

Condutores Elétricos

Aspectos construtivos e aplicações

Escola Politécnica da Universidade de São Paulo

Depto. de Engenharia de Energia e Automação Elétricas
Escola Politécnica da USP

Junho/2011

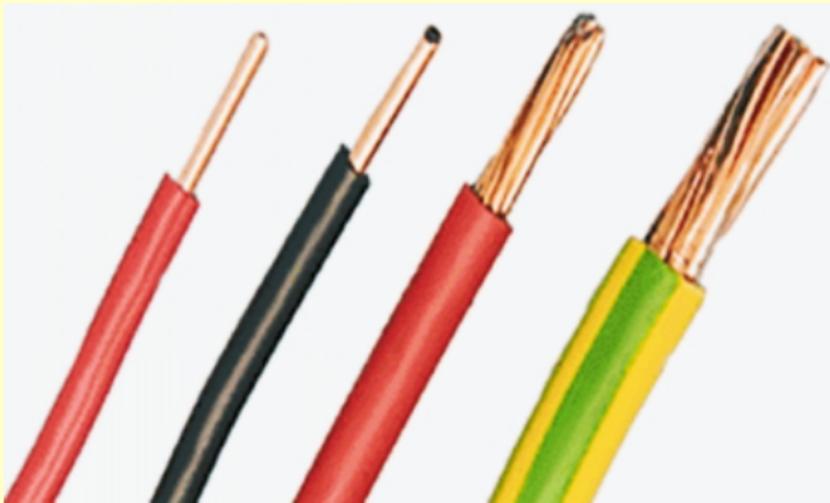
Definições

Fios e cabos

- O condutor elétrico é um produto metálico, com uma determinada seção transversal geralmente circular, de comprimento bastante elevado;
- O condutor elétrico é utilizado para transportar energia elétrica ou transmitir sinais elétricos. Normalmente pode ser:
 - Fio elétrico: produto metálico maciço e flexível, com seção transversal invariável, que pode ou não possuir isolamento e/ou proteção mecânica; e
 - Cabo elétrico: produto metálico composto de fios elétricos justapostos, que pode ou não possuir isolamento e/ou proteção mecânica.

Condutores elétricos

Fios condutores e cabos elétricos



<http://www.bdwires.com/>

Fios e cabos elétricos

Materiais utilizados na sua construção

- O processo de fabricação de fios e cabos elétricos normalmente emprega os seguintes materiais:
 - Material condutor: responsável pelo transporte da energia elétrica, ou dos sinais elétricos, da origem (fonte) para o destino (carga);
 - Material isolante: garante a integridade da energia elétrica, ou dos sinais elétricos transportados; e
 - Proteção mecânica: responsável por garantir a integridade física do material condutor e do material isolante.

Tipos de materiais

Materiais condutores

- Os materiais condutores utilizados na produção de fios e cabos elétricos são o cobre e o alumínio;
- O cobre utilizado é o **cobre eletrolítico** recozido, com pureza mínima de 99,9% e condutibilidade de 100% na escala da IACS – *International Annealed Copper Standard*. A sua condutividade é:

$$\sigma = 5,814 \times 10^7 [\Omega^{-1} \cdot m^{-1}]$$

- O alumínio utilizado é de alta pureza, têmpera meio-dura e condutibilidade de 61% na escala IACS.

Tipos de materiais

Materiais condutores – Tabela de resistividade a 20° C

Material	Resistividade [$\Omega \cdot m$]	Coefficiente α
Prata	$1,587 \times 10^{-8}$	0,0038
Cobre	$1,724 \times 10^{-8}$	0,0039
Ouro	$2,214 \times 10^{-8}$	0,0034
Alumínio	$2,820 \times 10^{-8}$	0,0039
Platina	$1,050 \times 10^{-7}$	0,0039

Tipos de materiais

Materiais condutores

- Em instalações elétricas de baixa tensão não se pode utilizar condutores de alumínio:
 - O alumínio oxida com facilidade e a superfície oxidada possui baixa condutividade, sendo assim, conexões entre dois cabos de alumínio devem ser feitas por meio de soldas exotérmicas, que não são apropriadas para instalações de baixa tensão;
 - Conexões do alumínio com outros materiais, em especial o cobre, resulta em pilhas eletrolíticas que favorecem a corrosão.

Tipos de materiais

Características do cobre e do alumínio

Características	Cobre	Alumínio
Densidade (g/cm ³)	8.89	2.70
Ponto de fusão(°C)	1083	652.6
Calor específico volumétrico(J/k.m ³)	3.45x10 ⁶	2.5x10 ⁶
Coefficiente de expansão linear(°C ⁻¹ a 20°C)	16.8x10 ⁻⁶	23.6x10 ⁻⁶
Condutividade térmica (cal/cm.seg.°C)	0.934	0.56
Carga de ruptura(kgf/mm ²)	-----	20.3
Alongamento a ruptura(%)	2.5	1.2
Resistividade elétrica(Ω x mm ² /m a 20°C)	0.017241	0.02828
Condutividade elétrica(%IACS a 20°C)	100	61

Processo de fabricação

Trefilação a frio

- O processo de fabricação consiste em:
 - Conformação mecânica do fio máquina, produzido pelo processo de laminação a quente do material condutor, a partir do lingote obtido pelo processo de fundição; ou
 - Conformação mecânica do vergalhão de material condutor, produzido pelo processo de extrusão a quente do material condutor, a partir do tarugo obtido pelo processo de fundição.

Trefilação a frio

Exemplo de trefilação a frio



<http://www.youtube.com/watch?v=olFCvqDLcz0>

Cobre x Alumínio

Comparação entre os dois materiais

- A comparação entre ambos os materiais pode ser conduzida considerando aspectos elétricos e mecânicos;
- Do ponto de vista elétrico, a comparação consiste em determinar a relação entre as seções transversais de um condutor cilíndrico de alumínio e um de cobre, que possuam a mesma resistência elétrica;
- Do ponto de vista mecânico, a comparação consiste em determinar a relação entre as massas desses condutores.

Comparação do ponto de vista elétrico

Cobre x Alumínio

- Considerando que dois condutores distintos, um de cobre e outro de alumínio, possuem a mesma resistência elétrica, têm-se:

$$R_{Cu} = \frac{\rho_{Cu} \times L}{S_{Cu}} \quad \text{e} \quad R_{Al} = \frac{\rho_{Al} \times L}{S_{Al}}$$

Onde:

- L Comprimento do condutor;
- S Área da seção transversal do condutor;
- ρ Resistividade do condutor.

Comparação do ponto de vista elétrico

Cobre x Alumínio

- Igualando as duas resistências, tem-se:

$$\frac{\rho_{Cu} \times L}{S_{Cu}} = \frac{\rho_{Al} \times L}{S_{Al}}$$

- E:

$$\frac{0,017241}{S_{Cu}} = \frac{0,02828}{S_{Al}}$$

- Portanto:

$$S_{Cu} = 0,610 \times S_{Al} \quad \text{e} \quad d_{Cu} = 0,781 \times d_{Al}$$

Comparação do ponto de vista mecânico

Cobre x Alumínio

- A relação entre a massa de ambos os condutores, que possuem a mesma resistência elétrica é dada por:

$$M_{Cu} = \gamma_{Cu} \times S_{Cu} \times L \quad \text{e} \quad M_{Al} = \gamma_{Al} \times S_{Al} \times L$$

Onde:

- γ Densidade do condutor;
- S Área da seção transversal do condutor;
- L Comprimento do condutor;
- M Massa do condutor.

Cobre x Alumínio

Comparação do ponto de vista mecânico

- A relação entre massas pode ser obtida pela divisão de ambas as expressões, considerando que:

$$S_{Cu} = 0,610 \times S_{Al}$$

- Portanto:

$$\frac{M_{Cu}}{M_{Al}} = \frac{8,89 \times 0,610}{2,70 \times 1} \approx 2,0$$

- Sendo assim, um condutor de cobre com o mesmo comprimento do condutor de alumínio e a mesma resistência elétrica possui o **dobro** de massa.

Materiais condutores

Demais materiais

- Além do cobre e do alumínio, há outros materiais condutores:
 - Prata: alta condutibilidade e, além disso, o óxido é condutor;
 - Platina: possui alta temperatura de fusão e, além disso, é utilizada em contatos por ser um metal “inerte”; e
 - Ouro: não oxida e, portanto, pode ser utilizado para proteger outros metais.
- E ligas metálicas:
 - Bronze, latão, etc.

Materiais isolantes

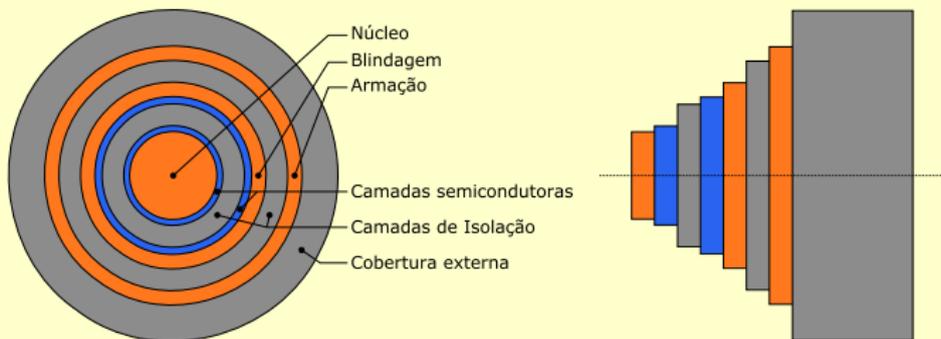
Fios e cabos elétricos

- Os fios e cabos elétricos podem ser:
 - Nus: são fios e cabos sem isolamento nenhuma, normalmente aplicados em redes elétricas de distribuição ou de transmissão (AC – *aluminum cable*, AAAC – *all aluminum alloy conductor*, ACSR – *aluminum cable steel reinforced* e ACAR – *Aluminum conductor alloy reinforced*);
 - Isolados: são aqueles cujo condutor é revestido por um material para isolá-lo do meio que o circunda (termoplásticos: PVC – cloreto de polivinila e PE – polietileno; termofixos: XLPE – polietileno reticulado e EPR – borracha etileno propileno).

Cabos elétricos isolados

Aspectos construtivos

- A seguir é apresentado um cabo isolado completo, normalmente empregado em tensões superiores a 1000 [V]:



Proteção mecânica

Fios e cabos elétricos

- Em alguns casos, os cabos isolados podem possuir uma capa externa para proteção mecânica;
- Há dois tipos de capas:
 - Não-metálicas: geralmente externas, são escolhidas em função da resistência mecânica e/ou química, e são compostas por PVC, neoprene, PC, etc.; e
 - Metálicas: empregadas na forma de armação, quando os cabos são solicitados mecanicamente. A armação pode ser radial (fitas de aço ou alumínio) ou tangencial (fios de aço).

Fios e cabos elétricos

Seção transversal

- Fios e cabos elétricos são definidos pela seção transversal. Atualmente, as escalas em uso são:
 - AWG – *American Wire Gauge*: atualmente em desuso;
 - CM – *Circular mil*: área de seção transversal equivalente a um círculo com o diâmetro de um milésimo de polegada; e
 - Milimétrica: é a escala atualmente empregada no Brasil.

Escalas utilizadas

Seção transversal

Escala AWG



[http://pt.wikipedia.org/wiki/Ficheiro:Wire_gauge_\(PSF\).png](http://pt.wikipedia.org/wiki/Ficheiro:Wire_gauge_(PSF).png)

Cabos isolados

Capacidade de condução de corrente

- Está relacionada com a temperatura máxima de operação da camada isolante;
- A passagem de corrente produz aquecimento no condutor. Parte é armazenada no cabo e parte é transferida para a atmosfera;

$$\underbrace{Wdt}_{\text{produzido}} = \underbrace{Qd\theta(t)}_{\text{armazenado}} + \underbrace{Ak\theta(t)dt}_{\text{transferido}}$$

Onde:

W calor produzido por efeito Joule ($R_{cond} \cdot I^2$);

Q capacidade térmica do condutor e do isolante;

$\theta(t)$ $T_{cabo} - T_{amb}$;

A Área da superfície emissora de calor;

k Coeficiente de transferência de calor.

Cabos isolados

Capacidade de condução de corrente

- A solução da equação diferencial:

$$W = Q \frac{d\theta(t)}{dt} + Ak\theta(t)$$

- É dada por:

$$\theta(t) = WR_t \left\{ 1 - e^{-\frac{t}{QR_t}} \right\}$$

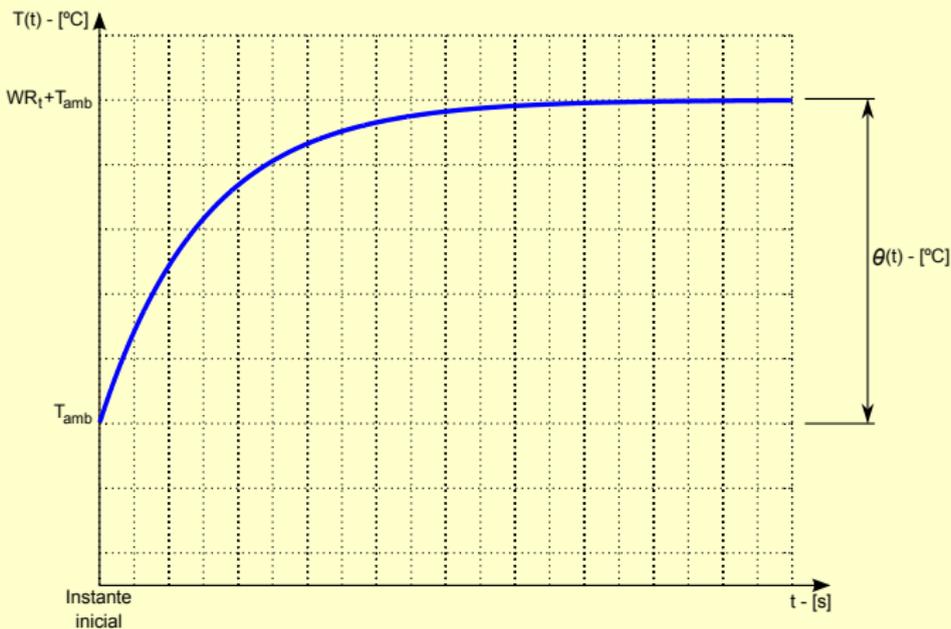
Onde:

$R_t = \frac{1}{Ak}$ resistência térmica do condutor e do isolante.

Cabos isolados

Capacidade de condução de corrente

- A curva de aquecimento é dada por:



Cabo ideal e retilíneo no espaço livre

Resistência térmica

- A resistência térmica do cabo ideal isolado e retilíneo, cuja seção transversal é circular, depende da resistência térmica do material isolante e da resistência térmica do ar.

$$R_t = R_t^{isolante} + R_t^{ar}$$

$$R_t^{isolante} = \frac{\rho_{iso}}{2\pi} \ln \frac{D_{cabo}}{D_{cond}} \quad \text{e} \quad R_t^{ar} = \frac{10^3}{\pi \cdot D_{cabo} \cdot h \cdot \theta^{0.25}}$$

Onde:

h coeficiente de dissipação de calor;

D_{cabo} diâmetro total do cabo (ou fio);

ρ_{iso} resistividade térmica do isolante;

D_{cond} diâmetro do elemento condutor.

Cabo ideal e retilíneo no espaço livre

Capacidade térmica

- A capacidade térmica do cabo ideal isolado e retilíneo, cuja seção transversal é circular, depende da capacidade térmica do material isolante e da capacidade térmica do material condutor.

$$Q = Q_{condutor} + Q_{isolante}$$

$$Q_{condutor} = c_{cond} \cdot S_{cond} \quad \text{e} \quad Q_{isolante} = c_{iso} \cdot S_{iso} = c_{iso} \cdot \frac{\pi}{4} \cdot \{ D_{cabo}^2 - D_{cond}^2 \}$$

Onde:

c_{cond} calor específico do condutor;

c_{iso} calor específico do isolante.

Exemplo

Cálculo da capacidade de corrente

- Determine a corrente máxima que pode circular por um condutor isolado ideal e retilíneo, cuja camada de isolação em PVC ($70^{\circ} [C]$) possui $1 [mm]$ de espessura, e cujo elemento condutor de cobre possui seção transversal circular de área $2,5 [mm^2]$. Dados:

- $\rho_{iso} = 6,0 \left[\frac{^{\circ}C \cdot m}{W} \right]$

- $h = 6,8 \left[\frac{W}{m^2} \right]$

- $Q_{condutor} = 8,625 \left[\frac{J}{^{\circ}C \cdot m} \right]$

- $Q_{isolante} = 14,84 \left[\frac{J}{^{\circ}C \cdot m} \right]$

Exemplo

Cálculo da capacidade de corrente

- O primeiro passo é calcular a resistência térmica do conjunto isolamento/ar, desta forma, tem-se:

$$R_t^{isolante} = \frac{6,0}{2\pi} \ln \frac{\sqrt{\frac{4 \cdot 2,5}{\pi}} + 1 + 1}{\sqrt{\frac{4 \cdot 2,5}{\pi}}} = 0,72 \left[\frac{^{\circ}\text{C}\cdot\text{m}}{\text{W}} \right]$$

$$R_t^{ar} = \frac{10^3}{\pi \cdot \left(\sqrt{\frac{4 \cdot 2,5}{\pi}} + 1 + 1 \right) \cdot 6,8 \cdot 50^{0,25}} = 4,65 \left[\frac{^{\circ}\text{C}\cdot\text{m}}{\text{W}} \right]$$

- Portanto:

$$R_t = 4,65 + 0,72 = 5,37 \left[\frac{^{\circ}\text{C}\cdot\text{m}}{\text{W}} \right]$$

Exemplo

Cálculo da capacidade de corrente

- Em seguida, calcula-se a resistência elétrica do condutor, considerando sua variação com a temperatura:

$$R_{cond} = \rho_{20[^\circ C]} \frac{l_{cond}}{S_{cond}} [1 + \alpha \cdot \theta(t)] = \rho_{20[^\circ C]} \frac{l_{cond}}{S_{cond}} [1 + \alpha \cdot (T_{cond} - T_{amb})]$$

- Supondo que a temperatura ambiente seja 20 [°C] e que o condutor tenha 1 [m] de comprimento (para o cobre: $\rho_{20[^\circ C]} = 1,7241 \times 10^{-8}$ e $\alpha = 3,93 \times 10^{-3}$):

$$R_{cond} = 1,7241 \times 10^{-8} \frac{1}{2,5 \times 10^{-6}} [1 + 3,93 \times 10^{-3} \cdot (70 - 20)] = 8,252 \times 10^{-3} [\Omega]$$

Exemplo

Cálculo da capacidade de corrente

- A partir dos dados obtidos anteriormente, pode-se escrever a equação que descreve a elevação de temperatura do condutor. Sendo assim:

$$\theta(t) = 44,311 \times 10^{-3} \cdot I^2 \left(1 - e^{\frac{-t}{126,007}} \right)$$

- Considerando o tempo tendendo ao infinito, pode-se determinar a corrente I que é capaz de elevar a temperatura do condutor aos 70 [°C]:

$$I = \sqrt{\frac{70-20}{44,311 \times 10^{-3}}} = 33,59 [A]$$

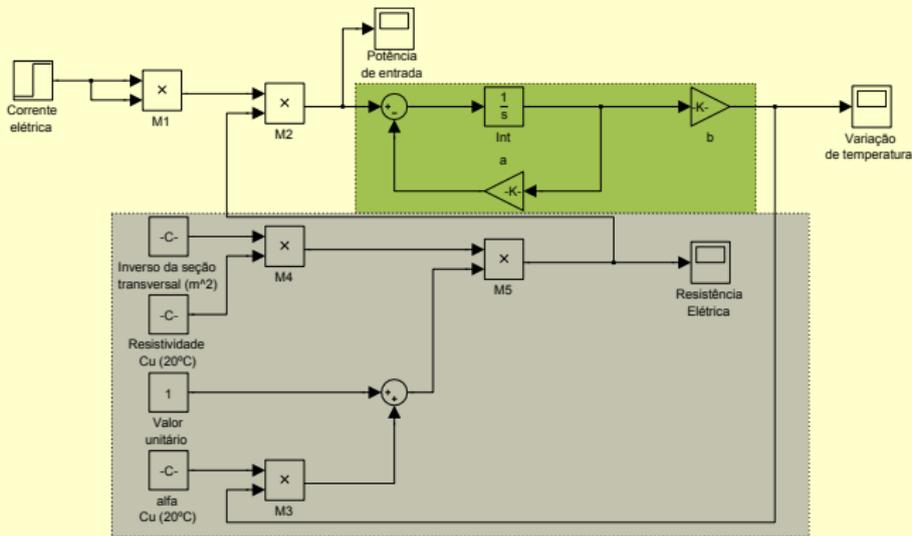
- E a equação fica:

$$\theta(t) = 50 \left(1 - e^{\frac{-t}{126,007}} \right)$$

Exemplo

Dinâmica do sistema

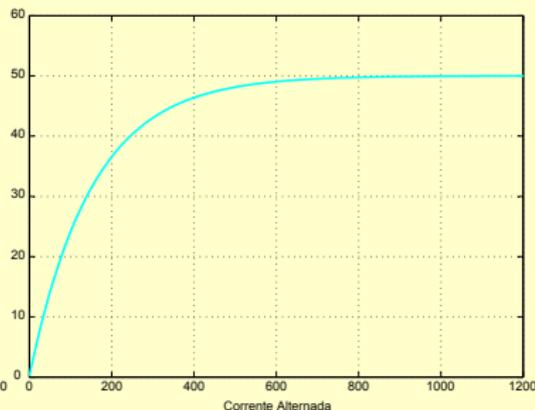
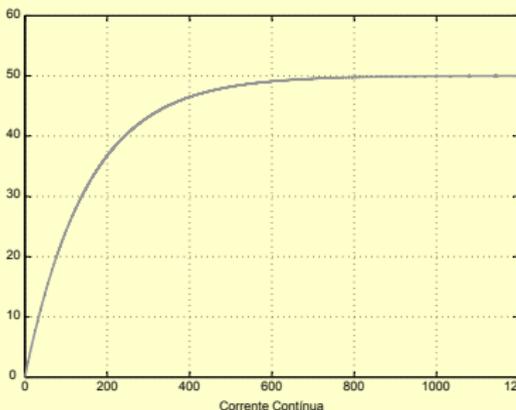
- A partir da equação da alevação de temperatura pode-se construir o sistema dinâmico ilustrado.



Exemplo

Corrente alternada vs. Corrente contínua

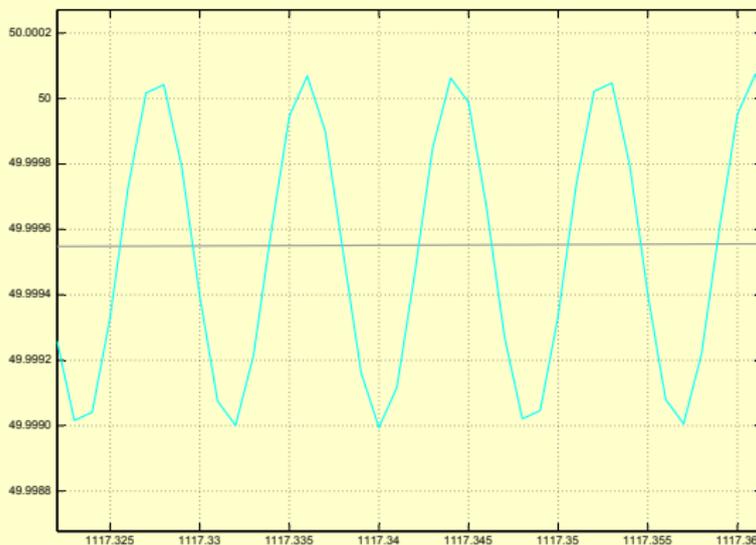
- Os gráficos a seguir apresentam a elevação de temperatura para o sistema submetido a uma corrente contínua e a uma corrente alternada de valor eficaz igual à corrente contínua.



Exemplo

Corrente alternada vs. Corrente contínua

- O gráfico a seguir apresenta a comparação entre a elevação de temperatura para o sistema submetido a uma corrente contínua e a uma corrente alternada de valor eficaz igual à corrente contínua.



Correção da capacidade de corrente

Fator de correção de temperatura

- Caso a temperatura ambiente seja diferente de da temperatura adotada para a obtenção da curva de aquecimento do condutor, pode-se proceder com a obtenção da nova curva, porém o usual é a utilização de fatores de correção de temperatura que são tabelados (NBR5410).

Tabela 40 — Fatores de correção para temperaturas ambientes diferentes de 30°C para linhas não-subterrâneas e de 20°C (temperatura do solo) para linhas subterrâneas

Temperatura °C	Isolação	
	PVC	EPR ou XLPE
Ambiente		
10	1,22	1,15
15	1,17	1,12
20	1,12	1,08
25	1,06	1,04
35	0,94	0,96
40	0,87	0,91
45	0,79	0,87
50	0,71	0,82
55	0,61	0,76
60	0,50	0,71
65	–	0,65
70	–	0,58

Correção da capacidade de corrente

Fator de correção de agrupamento

- Os fatores de correção para agrupamento são tabelados (NBR5410).

Tabela 42 — Fatores de correção aplicáveis a condutores agrupados em feixe (em linhas abertas ou fechadas) e a condutores agrupados num mesmo plano, em camada única

Ref.	Forma de agrupamento dos condutores	Número de circuitos ou de cabos multipolares												Tabelas dos métodos de referência
		1	2	3	4	5	6	7	8	9 a 11	12 a 15	16 a 19	≥20	
1	Em feixe: ao ar livre ou sobre superfície; embutidos; em conduto fechado	1,00	0,80	0,70	0,65	0,60	0,57	0,54	0,52	0,50	0,45	0,41	0,38	36 a 39 (métodos A a F)
2	Camada única sobre parede, piso, ou em bandeja não perfurada ou prateleira	1,00	0,85	0,79	0,75	0,73	0,72	0,72	0,71	0,70				36 e 37 (método C)
3	Camada única no teto	0,95	0,81	0,72	0,68	0,66	0,64	0,63	0,62	0,61				
4	Camada única em bandeja perfurada	1,00	0,88	0,82	0,77	0,75	0,73	0,73	0,72	0,72				38 e 39 (métodos E e F)
5	Camada única sobre leito, suporte etc.	1,00	0,87	0,82	0,80	0,80	0,79	0,79	0,78	0,78				

Temperaturas de operação características

Cabos isolados

- A tabela a seguir apresenta as temperaturas de operação características, em função do desempenho dinâmico de cada material isolante

Tipo de material	Regime	Sobrecarga	Curto-circuito
PVC	70	100	160 ⁽¹⁾
EPR	90	100	160 ⁽¹⁾
Papel (massa)	85	110	200
Papel (oleo)	85	105	250

⁽¹⁾: Fonte: <http://www.ipce.com.br/introducao.html>

