# PARÂMETROS DE CABOS ELETRICOS DE BAIXA TENSÃO-RESISTÊNCIA E INDUTÂNCIA

*Queda de tensão*

## Cálculo da Resistência dos Condutores em Corrente Alternada (60 Hz) - $R_{c.a.}$

Para o cálculo da Resistência em Corrente Alternada é necessário conhecer o valor da Resistência em Corrente Contínua.

### Resistência em Corrente Contínua

O cálculo da resistência em C.C., à temperatura do condutor t, é dada pela seguinte expressão:

$R_{cct} = R_{cc} \quad (1+\alpha\,(t-20))$

$R_{cct} = R_{cc} \quad (1+\alpha\,.\,\Delta t)$

$\alpha$ = 0,00393 para condutor de cobre

$\alpha$ = 0,00403 para condutor de alumínio

(O valor de $R_{cc}$ pode ser obtido diretamente das tabelas de dados construtivos ou, em casos não previstos, pode ser calculado pelas expressões:

Para condutores redondos normais

$$R_{cc} = \frac{4 \cdot \rho_{20}}{n \,.\, \pi \,.\, d^2} \cdot K_1 \cdot K_2 \cdot K_3$$

Para condutores compactos

$$R_{cc} = \frac{\rho_{20}}{A} \cdot K_1 \cdot K_2 \cdot K_3$$

$\rho_{20}$ = resistividade padrão do metal do condutor a 20°C, - ($\Omega$ mm²/Km),isto é:

Para condutores de cobre

$$\rho_{20} = 17{,}241\ \Omega\,.\,mm^2/Km$$

Para condutores de alumínio

$$\rho_{20} = 28{,}264\ \Omega\,.\,mm^2/Km$$

A = Seção nominal em mm²

n = n.º de fios componentes do condutor

d = diâmetro dos fios elementares que compoem o condutor, - (mm)

$K_1$ = fator que depende do diâmetro dos fios elementares, do tipo de metal e se o cobre é nu ou revestido

$K_2$ = fator que depende do tipo de encordoamento

$K_3$ = fator que depende da forma de reunião das veias isoladas (cabos multipolares)

Os valores de $K_1$, $K_2$ e $K_3$ são dados pelas tabelas abaixo:

| Diâmetro dos fios elementares (mm) | | $K_1$ | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | | Fio sólido ou corda compacta | | condutores encordoados | |
| | | cobre nu | cobre revestido ou alumínio nu | cobre nu | cobre revestido ou alumínio nu |
| > | ≤ | | | | |
| — | 0,10 | — | — | 1,07 | 1,12 |
| 0,10 | 0,31 | — | — | 1,04 | 1,07 |
| 0,31 | 0,91 | 1,03 | 1,05 | 1,02 | 1,04 |
| 0,91 | 3,60 | 1,03 | 1,04 | 1,02 | 1,03 |
| 3,60 | — | 1,03 | 1,04 | — | — |

| Tipo de encordoamento | Diâmetro do fio elementar (mm) | $K_2$ |
|---|---|---|
| Fio sólido ou corda compacta | — | 1,00 |
| Redondo normal | > 0,60 | 1,02 |
| | ≤ 0,60 | 1,04 |
| Flexíveis | > 0,60 | 1,03 |
| | ≤ 0,60 | 1,04 |

Os cabos de energia BT, normais, prevêem condutores redondos normais,ou compactos (redondos ou setoriais).

| Forma de Reunião | $K_3$ |
|---|---|
| Cabos singelos,ou multipolares com veias paralelas (não torcidos) .... | 1,00 |
| Cabos multipolares, com veias torcidas (não flexíveis) ..... | 1,02 |
| Cabos multipolares, com veias torcidas (flexíveis) ..... | 1,05 |

Aqui, deve-se entender cabos flexíveis, aqueles de construção especial para uso móvel, tais como: Cabos para máquinas móveis pesadas (escavadeiras, dragas, guindastes, etc.) bem como máquinas móveis de uso leve, tais como: máquinas para solda, máquinas de uso doméstico, étc.

## Resistência em corrente alternada.

## Simbologia:

$R_{cct}$ = Resistência em c.c., à temperatura de t°C, - (Ω / Km)
$R_{cat}$ = Resistência em c.a., à temperatura de t°C, - (Ω / Km)
$d_c$ = Diâmetro do condutor, - (mm)
- Para cabos com condutores setoriais: $d_c = d_x$ = diâmetro de um condutor circular de mesma seção
S = Distância entre eixos dos condutores, - (mm)
- Para cabos com condutores setoriais:
S = $(d_x + 2e.)$
e. = espessura isolante, - (mm)
$y_s$ = fator devido ao efeito pele (skin-effect)
$y_p$ = fator devido ao efeito de proximidade
f = frequência, - (Hz)

A resistência em corrente alternada é dada por:

$$R_{cat} = R_{cct}\,(1 + y_s + y_p)$$

$$y_s = \frac{x_s^4}{192 + 0{,}8\,x_s^4} \qquad \text{onde } x_s^2 = \frac{8\pi f}{R_{cct}} \cdot 10^{-4} \cdot K_s$$

$$y_p = \frac{x_p^4}{192 + 0{,}8\,x_p^4} \cdot \left(\frac{d_c}{S}\right)^2 \cdot \left[0{,}312 \cdot \left(\frac{d_c}{S}\right)^2 + \frac{1{,}18}{\frac{x_p^4}{192 + 0{,}8\,x_p^4} + 0{,}27}\right]$$

$$\text{onde } x_p^2 = \frac{8\pi f}{R_{cct}} \cdot 10^{-4} \cdot K_p$$

Para cabos com condutores setoriais, o valor de $y_p$ deve ser multiplicado por 2/3.

Os valores de $K_s$ e $K_p$ são experimentais e estão tabelados a seguir.(Válidos apenas para condutores de cobre)

| Tipo de Condutor | Ks | Kp | |
|---|---|---|---|
| | | Cabos Secos | Cabos em papel impregnado |
| Redondo Compacto | 1 | 1 | 0,8 |
| Redondo Normal | 1 | 1 | 0,8 |
| Setorial | 1 | 1 | 0,8 |

## Cálculo da Reatância Indutiva $X_L$

$$X_L = 2\pi f.\ L.\ 10^{-3}\ -\ (\Omega/Km)$$

f = frequência, - (Hz)
L = Indutância do cabo, - (mH/Km) (valor médio)

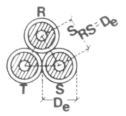
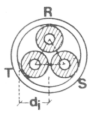
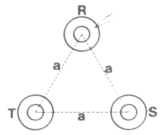
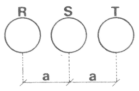
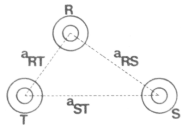
$$L = K + 0{,}46 \log \frac{2S_M}{d_c}$$

| Valores de K | |
|---|---|
| n.º de fios componentes do condutor | K (mH/Km) |
| corda compacta | 0,0500 |
| 1 | 0,0500 |
| 2 | 0,0778 |
| 7 | 0,0642 |
| 19 | 0,0555 |
| 37 | 0,0528 |
| 61 | 0,0515 |
| > 61 | 0,0512 |

$d_c$ = diâmetro do condutor, - (mm)
$d_i$ = diâmetro sobre o isolamento. - (mm)
$D_e$ = diâmetro externo do cabo. - (mm)
$S_M$ = distância média geométrica dos condutores, - (mm) (Média geométrica dos distanciamentos entre os eixos dos diversos condutores do circuito.)

Nota: Para cabos de condutores setoriais,considerar $d_c$ e $S_M$ os mesmos de um cabo de condutores redondos de seção equivalente.

# Distâncias médias geométricas para algumas disposições de cabos, em sistemas trifásicos simétricos.

| Disposição dos condutores | Esquema | Cálculo de $S_M$ |
|---|---|---|
| 3 cabos singelos em trifolio |  $S_{RT} = S_{RS} = S_{ST} = D_e$ | $S_M = \sqrt[3]{S_{RT} \cdot S_{RS} \cdot S_{ST}} = D_e$ |
| 1 cabo tripolar |  $S_{RT} = S_{RS} = S_{ST} = d_i$ | $S_M = \sqrt[3]{d_i^3} = d_i$ |
| 3 cabos unipolares em triângulo igualmente espaçados de *a* |  $S_{RT} = S_{RS} = R_{ST} = a$ | $S_M = \sqrt[3]{a.a.a} = a$ |
| 3 cabos singelos em plano igualmente espaçados de *a* |  $S_{RS} = a$<br>$S_{RT} = 2a$<br>$S_{ST} = a$ | $S_M = \sqrt[3]{a.2a.a} = a\sqrt[3]{2}$ |
| 3 cabos singelos espaçados assimetricamente |  | $S_M = \sqrt[3]{a_{RS} \cdot a_{ST} \cdot a_{RT}}$ |

# CURVA DE CURTO-CIRCUITO DOS CABOS ELETRICOS DE BAIXA TENSÃO

*Correntes máximas de curto circuito*

## Introdução

Este capítulo tem por finalidade auxiliar os usuários de cabos de energia na determinação das condições de operação do cabo, durante um curto-circuito.
Os ábacos fornecidos adiante podem ser usados nas seguintes situações:
a) Para determinar a máxima corrente de curto-circuito permitida num cabo.
b) Para determinar a seção do condutor necessária para suportar uma particular condição de curto-circuito.
c) Para determinar o tempo máximo que um cabo pode funcionar, com uma particular corrente de curto-circuito, sem danificação do isolamento.

## Considerações Técnicas

Para a resolução do problema de curto circuito em cabos isolados foram desenvolvidas duas fórmulas: uma para condutor de cobre e a outra para condutor de alumínio. Baseiam-se na energia térmica armazenada no material condutor e no limite máximo de temperatura admitida pelo isolamento. Admite-se ainda que o intervalo de tempo da passagem de corrente de curto circuito é pequeno, de forma que o calor desenvolvido durante o curto fica contido no condutor.

| Condutor | Fórmula |
|---|---|
| Cobre | $\left(\frac{I}{S}\right)^2 t = 0{,}0297 \log \left(\frac{T_2+234}{T_1+234}\right)$ |
| Alumínio | $\left(\frac{I}{S}\right)^2 t = 0{,}0125 \log \left(\frac{T_2+228}{T_1+228}\right)$ |

Referência: IPCEA-P-32.382

## Simbologia

I = Corrente de curto circuito - (A)
S = Seção transversal - (Circular Mils)
$S_m$ = Seção transversal - ($mm^2$)
t = Tempo de duração do curto circuito - (s)
$T_1$ = Máxima temperatura admissível no condutor em Operação Normal - (°C)
$T_2$ = Máxima temperatura admitida para o condutor no curto circuito - (°C)

É importante realçar que a temperatura anormal no condutor persiste por um intervalo de tempo maior do que o de duração do curto. Por exemplo, uma corrente de 36000 ampères num cabo de 500 MCM eleva a temperatura do cobre num cabo EPROTENAX, de 90°C para 250°C, em aproximadamente 1 segundo, enquanto que, com a corrente reduzida a zero, levaria esse cabo 3000 segundos para voltar à temperatura de operação normal no condutor. O tempo de esfriamento variará com a geometria do cabo.
Este atraso térmico no resfriamento é de uma especial importância em casos onde os circuitos são protegidos por religadores automáticos e onde um imediato religamento manual é às vezes praticado.
Geralmente a temperatura inicial do condutor não é precisamente conhecida, desde que depende da carga do cabo e das condições ambientais. Por motivos de segurança deve-se adotar a máxima temperatura admissível no condutor, nas condições normais de trabalho do cabo.

## Considerações sobre emendas, terminais e terminações

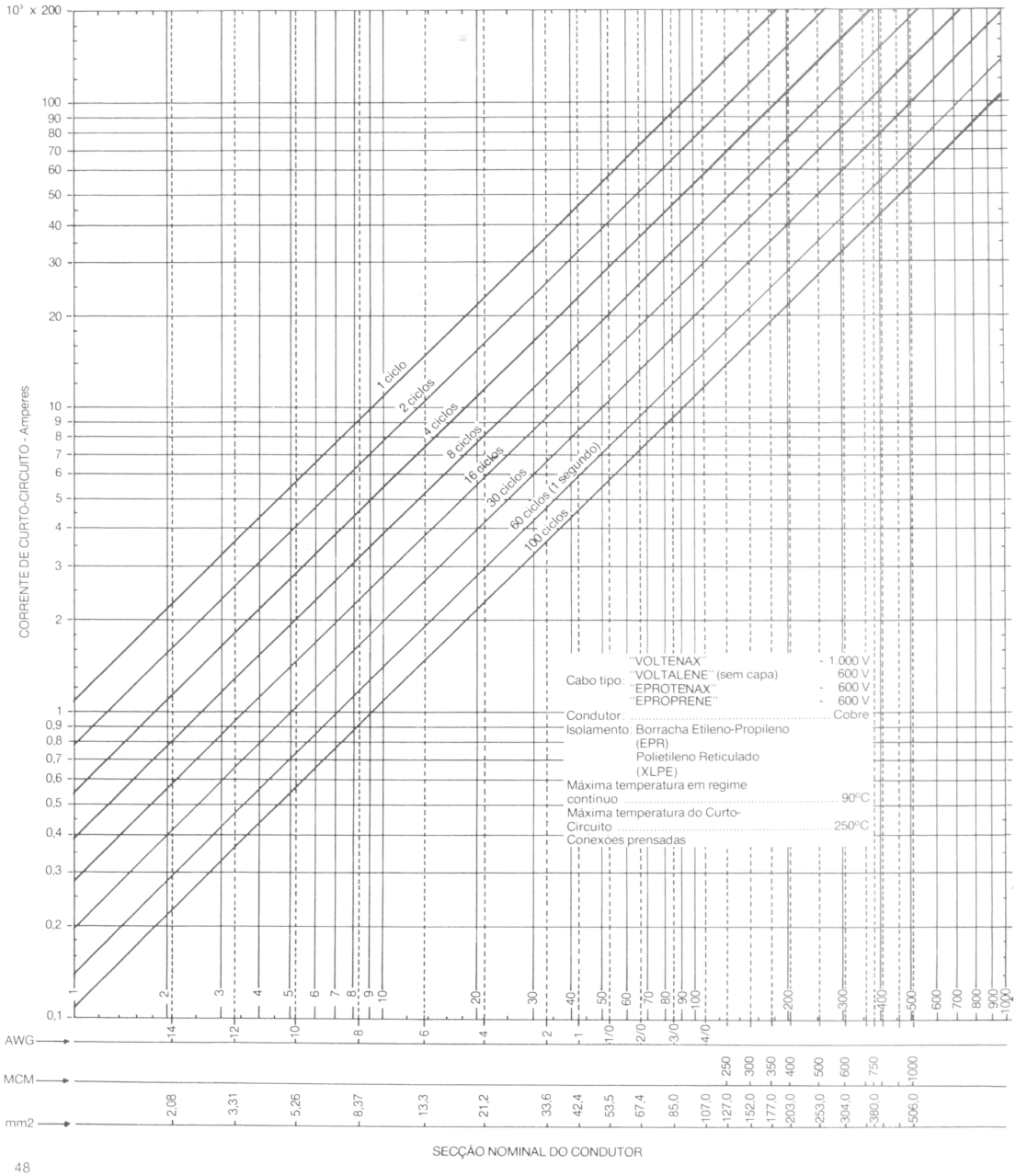
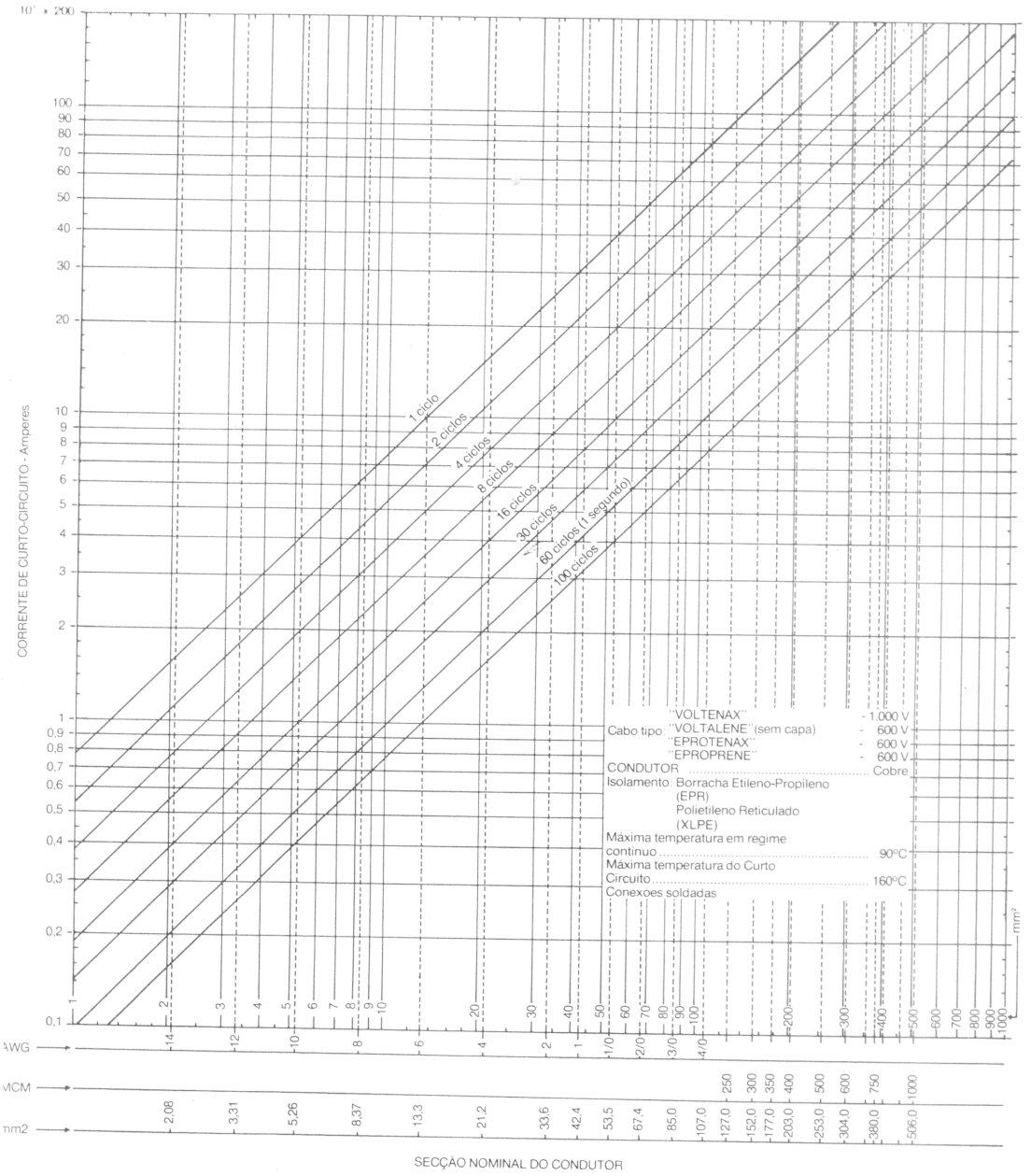
Comumente, na instalação de um cabo de energia, as conexões são executadas com solda estanho-chumbo.
Estas soldas tem suas características mecânicas depreciadas com a temperatura; recomenda-se, em geral, que a temperatura não ultrapasse 160°C. Vemos, então, que embora todos os isolamentos admitam temperaturas superiores a 160°C, com exceção do Sintenax (PVC especial de fabricação PIRELLI), é a emenda, terminal ou terminação que fixará a máxima temperatura para as condições de emergência.
Como, eventualmente, as conexões poderão ser executadas por meio de conetores de compressão ou aparafusados, ou por meio de soldas especiais (soldas a arco ou autógenas), sendo a temperatura máxima de curto circuito fixada pelo isolamento, fornecemos ábacos referentes a cabos instalados com todas as conexões por pressão, e por meio de solda de estanho ($T_2$ = 160°C).

## Fórmulas Simplificadas

As fórmulas apresentadas podem ser simplificadas, uma vez fixadas as temperaturas máximas em regime continuo e de curto circuito. A tabela abaixo resume estas fórmulas, para todos os cabos de energia de baixa tensão de uso geral.

| Tipo de cabo | $T_1$ °C | Fórmula baseada na máxima temperatura de curto circuito | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | Condutor de cobre | | | | Condutor de alumínio | | | |
| | | Conexões prensadas | | Conexões soldadas | | Conexões prensadas | | Conexões soldadas | |
| | | $T_2$ °C | Fórmula | $T_2$ °C | Fórmula | $T_2$ °C | Fórmula | $T_2$ °C | Fórmula |
| SINTENAX | 75 | 160 | $I\sqrt{t} = 110Sm$ | — | — | 160 | $I\sqrt{t} = 72Sm$ | — | — |
| VOLTENAX | 90 | 250 | $I\sqrt{t} = 142Sm$ | 160 | $I\sqrt{t} = 99Sm$ | 250 | $I\sqrt{t} = 93Sm$ | 160 | $I\sqrt{t} = 65Sm$ |
| VOLTALENE SEM CAPA | | | | | | | | | |
| EPROTENAX | | | | | | | | | |
| EPROPRENE | | | | | | | | | |
| PAPEL IMPREGNADO | 95 | 200 | $I\sqrt{t} = 118Sm$ | 160 | $I\sqrt{t} = 95Sm$ | 200 | $I\sqrt{t} = 77Sm$ | 160 | $I\sqrt{t} = 62Sm$ |

## *Correntes máximas de curto circuito*



## *Correntes máximas de curto circuito*