

## Capítulo XII

# Proteção de cabos

Por Cláudio Mardegan\*

Falando em proteção de cabos, este capítulo abordará alguns critérios e tipos de proteção contra sobrecargas e contra curtos-circuitos. Veremos ainda como se constituem as curvas de curta duração dos cabos, que são aquelas que se encontram nos catálogos dos fabricantes. Os cabos fabricados de acordo com as normas brasileiras e respectivas normas IEC, apresentam como especificação o valor da relação  $U_o/U$ , que representa o quanto o cabo suporta de sobretensão fase-terra ( $U_o$ ) e entre fases ( $U$ ). As seguintes normas foram utilizadas para a elaboração deste capítulo:

- CEA P-32-382
- ICEA P-45-482
- NBR-6251

Os principais critérios para proteção de um cabo são:

- Corrente nominal.
- Queda de tensão.
- Proteção contra sobrecargas.
- Proteção contra curto-circuito.

Neste capítulo, serão tratados os dois últimos: proteção contra sobrecarga e curto-circuito.

### Proteção contra sobrecarga

Para que o cabo não tenha um envelhecimento precoce de sua isolação, ele não deve estar sujeito a temperatura acima da qual é especificada para o tipo de isolação. Assim, a corrente para pick-up do dispositivo

de proteção deve ficar, no máximo, igual ao valor de corrente relativo ao local em que o cabo foi instalado. Esta corrente pode ser calculada, por exemplo, pelo software Cymcap (da Cyme do Canadá), o qual permite, entre outras características, calcular a ampacidade do cabo para vários tipos de instalação e configurações, fazendo, inclusive, otimizações de posicionamento.

$$I_{PICKUP} \leq I_{SOBRECARGA-CABO}$$

### Proteção contra curto-circuito

#### No condutor

Os cabos, segundo as normas, apresentam uma característica de curto-circuito dada pela equação de  $I^2t$  a seguir:

$$I = \frac{K \times S}{\sqrt{t}}$$

Em que  $I_{cc}$  = Corrente suportada pelo cabo [A]

$S$  = Seção de cabo em  $mm^2$

$t$  = tempo de exposição do cabo à corrente [s]

$K$  = Constante que depende do tipo de isolamento – veja Tabela 1

$K = 142$  (EPR/XLPE)

$K = 114$  (PVC)

$K = 134$  (EPR/XLPE 105 °C)

Os valores de  $K$  são obtidos a partir da norma ICEA-P32.382, como demonstrado nos exemplos a seguir.

TABELA 1 – FATOR K DOS CABOS EM FUNÇÃO DO TIPO DE ISOLAÇÃO

TEMPERATURAS (GRAUS)								
Cabo	Condutor	Conexão prensada			Fator K	Conexão soldada		Fator K
		T1	T2	T1		T2		
EPR/XLPE 90°	Cobre	90	250	142	90	160	99	
	Alumínio	90	250	93	90	160	65	
EPR/XLPE 105°	Cobre	105	250	134	105	160	87	
	Alumínio	105	250	88	105	160	57	
PVC	Cobre	70	160	114	70	160	114	
	Alumínio	70	160	74	70	160	74	

**Exemplo 1**

Calcule o fator K para um cabo de cobre de isolamento EPR ( $T_2 = 250$  °C e  $T_1 = 90$  °C), utilizando a equação da ICEA P-32-382.

Cabo – Cobre(ICEA P – 32 – 382)[89]

$$K = 0.34 \times \sqrt{\log\left(\frac{T_2 + 234}{T_1 + 234}\right)}$$

Com  $\Rightarrow T_2 = 250$ ;  $T_1 = 90$ °

$$K = 141.95 \approx 142$$

**Exemplo 2**

Calcule o fator K para um cabo de alumínio de isolamento EPR ( $T_2 = 250$  °C e  $T_1 = 90$  °C), utilizando a equação da ICEA P-32-382.

Cabo – Alumínio(ICEA P – 32 – 382)[89]

$$K = 0.22 \times \sqrt{\log\left(\frac{T_2 + 228}{T_1 + 228}\right)}$$

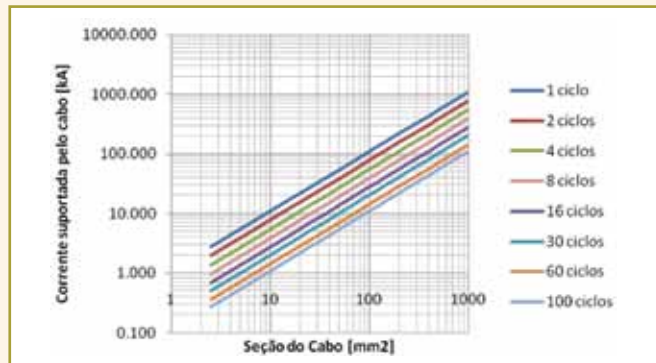
Com  $\Rightarrow T_2 = 250$ ;  $T_1 = 90$ °

$$K = 92.55 \approx 93$$

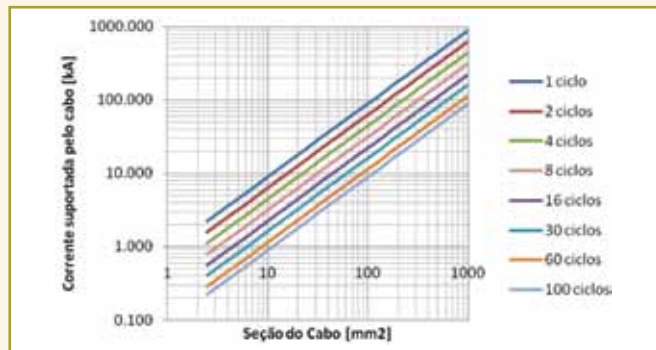
**Curvas térmicas de curta duração do cabo (curvas de dano do cabo)**

A partir das equações fornecidas no item “Proteção contra curto-circuito”, podem-se construir as curvas de curta duração dos cabos, que são aquelas encontradas nos catálogos dos fabricantes dos cabos. As Figuras 1, 2, 3 e 4 apresentam as características de corrente de curta duração para cabos de cobre e de alumínio para

isolação EPR-90°/XLPE e PVC. Nas Figuras 5 e 6, estão as curvas de danos dos cabos de cobre e de alumínio, respectivamente.



**Figura 1 – Característica de corrente suportada pelos cabos de cobre EPR 90°/XLPE.**



**Figura 2 – Característica de corrente suportada pelos cabos de cobre e isolamento de PVC.**

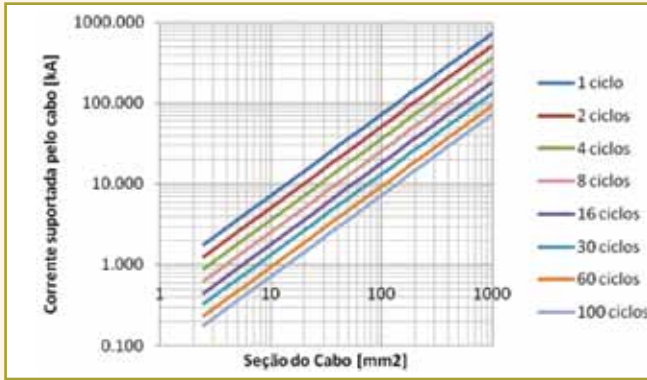


Figura 3 – Característica de corrente suportada pelos cabos de alumínio e EPR 90°/XLPE.

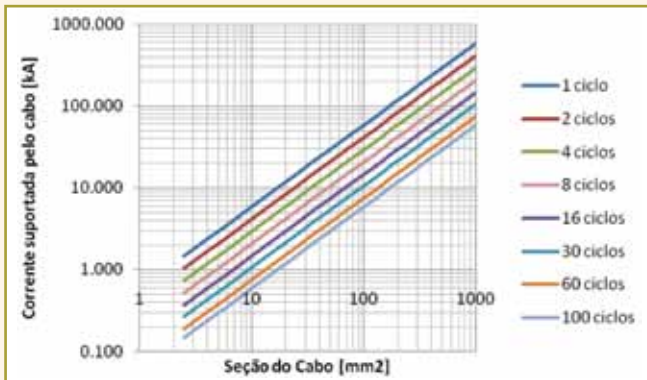


Figura 4 – Característica de corrente suportada pelos cabos de alumínio e isolamento de PVC.

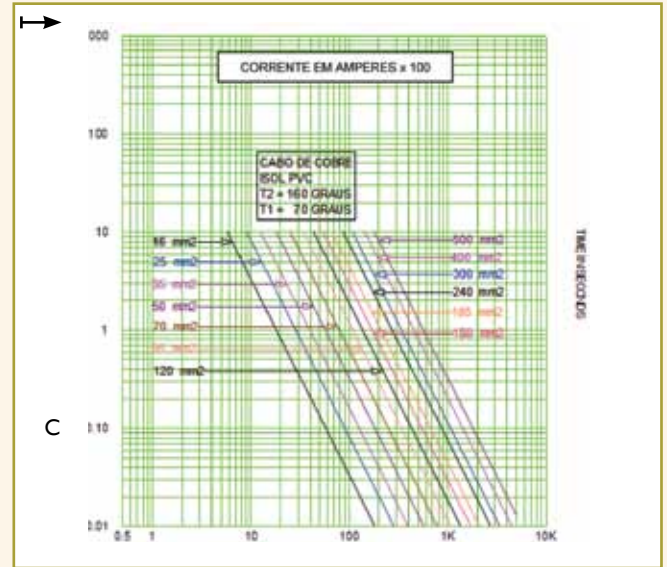
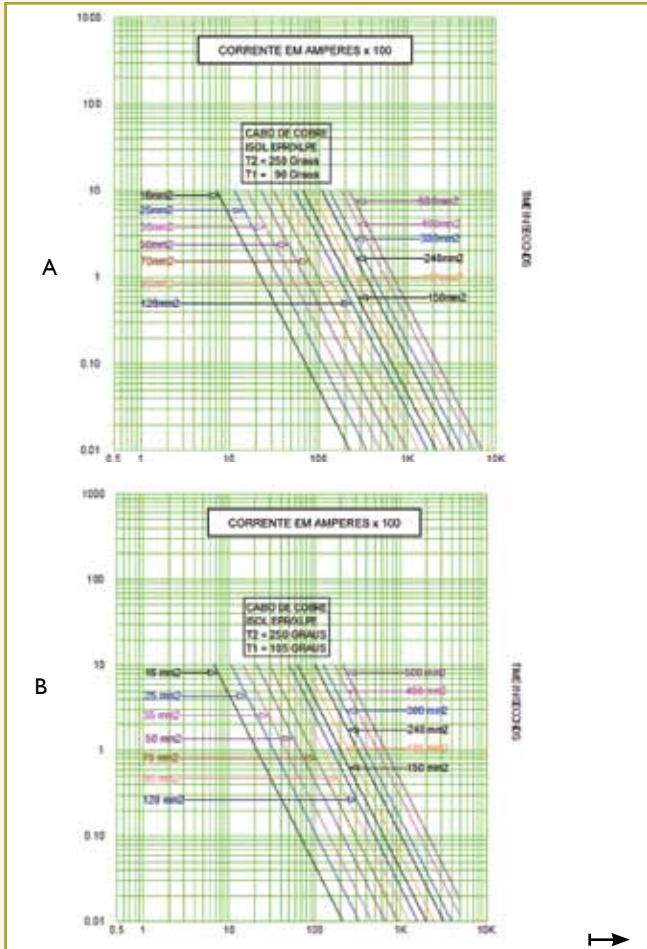
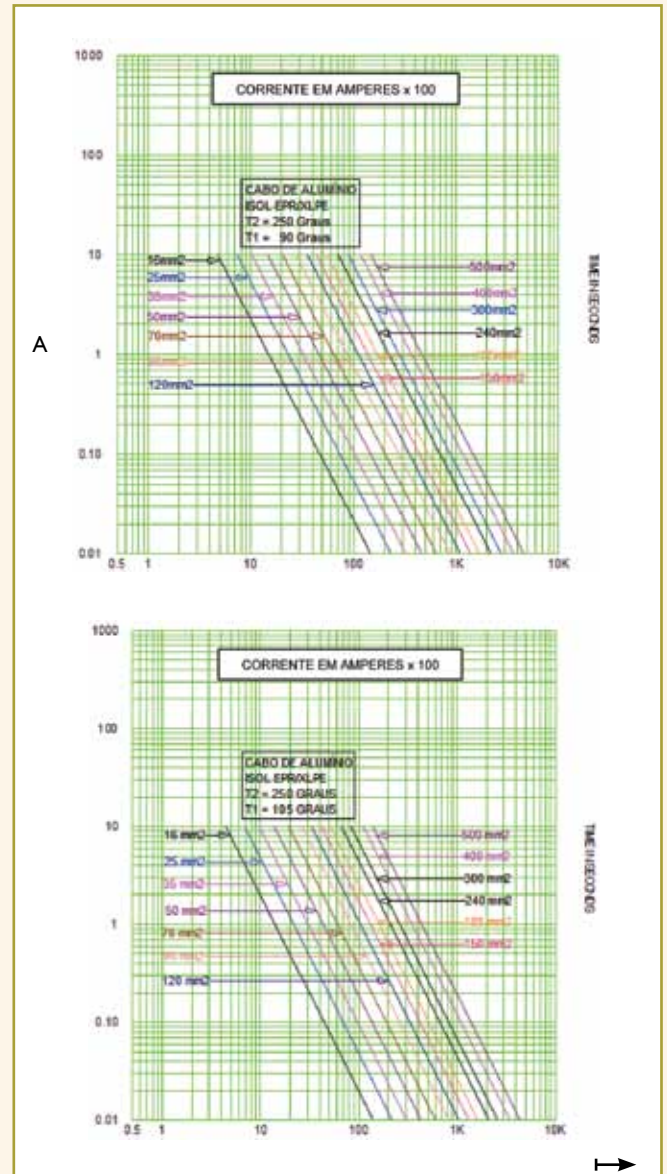


Figura 5 – Curva tempo versus corrente para cabos de cobre com isolamento (a) EPR/XLPE 90 °C, (b) EPR/XLPE 105 °C e (c) PVC 70 °C.



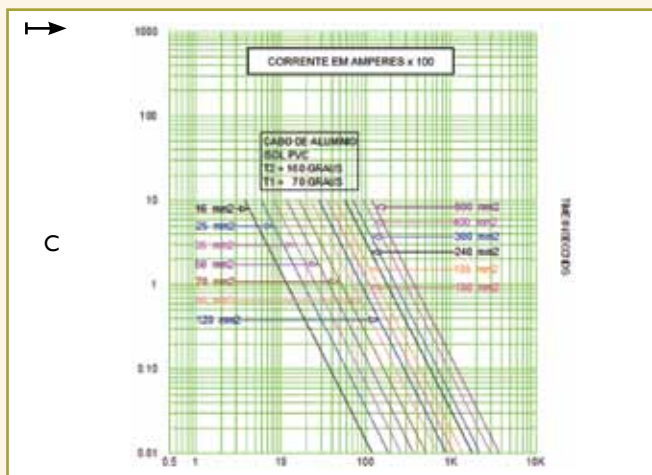


Figura 6 – Curva tempo versus corrente para cabos de alumínio com isolamento (a) EPR/XLPE 90 °C, (b) PR/XLPE 105 °C e (c) PVC 70 °C.

**Exemplo 3**

Determinar a seção mínima de um cabo de média tensão (8.7/15 kV), EPR 90 °C, sabendo-se que ele deve suportar uma corrente de curto-circuito de 21.000 A e o tempo de eliminação da falta é de 1 segundo.

SOLUÇÃO:

$$I = \frac{K \times S}{\sqrt{t}} = \frac{142 \times S}{\sqrt{1}} \Rightarrow 21000 \times \sqrt{1} = 142 \times S$$

$$S = \frac{21000}{142} = 147.8$$

$$S = 150 \text{ mm}^2$$

**NA BLINDAGEM**

A blindagem dos cabos, segundo a norma ICEA P-45-482, apresenta uma característica de curto-circuito dada pela fórmula:

$$I = \frac{K \times S}{\sqrt{t}}$$

Em que Icc = Corrente suportada pela blindagem do cabo [A]

S = Seção da blindagem do cabo em mm<sup>2</sup>

t = Tempo de exposição do cabo à corrente de curto-circuito [s]

K= Constante que depende do tipo de isolamento. Veja Tabela 2.

TABELA 2				
TEMPERATURAS (GRAUS)				
Cabo	Condutor	T1	T2	Fator K
EPR / XLPE 90°	Cobre	85	200	124,2
EPR / XLPE 105°	Cobre	100	200	115
PVC	Cobre	65	200	136,7

Lembramos que a blindagem não foi projetada para permitir a circulação da corrente de falta e sim distribuir homogeneamente o campo elétrico no cabo.

**EXEMPLO 4**

Calcular a corrente de curto-circuito suportada pela blindagem de um cabo de média tensão, sabendo-se que a isolamento é de EPR 90° e a seção da blindagem é de 6,16 mm<sup>2</sup>.

**SOLUÇÃO**

$$I = \frac{K \times S}{\sqrt{t}} = \frac{124.2 \times 6.16}{\sqrt{1}} = \frac{765}{\sqrt{1}}$$

Isso significa que o cabo deste exemplo suporta uma corrente de 765 A durante 1 s.

**EXEMPLO 5**

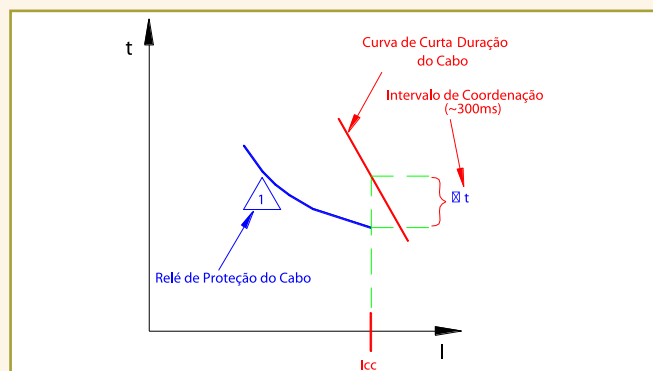
Admitindo que o cabo do exemplo 3 é instalado em um circuito de um motor em que o relé é instantâneo (0.05 s) e o dispositivo de manobra é um disjuntor (tinterrupção = 3 ciclos = 0.05 s), calcule a corrente suportada pela blindagem.

**SOLUÇÃO**

$$I = \frac{K \times S}{\sqrt{t}} = \frac{124.2 \times 6.16}{\sqrt{0.1}} = \frac{765}{\sqrt{0.1}} = 2419A$$

**Coordenação**

A Figura 7 mostra a característica de corrente de curta duração do cabo e, para que o cabo não se danifique até a proteção operar, deve haver um intervalo de coordenação que compreenda o tempo de operação mais o tempo de interrupção do dispositivo de proteção. Caso queira que o cabo suporte se esta proteção falhar, deve-se utilizar 600 ms.



**Figura 7 – Coordenação entre a proteção de sobrecorrente e o cabo.**

Ao se dimensionar cabos, deve-se levar em conta que a proteção principal pode falhar e o cabo deve suportar até a proteção de backup operar. Os tempos de eliminação utilizados normalmente variam entre 0.6 e 1.5 segundo.

Assim, para efeito de verificação, o intervalo de coordenação utilizado é da ordem de 300 ms. Entretanto, para o dimensionamento é mais conservativo utilizar 600 ms para dar tempo para que a operação de backup opere.

**U<sub>0</sub>/U de cabos**

Os cabos fabricados de acordo com as normas brasileiras (NBRs) e as respectivas normas IEC apresentam como especificação o valor da relação U<sub>0</sub>/U, que representa o quanto o cabo suporta de sobretensão fase-terra (U<sub>0</sub>) e entre fases (U). Portanto, um cabo de 8.7/15 kV suporta uma tensão fase-terra de

até 8.7 kV e 15 kV entre fases, permanentemente.

Quando da seleção desta relação U<sub>0</sub>/U, na especificação do cabo, o critério difere quando aplicamos um cabo em um sistema solidamente aterrado ou quando aplicamos a um sistema que não é solidamente aterrado.

Em um sistema solidamente aterrado, a ocorrência de uma falta à terra, as tensões fase-terra, nas fases sãs, não se alteram, ou seja, tanto antes como depois da falta, serão V<sub>FT</sub> = V<sub>FF</sub> /.

O caso extremamente oposto é o do sistema não aterrado (isolado). Quando ocorre uma falta à terra, a tensão fase-terra aumenta de √3 nas outras duas fases sãs.

A Tabela 3 sintetiza o comportamento do sistema quando da ocorrência de uma falta à terra em função do tipo de aterramento.

TABELA 3 – COMPORTAMENTO DA TENSÃO SOB FALTA FASE-TERRA EM FUNÇÃO DO ATERRAMENTO DO SISTEMA		
Aterramento do Sistema	Tensões Fase-Terra	
	Sem falta à terra	Com falta à terra
Solidamente Aterrado	V <sub>FT</sub> = $\frac{V_{FF}}{\sqrt{3}}$	V <sub>FT</sub> = $\frac{V_{FF}}{\sqrt{3}}$
Não aterrado	V <sub>FT</sub> = $\frac{V_{FF}}{\sqrt{3}}$	V <sub>FT</sub> = V <sub>FF</sub>

De modo geral, o valor da tensão fase-terra nas fases sãs (quando exposto à uma falta à terra) pode ser escrita:

$$V_{FT} = \frac{V_{FF}}{\sqrt{3}} \times FS \quad FS = \sqrt{\left(\frac{1}{2} + \frac{K-1}{K+2}\right)^2 + \frac{3}{4}} \quad K = \frac{Z_0}{Z_1}$$

Como pode ser observado na equação anterior, o valor do fator de sobretensão (FS) varia de 1 (quando o sistema é solidamente aterrado) até √3 (quando o sistema é isolado).

Se o cabo é construído de acordo com a norma ABNT NBR 6251, a escolha do valor da relação U<sub>0</sub>/U irá depender da categoria em que o cabo se encontra, ou seja, se existe proteção que identifique a falta à terra e a elimine ou não dentro de um tempo predeterminado.

A norma ABNT NBR 6251 apresenta três categorias a seguir indicadas.

**Categoria A** – Curto-circuito fase-terra eliminado em 1 minuto.

**Categoria B** – Curto-circuito fase-terra eliminado em 1 hora. Se fabricado como a ABNT NBR 6251, o tempo de eliminação pode ser de até 8 horas e não deve exceder 120 horas em 12 meses.

**Categoria C** – Todos os casos que não se enquadram nas categorias anteriores.

A Tabela 4 indica as diretrizes da norma ABNT NBR 6251.

Tensão máxima operativa em kV	Tensão de isolamento em kV	
	CAT A/B (kV)	CAT C (kV)
1.2	0.6	0.6
3.6	1.8	3.6
7.2	3.6	6.0
12.0	6	8.7
17.5	8.7	12.0
24.0	12	15.0
30.0	15	20.0
42.0	20	-

É importante notar que:

- A norma estabelece o valor mínimo, o que não quer dizer que não se pode colocar um valor superior. O correto é sempre calcular.
- Como o parâmetro da norma é o tempo, se há um relé que detecta esta falta à terra em um tempo inferior ao especificado pela norma, podem-se utilizar os respectivos valores de  $U_0$  apresentados na Tabela 4.

**EXEMPLO 6**

Dado um sistema de 13.8 kV, em que a corrente de curto-circuito é de 3922 A e o transformador à montante é aterrado por resistência de 400 A – 10s, determine o valor do fator de sobretensão e a tensão fase-terra sob falta à terra.

**SOLUÇÃO:**

O valor de K é dado por:

$$K = \frac{Z_0}{Z_1} = \frac{\frac{13800}{\sqrt{3}}}{\frac{400}{2.031}} = \frac{19.92}{3922.2} = 9.81$$

O fator de sobretensão será:

$$FS = \sqrt{\left(\frac{1}{2} + \frac{K-1}{K+2}\right)^2 + \frac{3}{4}} = 1.517$$

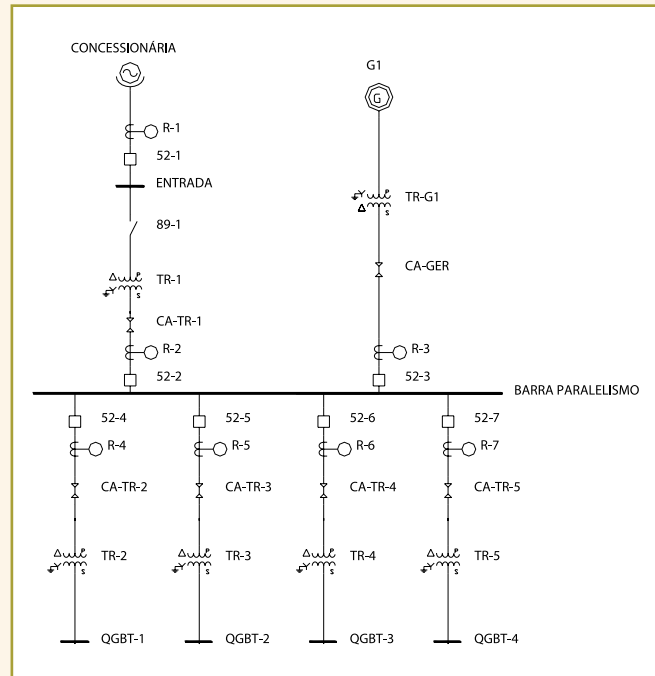
A tensão fase-terra do cabo deve ser maior que:

$$V_{FT} = \frac{V_{FF}}{\sqrt{3}} \times FS = \frac{13800}{\sqrt{3}} \times 1.517 = 12.1kV$$

Um caso típico de problemas com cabos é apresentado no esquema da Figura 8.

Obtém-se que:

- Em condição normal, a concessionária trabalha em paralelo com o gerador G1.
- O aterramento do sistema é provido pelo neutro do TR-1 (aterramento sólido).
- Caso a concessionária fique fora pela abertura do disjuntor 52-2, o nível de tensão da barra de paralelismo fica não aterrado.
- No caso de curto-circuito fase-terra no nível de tensão da barra de paralelismo, a tensão nas duas fases sãs do sistema irá subir de  $\sqrt{3}$ .
- Na situação descrita no item 4, a tensão fase-terra será igual à tensão entre fases, ou seja, se o cabo não for corretamente dimensionado



**Figura 8 – Problema com cabos em sistemas que paralelam geradores com a concessionária.**

ou não contar com um sistema que desligue adequadamente, poderá haver a queima do(s) cabo(s).

Como ainda há em muitas literaturas e desenhos a notação do circular mil (CM), apresentamos a sua definição: 1 CM (circular mil) equivale a uma área igual à de um círculo com diâmetro de 1 milésimo de polegada.

1 polegada = 25.4mm

$d(\text{diâmetro}) = \frac{25.4}{1000} = 0.0254\text{mm}$

$\text{Área} = \frac{\pi \times d^2}{4} = \frac{\pi \times 0.0254^2}{4} = 0.000507\text{mm}^2 = 0.5067 \times 10^{-3}$

1CM =  $0.5067 \times 10^{-3}$

1kCM = 1MCM = 0.5067

1mm<sup>2</sup> = 1973.53CM

*\*CLÁUDIO MARDEGAN é engenheiro electricista formado pela Escola Federal de Engenharia de Itajubá (atualmente Unifei). Trabalhou como engenheiro de estudos e desenvolveu softwares de curto-circuito, load flow e seletividade na plataforma do AutoCad®. Além disso, tem experiência na área de projetos, engenharia de campo, montagem, manutenção, comissionamento e start up. Em 1995 fundou a empresa EngePower® Engenharia e Comércio Ltda, especializada em engenharia elétrica, benchmark e em estudos elétricos no Brasil, na qual atualmente é sócio diretor. O material apresentado nestes fascículos colecionáveis é uma síntese de parte de um livro que está para ser publicado pelo autor, resultado de 30 anos de trabalho.*

**CONTINUA NA PRÓXIMA EDIÇÃO**  
Confira todos os artigos deste fascículo em [www.osetoreletrico.com.br](http://www.osetoreletrico.com.br)  
Dúvidas, sugestões e comentários podem ser encaminhados para o e-mail [redacao@atituedeitoria.com.br](mailto:redacao@atituedeitoria.com.br)