

# Condutores Elétricos

## Aspectos construtivos e aplicações

Giovanni Manassero Junior

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

14 de março de 2013

# 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 $\alpha$ |
|----------|------------------------------------|-----------------------|
| 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 ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )   | 8.89                  | 2.70                  |
| Ponto de fusão ( $^{\circ}\text{C}$ )  | 1083                  | 652.6                 |
| Calor específico volumétrico ( $\text{J}/\text{k}\cdot\text{m}^3$ )                    | $3.45 \times 10^6$    | $2.5 \times 10^6$     |
| Coefficiente de expansão linear ( $^{\circ}\text{C}^{-1}$ a $20^{\circ}\text{C}$ )     | $16.8 \times 10^{-6}$ | $23.6 \times 10^{-6}$ |
| Condutividade térmica ( $\text{cal}/\text{cm}\cdot\text{seg}\cdot^{\circ}\text{C}$ )   | 0.934                 | 0.56                  |
| Carga de ruptura ( $\text{kgf}/\text{mm}^2$ )  | -----                 | 20.3                  |
| Alongamento a ruptura (%)  | 2.5                   | 1.2                   |
| Resistividade elétrica ( $\Omega \times \text{mm}^2/\text{m}$ a $20^{\circ}\text{C}$ ) | 0.017241              | 0.02828               |
| Condutividade elétrica (%IACS a $20^{\circ}\text{C}$ )                                 | 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;
- $\rho$  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:

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

Onde:

- $\gamma$  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

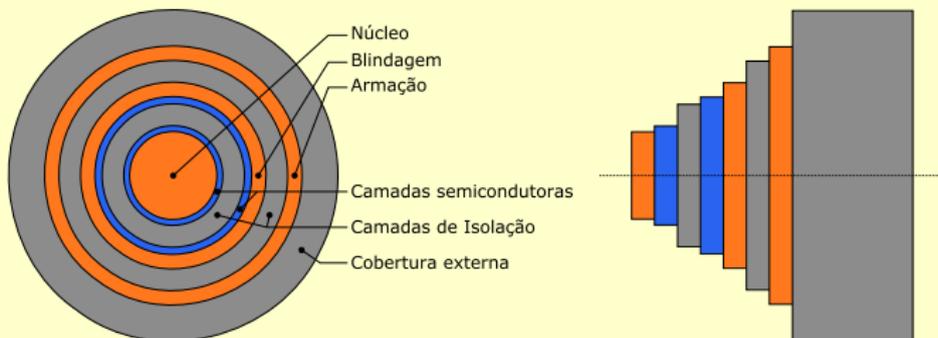
## Fios e cabos elétricos

- 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:

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

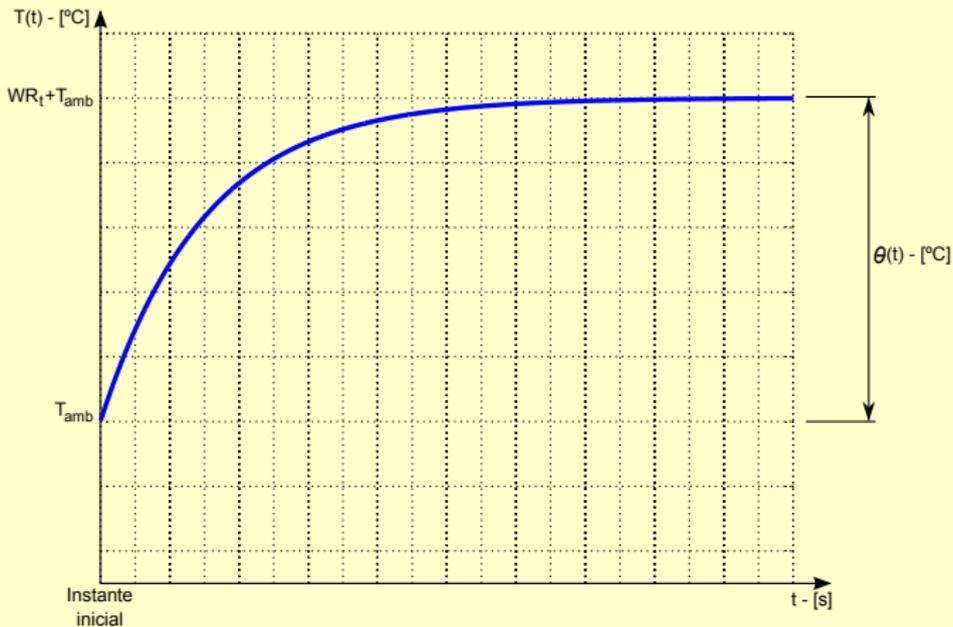
Onde:

$R_t = \frac{1}{Ak}$  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);

$\rho_{iso}$  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]:

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

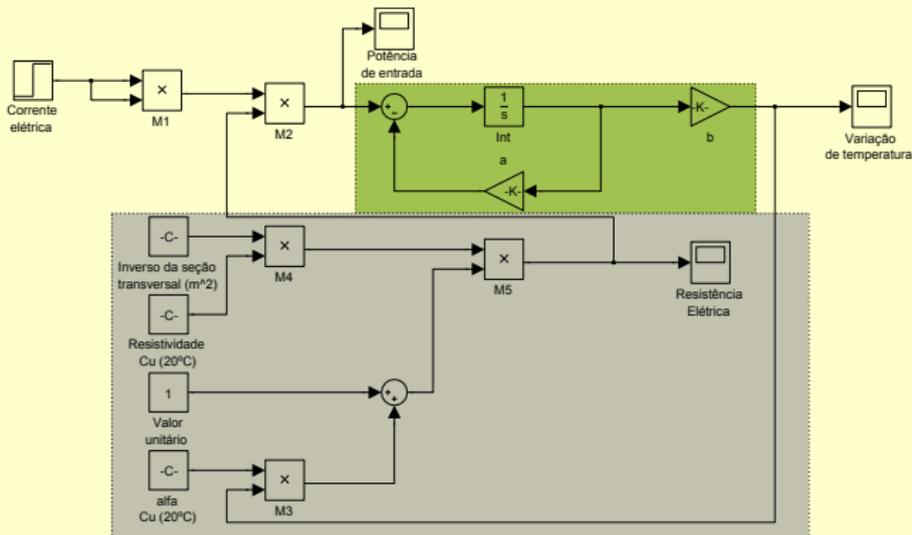
- E a equação fica:

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

# Exemplo

## Dinâmica do sistema

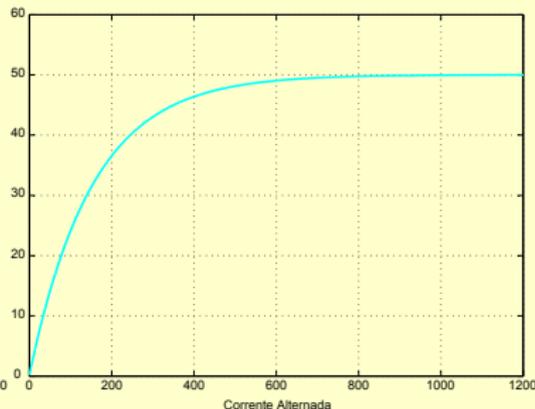
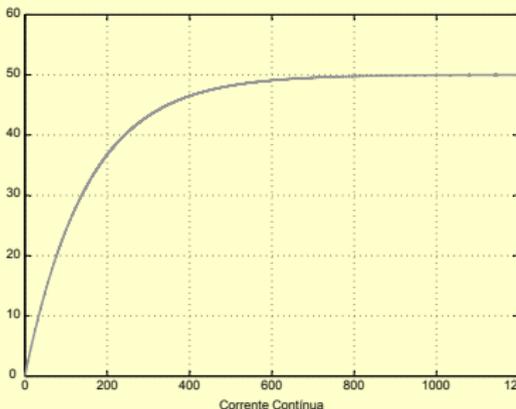
- A partir da equação da alevação de temperatura pode-se construir o sistema dinâmico ilustrado.



# Exemplo

## Corrente alternada vs. Corrente contínua

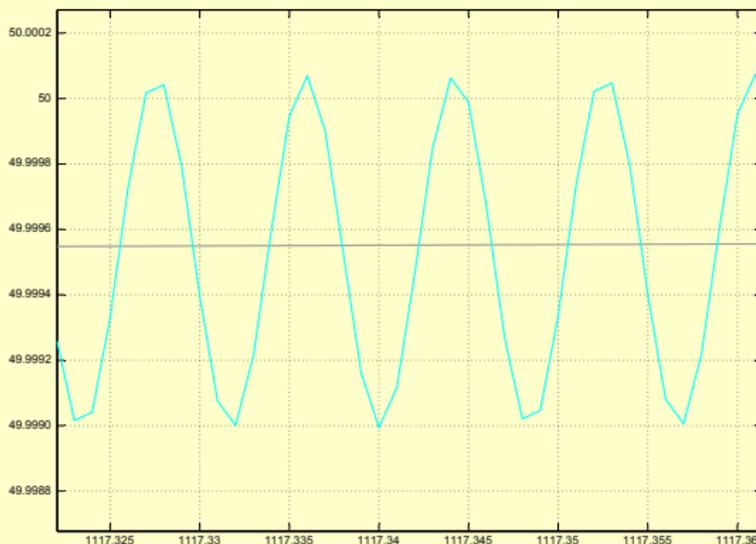
- Os gráficos a seguir apresentam a elevação de temperatura para o sistema submetido a uma corrente contínua e a uma corrente alternada de valor eficaz igual à corrente contínua.



# 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<br>°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

- Caso haja dois (ou mais) condutores próximos, o aquecimento produzido pela passagem de corrente em um condutor interfere com o aquecimento produzido pela passagem de corrente em um segundo condutor;
- Neste caso, a curva de aquecimento comporta-se de maneira diferente e a corrente máxima que pode circular no segundo condutor é menor.



# 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 <sup>(1)</sup> |
| EPR              | 90     | 100        | 160 <sup>(1)</sup> |
| Papel (massa)    | 85     | 110        | 200                |
| Papel (oleo)     | 85     | 105        | 250                |

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

# Temperaturas de operação características

## Cabos isolados

- Temperatura de regime permanente: É a maior temperatura que a isolação pode atingir continuamente em serviço normal. É a principal característica na determinação da capacidade de condução de corrente de um cabo;
- Temperatura em regime de sobrecarga: é a temperatura máxima que a isolação pode atingir em regime de sobrecarga. Segundo as normas de fabricação, a duração desse regime não deve superar 100 horas durante doze meses consecutivos, nem superar 500 horas durante a vida do cabo;
- Temperatura em regime de curto-circuito: é a temperatura máxima que a isolação pode atingir em regime de curto-circuito. Segundo as normas de fabricação, a duração desse regime não deve superar 5 segundos durante a vida do cabo.