

8

CONDUTORES ELÉTRICOS DE BAIXA TENSÃO

8.1 INTRODUÇÃO

Em qualquer circuito elétrico, nota-se a presença de elementos condutores, que interligam os equipamentos elétricos às fontes e aos demais componentes do circuito.

Os condutores transportam a corrente elétrica (convencional) que transita dos potenciais maiores para os menores.

Na busca dessa qualidade específica de conduzir corrente elétrica, encontra-se na natureza alguns tipos de metais, que por suas características físicas e químicas, podem ser tratados para atender perfeitamente essa função. O cobre e o alumínio são os principais metais condutores utilizados.

8.2 OBJETIVO

O objetivo deste capítulo é apresentar aspectos gerais sobre a aplicação de condutores utilizados em circuitos elétricos de potência e, em particular em instalações elétricas prediais, portanto condutores isolados de cobre de baixa tensão (BT).

8.3 CLASSIFICAÇÃO E ASPECTOS CONSTRUTIVOS

Entende-se por :

Condutor elétrico: como sendo um produto metálico, geralmente de forma cilíndrica e de comprimento muito maior do que a dimensão transversal, utilizado para transportar energia elétrica ou para transmitir sinais elétricos;

Fio elétrico: como sendo um produto metálico maciço e flexível, de seção transversal invariável e de comprimento muito maior do que a dimensão transversal. Pode ser utilizado como condutor ou na fabricação de cabos e;

Cabo elétrico: como sendo um condutor formado por um conjunto de fios justapostos.

Existem vários critérios para a classificação dos cabos e fios, dentre os quais, são apresentados, sucintamente, aqueles de maior interesse para este texto:

a) Quanto à tensão de operação

- baixa tensão: para operação sob tensão inferior ou igual a 1000V;
- média tensão: para operação sob tensão maior que 1000V e inferior (ou igual) a 35000V;
- alta tensão: para operação sob tensão maior que 35000V.

b) Quanto ao material condutor:

Os materiais utilizados na fabricação de condutores, em quase sua totalidade, são o cobre e o alumínio.

O cobre utilizado nos condutores elétricos é refinado por eletrólise, com pureza mínima de 99,9%, recozido, têmpera mole, de condutibilidade mínima 100% IACS a 20°C (IACS -“international annealed copper standart”, padrão internacional de resistividade, correspondente à apresentada por um fio de cobre com 1m de comprimento, 1mm² de seção transversal a 20°C), ou seja, de resistividade elétrica máxima $\rho_{20^\circ}=0,017241\Omega \times \text{mm}^2/\text{m}$. Em aplicações especiais, como redes de tróleibus, utiliza-se de cobre de têmpera meio-dura e dura.

O alumínio puro utilizado em condutores isolados é, normalmente de têmpera dura e de condutibilidade 61% IACS a 20°C, ou seja, de resistividade elétrica máxima de $\rho_{20^\circ}=0.02828\Omega \times \text{mm}^2/\text{m}$.

Em algumas aplicações especiais, outros metais ou ligas, como prata, platina, ouro, mercúrio são utilizados como condutores.

A tabela abaixo apresenta características físicas do cobre e do alumínio .

Tabela 8.1 - Características físicas do cobre e 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

O condutor dos fios e dos cabos é caracterizado pela sua seção reta nominal, em escala milimétrica (mm²). Historicamente há outras unidades de seção que estão gradativamente sendo abandonadas, como AWG, baseada nas bitolas possíveis das ferramentas de extrudagens sucessivas de fios de cobre e o CM – circular mil, que tem com unidade a área de um círculo de 1 milésimo de polegada de diâmetro.

Do ponto de vista elétrico a comparação, entre a aplicação de um condutor de cobre ou de alumínio, se faz através de determinação das seções para um condutor de cobre ou de alumínio, necessárias alternativamente em um segmento da rede, que apresentem a mesma resistência elétrica.

Assim, considerando a mesma corrente transportada, a questão proposta é: qual é a relação entre as seções dos condutores de cobre e de alumínio que, aplicados alternativamente, resultam na mesma queda de tensão em um determinado trecho da rede?

Igualando-se as resistências elétricas dos dois condutores é possível determinar a relação entre suas seções, considerando as resistividades de cada um dos materiais, conforme indicado abaixo:

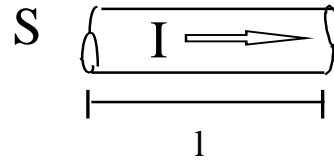
$$R = \rho \frac{l}{S}$$

$$\rho_{Cu} \frac{l}{S_{Cu}} = \rho_{Al} \frac{l}{S_{Al}}$$

$$\frac{S_{Cu}}{S_{Al}} = \frac{\rho_{Cu}}{\rho_{Al}} = \frac{0.017}{0.028} = 0.607$$

$$S_{Cu} = 0.607 S_{Al}$$

$$d_{Cu} = 0.78 d_{Al}$$



Portanto, conclui-se que para se obter a mesma resistência em um trecho de rede constituído alternativamente por condutor de cobre ou de alumínio, necessita-se aplicar um condutor de cobre que tenha cerca de 61% da seção do de alumínio, ou 78% do diâmetro.

Por outro lado, a relação dos pesos específicos do cobre ρ_{Cu} e do alumínio ρ_{Al} são:

$$\frac{\rho_{Cu}}{\rho_{Al}} = \frac{8.89}{2.70} = 3.29$$

Isso permite concluir que a relação entre as massas do cobre M_{Cu} e do alumínio M_{Al} necessárias para o transporte de uma mesma corrente, que produz a mesma queda de tensão é:

$$\frac{M_{Cu}}{M_{Al}} = \frac{3.29}{1.64} \cong 2$$

Conclui-se, portanto, que para o transporte de uma corrente em um trecho de linha com a mesma resistência, o condutor de cobre terá uma seção transversal 61% da seção do de alumínio, mas mesmo assim, pesará cerca do dobro deste!!

c) Quanto à isolação:

- **nus:** são os fios ou cabos sem isolação ou cobertura,

Os cabos nus são aplicados em redes elétricas de distribuição ou de transmissão aéreas que utilizam alumínio em seus condutores, por este metal apresentar baixo peso específico em relação ao cobre e portanto oferecer vantagens mecânicas ao dimensionamento das estruturas de sustentação. Os cabos nus de alumínio se apresentam como:

- cabos de alumínio de têmpera dura : aplicados em redes aéreas onde a tensão mecânica de tração é limitada, como por exemplo em redes urbanas de distribuição de energia onde os vãos (distâncias entre os postes) são da ordem de algumas dezenas de metros;

- cabos de alumínio - liga : utilizados em aplicações especiais onde se requer características como alta resistência à corrosão, como em áreas litorâneas de alta agressividade ou mesmo em aplicações onde se requer resistência mecânica superior;

- cabos de alumínio com alma de aço (aluminum conductor steel reinforced - ACSR) , que são compostos por vários fios ou tendões de alumínio, sustentados por um cabo de aço, que lhe confere um alta capacidade mecânica de tração. São utilizados em situações onde se ocorrem elevados esforços de tração, como em linhas de transmissão, onde os vãos são, usualmente, suspensos a 200m.

- **isolados:** são aqueles cujo condutor é revestido por um material para isolá-lo eletricamente do meio que o circunda.

A isolação deve ser constituída de material com suficiente rigidez dielétrica, e suportar ainda temperaturas de operação do cabo sem degradação de suas propriedades, e apresentar resistência mecânica suficiente para não se danificar face aos esforços mecânicos presentes na instalação (puxamento) e na operação (dilatações e contrações resultantes de aquecimento).

Usualmente os cabos e fios isolados são de cobre, principalmente em instalações industriais e residenciais de baixa tensão, por serem mais adequados na execução das conexões aos terminais de equipamentos, que geralmente são de cobre. O contato bimetálico cobre-alumínio resultaria na presença de pilhas eletrolíticas, que favoreceria a corrosão.

Os materiais utilizados como isolação, além de alta resistividade, devem possuir alta rigidez dielétrica, sobretudo quando empregados para operar com tensão superior a 1000 V. Em instalações industriais e residenciais, os principais materiais empregados na isolação dos fios e cabos são:

- **termoplásticos :** utilizados geralmente em fios e cabos de baixa tensão onde a temperatura é limitada a 75°C, como por exemplo, em redes elétricas cuja queda de tensão é fator mais restritivo do que o carregamento em seu dimensionamento. Suportam cerca de 90°C a 110 °C durante sobrecargas e de 160 °C durante curto-circuito. Os materiais termoplásticos amolecem com a elevação excessiva da temperatura,

perdendo portanto sua rigidez mecânica. São materiais termoplásticos: o cloreto de polivinila (PVC), polietileno (PE), etc;

- **termofixos:** utilizados geralmente em redes de média e alta tensão por suportar temperatura, em regime contínuo de operação da ordem de 90°C e portanto maior confiabilidade. Suportam cerca de 130°C durante sobrecargas e de 250 °C durante curto-circuito. Os isolantes termofixos não amolecem com o aumento da temperatura como ocorre com os termoplásticos, carbonizando-se apenas a temperaturas bastante elevadas. São matérias termofixos: polietileno reticulado (XLPE), borracha etileno-propileno (EPR), etc.

Em alguns tipos de aplicações específicas, os cabos isolados apresentam uma capa externa para proteção mecânica. Em cabos de média e alta tensão há outras camadas de materiais além da isolação, com função de confinar o campo elétrico, diminuir o gradiente de tensão preservando o material isolante, blindagem metálica, proteção mecânica e química.

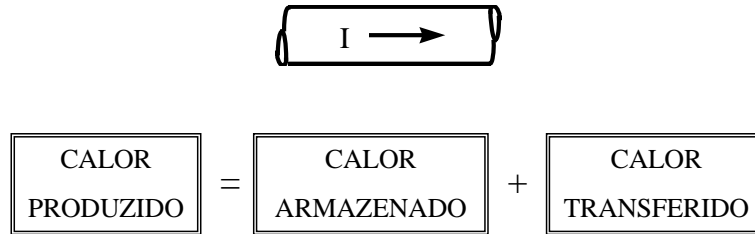
8.4 CÁLCULO DE CAPACIDADE DE CORRENTE DE UM CABO ISOLADO

O problema central da aplicação de cabos e fios é a determinação da máxima corrente que pode transportar em determinada condição de operação.

Neste item é apresentado o cálculo da capacidade de transporte de um fio isolado imerso no ar, submetido a um degrau de corrente constante, a partir de um certo instante.

Cabe ressaltar que a capacidade de corrente de um fio ou cabo isolado é determinada pela temperatura suportada pelo material isolante, que resulta do aquecimento produzido pela energia calorífica decorrente do efeito joule (RI^2). Isto ocorre porque a temperatura que degrada as propriedades do material isolante é inferior àquela suportada pelo metal condutor.

Assim, o cálculo da corrente que um condutor pode suportar é um problema de natureza termodinâmica, cujo equacionamento resulta do balanço de calor gerado, armazenado e dissipado por um condutor que transporta uma corrente I , imerso em um ambiente a temperatura t_{amb} . Assim, tem-se:



$$W \cdot dt = Q \cdot d\theta + A \cdot k \cdot \theta \cdot dt$$

onde:

- W = calor produzido por efeito Joule (RI^2)
- Q = $Q_{cond} + Q_{iso}$ = capacidade térmica do condutor e isolante
- c_{cond} = calor específico do condutor
- c_{iso} = calor específico do isolante
- $d\theta$ = variação de temperatura do condutor no intervalo dt
- A = área da superfície emissora de calor
- k = coeficiente de transferência de calor
- θ = elevação de temperatura do condutor sobre o ambiente

Considerando que imediatamente antes do instante inicial não há corrente passando pelo condutor e que no instante $t=0$ imprime-se um degrau de corrente de amplitude I constante no condutor, a temperatura do mesmo eleva-se conforme a equação abaixo, que representa solução para a equação diferencial acima, onde:

- $W = RI^2$ = calor produzido
- $R_t = 1/(A \cdot k)$ = resistência térmica
- $R_t Q$ = constante de tempo térmica

- t_{cond} = temperatura do condutor
- t_{amb} = temperatura ambiente
- $Q_{cond} = S_{cond} \cdot c_{cond}$
- $Q_{iso} = S_{iso} \cdot c_{iso}$

A elevação temperatura do condutor em relação a ambiente, em função do tempo é dada pela solução da referida equação diferencial:

$$\theta(t) = t_{cond} - t_{amb} = W \cdot R_t \cdot \left(1 - e^{-\frac{t}{R_t \cdot Q}} \right)$$

Nota-se que:

- quando $t = 0$, verifica-se que $\theta(0)=0$, o que representa que a temperatura do condutor é igual à ambiente, no instante inicial;
- quando t tende a infinito a temperatura do condutor se estabiliza em $t_{cond} = t_{amb} + WR_t$, que é chamada temperatura de regime permanente;
- a elevação da temperatura segue uma lei do tipo exponencial somada com uma constante, com constante de tempo igual a $R_t Q$. Há portanto uma elevação rápida da temperatura no período inicial e posteriormente a elevação se dá a taxas cada vez menores.

Considera-se que parte do calor gerado por efeito joule no seio do material condutor eleva a temperatura do cabo e do isolante e, o restante é dissipado para o ambiente, desde que a temperatura do condutor seja superior a do ambiente. Assim, o calor é transmitido, por condução, da superfície do condutor para a superfície interna do material isolante atravessando-o e posteriormente da superfície externa do isolante para o ar. Assim é necessário conhecer as resistências térmicas da camada isolante e do ar, para a solução adequada do problema.

Considerando o cabo da figura abaixo:

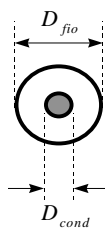


Figura 10.5

Demonstra-se que a resistência térmica da camada isolante $R_{t_{iso}}$ é dada por:

$$R_{t_{iso}} = \frac{\rho_{iso}}{2\pi} \cdot \ln \frac{D_{fio}}{D_{cond}}$$

onde: ρ_{iso} é a resistividade térmica do isolante e $R_{t_{iso}}$ é a resistência térmica do isolante.

Demonstra-se que a resistência térmica do meio que envolve o isolante é dada por:

$$Rt_{ar} = \frac{10^3}{\pi \cdot D_{fio} \cdot h \cdot \theta_s^{0,25}}$$

onde: h é o coeficiente de dissipação de calor do isolante para o ambiente

A resistência térmica total Rt consiste na soma de Rt_{ar} e Rt_{iso} .

Por outro lado, as capacidades térmicas dos materiais constituintes do cabo são dadas por:

$$Q = c \cdot A$$

onde Q é a capacidade térmica do material, c a capacidade térmica específica e A a área da seção transversal do material. Logo, tem-se que a capacidade térmica do condutor é:

$$Q_{cond} = c_{cond} \cdot S_{cond}$$

e a capacidade térmica do isolante :

$$Q_{iso} = c_{iso} \cdot S_{iso} = c_{iso} \cdot \frac{\pi}{4} \cdot (D_{fio}^2 - D_{cond}^2)$$

À título de ilustração a tabela 8.2 apresenta a capacidade térmica específica de alguns materiais.

Tabela 8.2 - Capacidade Térmica Específica

Material	capacidade térmica específica (J/°C.m ³)
cobre	3.45 x 10 ⁶
alumínio	2.50 x 10 ⁶
PVC	1.70 x 10 ⁶
polietileno	2.40 x 10 ⁶
EPR	2.00 x 10 ⁶

Exemplo de aplicação:

Calcular a capacidade de corrente de um fio de cobre isolado em PVC de bitola 2,5mm², sabendo-se que a temperatura máxima admissível em regime permanente é de 70°C e a

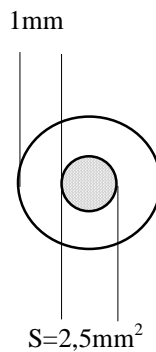
espessura da isolação é de 1mm. O fio alimenta um circuito monofásico e está suficientemente distante de qualquer outra fonte de calor.

São dados ainda: a resistividade específica do isolante, o coeficiente de transmissão de calor da isolação para o ar, a capacidade calorífica específica da isolação e do condutor.

O diâmetro do fio é dado por:

$$D_{cond} = \sqrt{\frac{4S}{\pi}} = \sqrt{\frac{4 \times 2,5}{\pi}} = 1,78mm$$

$$D_{fio} = 1,78 + 2 \times 1 = 3,78mm$$



A resistência térmica de isolação é dada por:

$$Rt_{iso} = \frac{\rho_{iso}}{2\pi} \ln \frac{D_{fio}}{D_{cond}} = \frac{6}{2\pi} \ln \frac{3,78}{1,78} = 0,72^0 Cm / W$$

A resistência térmica do ar, considerando $h=6.8W/m^2$, é dada por:

$$R_{tar} = \frac{10^3}{\pi \times D_{fio} \times h} \theta_s^{-0,25} = \frac{10^3}{\pi \times 3,78 \times 6,8} 50^{-0,25} = 4,65^0 Cm / W$$

A resistência elétrica é dada por :

$$R_{cond} = \frac{0,017241}{S_{cond}} [1 + 0,00393 \times (T_{cond} - 20)] =$$

$$= 6,89 \times 10^{-3} [1 + 0,00393 \times 50] = 8,24 \times 10^{-3} \Omega$$

A elevação da temperatura é dada por:

$$\theta = WR_t[1 - e^{-\frac{t}{T}}]$$

Em regime permanente, vem:

$$\theta = WR_t$$

$$I = \sqrt{\frac{\theta}{rR_t}} = \sqrt{\frac{50 \times 1000}{8,24 \times (0,72 + 4,65)}} = 33,6A$$

onde $r = R_{\text{cond}}$ e $W = RI^2$ é o calor produzido.

Para o regime transitório, temos que a elevação da temperatura em função do tempo é dada por:

$$Q = Q_c + Q_d = 23,47J/^{\circ}Cm$$

$$Q_c = c_c A_c = 8,625J/^{\circ}Cm$$

$$Q_d = c_d A_d = 14,84J/^{\circ}Cm$$

$$\theta = 8,24 \times 10^{-3} \times 33,6^2 \times 5,37[1 - e^{-\frac{t}{T}}]$$

$$T = Rt \times Q = 23,47 \times 5,37 = 126\text{segundos}$$

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

8.5 INFLUÊNCIA DO TIPO DE INSTALAÇÃO E DA TEMPERATURA AMBIENTE NA CAPACIDADE DE CORRENTE DE UM CABO ISOLADO

No item anterior, foi calculada a capacidade de corrente de um cabo isolado imerso no ar. É importante notar que, se o meio no qual o cabo está inserido for diferente desse apresentado, como por exemplo um eletroduto embutido em uma parede, a capacidade de corrente do cabo também será diferente, pois a transferência de calor para o meio terá característica diferente daquela anterior.

Da mesma forma, se houver outras fontes de calor próximas ao cabo, como por exemplo outros cabos instalados no mesmo eletroduto, também haverá uma condição de dissipação

de calor diferente daquela apresentada no item anterior e assim, a capacidade de corrente também será diferente.

Há várias formas de instalar cabos isolados em instalações residenciais e industriais, como por exemplo: em prateleiras metálicas e em eletrodutos (tubos plásticos ou metálicos). Também é comum haver vários circuitos próximos, instalados em um mesmo eletroduto ou prateleira. Assim , além de diferentes geometrias determinadas pela forma de instalação, haverá também diferentes fontes de calor influenciando na capacidade de corrente dos cabos. Acresça-se a isto a temperatura do ambiente, que também é determinante na capacidade de corrente do cabo.

Assim, a determinação da capacidade de corrente de um cabo em cada uma das condições de instalação, de agrupamento de circuitos e de temperatura do ambiente no qual está imerso é um problema de termodinâmica específico.

Para efeito prático, é calculada a capacidade de corrente de cada cabo operando em um tipo de instalação de referência sob uma determinada temperatura ambiente e são definidos fatores que ajustam essa corrente de referência para outras situações de operação. Assim, há o *fator de agrupamento*, que multiplicado pela capacidade de corrente de referência resulta na capacidade de corrente do cabo quando operando próximo de outros circuitos que influem no processo de transferência de calor . Também define-se o *fator de correção da capacidade de corrente com a temperatura ambiente*, que multiplicado pela capacidade de corrente de referência resulta na capacidade de corrente do cabo quando operando imerso em meio com temperatura diferente da adotada na situação de referência.

Por exemplo: A capacidade de corrente de referência de 24 A, corresponde a um circuito com 2 fios de cobre , isolados com PVC, instalados em um eletroduto embutido na parede, num ambiente com temperatura ambiente de 30°C. Se o fator de agrupamento de 2 circuitos dessa instalação, ou seja se forem instalados 2 circuitos num mesmo eletroduto, for 0,85, a capacidade de corrente se reduzirá para $0,85 \times 24 = 20,4$ A. Se ainda neste caso, a temperatura ambiente for 35 °C e o fator de correção para essa temperatura for 0,80, assim a capacidade de corrente será reduzida para $0,80 \times 20,4 = 16,3$ A.

Os fabricantes de cabos publicam, em seus catálogos, as capacidades de corrente de referência para os tipos usuais de instalações e os fatores de agrupamento e de correção para várias temperaturas ambiente.

8.6 CAPACIDADE DE SUPORTAR CORRENTE DE CURTO CIRCUITO

Todas as instalações elétricas estão sujeitas a curto circuito, quer seja por algum defeito de fabricação de seus elementos, que seja por práticas inadequadas de montagem ou mesmo por interferência de agentes externos.

Embora os dispositivos de proteção, como fusíveis e disjuntores, operem rapidamente para impedir ou minimizar os danos que um curto circuito pode causar, sempre há um intervalo de tempo, ainda que curto, no qual os fios e cabos da rede ficam submetidos às correntes de curto circuito, em geral muito elevadas.

Os cabos e fios isolados devem ter capacidade de suportar essas correntes elevadas, pelo menos durante o curto intervalo de tempo em que os dispositivos de proteção estão detectando o defeito e atuando para abrir o circuito.

Para determinar aproximadamente a capacidade de corrente de curto circuito I_{cc} , que um fio ou cabo suporta, durante um certo intervalo de tempo t utiliza-se a expressão:

$$I_{cc}^2 = (K^2 \times S^2) / t \quad , \quad \text{onde } K \text{ é uma constante que depende do material isolante;} \\ S \text{ é a secção reta do condutor.}$$

Assim por exemplo: em uma instalação onde a corrente de curto circuito é 2000 A, um fio de 4 mm², cuja isolação apresenta uma constante $K= 120$, o tempo máximo que a proteção deveria atuar para não danificar o cabo em caso de curto circuito é de:

$$t = (120^2 \times 4^2) / 2000^2 = 0,0576 \text{ s}$$

ou seja 3,5 ciclos. Cabe lembrar que, no Brasil onde a frequência da rede é 60 Hz, um ciclo é 1/ 60 s.

