

SISTEMA COAXIAL DE PROTEÇÃO

*Swytz José Silva Tavares

Resumo

A finalidade deste artigo é apresentar um novo conceito para o cabo de descida dos pára-raios prediais, usados no escoamento de descargas atmosféricas, visando uma maior segurança para as estruturas e equipamentos por ele protegidos.

Abstract

The main objective of this paper is to show a new model for the cable of buildings lightning - arresters to the drainage of atmospheric discharges, this new concept may introduce more security to the buildings and equipments that are protected by it.

01 - INTRODUÇÃO

Há fortes indícios de que os sistemas de proteção contra descargas atmosféricas devem sofrer profundas modificações na sua concepção, tanto no que diz respeito à interpretação do que seja a descarga elétrica propriamente dita, quanto ao aspecto do projeto e construção de tais sistemas.

A preocupação com o condutor de descida tem sido no sentido de apresentar uma baixíssima resistência elétrica e de suportar a dissipação térmica I^2R provocada pela enorme corrente de descarga.

As dimensões dos fios e cabos elétricos são geralmente expressas por um número de uma escala tomada como padrão. Os condutores usados para descida têm suas bitolas escolhidas dentre as padronizadas de 1/0, 2/0, 3/0, 4/0 e 500 MCM (mil circular de

mil). Considerando que o cabo de menor seção tem resistência de 0,025 ohms para um comprimento de 80m, a máxima tensão (queda) neste cabo seria de 375 V para uma corrente de pico de 15 KA. Portanto, parece que o fenômeno de arcos secundários não ocorre por motivo da resistência do cabo ou alta corrente.

02 - ANÁLISE DA DESCARGA ATMOSFÉRICA

Estudos de descargas atmosféricas demonstram que a descarga é um pulso complexo de corrente e que possui um amplo espectro de frequências. A análise espectral das descargas mostra um alto conteúdo de energia concentrado em torno da frequência de 5 KHz, para a maioria das descargas e em 10 KHz para as restantes. Os espectros caem rapidamente de amplitude para frequências baixas e caem menos para frequências altas, atingindo a mais de 100 MHz, provocando estalos, conhecidos como estática, nas re-

* Engenheiro Eletricista pela Universidade de Fortaleza - UNIFOR; atualmente, prof. substituto do Depto. de Engenharia Elétrica da UFC.

cepções de rádio em amplitude modulada. Portanto, para um raio isolado, não existe uma componente CC.

Ele deve ser encarado como um pulso ou um surto de corrente.

Um pulso quando se propaga em um condutor, "vê" uma impedância complexa e não apenas a resistência do condutor. É preciso que se leve também em conta a parte reativa deste condutor.

Portanto, vamos encarar o gerador eletrostático nuvem-terra como um gerador de pulsos que será ligado a uma linha de transmissão, em que um condutor é o fio de descida e o outro condutor é a torre metálica ou estrutura do prédio, paralelos ao fio de descida.

Esta linha de transmissão apresenta uma impedância que pode ser calculada conforme o modelo:

$$Z_0 = \frac{138}{\sqrt{\epsilon_r}} \log \frac{4h}{d}$$

onde:

ϵ_r = constante dielétrica relativa do meio entre o condutor e a estrutura.

h = distância entre o condutor e a estrutura.

d = diâmetro do condutor

Supondo a estrutura aterrada, h = 100 mm e $\epsilon_r = 1$ para o ar, calculam-se os valores das impedâncias características para as várias bitolas.

Então, através da equação, a impedância mínima vista pela corrente de descarga é de 223,7 ohms para a bitola de 1/0.

Portanto, o pico de tensão estabelece que uma tensão desenvolvida sobre a impedância do cabo-torre é:

$$\Delta V = 223,7 \times 15000 \text{ AMPERE} = 3\ 355\ 500 \text{ V}$$

Este pico de tensão estabelece um campo elétrico, entre o cabo e estrutura da torre (terra), cujo dielétrico é o ar úmido, com rigidez entre 10 KV/cm e 30KV/cm, é fatal que saltear cono extremo superior do cabo, para descargas intensas.

Portanto, mesmo que a resistência de terra seja nula, a descarga "vê", na ponta do pára-raios, uma impedância de 223,7 ohms.

Mesmo no caso de correntes menores, existe o efeito de transformador provocado pelo campo magnético da descarga, que flui pelo fio de descida. Este campo induz correntes parasitas nas estruturas próximas. Por isso, os fios de terra que interligam os equipamentos em vários pavimentos não devem formar uma malha fechada. Por isso também que, para torres centradas em terrenos, a malha deve ser radial e não fechada, pois a forte corrente central de descida induz corrente na espiral formada por esta malha de terra fechada.

Deve-se, portanto, procurar uma linha de

transmissão que apresente uma menor impedância característica e que seja cômoda e segura para a instalação. Uma linha pode ser o cabo coaxial, que apresenta as seguintes vantagens:

- técnicas de construção e controle da impedância bem conhecida;
 - facilidade de instalação;
 - isolamento da corrente interna das estruturas externas;
 - confinamento dos campos magnéticos e elétricos em seu interior, evitando induções externas.
- A aplicação de cabos coaxiais em condução de descargas atmosféricas traz novos problemas como:
- casamento de impedâncias do gerador (descarga) e da carga (terreno) ou (malha de terra);
 - elevação de temperatura a ser suportada pelo dielétrico;
 - tensão de ruptura do dielétrico, devido ao fortíssimo campo elétrico que se forma entre os condutores;
 - retenção de energia elétrica, armazenada no capacitor formado pelos condutores interno e externo, após a descarga.

Normalmente, os cabos coaxiais são construídos para sistemas de telecomunicações onde correntes e tensões não atingem, nem de longe, os valores das descargas. Como alternativa, existe o recurso de se utilizar cabos isolados de energia, como condutor coaxial de descida.

Os cabos singelos de energia, com blindagem metálica e com isolamento de PVC, de rigidez dielétrica ao impulso de 50 KV/mm, são comercializáveis.

Como para estes cabos a espessura do dielétrico é de 6,4mm, e tensão de pico suportável é de $50 \times 6,4 = 320 \text{ KV}$.

Os cabos blindados possuem um condutor central que é revestido por fita de cobre colocada sobre a camada de material isolante. Esta blindagem confere ao cabo de energia as características básicas de cabo coaxial.

Com estas características, o cabo de energia atende ao requisito de proteção de estruturas de instalação, das descargas laterais e blindagem dos efeitos de indução do campo magnético, durante descargas.

Após a conclusão de viabilidade da utilização deste tipo de cabo para escoar cargas elétricas, devemos verificar os seus valores de impedância e suportabilidade térmica. A impedância característica vista de um cabo coaxial é:

$$Z_0 = \frac{138}{\sqrt{\epsilon_r}} \log \frac{D}{d}$$

Onde:

D = diâmetro interno do condutor externo;
d = diâmetro externo do condutor interno;
 ϵ_r = constante dielétrica relativa do material isolante.

Se observarmos a expressão matemática acima, concluiremos que para se obter uma mínima impedância é necessário que o quociente D/d seja pequeno. Porém, isto representaria diminuir o isolamento entre os condutores, causando um possível curto por causa do grande potencial que seria desenvolvido numa descarga. Como a constante dielétrica para a equação acima é 5, então podemos calcular o valor da impedância complexa para o cabo 1/0, que é igual a 23,5 ohms. Portanto, a tensão entre o condutor externo e o interno seria $\Delta V = 23,5 \times 15 \text{ KA} = 352,5$ que é maior do que a tensão de pico admitida pelo cabo. Mas, um cabo 4/0 apresenta 17,2 ohms como impedância complexa e o ΔV seria igual a 258 KV.

Há a hipótese de diminuir esta impedância com cabos em paralelo.

03 - COMPORTAMENTO TÉRMICO E ELÉTRICO DO CABO COAXIAL

Outro ponto a ponderar sobre o cabo coaxial é o comportamento do material isolante frente aos efeitos térmicos das descargas. Analisando o comportamento térmico, no seu interior, podemos afirmar que a energia térmica adquirida pelo cabo durante uma descarga atmosférica se transfere, por condução, do condutor central para o meio exterior, atravessando as camadas de isolamento. As suas características térmicas garantem que o cabo não apresentará avarias no material isolante.

A equação térmica característica é dada pela expressão:

$$Q = M \cdot C \cdot \Delta T; \text{ onde, } M = \text{Massa da substancia}$$

c = calor específico
 ΔT = variação de temperatura
 Q = Quantidade de calor (cal)

A equação que representa a dissipação térmica no condutor, é dada por:

$$E = I^2 \cdot R \cdot t; \text{ onde:}$$

I = corrente no condutor
 R = resistência do condutor
 t = tempo da corrente no condutor
 E = Energia (joules ou watt X seg)

Lembrando que 1 cal. = 4,168 joules, podemos fazer a seguinte igualdade: $E = Q$

$$2,4 \cdot 10^{-1} \cdot I^2 \cdot R \cdot t = M \cdot c \cdot \Delta T$$

Se $c = 0,092 \text{ cal/g } ^\circ\text{C}$, para o material cobre, e $t = 10 \text{ ms}$ a duração de uma descarga atmosférica, podemos ter assim, a variação de temperatura no

cabo após o evento, e a expressão fica:

$$\Delta T = 2,6 \cdot 10^{-2} \cdot \frac{I^2 \cdot R}{M} \text{ (} ^\circ\text{C)}, \text{ com } M \text{ dado em gramas.}$$

Podemos calcular com esta equação o incremento na temperatura do condutor, quando submetido a alta corrente de descarga. Por exemplo, um cabo de 80 m de comprimento e com bitola 1/0 para uma corrente de 100 KA terá um acréscimo na temperatura de mais ou menos $170 ^\circ\text{C}$, para esta mesma situação um cabo de 500 MCM teria um aumento de apenas $8,5 ^\circ\text{C}$. Portanto, os cabos coaxiais podem ser empregados nos parâ-raios prediais, no ponto de vista do aspecto térmico.

Não há interesse, entretanto, do casamento entre impedâncias do gerador eletrostático nuvem-terra com a do cabo de descida para maior transferência de energia. Mas, existe a necessidade de não refletir a energia de descida pelo solo no cabo, porque haveria a criação de ondas estacionárias devido a esta reflexão de energia nas extremidades do cabo. Estas ondas causam sobretensões que rompem o material dielétrico da isolação.

Porém, há interesse que a resistência do solo seja igual a do cabo e as partes reativas iguais e com sinal contrário, para se obter uma impedância casada. Isto é feito na intenção do terreno absorver toda a energia da descarga elétrica.

04 - MALHA DE TERRA

A malha de terra para este tipo de sistema de aterramento é uma estrutura especial montada na extremidade inferior do cabo coaxial, para garantir uma mínima reflexão e uma máxima absorção da energia da descarga.

Vejam na figura 1.a configuração radial do campo elétrico para um cabo terminado em malha simples. Notemos que o condutor interno se aprofunda no terreno juntamente com o seu dielétrico e o condutor externo se estende para um plano condutor, fazendo que a configuração dos campos elétrico e magnético se modifiquem. O plano condutor pode ser feito por uma malha de condutores. A figura somente apresenta as linhas do campo elétrico, as do campo magnético estão no interior do cabo porque estão concêntricas ao condutor interno.

A necessidade de se aprofundar o dielétrico do cabo vem da possibilidade de formação de arcos elétricos entre os condutores central e externo; pois o solo é melhor condutor que o dielétrico.

Quando ocorre uma descarga elétrica, a maioria das cargas irão tentar seguir as linhas do campo, elétrico, em contato com o solo. Devido a existência da resistividade do terreno, as cargas serão dissipadas pela resistência em forma de calor. E o restante das cargas se perderão no âmago do terreno, pois o gera-

dor eletrostático equivalente tem o seu terminal de referência na terra.

O volume do terreno que envolve as linhas do campo elétrico deve ter seu valor de resistência próximo ao valor da impedância característica do cabo (casamento de impedâncias) e apresentar uma capacidade de absorção e dissipação térmica de modo a não calcinar o material constituinte do solo, para não mudar suas características.

A desvantagem de terminação em malha simples consiste no escoamento da corrente de descarga pelo "poder das pontas", o que apresenta grande densidade na saída do condutor interno. Então, haverá um aquecimento exagerado a ponto de alterar as características do terreno pelo processo da calcinação, além, da deteriorização dos eletrodos e material isolante pela temperatura.

Na figura 2, vemos o sistema coaxial com terminação em malha dupla. A corrente de escoamento se distribui de maneira mais uniforme e distribuída que o caso anterior. A densidade de corrente é menor que a de terminação em malha simples, evitando calcinação do material do terreno. Outra vantagem é que a corrente fica confinada, praticamente, no volume envolvido pela malha dupla. Isto não ocorre para a malha simples, pois, as correntes se espalham e podem encontrar alguma tubulação condutora, podendo danificar instalações distantes.

Analisando o sistema coaxial de terminação em malha dupla verificamos que a dissipação da maior parte da energia da descarga atmosférica se faz entre as placas da malha. Então, a resistência simplesmente será dada por:

$$R = \rho \frac{L}{A} \text{ onde:}$$

ρ = resistividade do solo

L = distância entre placas da malha

A = área de cada malha, suposta iguais.

05 - MÉTODO PARA CÁLCULO DA MALHA DE TERRA

Calculemos as dimensões de uma malha deste tipo usando cabo de descida 500 MCM, cujo Z_0 é 13 ohms, resistividade do terreno $940 \Omega \cdot m$. O calor específico do terreno é $c = 0,18 \text{ cal/g } ^\circ C$, admitindo um acréscimo de $20 ^\circ C$ na temperatura do solo sem afetar suas características para uma corrente de descarga igual a 15 KA com duração de 10 ms.

Tomando-se uma expressão anterior podemos calcular a massa do terreno.

$$M = 2,4 \cdot 10^{-1} \cdot \frac{I^2 \cdot R \cdot t}{C \cdot \Delta T} \cdot 10^{-3} \quad (\text{KG})$$

Calculando-se, temos:

$$M = 2,4 \cdot 10^{-1} \cdot \frac{(15000)^2 \cdot 13 \cdot 10^{-2}}{0,18 \cdot 20} \cdot 10^{-3} = 1950 \text{ KG}$$

Sabendo que a massa específica média da terra é 3000 Kg/m³:

$$V = \frac{M}{m} = \frac{1950}{3000} = 0,65 \text{ m}^3$$

Foi estabelecida uma relação de $L/A = 0,0138 \text{ m}^{-1}$ e sabendo que $V = L \cdot A$ e

$$A = \rho \frac{L}{R}, \text{ temos:}$$

$$V = \frac{L^2 \cdot \rho}{R} = L = \sqrt{\frac{V \cdot R}{\rho}} \quad \& \quad \frac{R}{\rho} = \frac{L}{A}; \text{ temos } L = \sqrt{\frac{V \cdot L}{A}}$$

$$L = \sqrt{0,65 \cdot 0,0138} = 0,095 \text{ m}$$

$$A = \frac{V}{L} = \frac{0,65}{0,095} = 6,86 \text{ m}^2$$

Com a malha em forma de círculo, temos:

$$r = \sqrt{\frac{A}{\pi}} = \sqrt{\frac{6,86}{3,14}} = 1,5 \text{ m}$$

Analisando os valores obtidos para o cálculo da dimensão da malha de terra para os diferentes tipos de solo, foi constatado que as malhas planas não sofrem grandes alterações nos seus valores e ocupam uma área muito menor que a malha de terra convencional. Portanto, há possibilidade de se padronizar um sistema coaxial de descida e uma malha de terra independente do tipo de terreno. Devemos salientar que alguns estudos indicaram que a dimensão de "L" tem de ser no mínimo 0,5m.

Então, para o cabo 500 MCM de 80m com $Z_0 = 13$ ohms e médio = 433 ohms x metro, teremos:

$$A = 16,7 \text{ m}^2$$

$$r = 2,3 \text{ m}$$

$$V = 8,35 \text{ m}^3$$

06 - OUTRAS CONSIDERAÇÕES TÉCNICAS

Agora, analisemos a ligação do extremo superior do cabo coaxial com o pára-raios. O condutor interno deve prosseguir junto com o dielétrico até conectar-se com o pára-raios, para evitar pequena distância com o condutor externo que é aterrado na sua extremidade inferior. Portanto, o condutor externo não é ligado à torre. Por ser isolado externamente, o cabo pode ser fixado à torre, ao longo da descida, por isoladores. Também, a estrutura deve ser aterrada, por medida de segurança (estrutura da torre).

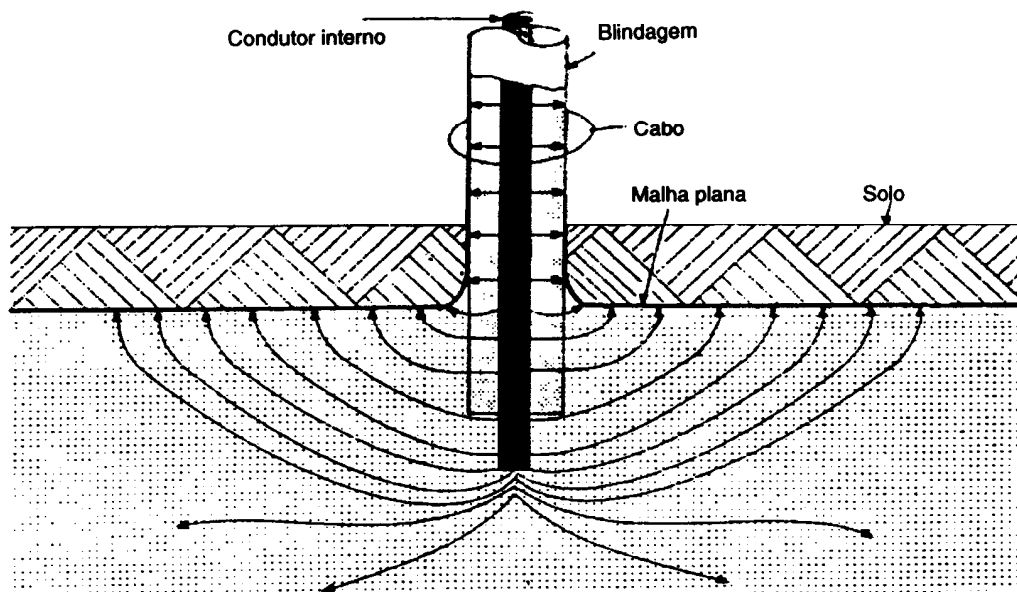
07 - CONCLUSÕES

Esta nova concepção dos sistemas de proteção utilizando o cabo coaxial apresenta uma solução técnico-econômica bem mais atraente que o sistema convencional de proteção.

O custo por metro de condutor de descida é mais caro quando utilizamos o cabo coaxial. Mas, o custo da malha de terra convencional, por vezes, requer extensões para diminuir a resistência de terra, o que ultrapassa em muito os custos do sistema coaxial de proteção. Porque, a malha convencional utiliza o cabo de descida para a malha de terra, bem como, à interligação dos eletrodos de cobre.

OBS: 1) A concepção de descida de pára-raios em cabo coaxial é uma idéia nova e carece de resultados experimentais seguros.

2) Unidade "CIRCULAR MIL" = É a área de um círculo de diâmetro igual a 1 mil (1/1000 da polegada).



Fonte: Silva e Barradas (1)
Fig. 1: Cabo terminado em malha simples

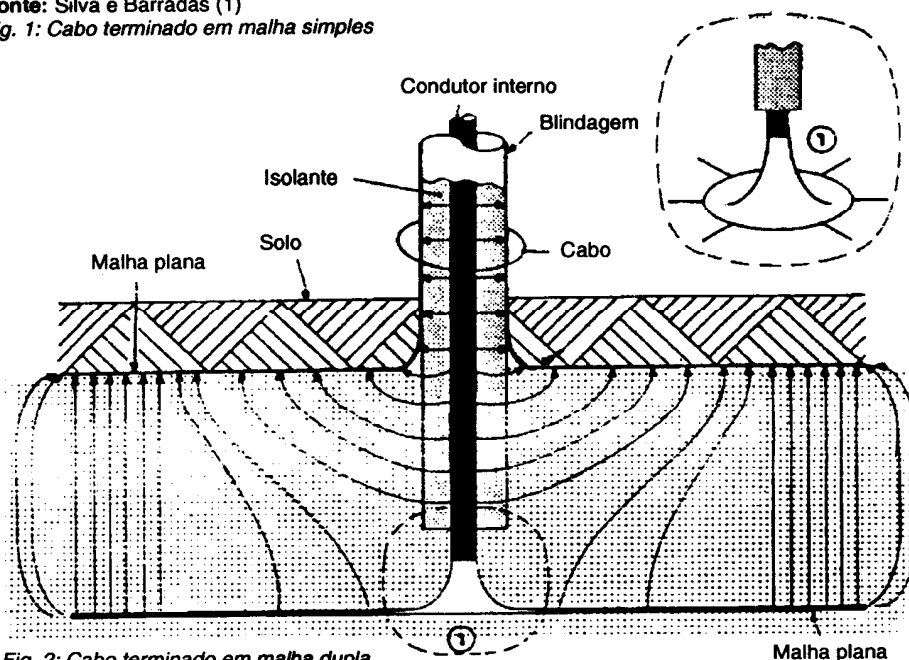


Fig. 2: Cabo terminado em malha dupla
Fonte: Silva e Barradas (1)

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- 01 -SILVA, Aluizio Ferreira & Barradas, Ovídio C. Machado. Telecomunicações "Sistema de Energia", Livros Técnicos e Científicos, Editora Ltda, Rio de Janeiro, 1980. p. 782-792.
- 02 -CREDER, Hélio. Instalações Elétricas, "Instalação

de Pára-Raios Prediais", Livros Técnicos e Científicos, Editora Ltda, São Paulo, p. 246-262.

- 03 -GRAY, Alexandre & Wallace, G.A. Eletrotécnica Princípios e Aplicações. Tradução: Miguel Magaldi. Ao livro Técnico Ltda, Rio de Janeiro, 1958, p. 50.