

Condutores Elétricos e Dispositivos de Proteção

Conceitos básicos, aspectos construtivos, aplicações

Eletrotécnica Geral

12 de Agosto de 2020

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

Condutores

Definições

- 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.

Fios condutores e cabos elétricos



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

Materiais utilizados na construção de fios e cabos elétricos

- 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.

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.

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

Restrição ao uso de alumínio em instalações de baixa tensão

- 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.

Características do cobre e do alumínio

Características	Cobre	Alumínio
Densidade - $\frac{g}{cm^3}$	8,89	2,70
Ponto de fusão - °C	1083	652,6
Calor específico volumétrico - $\frac{J}{K \cdot m^3}$	$3,45 \times 10^6$	$2,50 \times 10^6$
Coefficiente de expansão linear - °C ⁻¹ a 20°C	$16,8 \times 10^{-6}$	$23,6 \times 10^{-6}$
Condutividade térmica - $\frac{cal}{cm \cdot s \cdot ^\circ C}$	0,934	0,560
Carga de ruptura - $\frac{kgf}{mm^2}$	-	20,3
Alongamento à ruptura - %	2,5	1,2
Resistividade elétrica - $\frac{\Omega \times mm^2}{m}$ a 20°C	0,017241	0,02828
Condutividade elétrica - % IACS a 20°C	100	61

Processo de fabricação – trefilação a frio

- 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.

Exemplo de trefilação a frio



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

Cobre x Alumínio - comparação do ponto de vista elétrico e mecânico

- 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.

Cobre x Alumínio – comparação do ponto de vista elétrico

- 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.

Cobre x Alumínio – comparação do ponto de vista elétrico

- 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:

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

Cobre x Alumínio – comparação do ponto de vista mecânico

- A relação entre as 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.

Demais materiais condutores

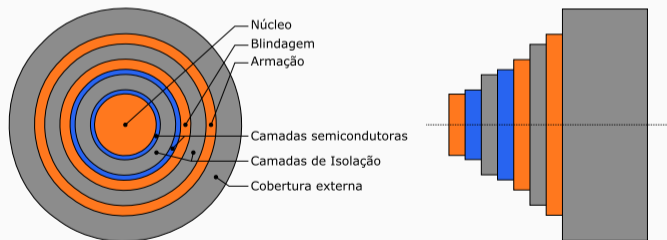
- Além do cobre e do alumínio, há outros materiais condutores:
 - Prata: alta condutibilidade e, além disso, o óxido é condutor;
 - Platina: possui alta temperatura de fusão e, além disso, é utilizada em contatos por ser um metal “inerte”; e
 - Ouro: não oxida e, portanto, pode ser utilizado para proteger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

Fios e cabos elétricos nus e isolados

- Nus: são fios e cabos sem isolação 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; e
 - 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 de 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).

Seção transversal de fios e cabos elétricos – escalas

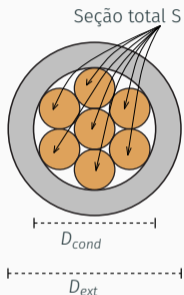
- AWG – *American Wire Gauge*: atualmente em desuso;
- CM – *Circular mil*: área de seção transversal equivalente a um círculo com o diâmetro de um milésimo de polegada; e
- Milimétrica: é a escala atualmente empregada no Brasil.

Escala AWG



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

Detalhes da disposição dos condutores no cabo



Nota-se sempre que $S < \pi \frac{D_{cond}^2}{4}$

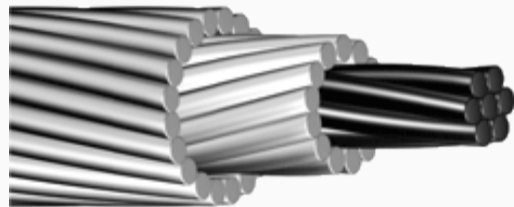
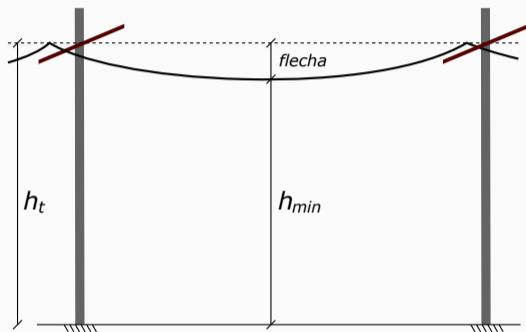
Ex.: Fabricante A

Seção S total do feixe (mm^2)	$D_{cond}(mm)$	$D_{ext}(mm)$
2,5	1,95	3,55
4	2,43	4,03
6	3,00	4,60
10	3,90	5,90

Ex.: Fabricante B

Seção S total do feixe (mm^2)	$D_{cond}(mm)$	$D_{ext}(mm)$
2,5	1,92	3,70
4	2,43	4,20
6	2,99	4,90
10	3,92	6,70

Considerações mecânicas sobre os cabos nus de alumínio



- Tração mecânica é necessária para limitar a flecha da linha; e
- Fios (alma) de aço no interior do cabo suportam o esforço mecânico.

Disposição dos condutores nus no cabo de alta tensão

- Cabos CA (Condutores de Alumínio) (ACC – *All Aluminum Conductors*)

7 (2 camadas)



$$1 + 6$$

19 (3 camadas)



$$1 + 6 + 12$$

91 (6 camadas)



$$1 + 6 + 12 + 6 \cdot (6 - 1)$$

- Cabos CAA (Condutores de Alumínio com Alma de Aço) (ACSR – *Aluminum Conductors, Steel Reinforced*)

6 de alumínio e 1 de aço



18 de alumínio e 1 de aço



84 de alumínio e 1 de aço



Exemplos de dados de catálogo de condutores CAA/ACSR

Cabo	AWG ou MCM	Área – mm ²		Formação – N x mm		D_{cabo} mm	Massa – kg/km		Resistência CC a 20° C – Ω /km
		Al	Aço	Al	Aço		Al	Aço	
Quail	2/0	67,33	11,22	6 x 3,78	1 x 3,78	11,34	185,47	86,57	0,4246
Pigeon	3/0	85,12	14,19	6 x 4,25	1 x 4,25	12,75	234,46	109,44	0,3359
Penguin	4/0	107,22	17,87	6 x 4,77	1 x 4,77	14,31	295,34	137,86	0,2667
Waxwing	266,8	134,98	7,50	18 x 3,09	1 x 3,09	15,45	372,71	57,78	0,2129
Partridge	266,8	134,87	21,99	26 x 2,57	7 x 2,00	16,28	374,00	171,46	0,2141
Ostrich	300,0	152,19	24,71	26 x 2,73	7 x 2,12	17,28	422,01	192,65	0,1897
Merlin	336,4	170,22	9,46	18 x 3,47	1 x 3,47	17,35	470,02	72,87	0,1688
Linnet	336,4	170,55	27,83	26 x 2,89	7 x 2,25	18,31	472,93	217,00	0,1693
Oriole	336,4	170,50	39,78	30 x 2,69	7 x 2,69	18,83	473,59	310,68	0,1698

Capacidade de condução de corrente

Capacidade de condução de corrente de cabos isolados em regime permanente

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

$$\overbrace{Wdt}^{\text{produzido}} = \overbrace{Qd\theta(t)}^{\text{armazenado}} + \overbrace{\frac{\theta(t)}{R_t} dt}^{\text{transferido}}$$

- Onde:

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

Q capacidade térmica do condutor e do isolante [$\frac{J}{^{\circ}C \cdot m}$];

$\theta(t)$ $T_{cabo} - T_{amb}$ [$^{\circ}C$];

R_t resistência térmica do isolante e do ar [$\frac{^{\circ}C \cdot m}{W}$].

Capacidade de condução de corrente de cabos isolados em regime permanente

- A solução da equação diferencial:

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

- É dada por:

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

Temperaturas de operação características de cabos isolados

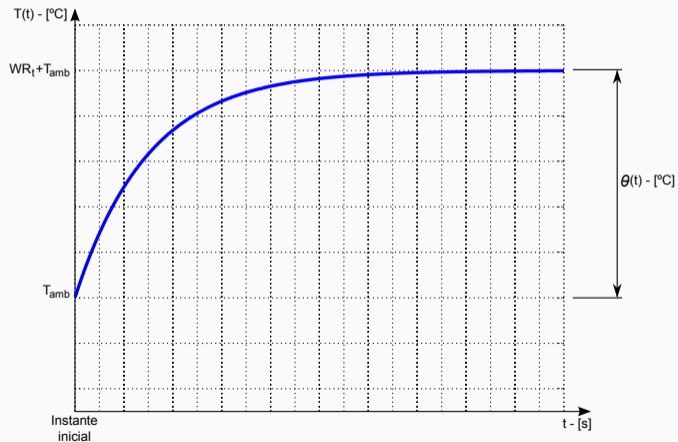
Tipo de material	Regime	Sobrecarga	Curto-circuito
PVC	70	100	160 ⁽¹⁾
EPR	90	100	160 ⁽¹⁾
Papel (massa)	85	110	200
Papel (oleo)	85	105	250

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

Temperaturas de operação características de cabos isolados

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

Curva de aquecimento de cabos isolados



Resistência térmica do cabo ideal e retilíneo no espaço livre

- 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.

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

- Onde:

$$R_t^{isolante} = \frac{\rho_{iso}}{2\pi} \ln \frac{D_{cabo}}{D_{cond}}; \text{ e}$$

R_t^{ar} pode ser calculado com base na norma IEC 60287.

Capacidade térmica do cabo ideal e retilíneo no espaço livre

- 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} é o calor específico do condutor; e

c_{iso} é o calor específico do isolante.

Exemplo de cálculo da capacidade de corrente em regime permanente

- Determine a corrente máxima que pode circular por um condutor isolado ideal e retilíneo, cuja camada de isolamento 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:

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

- $Rt_{ar} = 4,65 \left[\frac{^{\circ}C \cdot m}{W} \right]$

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

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

Exemplo de cálculo da capacidade de corrente em regime permanente

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

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

- Portanto:

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

Exemplo de cálculo da capacidade de corrente em regime permanente

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

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

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

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

Exemplo de cálculo da capacidade de corrente em regime permanente

- 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]:

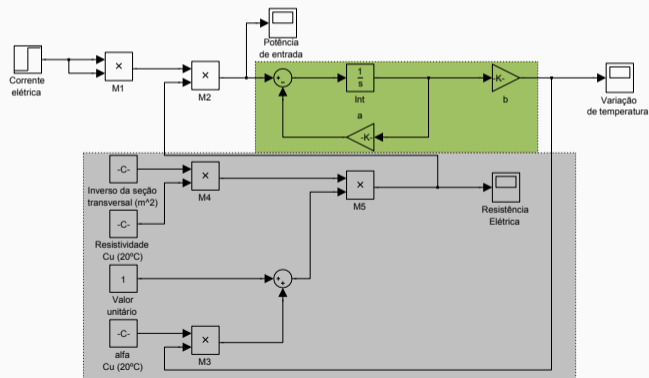
$$I = \sqrt{\frac{70-20}{44,311 \times 10^{-3}}} = 33,59 \text{ [A]}$$

- E a equação fica:

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

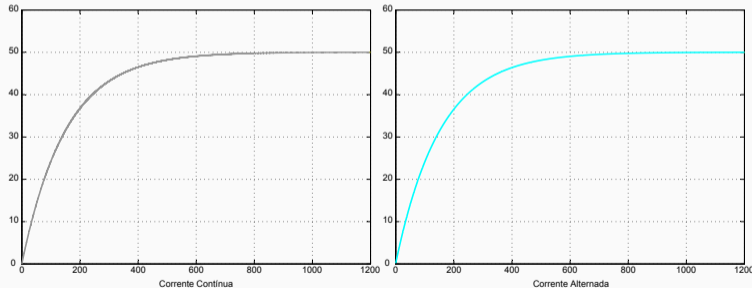
Dinâmica do aquecimento do condutor

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



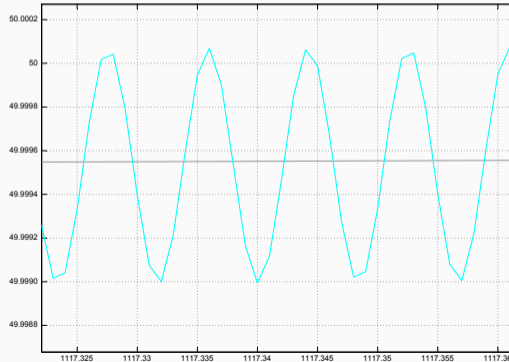
Corrente alternada vs. Corrente contínua

- 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.

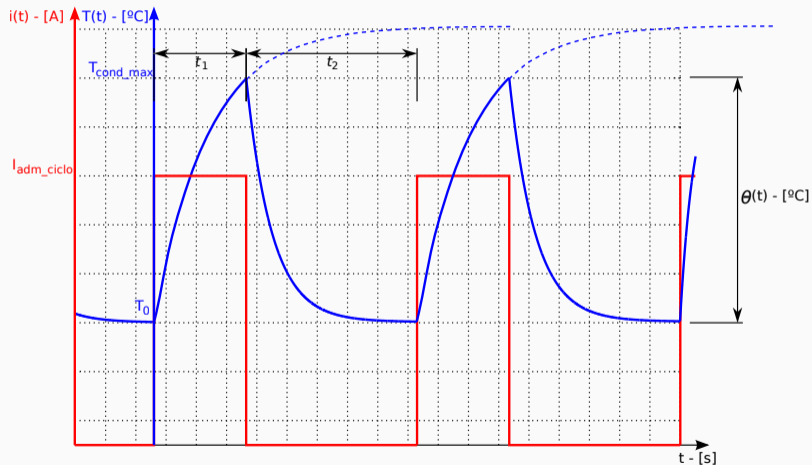


Corrente alternada vs. Corrente contínua

- 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.



Corrente admissível para o regime cíclico de carga



t_1 : intervalo de aquecimento ($I \neq 0$) e t_2 : intervalo de resfriamento ($I = 0$)

Determinação da corrente admissível para o ciclo para o regime cíclico de carga

- Quando o elemento condutor é submetido a um regime cíclico de carga, a corrente admissível durante a etapa de condução desse ciclo pode ser superior à corrente admissível do condutor em regime contínuo de carga;

$$I_{adm_ciclo} \geq I_{adm_cont}$$

- Para tanto, deve-se garantir que temperatura final durante a condução, no regime cíclico, seja inferior à máxima temperatura que o condutor pode suportar.

$$T_{max_ciclo} \leq T_{cond_max}$$

Fase de aquecimento do regime cíclico de carga

- No aquecimento, o condutor respeita a curva definida pela seguinte equação:

$$T_{cond}(t_1) = T_{cond_max} = T_0 + (A \cdot I^2 + T_{amb} - T_0) \cdot \left(1 - e^{-\frac{t_1}{B}}\right)$$

- Onde:

$$A = R_{cond} \cdot (R_{tiso} + R_{tar}); \text{ e}$$

$$B = (R_{tiso} + R_{tar}) \cdot (Q_{cond} + Q_{iso}).$$

- Obs.: esta é a expressão geral para variação de temperatura em um condutor. A dedução para a temperatura em operação não-cíclica é um caso particular onde $T_0 = T_{amb}$.

Fase de resfriamento do regime cíclico de carga

- No resfriamento, o condutor respeita a curva definida pela seguinte equação (caso particular da expressão anterior onde $I = 0$):

$$T_{cond}(t_2) = T_0 = T_{amb} + (T_{cond_max} - T_{amb}) \cdot e^{-\frac{t_2}{B}}$$

Regime cíclico de carga

- A corrente admissível do ciclo pode ser determinada substituindo T_0 da equação de resfriamento na equação de aquecimento, lembrando que:

$$T_{cond_max} - T_{amb} = A \cdot I_{adm_cont}^2$$

- O que resulta em:

$$I_{adm_ciclo} = I_{adm_cont} \cdot \sqrt{\frac{1 - e^{-\frac{t_1+t_2}{B}}}{1 - e^{-\frac{t_1}{B}}}}$$

Suportabilidade de corrente do fio em curto-circuito – hipótese adiabática

- Considerando que o fio:
 - se encontra operando na temperatura máxima em regime;
 - é aquecido rapidamente até a temperatura máxima em curto-circuito; e
 - não troca calor com o ambiente nesse curto intervalo de tempo.
- A corrente máxima admissível em curto-circuito é tal que o calor produzido é igual ao calor armazenado. Sendo assim:

$$R_{cond} \cdot I_{adm,cc}^2 \cdot t = Q\Delta T \quad \text{e} \quad I_{adm,cc} = \sqrt{\frac{Q \cdot \Delta T}{R_{cond} \cdot t}}$$

- Onde R_{cond} é calculada (por metro) na máxima temperatura em curto-circuito.

Fator de correção de temperatura para a capacidade de corrente

- 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).

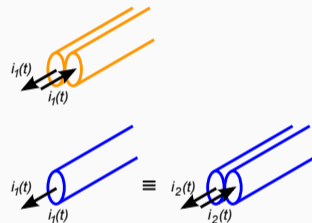
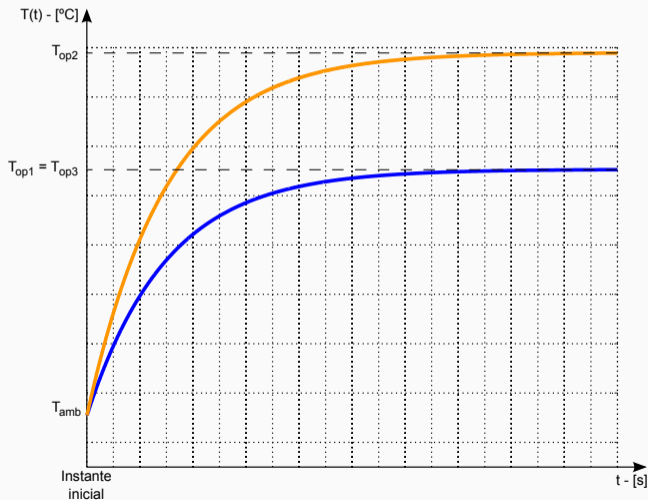
Tabela 40 — Fatores de correção para temperaturas ambientes diferentes de 30°C para linhas não-subterrâneas e de 20°C (temperatura do solo) para linhas subterrâneas

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

Fator de correção de agrupamento para a capacidade de corrente

- 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



$$f_a = \frac{I_2}{I_1}$$

Correção da capacidade de corrente

- 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				

Dispositivos de proteção

Definições para sistemas de proteção

- Sistemas de proteção são sistemas que tem o objetivo de desligar a parcela do sistema elétrico de potência que se encontra defeituosa, ou operando fora das suas condições normais;
- Nesse contexto, os sistemas de proteção devem atuar rapidamente para minimizar riscos à vida humana e danos aos equipamentos que compõem os sistemas elétricos de potência;
- Normalmente, há duas situações que podem produzir danos:
 - Sobrecargas de longa duração; e
 - Curtos-circuitos.

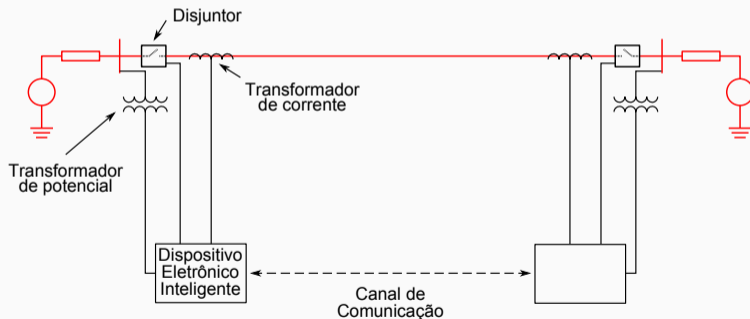
Condições anormais de operação e falha no sistema de proteção

Falha na Proteção do Transformador

<http://www.youtube.com/watch?v=oDLzgZdt8ZM>

Componentes de sistemas de proteção

- Elementos de sistemas de proteção mais complexos estão ilustrados na figura.



Descrição dos componentes dos sistemas de proteção

- Transformadores de instrumentação: responsáveis por adequar os valores dos sinais de tensões e correntes, que circulam no sistema protegido, a valores que podem ser lidos pelos dispositivos eletrônicos inteligentes;
- Sensores: responsáveis por avaliar se o sistema elétrico encontra-se operando normalmente ou se há alguma condição anormal de operação (sobrecarga ou curto-circuito); e
- Disjuntores: elementos capazes de seccionar o circuito elétrico que se encontra operando fora das condições anormais de operação, mesmo quando a magnitude da corrente é elevada e há a formação de arco elétrico.

Descrição dos componentes dos sistemas de proteção

- Sensores:
 - Relés de proteção eletromecânicos: são equipamentos utilizados amplamente, cujo princípio de operação é mecânico;
 - Relés de proteção eletrônicos: são equipamentos utilizados durante um curto período, cuja operação é baseada em componentes eletrônicos analógicos;
 - Dispositivos eletrônicos inteligentes (relés numéricos ou relés digitais): são equipamentos desenvolvidos concomitantemente ao desenvolvimento dos processadores digitais, cuja operação é baseada em rotinas de *software*.

Formação do arco elétrico

Arco Elétrico - Nível de tensão de 500 [kV]

<http://www.youtube.com/watch?v=6GilVze2Tac>

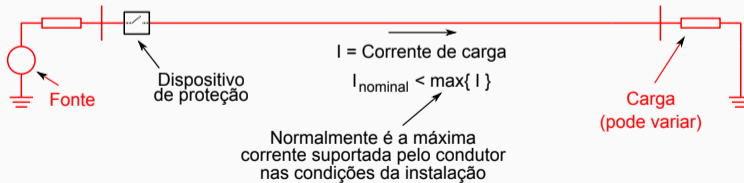
Proteção de instalações elétricas de baixa tensão

Componentes do sistema proteção de instalações elétricas de baixa tensão

- Sistemas de proteção para instalações elétricas de baixa tensão normalmente são mais simples e apresentam um custo menor do que os sistemas de proteção para instalações elétricas mais sofisticadas;
- Nesse caso, os dispositivos que discernem as situações normais das situações de sobrecarga e/ou curto-circuito (relés de proteção) confundem-se com os dispositivos que efetuam o desligamento do circuito (disjuntores);
- Os dispositivos de proteção que encontram-se nessa categoria são:
 - Elos fusíveis; e
 - Disjuntores (*quicklags*).

Corrente nominal

- É o máximo valor eficaz da intensidade de corrente que pode circular pelo dispositivo de proteção (elo fusível ou disjuntor *quicklag*) sem causar seu desligamento automático;
- É uma característica técnica do dispositivo de proteção em questão e, portanto, é parâmetro de projeto quando da seleção do dispositivo de proteção mais conveniente para os diversos circuitos da instalação elétrica;



Corrente nominal

- O dispositivo de proteção (elo fusível e/ou disjuntor) se comporta segundo as equações:

$$\left\{ \begin{array}{l} I < I_{nominal} \rightarrow \text{não ocorre o desligamento;} \\ I > I_{nominal} \rightarrow \text{ocorre o desligamento em } \Delta t = f\{I^{-1}\} \end{array} \right.$$

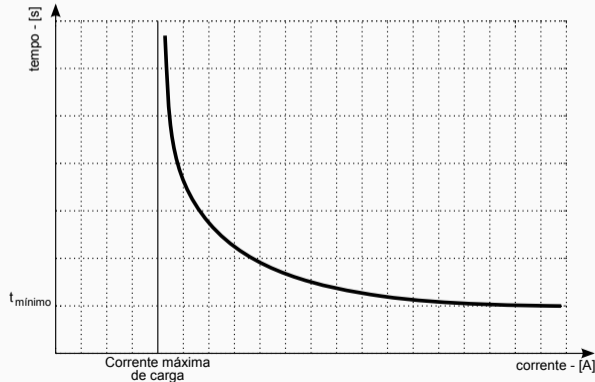
- O tempo para seccionamento do circuito elétrico, que é protegido pelo dispositivo de proteção, é dado por:

$$\Delta t = t_{\text{início curto}} - t_{\text{extinção}}$$

- Esse tempo é inversamente proporcional à magnitude da corrente de sobrecarga ou curto-circuito, isto é, quanto maior essa corrente, menor o tempo para o dispositivo de proteção desligar o circuito.

Curva “Tempo vs. Corrente”

- A curva “Tempo vs. Corrente”, ilustrada na figura, descreve o comportamento descrito pelas equações apresentadas anteriormente.



Capacidade disruptiva

- É o máximo valor eficaz da corrente que pode ser interrompida pelo dispositivo de proteção;
- Assim como a corrente nominal, também é uma característica técnica do dispositivo de proteção em questão e, portanto, é parâmetro de projeto quando da seleção do dispositivo de proteção mais conveniente para os diversos circuitos da instalação elétrica.

Capacidade disruptiva

- Normalmente é expressa em termos de corrente máxima ou de potência aparente máxima que o dispositivo de proteção é capaz de interromper:

$$\left\{ \begin{array}{l} S_{disruptiva} = \sqrt{3}V_{nominal} \cdot I_{disruptiva} \rightarrow \text{circuito trifásico;} \\ S_{disruptiva} = V_{nominal} \cdot I_{disruptiva} \rightarrow \text{circuito monofásico.} \end{array} \right.$$

- Onde:

$V_{nominal}$ Tensão eficaz nominal de linha [V];

$I_{disruptiva}$ Corrente disruptiva [A]; e

$S_{disruptiva}$ Capacidade disruptiva [VA].

Dimensionamento incorreto da capacidade disruptiva

Capacidade Disruptiva - Dimensionamento incorreto

<http://www.youtube.com/watch?v=ZhFY7wepItQ>

Elos fusíveis

Aspectos dos elos fusíveis

- Elos fusíveis são dispositivos de proteção constituídos por elemento condutor, de composição especial, dimensionado de modo a fundir com intensidade de corrente especificada;
- O processo de fusão ocorre em um intervalo de tempo bem determinado;
- O calor para a fusão provém da corrente que o atravessa, por efeito Joule;
- Os tipos de fusíveis mais comuns, utilizados em instalações elétricas de baixa tensão, são: tipo rosca; cartucho (faca ou virola); diazed; e NH, que possui alta capacidade disruptiva.

Tipo rosca

- A figura a seguir ilustra um fusível do tipo rosca.



<http://hifusi.com.br>

Fusível cartucho do tipo virola

- A figura a seguir ilustra um fusível cartucho do tipo virola.



<http://hifusi.com.br>

Fusível cartucho do tipo faca

- A figura a seguir ilustra um fusível cartucho do tipo faca.



<http://hifusi.com.br>

Tipo diazed

- A figura a seguir ilustra um fusível do tipo diazed.



<http://portuguese.alibaba.com>

Tipo NH

- A figura a seguir ilustra um fusível do tipo NH, que possui alta capacidade disruptiva.



<http://www.eletricapaulista.com.br/>

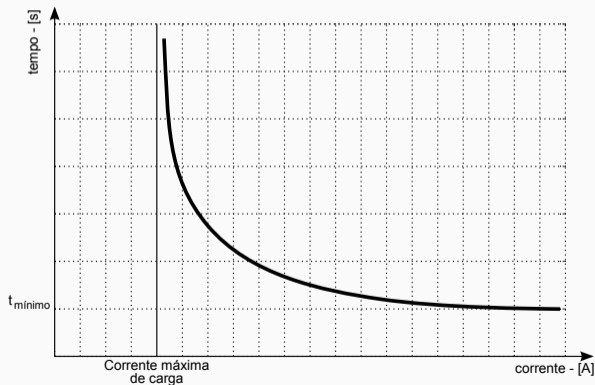
Princípio de funcionamento do fusível tipo NH

Fusível NH - Princípio de Funcionamento

<http://www.youtube.com/watch?v=ZhFY7wepItQ>

Característica de operação dos fusíveis

- A curva “Tempo vs. Corrente”, ilustrada na figura, descreve o comportamento genérico de um dispositivo de proteção do tipo fusível.



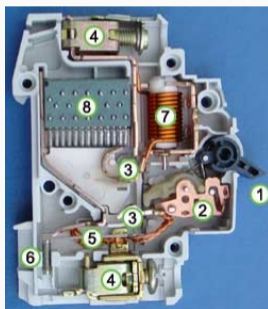
Disjuntos

Definições

- Disjuntores de baixa tensão (*quicklags*) são dispositivos do tipo *no fuse*, pois interrompem o circuito pela abertura de uma chave;
- Possuem dois elementos que “percebem” a ocorrência de sobrecorrente devido à sobrecarga ou curto-circuito:
 - Elemento térmico: responsável pela detecção de eventos de sobrecarga de longa duração;
 - Elemento magnético: responsável pela detecção de eventos de curto-circuito.
- Além desses elementos, os disjuntores possuem uma chave e uma câmara de extinção do arco elétrico que se forma durante a abertura da chave.

Arranjo típico

- A figura ilustra o arranjo de um disjuntor de baixa tensão.



1) Alavanca de acionamento

2) Mecanismo de atuação

3) Contatos elétricos

4) Terminais

5) Par bimetálico e cordoalha de cobre

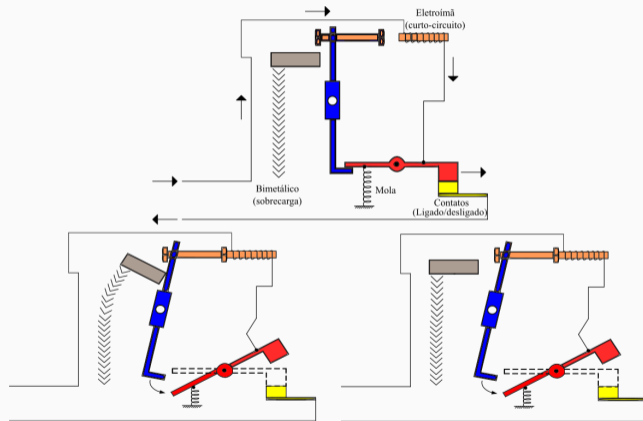
6) Parafuso de calibração

7) Eletroímã

8) Câmara de extinção de arco

<http://en.wikipedia.org/wiki/File:Circuitbreaker.jpg>

Ilustração das atuações térmica e magnética



"Manual de instalações elétricas", Julio Niskier

Princípio de funcionamento do elemento térmico

Princípio de Operação - Elemento Térmico

<http://www.youtube.com/watch?v=AEkX6GEm06g>

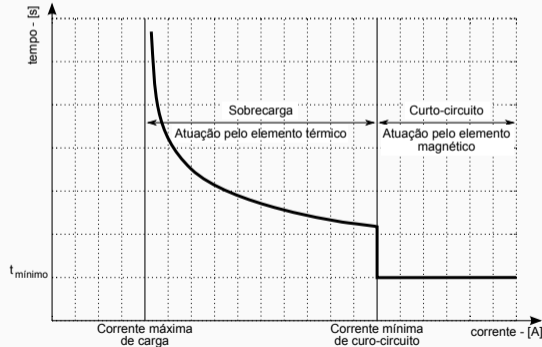
Elemento magnético e extinção do arco

Princípio de Operação - Elemento Magnético e Extinção do arco

<http://www.youtube.com/watch?v=AEkX6GEm06g>

Curva “Tempo vs. Corrente”

- A curva “Tempo vs. Corrente”, ilustrada na figura, descreve o comportamento genérico de um dispositivo de proteção do tipo disjuntor.



Dimensionamento dos dispositivos de proteção

Características dos dispositivos de proteção

- Corrente nominal I_n ;
- Corrente que assegura efetivamente a operação do dispositivo (I_2) durante sobrecargas ou curtos-circuitos; e
- Tempo de atuação do dispositivo (t) quando ocorrem sobrecargas ou curtos-circuitos.

Valores utilizados no dimensionamento

- Corrente de projeto (I_b), que é a corrente máxima que a carga pode solicitar;
- Capacidade máxima de condução do condutor (I_z);
- O tipo de dispositivo que será utilizado (fusível ou disjuntor); e
- Correntes I_n (nominal) e I_2 (corrente de atuação), do tipo de dispositivo a ser utilizado.

Condições para a coordenação conforme a norma NBR 5410

- Condição a1: $I_b \leq I_n$, o que normalmente acontece, pois a corrente de carga tem que, necessariamente, ser inferior ou igual à corrente máxima suportada pelo condutor;
- Condição a2: $I_n \leq I_z$, o que assegura que, potencialmente, o dispositivo de proteção atue antes que se atinja a corrente máxima suportada pelo condutor;
- Condição b: $I_2 \leq 1,45I_z$, o que representa uma margem de segurança que garante que o dispositivo de proteção atue quando ocorre uma corrente suficientemente menor que a máxima suportada pelo condutor.

Condições para a coordenação conforme a norma NBR 5410

- Para disjuntores é suficiente que sejam verificadas as condições (a1) e (a2), uma vez que I_2 é menor que $1,45I_n$;
- Para fusíveis devem ser verificadas as três condições e pode ser utilizada a seguinte regra para a determinação de I_2 , em função da corrente nominal I_n :
 - Para $I_n \leq 10$ [A] $\rightarrow I_2 = 1,90I_n$;
 - Para 10 [A] $\leq I_n \leq 25$ [A] $\rightarrow I_2 = 1,75I_n$; e
 - Para $I_n \geq 25$ [A] $\rightarrow I_2 = 1,60I_n$.

Detalhes sobre a capacidade disruptiva

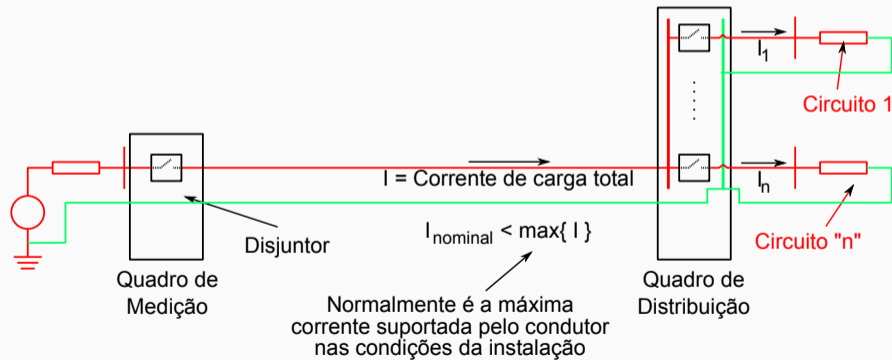
- Dispositivo de proteção tenha capacidade de suportar e de interromper a corrente de curto-circuito (capacidade disruptiva), em um intervalo de tempo inferior àquele que danifica o condutor.
- É necessário verificar se:

$$t < \frac{k^2 \times S^2}{I_{CC}^2}$$

- $k = 115$ para condutores de cobre com PVC 70°;
- $k = 135$ para condutores de cobre com XLPE;
- S é a seção do condutor em $[\text{mm}^2]$;
- I_{CC} é a corrente de curto-circuito em $[\text{A}]$;
- t é o tempo de atuação do dispositivo para a corrente I_{CC} .

Aspectos adicionais sobre a proteção

Exemplo de coordenação da proteção



Demais características

- Seletividade: atuar para os defeitos que ocorrem nos equipamentos monitorados;
- Segurança: não atuar para os defeitos em outros equipamentos, ou para outras condições operativas do sistema;
- Velocidade: rapidez na atuação para minimização de riscos à vida humana e ao patrimônio; e
- Retaguarda: já abordada no slide anterior.

OBRIGADO!

Este material é resultado da modernização dos materiais elaborados pelos professores do Departamento de Engenharia de Energia e Automação Elétricas da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo para as diversas disciplinas da área de Eletrotécnica Geral e foi desenvolvido pelo professor Giovanni Manassero Junior e pela professora Milana Lima dos Santos, com a colaboração dos professores Silvio Giuseppe Di Santo e Carlos Eduardo de Moraes Pereira – Coordenação do professor Hernán Prieto Schmidt.

Referências:

Manual de instalações elétricas / Julio Niskier – Rio de Janeiro : LTC, 2005.

Introdução aos sistemas de distribuição de energia elétrica / Nelson Kagan, Carlos César Barioni de Oliveira e Ernesto João Robba – São Paulo : Edgard Blücher, c2005.