

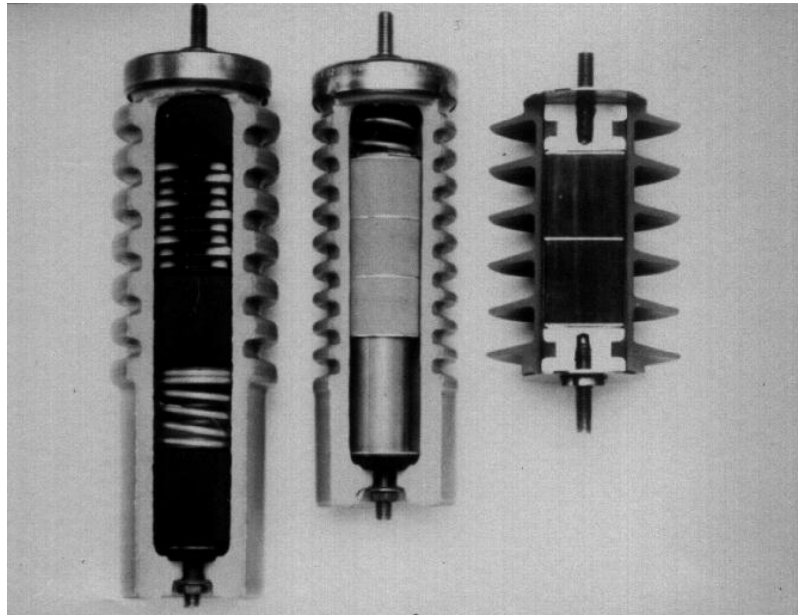
## IV Pára-raios para aplicação em redes de distribuição

### IV.1 Aspectos construtivos:

Existem atualmente três tipos construtivos de pára-raios sendo produzidos para aplicação em redes de distribuição: pára-raios de Carbetto de Silício (SiC), pára-raios de Óxido de Zinco (ZnO) com centelhadores, e os pára-raios de Óxido de Zinco (ZnO) sem centelhadores.

Os pára-raios com centelhadores são encapsulados em invólucros de porcelana e apresentam a corrente de descarga nominal de 5 kA . Os pára-raios de ZnO sem centelhadores têm sido produzidos com encapsulamento em porcelana e polimérico. Os pára-raios com invólucro de porcelana são de 5 kA, enquanto que os pára-raios poliméricos apresentam projetos para correntes de descarga nominais de 5 kA e 10 kA.

A Figura IV.1 ilustra os diferentes tipos construtivos de pára-raios de distribuição com e sem centelhadores, montados em invólucros de porcelana e polimérico.



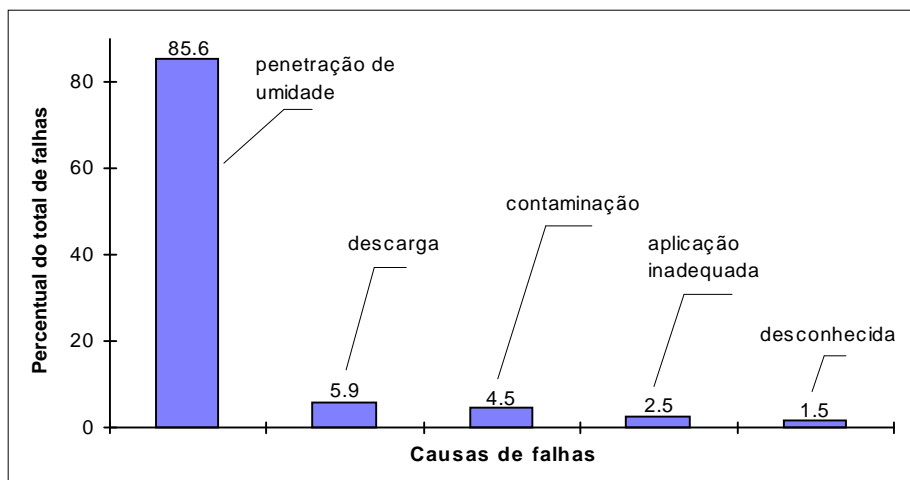
**Figura IV.1 - Detalhes construtivos de pára-raios de distribuição com e sem centelhadores, montados em invólucros de porcelana e polimérico.**

Considerando que os pára-raios de distribuição apresentem bons projetos elétrico e mecânico dos sistemas de vedação, bem como sejam adequadamente selecionados e instalados nas redes elétricas estima-se que a sua vida útil seja de aproximadamente 15 anos.

No entanto, na prática, os pára-raios de distribuição não vêm apresentando o desempenho esperado, sendo constatadas alterações significativas no seu desempenho que resultam, em muitas das vezes, na operação inadequada ou até mesmo na falha dos pára-raios com menos de cinco anos de operação comprometendo, desta forma, a confiabilidade do pára-raios e a continuidade no fornecimento de energia elétrica dos sistemas de distribuição.

Embora a maioria dos pára-raios atualmente adquiridos pelas empresas de energia sejam do tipo ZnO com invólucro polimérico, ainda existem vários pára-raios de SiC instalados nas redes elétricas. A taxa de falha anual dos pára-raios atualmente instalados nos sistemas de distribuição é estimada em 5%. Há uma tendência na redução significativa dessa taxa devido a substituição progressiva dos pára-raios com centelhadores por pára-raios de ZnO com invólucro polimérico ao longo dos últimos anos.

Estudos realizados por empresas concessionárias de energia e laboratórios de pesquisa têm identificado as principais causas que afetam o desempenho dos pára-raios. Todos os estudos realizados apontam como a principal causa de falhas dos pára-raios a penetração de umidade por perda de estanqueidade do invólucro, sendo esta causa responsável por aproximadamente 80 a 90 % de todas as falhas verificadas em pára-raios de distribuição. Um resumo do trabalho desenvolvido pela Ontario Hydro, o qual descreve o percentual do número total de pára-raios falhados atribuídos às diferentes causas de falhas é apresentado na Figura IV.2.



**Figura IV.2 - Causas de falhas atribuídas a pára-raios de distribuição**

A perda de estanqueidade em pára-raios de distribuição pode ocorrer por vários motivos: danificação das gaxetas de vedação durante o processo de fechamento dos pára-raios; envelhecimento das gaxetas ao longo do tempo com perda de suas propriedades, facilitando a penetração de umidade; e trincas ou fissuras na porcelana. Devido ao espaçamento interno de ar existente nos pára-raios com invólucros de porcelana, a penetração de umidade pode resultar em condensação de umidade e corrosão de seus componentes metálicos.

Literaturas apontam as falhas de projeto como responsáveis por 53% das falhas dos pára-raios por penetração de umidade. O envelhecimento do sistema de vedação corresponde a 18% das falhas /1/.

Pára-raios com centelhadores com presença de umidade em seu interior apresentam, geralmente, variações significativas nas suas características disruptivas. Em muitos casos, os níveis da tensão disruptiva a frequência fundamental chegam a valores tão baixos que uma sobretensão temporária pode resultar na disrupção dos centelhadores, com a conseqüente falha do pára-raios.

Já com relação aos elementos não-lineares, a absorção de umidade afeta significativamente a sua característica “tensão x corrente”. Nos blocos de Carbetto de Silício verifica-se um aumento significativo nas amplitudes das correntes subsequentes, reduzindo a possibilidade de sua extinção; e um aumento brusco nos valores de tensão residual à corrente de descarga nominal, aumento esse que pode comprometer a isolação do equipamento protegido quando da operação do pára-raios. Há registros comprovados de queima de transformadores pela operação de pára-raios com seus níveis de proteção comprometidos.

No caso de elementos a base de ZnO, a presença de umidade altera significativamente a característica “tensão x corrente” em toda a faixa de operação do pára-raios, acarretando no aumento da componente resistiva da corrente na tensão de operação do pára-raios, com conseqüente redução da sua capacidade de absorção de energia (Seção III.4.2 – Capítulo III); bem como os seus níveis de proteção, podendo comprometer a isolação dos equipamentos protegidos.

Pelo acima exposto a penetração de umidade altera as características dos pára-raios de distribuição, alterações estas que podem conduzir a falha do pára-raios seguida da passagem da corrente de curto-circuito do sistema. Conforme visto anteriormente, devido as características construtivas dos pára-raios (espaçamento interno de ar entre a parte ativa do pára-raios e a parte interna do invólucro) a passagem da corrente de falta do sistema produz a formação de gases de alta pressão que tendem a provocar a fragmentação do invólucro ou até mesmo a explosão do pára-raios, caso esse não possua características mecânicas suficientes para suportar e eliminar os gases de alta pressão.

De acordo com as informações disponíveis na Figura IV.2 as descargas atmosféricas são responsáveis por aproximadamente 6% das falhas verificadas nos pára-raios. Se atentarmos para o fato de que muitos dos pára-raios falhados devido ao efeito das descargas atmosféricas apresentavam presença de umidade em seus elementos ativos (blocos de resistência não-lineares e centelhadores, quando presentes) pode-se imaginar que a descarga atmosférica foi uma conseqüência, sendo a causa principal da falha a presença de umidade. Desta forma, pode-se concluir que aproximadamente 90% das falhas que ocorrem nos pára-raios de distribuição deve-se a presença de umidade no interior dos pára-raios.

A contaminação também tem uma parcela significativa no índice de falhas em pára-raios. No caso de pára-raios com centelhadores, o efeito da contaminação deve-se em parte a má distribuição de tensão na parte interna dos pára-raios e a transferência de arco que se dá entre a parte externa e interna da porcelana, proveniente da corrente de fuga externa que flui pelo invólucro. Os fatores acima descritos acarretam em disrupção dos centelhadores série em frequência fundamental. Já nos pára-raios sem centelhadores a causa principal é a degradação dos elementos de ZnO, proveniente da distribuição de tensão não uniforme na porcelana seguida pela geração de descargas internas que produzem alterações irreversíveis na composição interna do gás, afetando as características dos elementos de ZnO.

A experiência de campo com a aplicação de pára-raios com invólucro polimérico tem demonstrado que este tipo de projeto de pára-raios é menos propenso a penetração de umidade, quando comparado aos pára-raios com invólucro de porcelana. Isso deve-se ao fato dos pára-raios com invólucro polimérico aplicados a redes de distribuição não apresentarem espaçamento interno de ar (Figura IV.1).

Existem basicamente três concepções de projetos para pára-raios poliméricos:

- Na primeira, o invólucro polimérico é moldado e posteriormente encapsulado sobre o conjunto de blocos de ZnO envoltos em um material de fibra de vidro impregnado em resina epoxi. A interface entre o material de fibra de vidro e a parte interna do invólucro polimérico é geralmente preenchida por fluído de silicone;
- Na segunda, o invólucro polimérico é injetado diretamente sobre o conjunto de blocos encapsulado em um material de fibra de vidro impregnado em resina epoxi. Essa concepção de projeto apresenta como maior vantagem a eliminação quase que total da possibilidade de penetração de umidade. Como desvantagem, há a necessidade de um controle visando um processo de injeção homogêneo, de forma a evitar a formação de bolhas de ar, que podem resultar na formação de descargas parciais que pode levar a degradação do pára-raios ao longo do tempo.

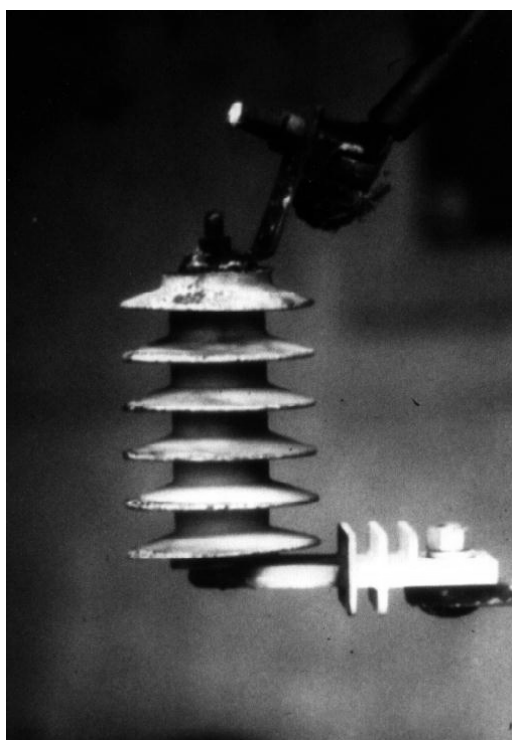
O encapsulamento dos blocos em material de fibra de vidro impregnado em resina epoxi tem como funções básicas garantir a suportabilidade mecânica necessária em caso de uma eventual falha do pára-raios, seguida pela passagem da corrente de curto-circuito do sistema e facilitar o processo de montagem.

- Na terceira concepção de projeto o material polimérico é injetado diretamente sobre os elementos de ZnO. Essa concepção requer, no entanto, maior tecnologia.

Outro aspecto importante dos pára-raios poliméricos está associado às consequências em caso de falha do pára-raios. O projeto mecânico do pára-raios polimérico deve ser tal que resista mecanicamente a passagem da corrente de curto-circuito do sistema sem fragmentação ou desprendimento dos elementos ativos de ZnO, permanecendo intacto após a passagem da corrente de falta.

Para assegurar esta característica os projetos de pára-raios poliméricos devem ser submetidos aos ensaios de modo de falha, onde são simuladas as condições de falha do pára-raios seguida pela passagem da corrente de falta do sistema.

A Figura IV.3 ilustra o exemplo de um pára-raios submetido ao ensaio de modo de falha, através da circulação de corrente com valor simétrico de 10 kA por 10 ciclos.



**Figura IV.3 - Detalhes de um pára-raios de distribuição polimérico submetido ao ensaio de corrente de falta.**

As várias vantagens dos pára-raios com invólucro polimérico em relação aos pára-raios com invólucro de porcelana foram apresentadas no Capítulo III.

Pára-raios poliméricos aplicados a redes de distribuição começaram a ser adquiridos por empresas concessionárias de energia elétrica brasileiras no início dos anos 90. Desde então, o processo de aquisição desse tipo de pára-raios vem crescendo ano a ano, sendo atualmente o tipo de pára-raios predominantemente adquirido pela maioria das empresas concessionárias de energia no Brasil.

## IV.2 Critérios básicos para a seleção dos pára-raios para redes de distribuição

O correto dimensionamento dos pára-raios às características dos sistemas para onde serão aplicados propicia uma proteção adequada aos equipamentos protegidos a uma melhor relação entre benefício e custo.

A seguir são apresentadas informações quanto aos procedimentos para a seleção dos pára-raios aplicados em redes de distribuição primárias. Tais conceitos podem ser utilizados para aplicação em linhas de distribuição.

### (1). Seleção da tensão nominal dos pára-raios:

Os procedimentos básicos para a seleção da tensão nominal dos pára-raios com e sem centelhadores são apresentados na Seção III.5 – Capítulo III.

Como visto anteriormente, o critério de seleção da tensão nominal do pára-raios depende do tipo de pára-raios utilizado: No caso de pára-raios com centelhadores, a seleção da tensão nominal dos pára-raios está relacionada a não disrupção dos centelhadores para a máxima sobretensão temporária no ponto de aplicação do pára-raios, enquanto que para os pára-raios de ZnO a seleção da tensão nominal depende das características de suportabilidade dos pára-raios a essas sobretensões.

Este conceito é muito importante quando aplicável a pára-raios sem centelhadores, visto que permite ao usuário especificar um pára-raios com tensão nominal mais adequada, em função das características do sistema. Esta seleção adequada, via de regra, permite aos usuários reduzir os custos com a aquisição dos pára-raios, bem como melhorar as características de proteção oferecida pelos pára-raios.

**Exemplo 1** – Definir a seleção da tensão nominal de um pára-raios considerando um sistema com as seguintes características:

- |  |   |
|--|---|
| - Tensão nominal $U_n$ :                         | 13,8 kV <sub>ef</sub>                                 |
| - Máxima tensão operativa do sistema $U_{max}$ : | 14,4 kV <sub>ef</sub>                                 |
| - Sistema aterrado na SE:                        | $Z_1 = 1,0938 + j2,7274$<br>$Z_0 = 2,0784 + j10,8568$ |
| - Duração estimada para a falta:                 | 2 segundos.   |

Com base nas impedâncias de seqüência positiva e zero obtém-se um fator de aterramento  $K = 1,353$  (Capítulo I – Seção I.1.1).

Logo, a amplitude da máxima sobretensão temporária, no ponto considerado será:

$$TOV_{SIST.} = 1,353 \cdot \sqrt{2} \cdot U_{max} = 1,353 \cdot \sqrt{2} \cdot (14,4 / \sqrt{3}) = 15,9 \text{ kV}_{cr}$$

- **Pára-raios com centelhadores:**

$$V_n \geq TOV_{SIST.} \Rightarrow V_n \geq 15,9 / \sqrt{2} \Rightarrow V_n \geq 11,2 \text{ kV}$$

Neste caso, o pára-raios deverá apresentar uma tensão nominal de 12 kV.

- **Pára-raios sem centelhadores:**

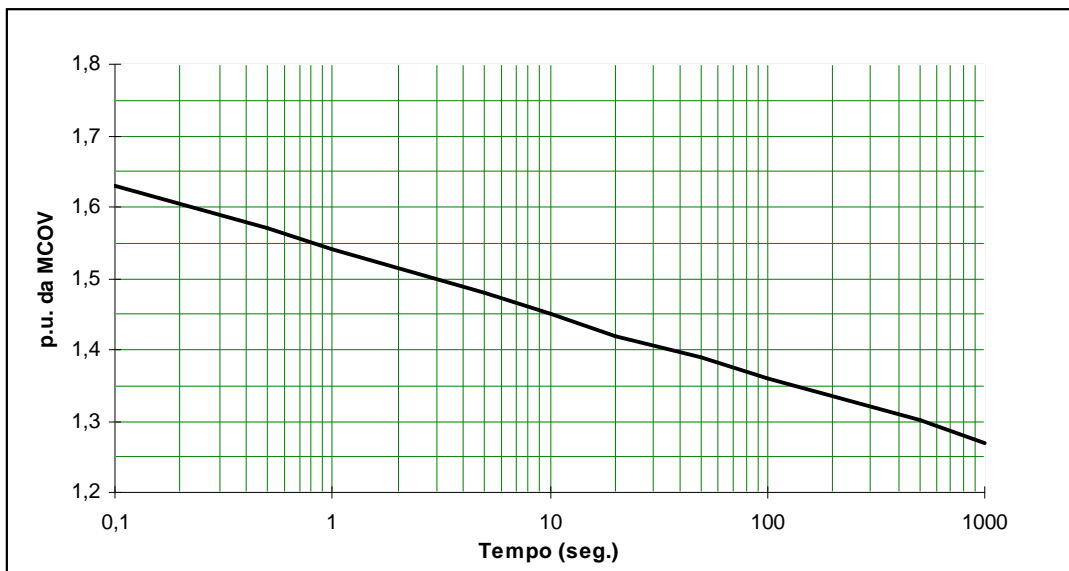
$$MCOV_{PR} \geq U_{Max. SIST.} \Rightarrow MCOV_{PR} \geq 14,4 / \sqrt{3} \Rightarrow MCOV_{PR} \geq 8,3 \text{ kV}_{ef}$$

A princípio será escolhido um pára-raios com MCOV de 8,4 kV.

Logo, qualquer valor de tensão com valor eficaz superior a 8,4 kV, será considerado uma sobretensão para o pára-raios. Portanto:

$$TOV_{PR} \geq TOV_{SIST.} / (\sqrt{2} \cdot MCOV_{PR}) \Rightarrow TOV_{PR} \geq 15,9 / (\sqrt{2} \cdot 8,40) \Rightarrow TOV_{PR} \geq 1,34$$

O próximo passo consiste em verificar se as características de suportabilidade do pára-raios para sobretensões temporárias atendem a sobretensão verificada no sistema. Uma curva típica apresentando a característica “tensão de frequência fundamental x tempo” para um pára-raios polimérico de distribuição encontra-se na Figura IV.4.



**Figura IV.4 – Curva característica “tensão de frequência fundamental x tempo”**

Alguns fabricantes de pára-raios, especialmente àqueles que seguem as normas ANSI apresentam curvas características “tensão de frequência fundamental versus tempo” em função da tensão nominal do pára-raios.

Verifica-se na curva “tensão de frequência fundamental x tempo” do pára-raios considerado, uma máxima duração permitida para a sobretensão temporária de de aproximadamente 100 segundos.

Como essa duração é superior a duração estimada para falta de 2 segundos, para esse caso o pára-raios com MCOV de 8,4 kV poderia ser aplicado no sistema. Este pára-raios apresenta uma tensão nominal de 10 kV.

Uma forma bastante conservativa para se definir a tensão nominal do pára-raios de ZnO consiste na determinação da sobretensão temporária equivalente a 10 segundos, a partir da sobretensão temporária encontrada no sistema. Neste caso, a amplitude e a duração das sobretensões temporárias com durações entre 0,1 s e 100 s, podem ser convertidas para uma amplitude equivalente -  $U_{eq}$ , com uma duração de 10 s (correspondente ao tempo de aplicação da tensão nominal no ensaio ciclo de operação):

$$U_{eq} = U_t \cdot \left( \frac{T_t}{10} \right)^m$$

$U_{eq}$  Amplitude da sobretensão temporária equivalente de 10 s;  
 $U_t$  Amplitude da sobretensão temporária;  
 $T_t$  Duração da sobretensão temporária em s;  
 $m$  Expoente que descreve a característica “tensão em frequência fundamental versus tempo” de um pára-raios.  $m = 0,02$

De acordo com esse método a tensão nominal do pára-raios deve ser igual ou superior ao valor da sobretensão equivalente obtida para 10 segundos. Isso garante a condição mínima do pára-raios de atender aos requisitos prescritos no ensaio de ciclo de operação.

Utilizando a expressão acima no exemplo, tem-se para uma sobretensão temporária com amplitude de 15,9 kV durante 2 segundos uma sobretensão temporária equivalente com amplitude de 15,4 kV por 10 segundos. Segundo esse critério, bastante conservativo, a tensão nominal do pára-raios deve ser de 12 kV.

## **(2). Definição da corrente de descarga dos pára-raios:**

Detalhes quanto a definição da corrente de descarga de um pára-raios foram apresentados, de forma genérica, na seção III.5 – Capítulo III.

No caso de pára-raios instalados no final de linha, pode ser utilizada a seguinte equação de modo a se obter uma estimativa da intensidade máxima de corrente de descarga que flui pelo pára-raios, quando da ocorrência de um surto:



$$I_{MAX} = \frac{(2 \cdot E_0 - V_r)}{Z_0}$$

- $I_{MAX}$  Corrente de descarga que flui pelo pára-raios ( A );  
 $E_0$  Corresponde a 1,2 vezes o nível de isolamento para impulso atmosférico da linha ( V );  
 $V_r$  Tensão residual do pára-raios para impulso atmosférico ( V );  
 $Z_0$  Impedância de surto monofásica da linha (  $\Omega$  ).

A Tabela IV.1, apresenta uma estatística dos valores de corrente de surtos atmosféricos que fluem pelos pára-raios /2/.

**Tabela IV.1 – Correntes de surtos atmosféricos através dos pára-raios**

Coluna 1	Porcentagem dos locais que recebem correntes de descarga por ano com amplitudes menores ou iguais às indicadas na coluna 1			
Correntes de Surtos atm. através dos PR	Rede urbana	Rede Semi-urbana	Rede Rural	Rede rural muito Exposta
1	89	70	49	49
2	93	80	68	68
3	96	87	76	76
5	98	93	88	80
10	99,5	97	95	85
20	99,5	99	98	91
30	-----	99,8	99	95
35	-----	99,9	99,3	98,5
55	-----	-----	99,9	99,7
65	-----	-----	-----	99,9
70	-----	-----	-----	-----

Cabe ressaltar que as informações disponíveis na Tabela IV.1 devem ser tomadas apenas como referência, não devendo se utilizar esses valores para a definição da corrente de descarga nominal dos pára-raios.

A maioria das empresas concessionárias de energia elétrica brasileiras vêm adotando pára-raios com corrente de descarga nominal de 10 kA em seus sistemas de distribuição. Basicamente, pára-raios de 5 kA têm sido especificados para uso em redes urbanas com baixa incidência de descargas atmosféricas.

### (3) Determinação da capacidade de absorção de energia dos pára-raios

As maiores solicitações de energia a que são submetidos os pára-raios em redes de distribuição são decorrentes dos surtos de origem atmosféricas e das sobretensões temporárias. Em casos muito raros, as solicitações de manobra

constituem um fator determinante para a determinação da capacidade de absorção de energia dos pára-raios aplicados em redes de distribuição aéreas.

A capacidade dos pára-raios suportarem as energias associadas as sobretensões temporárias é definida pela curva “tensão de frequência fundamental x tempo” do pára-raios. Uma vez adequado às características dos sistemas, os pára-raios absorverão as energias associadas e essas sobretensões.

A energia absorvida por um pára-raios durante a ocorrência de uma descarga atmosférica pode ser obtida com base na equação apresentada na seção III.5 – Capítulo III.

A maioria das empresas concessionárias de energia brasileiras vêm adotando os pára-raios com corrente de descarga nominal de 10 kA, classe 1 de descarga de linhas de transmissão. Esses pára-raios apresentam, em geral, uma capacidade de absorção de energia para impulsos de corrente elevada na faixa de 2,5 a 3,5 kJ / kV de tensão nominal. É importante ressaltar que a capacidade de absorção de energia está associada a uma amplitude de corrente de descarga e forma de onda da corrente. De modo geral, desempenhos bastante satisfatórios vêm sendo obtidos por estes pára-raios.

Existem registros de falhas em pára-raios decorrentes da incapacidade de suportarem elevadas energias associadas a surtos atmosféricos. Pára-raios instalados em redes rurais ou redes de distribuição urbanas não protegidas por “blindagens naturais”, podem ser atingidos por descargas atmosféricas diretas.

Neste caso, dependendo da amplitude da corrente, da sua forma de onda, e da distância entre a incidência da descarga e o ponto de instalação dos pára-raios, esses poderão vir a falhar. Para evitar falhas de pára-raios em regiões críticas, algumas empresas vêm realizando testes de campo considerando a aplicação pára-raios classe 2 de descarga de linhas de transmissão.

#### **(4) Definição da corrente suportável de falta:**

Em caso de uma eventual falha do pára-raios estes representam uma baixa impedância para a terra e são submetidos a corrente de curto-circuito do sistema. De modo a evitar riscos às pessoas e aos demais equipamentos instalados nas suas proximidades, os pára-raios devem ser projetados para suportar mecanicamente os efeitos das correntes de curto-circuito, sem fragmentação ou desprendimento dos elementos de ZnO (estamos aqui falando de pára-raios de ZnO com invólucros poliméricos).

Segundo a IEC 99.1/91 (aplicável a pára-raios com centelhadores) os pára-raios com correntes de descarga nominal de 5 kA podem ser de classe de alívio D ou E apresentando capacidade de suportar correntes de falta com valores simétricos de 16 kA e 5 kA, respectivamente, por um período mínimo de 0,2 segundos.

No entanto, verifica-se na prática que os pára-raios de distribuição com invólucro de porcelana não apresentam quaisquer dispositivos para aliviar as correntes de falta oriundas do sistema.

Para os pára-raios de ZnO poliméricos, a norma IEC 60099-4/01 estabelece os níveis eficazes de corrente presumíveis de falta de 5 kA e 10 kA para os pára-raios com corrente de descarga nominal de 5 kA; e valores de 10 kA, 16 kA ou 20 kA, para os pára-raios com corrente de descarga nominal de 10 kA classe 1 de DLT. Para todas as correntes acima, o tempo mínimo de ensaio deverá ser de 0,2 segundos.

O ensaio de baixa corrente com valor eficaz de  $600 \pm 200$  A também deverá ser realizado para todos os tipos de pára-raios. A duração mínima é de 1 segundo.

É importante ressaltar que quanto maior for o nível de suportabilidade do pára-raios a correntes de falta mais confiável será o seu desempenho sob situações de falha. No entanto, o aumento das características de suportabilidade está diretamente relacionado a um aumento do preço do pára-raios.

#### **(5). Determinação das características de proteção do pára-raios escolhido:**

As características de proteção dos pára-raios devem ser definidas em função dos níveis de suportabilidade dos equipamentos a serem protegidos; do grau de importância dos equipamentos e das linhas onde os pára-raios serão aplicados e do tipo de instalação do pára-raios em relação ao equipamento a ser protegido. Isto visa garantir uma proteção adequada aos equipamentos contra surtos atmosféricos e de manobra. Os níveis de proteção oferecidos pelos pára-raios são apresentados nos catálogos dos fabricantes.

Pode-se dizer que praticamente todos os pára-raios de ZnO, sejam de invólucro polimérico ou de porcelana, apresentam seus níveis de proteção dentro da faixa de valores máximos sugerida pela IEC 60099.4/01 (Ver Tabelas III.2 e III.3 - Seção III.3.2 – Capítulo III). Estes níveis garantem, via de regra, uma proteção adequada aos equipamentos protegidos tomando-se os cuidados necessários com os efeitos dos cabos de ligação entre os pára-raios e os equipamentos protegidos, principalmente em regiões onde há a possibilidade da incidência de correntes de elevadas amplitudes e/ou elevadas taxas de crescimento.

Quanto aos pára-raios com centelhadores ainda hoje em operação e comercializados, não se tem uma garantia absoluta dos seus níveis de proteção, apesar dos limites definidos em norma (apresentados na Tabela III.1 - Seção III.3.2 – Capítulo III). Casos mais críticos são observados em pára-raios com tempos de instalação superiores a 10 anos.

### IV.3 Análise do efeito dos cabos de ligação na proteção dos equipamentos:

Na seção III.5 do Capítulo III, foram apresentadas informações quanto a importância de se avaliar o efeito dos cabos de ligação entre os pára-raios instalados em redes de distribuição e os equipamentos protegidos.

É importante que esse efeito seja levado em consideração quando da determinação das tensões impulsivas de frente rápida nos terminais dos equipamentos protegidos.

**Exemplo 2** – Determinar as margens de proteção para um transformador aplicado em um sistema de 15 kV, com uma tensão suportável nominal para impulso atmosférico (TSNIA) de 95 kV. Esse transformador deve ser protegido por um pára-raios com tensão nominal de 12 kV , corrente de descarga nominal de 10 kA, apresentando as seguintes características de proteção:

- Tensão residual para impulso de frente íngreme: 48,0 kV
- Tensão residual para impulso atmosférico: 43,2 kV
- Tensão residual para impulso de manobra a 0,5 kA: 34,8 kV

**NOTA:** Os valores de tensão residual acima correspondem aos níveis máximos estabelecidos na Tabela III.3

O comprimento total dos cabos de ligação entre o pára-raios e o transformador é de 2 metros.

#### • Determinação da margem de proteção 1 (ondas de frente íngreme)

$$MP_1 = \frac{TSIACF}{NPFO + \Delta V(t)}$$

$$TSIACF = 1,15 \cdot TSNIA \rightarrow TSIACF = 1,15 \cdot 95 \rightarrow TSIACF = 109 \text{ kV}$$

$$NPFO = 48 \text{ kV}$$

$$\Delta V = (L \cdot (di / dt) \cdot Ic) \rightarrow \Delta V = 1,3 \mu\text{H/m} \cdot (10 \text{ kA} / 1 \mu\text{s}) \cdot 2 \text{ m} \rightarrow \Delta V = 26 \text{ kV}$$

$$MP_1 = \frac{TSIACF}{NPFO + \Delta V(t)}$$

$$MP_1 = \frac{109}{48 + 26}$$

$$MP_1 = 1,47 = 47,3\%$$

- **Determinação da margem de proteção 2 (impulso atmosférico normalizado)**

$$MP_2 = \frac{TSNIA}{NPIA + \Delta V(t)}$$

$$TSNIA = 95 \text{ kV} \quad NPIA = 43,2 \text{ kV}$$

$$\Delta V = (L \cdot (di / dt) \cdot lc) \rightarrow \Delta V = 1,3 \mu\text{H/m} \cdot (4 \text{ kA} / 1 \mu\text{s}) \cdot 2 \text{ m} \rightarrow \Delta V = 10,4 \text{ kV}$$

$$MP_2 = \frac{TSNIA}{NPIA + \Delta V(t)} \quad MP_2 = \frac{95}{43,2 + 10,4} \quad MP_2 = 1,77 = 77,2\%$$

- **Determinação da margem de proteção 3 (impulsos de manobra)**

$$MP_3 = \frac{TSNIM}{NPIM}$$

$$TSNIM = 0,83 \cdot TSNIA \rightarrow TSNIM = 0,83 \cdot 95 \rightarrow TSNIM = 78,9 \text{ kV}$$

$$NPIM = 34,8 \text{ kV}$$

$$MP_3 = \frac{TSNIM}{NPIM} \quad MP_3 = \frac{78,9}{34,8} \quad MP_3 = 2,27 = 127\%$$

Ainda existem instalados nas redes de distribuição primárias pára-raios de SiC de projeto antigo, que apresentam níveis de proteção bem superiores aos níveis atualmente utilizados. Neste caso, o efeito dos cabos de ligação pode se tornar bastante crítico e tem de ser considerado.

De maneira a tornar desprezível o efeito dos cabos de ligação entre os pára-raios e os equipamentos protegidos, algumas empresas concessionárias vêm optando pela instalação dos pára-raios junto aos equipamentos protegidos. No caso dos transformadores, os pára-raios são instalados junto às suas buchas.

A experiência de campo tem demonstrado que a instalação de pára-raios poliméricos diretamente na carcaça dos transformadores tem reduzido bastante o efeito de queima de transformadores por descargas atmosféricas. Esse tipo de instalação torna-se confiável pelo fato de não haver risco de explosão do pára-raios, em caso de sua falha.

#### **IV.4 Referências bibliográficas:**

- /1/ Martinez, M. L. B., "Pára-raios para sistemas de Média Tensão – Características Técnicas e Aplicação a Sistemas de Potência"; Dissertação de Mestrado, EFEI, Dezembro 1992.
- /2/ Proteção contra Sobretensão Atmosférica de Redes e Equipamentos de distribuição", CERJ
- /3/ Campos, M. L. B. et alli, "Avaliação do desempenho de Pára-raios de distribuição"; Seminário Nacional de Qualificação de Materiais e Equipamentos do Setor de Energia Elétrica - SQME, 1997.
- /4/ IEC 60.099-4 "Surge Arresters - Part 4: "Metal-Oxide surge arresters without gaps for a.c. systems", 2001.