{S}{U\sqrt{3}} = \frac{125 \cdot 10^3}{380 \cdot \sqrt{3}} = 190 \text{ A}$$

(ver cálculo directo no gráfico 1).

2 - Secção Necessária para o Aquecimento em Regime Permanente (ver secção 2.2.2)

O quadro das características dos cabos LSVV (capítulo V.III) dá-nos a capacidade de transporte de um único cabo, ao ar livre, à temperatura de 30 °C. Os coeficientes de correcção a considerar são:

— para a temperatura do ar a 40 °C:

$$K_1 = 0,87 \text{ (ver quadro 35) com } \theta_p = 70 \text{ °C e } \theta_o = 40 \text{ °C,}$$

— para a proximidade térmica entre quatro canalizações encostadas no mesmo tabuleiro:

$$K_2 = 0,75 \text{ (ver quadro 36).}$$

A partir daqui calculamos a intensidade fictícia:

$$I_f = \frac{I}{K_1 \times K_2} = \frac{190}{0,87 \times 0,75} = 281 \text{ A}$$

Do quadro das características (capítulo V) pode concluir-se que a secção necessária para transportar 281 A nas condições indicadas é:

$$S_a = 240 \text{ mm}^2 \text{ (alumínio).}$$

3 - Secção Necessária para o Aquecimento em Caso de Curto-Circuito

(ver secção 2.2.4)

Para cabos LSVV:

— temperatura inicial: $\theta_d = 70 \text{ °C}$ (supõe-se que o cabo atingiu o equilíbrio térmico correspondente à carga máxima admissível em permanência);

— temperatura admissível no fim do curto-circuito: $\theta_f = 160 \text{ °C}$.

O gráfico 5 indica, nestas condições, para uma alma condutora em alumínio, uma densidade de corrente admissível durante 1 segundo: $\delta_0 = 73 \text{ A/mm}^2$

para 2 segundos teremos: $\delta = \frac{73}{\sqrt{2}} = 52 \text{ A / mm}^2$

A secção necessária é: $S = \frac{I_{cc}}{\delta} = \frac{4000}{52} = 77 \text{ mm}^2$

A secção normalizada imediata superior é:

$$S_b = 95 \text{ mm}^2$$

Método aproximado (ver página 89):

$$S = \frac{I_{cc}}{K} = \sqrt{\frac{t}{\theta_f - \theta_d}} = \frac{4000}{7} \sqrt{\frac{2}{90}} = 85 \text{ mm}^2$$

que conduzia ao mesmo valor da secção normalizada.

4 - Secção Necessária para a Queda de Tensão

Para $\cos \varphi = 0,8$ os quadros das características (capítulo V) indicam a queda de tensão por ampere e por quilómetro. Podemos admitir, na pior hipótese, para o caso presente:

$$\frac{\Delta U \text{ admissível}}{I l} = \frac{19}{0,100 \cdot 190} = 1 \text{ V/A} \cdot \text{ km}$$

Segundo o quadro das características dos cabos LSVV, a secção mínima que permite respeitar esta condição é:

$$S_c = 70 \text{ mm}^2$$

Método aproximado: no gráfico 8 encontramos para $I l = 19 \text{ A.km}$ e ΔU admissível = 19 V uma secção mínima de 70 mm² em alumínio.

5 - Secção Necessária do Ponto de Vista Técnico

A secção a escolher será a maior das três secções S_a , S_b , S_c anteriormente determinadas:

$$S = 240 \text{ mm}^2, \text{ alumínio}$$

2.2.7- Determinação da Secção Económica

1 - Introdução

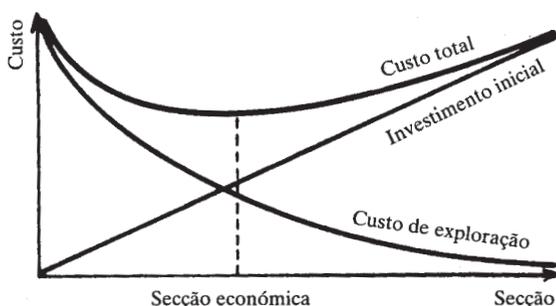
A secção mínima calculada, anteriormente, de maneira a satisfazer as diferentes condições técnicas de funcionamento (aquecimento em regime normal e em caso de curto-circuito, queda de tensão) não corresponde necessariamente à secção que conduz à melhor solução, no plano económico, considerada em termos globais, dado que, importa ter em conta a duração de vida da canalização estudada.

Com efeito, o custo total decompõe-se em duas parcelas:

- investimento inicial, isto é, correspondente ao valor de compra e de instalação, o qual é crescente com a secção;
- custo de exploração, correspondendo em grande parte ao custo das perdas de energia, por efeito de Joule, o qual varia no sentido inverso da secção.

Para um tipo de cabo e um regime de utilização dados, a soma destes custos, em função da secção, passa por um mínimo, correspondente ao valor da secção designado por secção económica. O gráfico representado na figura abaixo permite uma visualização da evolução dos diferentes custos.

Gráfico 12 - Evolução dos custos



Na maior parte dos casos, a secção económica é superior à secção necessária, do ponto de vista técnico, e a diferença respectiva tende a aumentar com o progressivo encarecimento da energia, e ainda com o desenvolvimento dos materiais isolantes, permitindo temperaturas de funcionamento cada vez mais elevadas.

Estes últimos factores levam à conclusão óbvia que o aspecto económico não deve ser esquecido, durante a determinação da secção. A solução escolhida poderá, no entanto, ser determinada em função de vários critérios, em particular:

- as vantagens a longo prazo da secção económica;
- as vantagens a curto prazo de um investimento mínimo, nomeadamente no caso de uma taxa de juro elevada e de um comprimento da canalização importante.

2 - Princípio de Cálculo

Um cálculo rigoroso da secção económica é dificultado na prática pela complexidade dos parâmetros a considerar e pela incerteza da sua evolução no tempo (carga a transportar, custos unitários, hipóteses financeiras, etc).

O método de cálculo, indicado a seguir, baseado em algumas hipóteses simplificativas, permitirá, no entanto, uma estimação suficientemente precisa, na maioria dos casos correntes, tendo em conta o facto de que a escolha se restringe à gama de secções normalizadas.

Iremos estudar uma canalização de comprimento l (em km), cujo custo de estabelecimento será designado por E (euros). Este valor compreende:

- custo do cabo, que poderá ser considerado, em primeira aproximação, como uma função linear da secção S (mm^2) da forma $cl + qS$, em que c e q são constantes cujo valor é dependente da especificação do cabo escolhido. Estes podem ser avaliados, por exemplo, a partir da nossa tabela de preços;
- o custo dos trabalhos de engenharia civil, do desenrolamento e montagem do cabo, da compra e montagem dos acessórios da rede e das instalações terminais, o qual poderá ser considerado como independente da secção, no âmbito da procura da secção económica. Designando por c' este valor, teremos para E a expressão:

$$E = c' + cl + qS$$

Quanto ao custo de exploração, compreende o custo das perdas energéticas, nas almas condutoras, no isolante e no écran, os encargos de manutenção, etc., e está associado a uma quantia paga ao longo de cada anuidade. Justifica-se na maioria dos casos, que só sejam considerados os custos anuais em perdas de Joule, nos condutores, as quais são aproximadamente dadas por:

$$W = \frac{n\rho l^2 hp}{S} 10^{-3}, \text{ euros}$$

em que:

n = número de condutores activos da canalização;

ρ = resistividade do metal condutor à temperatura de funcionamento ($\Omega \text{ mm}^2/\text{km}$);

l = comprimento da instalação (em km);

I = intensidade a transmitir, em ampere, suposta constante. Caso não seja constante deve considerar-se a intensidade média quadrática (ver ponto 3 da secção 2.2.3);

h = número de horas de serviço da canalização por ano (1 ano = 8760h);

p = preço da energia eléctrica, €/kWh.

O custo total resulta da soma das parcelas E e W , as quais, no entanto, não correspondem ao mesmo prazo, sendo necessário torná-las homogéneas antes de efectuar a sua adição. Isto pode fazer-se actualizando os custos de exploração pagos ao fim de vários anos, ou seja, remetendo os mesmos à época da compra do equipamento.

Se N (anos) é o prazo de amortização previsto, para o equipamento, e se tanto o preço da energia como a carga da canalização forem supostos constantes, durante esse período, a soma dos valores actualizados das perdas de Joule é:

$$W = w \left[\frac{1}{1+t} + \frac{1}{(1+t)^2} + \dots + \frac{1}{(1+t)^N} \right] = w \frac{(1+t)^N - 1}{t(1+t)^N}$$

em que t é a taxa de actualização fixada, cujo valor é na prática igual à taxa de juro do capital.

O termo $A = \frac{(1+t)^N - 1}{t(1+t)^N}$ é dado, em função de t e N , pelas tabelas financeiras.

Para a determinação da secção económica resta considerar a função:

$$\text{custo total } C = c' + cl + qlS + \frac{n\rho l^2 hpA}{S} \cdot 10^{-3}$$

a qual tem um mínimo para:

$$S_o = I \sqrt{\frac{n\rho hpA}{q} \cdot 10^{-3}}$$

A secção económica será o valor normalizado mais próximo de S_o .

A densidade de corrente económica é $\delta_o = \sqrt{\frac{q \cdot 10^{-3}}{n\rho hpA}}$ (A/mm²)

3 - Cálculo aproximado

Para um cálculo rápido podemos considerar a fórmula:

$$S_o = KI\sqrt{hpA}$$

com: $K = 4,61 \cdot 10^{-2}$ para o alumínio.

$K = 2,56 \cdot 10^{-2}$ para o cobre.

4 - Notas

- A - O comprimento da canalização não influencia o valor da secção económica;
- B - A densidade de corrente económica depende do tipo de cabo escolhido, das condições de utilização e das hipóteses financeiras. É independente da intensidade a transmitir e da secção. Pelo contrário, a densidade de corrente térmica (correspondente ao aquecimento da alma condutora até ao valor limite permitido), diminui com a secção. Devido a isso, e tendo em conta o facto de que a densidade económica é, geralmente, inferior à densidade térmica, a diferença entre a secção económica e a secção térmica é tanto mais importante quanto menores forem as secções;
- C - A escolha da secção económica, desde que seja superior à secção térmica, conduz às seguintes vantagens no plano técnico:
 - a queda de tensão é menor, o que apresenta um interesse particular, para os binários dos motores no arranque que são proporcionais ao quadrado da tensão;
 - a temperatura limite da alma condutora em regime normal oferece a possibilidade de sobrecargas, por vezes, importantes.

D - Usando as mesmas hipóteses simplificativas e os mesmos princípios de cálculo usados anteriormente, várias informações úteis poderão ser obtidas, por exemplo:

- determinação do tempo ao fim do qual o ganho, nos custos de exploração, permite compensar a diferença de investimento inicial;
- escolha económica entre o cobre e o alumínio;
- escolha económica entre os vários isolantes. Este cálculo mostra que, se o uso de um isolante, que autorize uma temperatura de funcionamento elevada, pode revelar-se necessário em certas condições de serviço, particularmente severas, não se justifica, no entanto, no plano económico.

E - A escolha da secção é um dos aspectos da optimização no plano económico da instalação. Outros elementos deverão também ser considerados, por exemplo: escolha da tensão de alimentação, melhoramento do $\cos \varphi$ dos receptores permitindo uma diminuição da intensidade a transmitir e, portanto, das perdas em exploração, etc.

5 - Exemplo de cálculo da secção económica

Retomando o exemplo dado (secção 2.2.6), assim como a secção técnica calculada (ponto 5 da secção 2.2.6), partimos para o cálculo da secção económica com os seguintes dados:

- intensidade $I = 190 \text{ A}$;
- regime de funcionamento $h = 2\,000 \text{ horas/ano}$, à plena carga;
- duração da amortização $N = 10 \text{ anos}$;
- taxa de actualização $t = 13 \%$;
- preço da energia eléctrica $p = 0,0945 \text{ €/kWh}$.

A secção escolhida, no plano técnico, foi a de 240 mm^2 com alma condutora em alumínio.

A secção económica obtém-se aplicando o cálculo aproximado indicado no ponto 3:

$$\text{Previamente determina-se o termo } A : A = \frac{1,13^{10} - 1}{0,13 \cdot 1,13^{10}} = 5,43$$

Considerando um valor de $K = 2,56 \cdot 10^{-2}$ (alma condutora em alumínio) e o cálculo aproximado obtém-se a secção económica:

$$2,56 \cdot 10^{-2} \sqrt{2000 \times 0,0945 \cdot 5,43} = 280,6 \text{ mm}^2$$

A secção normalizada mais próxima é a de 300 mm^2 .

2.3 - Generalidades sobre o Dimensionamento do Écran Metálico

Em caso de defeito monofásico (fase-terra), o écran metálico deve permitir o escoamento, de parte ou da totalidade, da corrente de curto-circuito, da instalação. Para as redes MT ou AT, cujo neutro está ligado à terra, directamente ou por intermédio de uma impedância de valor baixo, a corrente de defeito pode atingir valores elevados, dependendo da potência de curto-circuito da alimentação, das características da instalação no ponto do defeito e da regulação dos dispositivos de protecção. É preciso então assegurar que sob o efeito dessa intensidade, o écran não corre o risco de ser levado a atingir uma temperatura superior à permitida, quer para ele, quer para os outros elementos do cabo, em particular, o invólucro isolante.

Para os cabos MT e AT, a temperatura limite é, na maior parte dos casos, idêntica à admitida em curto-circuito para o aquecimento da alma condutora, para uma duração de tempo inferior a 5 segundos:

- cabo isolado a PE 150 °C;
- cabo isolado a PVC 160 °C;
- cabo isolado a PEX 250 °C.

No entanto, podemos ser levados, em certos casos, a reduzir estes valores de temperatura, a fim de ter em consideração os limites térmicos dos elementos constituintes do écran (bainha de chumbo, nalguns cabos isolados a PEX, por exemplo). Contrariamente ao que é habitual para as almas condutoras, não podemos admitir que o aquecimento do écran ao longo de um curto-circuito seja adiabático. Com efeito, em consequência da importância da superfície de contacto do écran com os meios adjacentes, em relação à sua espessura, o calor não fica concentrado no écran, dissipando-se na sua maior parte para o exterior. Em função disso, a hipótese de aquecimento adiabático conduziria a um aquecimento superior à realidade, o que implicaria um sobredimensionamento dos écrans.

Devido à complexidade dos fenómenos em jogo (dissipação do calor nos meios adjacentes, variação da resistência de contacto entre espiras dos écrans enfiados, em função da intensidade, etc.), não é possível indicar aqui um método de cálculo simples e de âmbito geral. Recomendamos ao leitor que se baseie, se tal for necessário, no método descrito na norma CEI 949. Os vários tipos de écrans, usados geralmente, estão descritos na secção 1.2.4.

Conforme aí referido os écrans metálicos são normalmente constituídos por fios e/ou fitas de cobre ou de alumínio. No seu dimensionamento considera-se as densidades de corrente que a seguir se indicam, supondo um curto-circuito com a duração de 1 s.

Cobre	$\delta = 143,2 \text{ A/mm}^2$
Alumínio	$\delta = 94,5 \text{ A/mm}^2$

Para melhor caracterização do dimensionamento é válido o expresso para as almas condutoras na secção 2.2.4 do capítulo II.

2.3.1 - Afecção de processos caloríficos não - adiabáticos ao cálculo da corrente de curto-circuito

A corrente de curto-circuito admissível na blindagem metálica de um cabo eléctrico é normalmente calculada assumindo um processo calorífico adiabático – ignorando as trocas de calor com o exterior.

Este procedimento dá origem a resultados mais conservadores, sobretudo para blindagens constituídas por fios de secção reduzida.

Numa perspectiva meramente computacional podemos aumentar a temperatura máxima permitida em situações de curto-circuito, de forma a obter um resultado equivalente ao obtido pelo cálculo não-adiabático. Este acréscimo de temperatura será meramente fictício servindo apenas interesses relativos ao procedimento de cálculo.

O método de cálculo mais usual para a corrente eléctrica de curto-circuito no condutor e na blindagem metálica de cabos eléctricos está assente no pressuposto de processos caloríficos adiabáticos. Este procedimento não considera as trocas de calor entre as diversas componentes metálicas e o exterior, assumindo que o calor gerado pela passagem da corrente de curto-circuito não será dissipado no curto intervalo de tempo em questão.

Neste cenário o calor gerado por efeito de Joule determina a temperatura máxima em situações de curto-circuito:

$$\theta_{\text{Max}} = \theta_p + \frac{1}{C} \int_{\tau} R I_{\text{Ad}}^2 dt \quad (1)$$

Na qual θ_p representa a temperatura para um regime permanente, C a capacidade calorífica da componente metálica em questão e R a sua resistência eléctrica. A corrente de curto-circuito I_{Ad} tem uma duração τ .

A temperatura máxima é estabelecida de forma a prevenir choques térmicos e o consequente envelhecimento acelerado dos componentes do cabo eléctrico. No caso dos dois mais populares materiais utilizados no isolamento: polietileno reticulado (XLPE) e borracha sintética (EPR), a temperatura máxima permitida num regime de curto-circuito é de 250°C.

De forma a contabilizar as trocas de calor durante uma situação de curto-circuito, o standard internacional IEC 949 introduz um factor empírico ε que relaciona o valor da corrente eléctrica obtida considerando as trocas de calor com o exterior (I_{nAd}) com o valor da corrente eléctrica resultado do método adiabático (I_{Ad}):

$$I_{\text{nAd}} = \varepsilon I_{\text{Ad}} \quad (2)$$

Partindo do tradicional método adiabático, podemos permitir para efeitos meramente computacionais uma temperatura máxima superior à recomendada de forma a obter um efeito equivalente à aplicação do factor ϵ .

A corrente de curto-circuito pode assim ser calculada através de um formalismo a que poderemos chamar método adiabático modificado:

$$\theta_{\text{Max}} + \Delta\theta = \theta_p + \frac{1}{C} \int_{\tau} R I_{\text{mAd}}^2 dt \quad (3)$$

A corrente de curto-circuito (I_{mAd}) calculada através desta expressão é idêntica à corrente eléctrica obtida pelo método não-adiabático descrito no standard IEC 949.

Para demonstrar o conceito consideremos uma blindagem metálica constituída por fios de cobre enrolados em hélice sobre uma cama em fita semicondutora - Figura 1.

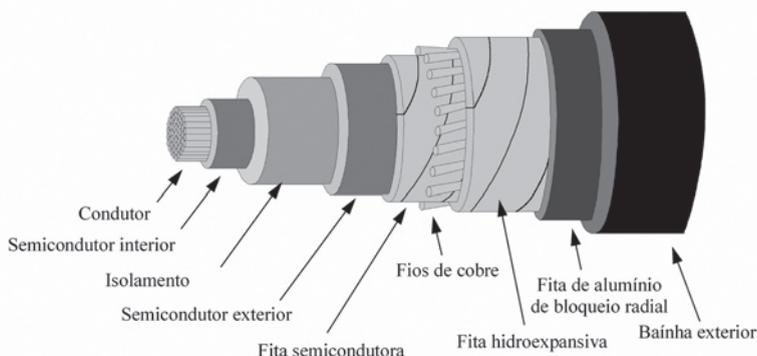


Figura 1 - Cabo de 60kV com isolamento em XLPE e blindagem por fios de cobre.

O gráfico 13 descreve o comportamento do aumento fictício da temperatura máxima, em função do diâmetro dos fios de cobre da blindagem.

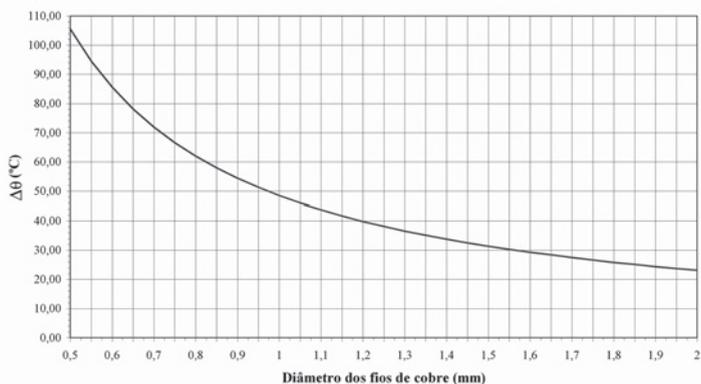


Gráfico 13 - Aumento de temperatura fictício em função do diâmetro dos fios de cobre da blindagem.

Para um determinado diâmetro dos fios da blindagem, o gráfico acima apresentado permite o cálculo da corrente de curto-circuito não-adiabática a partir da expressão 3. O desvio de resultados determinado pela afectação das trocas de calor é considerável, sobretudo para fios de diâmetros mais reduzidos. Assim para um curto-circuito com a duração de 1 segundo, o valor da corrente eléctrica escoada por uma blindagem de fios de cobre com um diâmetro de 0.5 mm, é cerca de 22% superior ao valor obtido pelo tradicional método adiabático. Para um diâmetro de 2.0 mm este desvio é apenas de 6%.

Conclusão:

Este método integra os princípios anunciados no standard IEC 949, de forma a afectar as trocas de calor na aproximação adiabática normalmente utilizada pela indústria. A metodologia adiabática resulta em valores mais conservadores, sobretudo no que diz respeito a blindagens constituídas por fios de diâmetros mais reduzidos.

2.3.2- Exemplos de cabos normalizados de média tensão

1 - Écrans em fios de cobre

Nos cabos de Média Tensão, isolados a PEX, normalizados pela EDP, o écran metálico utilizado é constituído por fios de cobre nú uniformemente distribuídos pela superfície do écran semiconductor exterior e envolvidos por fita de cobre nú com espessura compreendida entre 0,1 e 0,2 mm, enrolada em contra-hélice aberta.

São definidos 3 tipos de écran, consoante as dimensões e características dos constituintes, designados por tipo 1, 2 e 3.

Assim temos:

Tipo 1:

Secção nominal — 28 mm²
Fios de Cobre — diâmetro nominal: 1,13 mm;
secção aproximada: 1 mm²;
número mínimo de fios: 28
Resistência eléctrica máxima do écran: 0,6Ω/km a 20°C.

Tipo 2:

Secção nominal — 16 mm²
Fios de Cobre — diâmetro nominal: 0,8 mm;
secção aproximada: 0,5 mm²;
número mínimo de fios: 32
Resistência eléctrica máxima do écran: 1,1Ω/km a 20°C.

Tipo 3:

- Secção nominal — 35 mm²
Fios de Cobre — diâmetro nominal: 1,13 mm;
 secção aproximada: 1 mm²;
 número mínimo de fios: 35
Resistência eléctrica máxima do écran: 0,48Ω/km a 20°C.

O número de fios é condicionado, para cada secção nominal do écran, pela resistência eléctrica máxima exigida.

Conforme a tensão estipulada do cabo, o tipo de écran escolhido é definido como segue:

Cabos de 6/10 kV

- 1º Caso (corrente de defeito até 4 kA - 1 s)
 Écran do tipo 1
- 2º Caso (corrente de defeito até 1,5 kA - 1 s)
 Écran tipo 2

Cabos de 8,7/15 kV e 12/20 kV

- 1º Caso (corrente de defeito até 1,5 kA - 1 s e 1 kA - 2 s)
 Écran do tipo 2
- 2º Caso (corrente de defeito até 4 kA - 1 s)
 Écran tipo 1

Cabos de 18/30 kV

- 1º Caso (corrente de defeito até 1,5 kA - 1 s e 1 kA - 2 s)
 Écran do tipo 2
- 2º Caso (corrente de defeito até 5 kA - 1 s)
 Écran tipo 3

Extra EDP ou para outras secções de écran a resistência eléctrica máxima do écran é a definida na CEI 60228.

2 - Écrans em fita de cobre

Indicamos no quadro seguinte, em função de diferentes tempos de actuação das protecções, as intensidades admissíveis no écran, formado por uma fita de cobre nú, com 0,10 mm de espessura, enrolada em hélice e com sobreposição, prevista normalmente entre 10 e 15% da largura da fita.

Quadro 48 - Intensidades Admissíveis, no Écran em Fita de Cobre, para um Cabo de Média Tensão (Isolado a PEX), durante um Curto-Circuito (Ampere)

Secção da alma mm ²	0,5 segundos				1 segundo				2 segundos			
	Tensão estipulada kV											
	6/10	8,7/15	12/20	18/30	6/10	8,7/15	12/20	18/30	6/10	8,7/15	12/20	18/30
CABOS ISOLADOS A PEX												
16	900				650				400			
25	1000	1100			700	800			450	550		
35	1050	1200	1300		750	850	950		500	600	650	
50	1150	1300	1400	1750	800	900	1000	1200	550	650	700	850
70	1250	1350	1500	1800	850	950	1050	1300	600	650	750	900
95	1350	1500	1650	1950	950	1050	1150	1350	650	750	800	950
120	1450	1600	1700	2050	1000	1100	1200	1450	700	800	850	1000
150	1550	1650	1800	2100	1100	1150	1250	1500	750	850	900	1050
185	1650	1800	1900	2250	1150	1250	1350	1550	800	900	950	1100
240	1800	1950	2050	2400	1250	1350	1450	1650	900	950	1000	1200
300	1950	2100	2200	2500	1350	1450	1550	1800	950	1050	1100	1250
400	2100	2250	2400	2700	1500	1600	1650	1900	1050	1100	1200	1350
500	2300	2450	2550	2900	1600	1700	1800	2050	1150	1200	1250	1450
630	2550	2700	2850	3150	1800	1900	2000	2200	1250	1350	1400	1550
800	2800	2950	3100	3400	2000	2100	2150	2400	1400	1450	1550	1700
1000	3100	3200	3350	3650	2150	2250	2350	2600	1550	1600	1650	1800

(cálculos efectuados segundo o método descrito na norma CEI 949)

Exemplos de Cabos de AT

Nos cabos de AT a construção da blindagem é semelhante à da MT, normalmente constituída por uma coroa de fios de cobre aplicados helicoidalmente e por uma fita também de cobre aplicada em contra-espira em hélice aberta.

As secções das blindagens são as mais diversas, normalmente acima de 35 mm², dependendo das correntes de curto circuito dos sistemas onde os cabos vão ser instalados.

A título de exemplo, indicamos os seguintes tipos construtivos:

Quadro 49 - Blindagens usadas nos cabos AT

Secção da Blindagem (mm ²)	Nº de Fios	Diâmetro dos Fios (mm)	Resistência Óhmica máx. a 20°C em c.c. (Ω/km)	Intensidade máx. adm. em curto-circuito (Is)
16	32	0,80	1,150	2,4 kA
25	50	0,80	0,736	3,7 kA
35	35	1,13	0,526	5,2 kA
50	50	1,13	0,368	7,5 kA
60	60	1,13	0,307	8,9 kA
70	70	1,13	0,263	10,4 kA
75	75	1,13	0,245	11,2 kA
95	80	1,23	0,194	14,2 kA
100	67	1,38	0,184	14,9 kA
120	80	1,38	0,153	17,9 kA
130	58	1,70	0,142	19,4 kA
135	60	1,70	0,136	20,1 kA
150	67	1,70	0,123	22,4 kA
160	71	1,70	0,115	23,8 kA
165	73	1,70	0,111	24,6 kA
185	82	1,70	0,099	27,6 kA
250	82	1,97	0,074	37,2 kA

