

III Aplicação de pára-raios

Neste capítulo serão apresentadas informações referentes as terminologias aplicadas aos pára-raios e a sua classificação, aspectos referentes ao princípio de funcionamento dos diferentes tipos de pára-raios, sua aplicação na proteção dos sistemas e aspectos da especificação, seleção e aplicação dos pára-raios.

III.1 Terminologia aplicada aos pára-raios

III.1.1 Tensão nominal:

A tensão nominal de um pára-raios é o valor de tensão de frequência industrial para o qual o pára-raios é projetado, sendo utilizada como um parâmetro de referência para a especificação das características de proteção e de operação dos pára-raios. Geralmente a tensão nominal é o limite para as sobretensões dinâmicas permissíveis no sistema, sendo permitido ultrapassar este valor somente nas condições estabelecidas explicitamente pelo fabricante do pára-raios considerado.

Em pára-raios com centelhadores, a tensão nominal é definida como a máxima tensão eficaz de frequência fundamental que pode ser aplicada continuamente entre os terminais de um pára-raios e para o qual esse deve operar corretamente sem modificar as suas características de operação. Com este valor de tensão aplicado a seus terminais, o pára-raios é submetido ao ensaio de ciclo de operação.

Em pára-raios de ZnO sem centelhadores, a tensão nominal consiste no valor de tensão eficaz a frequência fundamental que é aplicado aos terminais do pára-raios e para o qual o pára-raios é projetado para operar corretamente e manter a sua estabilidade térmica sob condições de sobretensão temporária durante 10 segundos, após a absorção de uma energia prévia, conforme estabelecido no ensaio de ciclo de operação.

III.1.2 Máxima tensão contínua de operação (MCOV):

Consiste no maior valor eficaz de tensão de frequência fundamental que aplicada aos terminais dos pára-raios de ZnO sem centelhadores, permite que esse opere continuamente sem alteração das suas propriedades térmicas e elétricas.

III.1.3 Corrente de referência

A corrente de referência consiste no valor de crista (em caso de assimetria o maior valor entre as duas polaridades) da componente resistiva da corrente de frequência fundamental utilizada para determinar a tensão de

referência do pára-raios. Valores típicos para a amplitude da corrente de referência estão compreendidos na faixa de 1 mA a 20 mA.

III.1.4 Tensão de referência:

A tensão de referência consiste no valor de crista da tensão de frequência fundamental dividida por $\sqrt{2}$ que é aplicada aos terminais do pára-raios quando por este flui a corrente de referência. A definição da tensão de referência é aplicada somente a pára-raios de ZnO sem centelhadores, sendo utilizado como parâmetro para a especificação das características de operação desses pára-raios.

A medição da tensão de referência é utilizada para a seleção das amostras nos ensaios de ciclo de operação, característica “tensão de frequência fundamental versus tempo” e corrente suportável de longa duração.

III.1.5 Disrupção:

Descarga disruptiva entre todos os eletrodos utilizados na montagem do centelhador série do pára-raios.

III.1.6 Tensão disruptiva:

A tensão disruptiva de um pára-raios consiste no valor de crista da tensão de ensaio, que aplicada aos terminais de um pára-raios causa a sua disrupção. A tensão disruptiva está relacionada com a frequência fundamental, impulso atmosférico e impulso de manobra, sendo aplicada somente a pára-raios com centelhadores série (SiC e ZnO com centelhadores).

- **Tensão disruptiva de frequência fundamental:**

Valor da tensão de frequência fundamental, medida como o valor de crista dividido por $\sqrt{2}$ que causa a disrupção dos centelhadores série.

- **Tensão disruptiva de impulso:**

Maior valor de tensão de impulso atingido antes da disrupção, quando aos terminais de um pára-raios com centelhadores é aplicado um impulso de tensão com forma de onda, amplitude e polaridade preestabelecidos. Este conceito é aplicável a impulsos atmosféricos e de manobra.

III.1.7 Corrente de descarga

Consiste na corrente de impulso que flui através do pára-raios, sendo caracterizada pela sua forma de onda, amplitude e polaridade.

No caso dos pára-raios com centelhadores essa corrente aparece imediatamente após a disrupção dos centelhadores série.

III.1.8 Corrente de descarga nominal do pára-raios:

Valor de crista da corrente de descarga com impulso de forma 8/20 μ s que é utilizada para classificar o pára-raios. Em pára-raios com centelhadores é com essa corrente que se inicia a corrente subsequente no ensaio de ciclo de operação.

III.1.9 Tensão residual:

Consiste no valor de crista da tensão que aparece entre os terminais de um pára-raios durante a passagem da corrente de descarga, sendo a sua amplitude função de dois fatores:

- da forma de onda e da taxa de crescimento da corrente;
- da amplitude da corrente de descarga.

No caso dos pára-raios com centelhadores, a tensão residual consiste na tensão total que é aplicada aos terminais do pára-raios após a descarga disruptiva dos centelhadores.

Em pára-raios sem centelhadores, a tensão residual serve para definir as características de proteção oferecidas pelos pára-raios. Neste caso, faz-se necessário determinar a tensão residual para impulsos de frente íngreme; para impulsos atmosféricos e para impulsos de manobra.

III.1.10 Corrente de seguimento ou corrente subsequente:

Consiste no valor de crista da corrente de frequência fundamental que flui pelos pára-raios com centelhadores após a passagem da corrente de descarga, enquanto o pára-raios está solicitado pela tensão do sistema.

III.1.11 Capacidade de absorção de energia

A capacidade de absorção de energia está relacionada com a máxima quantidade de energia que um pára-raios é capaz de absorver, para uma dada forma de onda, durante uma sobretensão temporária ou transitória e dissipá-la, mantendo a sua estabilidade térmica e sem alterações significativas em suas propriedades térmicas e elétricas.

Um fator importante que deve ser considerado quando da análise da capacidade de absorção de energia de um pára-raios é a relação entre a capacidade de absorção de energia e a corrente de descarga que flui pelo pára-raios. A capacidade de absorção de energia dos elementos de ZnO apresenta uma dependência com as características da corrente de

descarga: uma menor capacidade de absorção de energia é obtida para os elementos de ZnO quando da ocorrência de impulsos de corrente com menores durações. A análise deste comportamento será mostrada no Capítulo IV, e é fundamental para a seleção adequada dos pára-raios aplicados próximos a bancos de capacitores.

A capacidade de absorção de energia é geralmente declarada pelo fabricante em termos de kJ / kV (nominal ou da MCOV), e está associada a um impulso de corrente com forma de onda e amplitude de corrente definidas. Para a mesma forma de onda, um aumento na amplitude da corrente reduz significativamente a capacidade de absorção de energia de um pára-raios.

III.1.12 Estabilidade térmica do pára-raios

Um pára-raios é considerado termicamente estável se após o ensaio de ciclo de operação, a temperatura resultante nos resistores não-lineares que compõem o pára-raios decresce com o tempo, quando o pára-raios é energizado na tensão de operação contínua e em condições normais de operação. Essa terminologia é aplicada a pára-raios sem centelhadores.

III.2 Classificação dos pára-raios

Segundo as normas técnicas IEC e NBR, a classificação de um pára-raios é feita basicamente de acordo com a corrente de descarga nominal, o classe de serviço e as características de proteção (os dois últimos em pára-raios com centelhadores):

III.2.1 Pela corrente de descarga nominal:

Os pára-raios com e sem centelhadores podem ser classificados, de acordo com sua corrente de descarga nominal em:

- Pára-raios com centelhadores:

Pára-raios classe estação:	20 kA(1)	15 kA(1)	10 kA
Pára-raios classe de distribuição(2):	5 kA		
Pára-raios classe secundária:	2,5 kA(3)	1,5 kA	

- (1) Valores descritos somente na NBR 5287/88 /1/
- (2) A IEC define os pára-raios de 5 kA como intermediário ou distribuição, dependendo da sua série.
- (3) Valor descrito na IEC 99.1/91 /2/

Os pára-raios de 10 kA podem ser ainda classificados em dois tipos:

- **Pára-raios para serviço pesado:**

Este tipo de pára-raios deve ter capacidade para descarregar a energia armazenada nas capacitâncias entre os condutores e a terra de uma linha de transmissão correspondentes aos sistemas aos quais esses são destinados.

- **Pára-raios para serviço leve:**

Adequados para condições de utilização menos severas do que as estabelecidas para o serviço pesado. Os pára-raios para serviço leve são usualmente empregados em redes de distribuição.

- **Pára-raios sem centelhadores:**

20 kA	10 kA	5 kA	2,5 kA	1,5 kA
-------	-------	------	--------	--------

III.2.2 Pela classe de descarga de linhas de transmissão ou corrente de longa duração

Os pára-raios com centelhadores de 20 kA, 15 kA e 10 kA serviço pesado podem ser de classe 1 a 5, dependendo das características de dissipar as energias das manobras de linhas de transmissão.

As normas IEC aplicadas a pára-raios com e sem centelhadores estabelecem cinco classes de descarga de linhas de transmissão. Segundo a norma IEC 60099.4 / 2001 /3/, aplicada a pára-raios sem centelhadores, os pára-raios de 10 kA podem ser classificados como classes 1 a 3, enquanto que os pára-raios de 20 kA correspondem as classes 4 e 5.

Os pára-raios de 10 kA serviço leve com centelhadores e os pára-raios de 5 kA com ou sem centelhadores, devem ser submetidos ao ensaio de corrente suportável de longa duração, com amplitude e forma de onda definidas em norma.

III.2.3 Pela classe de alívio de sobrepressão ou corrente suportável de falta

A classe de alívio de sobrepressão (aplicável a pára-raios com espaçamentos internos de ar) ou a corrente suportável de falta (aplicável a pára-raios sem espaçamentos internos de ar) de um pára-raios está relacionada a sua capacidade de suportar correntes internas de falta de alta e baixa intensidades após uma eventual falha do pára-raios, sem que haja violenta fragmentação do invólucro ou desprendimento dos elementos de ZnO.

As normas NBR e IEC aplicadas a pára-raios com centelhadores estabelecem cinco classes de alívio de sobrepressão:

Classe de alívio de sobrepressão	Classe do pára-raios	Valor eficaz mínimo da corrente de falta (kA)
A	20 kA, 15 kA e 10 kA serviços leve e pesado	40
B	10 kA serviços leve e pesado	20
C	10 kA serviços leve e pesado	10
D	5 kA	16
E	5 kA	5

A duração mínima de circulação da corrente de falta durante o ensaio deve ser de 0,2 s para correntes de alta intensidade e 1 segundo para baixas correntes.

A IEC 60.099.4 / 2001 /3/, aplicável a pára-raios sem centelhadores, estabelece os seguintes níveis eficazes de corrente presumível de falta para os pára-raios classe estação e distribuição:

Corrente de descarga nominal	Valor eficaz da corrente de falta (kA _{ef})			Corrente de baixa intensidade
	Nominal	Correntes reduzidas		
20 kA ou 10 kA	80	50	25	600 ± 200
20 kA ou 10 kA	63	25	12	600 ± 200
20 kA ou 10 kA	50	25	12	600 ± 200
20 kA ou 10 kA	40	25	12	600 ± 200
20 kA ou 10 kA	31,5	12	6	600 ± 200
20, 10 ou 5 kA	20	12	6	600 ± 200
10 kA ou 5 kA	16	6	3	600 ± 200
10, 5, 2,5 kA ou 1,5 kA	10	6	3	600 ± 200
10, 5, 2,5 kA ou 1,5 kA	5	3	1,5	600 ± 200

A duração mínima de circulação da corrente de falta durante o ensaio deve ser de 0,2 segundos para correntes de alta intensidade e 1 segundo para baixas correntes.

A norma ANSI C62.11/93 /4/ estabelece duas classes de alívio de sobrepressão:

- Pára-raios estação: 40 e 65 kA
- Pára-raios intermediários: 16,1 kA

As normas ANSI aplicadas a pára-raios de SiC e ZnO com ou sem centelhadores classifica os pára-raios de acordo com os ensaios realizados em:

- Pára-raios tipo estação: 20 kA, 15 kA e 10 kA
- Pára-raios tipo intermediário: 10 kA e 5 kA
- Pára-raios tipo distribuição serviço pesado: 10 kA
- Pára-raios tipo distribuição serviço normal: 5 kA
- Pára-raios tipo distribuição serviço leve: 5 kA
- Pára-raios tipo secundário: 1,5 kA

III.3 Característica de proteção dos pára-raios

Para o estudo de coordenação do isolamento é necessário conhecer as características de proteção dos pára-raios, que dependem basicamente do tipo de pára-raios utilizado e devem estar abaixo dos valores normalizados.

III.3.1 Características de proteção dos pára-raios com centelhadores

No caso de pára-raios com centelhadores as características de proteção são definidas pela normas IEC e NBR, pela combinação das seguintes curvas características:

- **Tensão disruptiva de impulso atmosférico x tempo para disrupção**

Curva que relaciona a tensão disruptiva de impulso atmosférico ao tempo para disrupção, obtida a partir de ensaio de tipo para uma forma de onda e polaridade definidas, porém variando-se as amplitudes.

- **Tensão residual x corrente de descarga 8/20 μ s**

Curva que relaciona a tensão residual do pára-raios à corrente de descarga com forma de onda 8/20 μ s

- **Tensão disruptiva de impulso de manobra x tempo para disrupção(*)**.

Curva que relaciona a tensão disruptiva de impulso de manobra ao tempo para disrupção, obtida a partir de ensaio de tipo em pára-raios de 10 kA com tensões nominais superiores a 100 kV e pára-raios de 15 kA(**) e 20 kA(**).

(*) Não aplicável ao projeto de norma da NBR referente a pára-raios de ZnO com centelhadores.

(**) Utilizados somente na NBR 5287/88, aplicável a pára-raios de SiC.

O nível de proteção para impulso atmosférico é definido pelo valor máximo entre a tensão disruptiva de impulso atmosférico cortado na frente dividida por 1,15; a tensão disruptiva de impulso atmosférico normalizado; e a tensão residual à corrente de descarga nominal do pára-raios.

O nível de proteção para impulso de manobra é definido pelo valor máximo entre a tensão disruptiva de impulso de manobra e a tensão residual para uma dada corrente de descarga.

Nos pára-raios com centelhadores as características de proteção são geralmente definidas pelas características das tensões disruptivas de impulso do pára-raios.

III.3.2 Características de proteção dos pára-raios sem centelhadores

No caso dos pára-raios sem centelhadores as características de proteção são definidas pela IEC 60099-4/2001, pela combinação dos seguintes ensaios:

- Tensão residual para impulso de corrente com frente íngreme de 1 μ s;
- Curva característica "tensão residual x corrente de descarga 8/20 μ s"
- Tensão residual para impulso de manobra

Detalhes sobre os ensaios acima descritos são apresentados na Seção V.

O nível de proteção para impulso atmosférico do pára-raios é definido pelo valor máximo entre a tensão residual para impulso de corrente com frente íngreme dividida por 1,15 e o maior valor de tensão residual à corrente de descarga nominal, obtidos para as amostras de ensaio durante o ensaio de tipo.

O nível de proteção para impulso de manobra é definido como o valor máximo da tensão residual para uma amplitude de corrente especificada, obtido para as amostras de ensaio durante o ensaio de tipo.

As características de proteção dos pára-raios são apresentadas nos catálogos técnicos de diversos fabricantes. No entanto, em caso da não disponibilidade dessas informações, pode-se considerar os valores apresentados nas Tabelas III.1 a III.3 abaixo, obtidos das normas técnicas publicadas pela IEC /2-3/:

Tabela III.1 – Níveis máximos de proteção de pára-raios com centelhadores

Tensão Nominal Ur(kVef)	Forma de onda aplicada					
	Imp. Frente ingreme		Imp. atm. normalizado		Tensão residual	
	5 kA	10 kA	5 kA	10 kA	5 kA	10 kA
1,2 a 10	4,15.U _r	-----	3,60.U _r	-----	3,60.U _r	-----
10 a 120	3,85.U _r	3,20.U _r	3,33.U _r	2,80.U _r	3,33.U _r	2,80.U _r

Tabela III.2 – Níveis máximos de proteção de pára-raios sem centelhadores

Tensão Nominal Ur (kVef)	Tensão residual – Forma de onda aplicada					
	Impulso de frente rápida 1/20 µs		Impulso atmosférico 8/20 µs		Imp. de manobra 30/60 µs	
	2,5 kA	5 kA	2,5 kA	5 kA	2,5 kA	5 kA
0,175 a 2,9	3,7 a 5,0.U _r	2,7 a 4,0.U _r	3,3 a 4,5.U _r	2,4 a 3,6.U _r	-----	-----
3 a 29	4,0.U _r	2,7 a 4,0.U _r	3,6.U _r	2,4 a 3,6.U _r	-----	-----
30 a 132	4,0.U _r	2,7 a 3,7.U _r	3,6.U _r	2,4 a 3,3.U _r	-----	-----

Tabela III.3 – Níveis máximos de proteção de pára-raios sem centelhadores

Tensão Nominal Ur (kVef)	Tensão residual - Forma de onda aplicada					
	Impulso de frente rápida 1/20 µs		Impulso atmosférico 8/20 µs		Imp. de manobra 30/60 µs	
	10 kA	20 kA	10 kA	20 kA	10 kA	20 kA
3 a 29	2,6 a 4,0.U _r	-----	2,3 a 3,6.U _r	-----	2,0 a 2,9.U _r	-----
30 a 132	2,6 a 3,7.U _r	2,6 a 3,1.U _r	2,3 a 3,3.U _r	2,3 a 2,8.U _r	2,0 a 2,6.U _r	2,0 a 2,3.U _r
144 a 342	2,6 a 3,7.U _r	2,6 a 3,1.U _r	2,3 a 3,3.U _r	2,3 a 2,8.U _r	2,0 a 2,6.U _r	2,0 a 2,3.U _r
360 a 756	2,6 a 3,1.U _r	2,6 a 3,1.U _r	2,3 a 2,8.U _r	2,3 a 2,8.U _r	2,0 a 2,3.U _r	2,0 a 2,3.U _r

III.4 Princípio de operação dos pára-raios

Para que se possa entender de forma mais clara a filosofia de aplicação dos pára-raios para a proteção dos equipamentos instalados ao longo das redes de distribuição e subestações, torna-se necessário entender o princípio de funcionamento dos diferentes tipos de pára-raios atualmente existentes.

III.4.1 Princípio de operação dos pára-raios com centelhadores:

Seja um pára-raios com centelhadores conectado entre uma fase e o terra de um determinado sistema elétrico, e energizado com uma tensão alternada de frequência fundamental. Em condição de regime permanente a impedância do conjunto de centelhadores série é da ordem de centenas de Megaohms, muito maior do que a impedância dos resistores não-lineares, da ordem de dezenas de ohms (no caso pára-raios de SiC) a alguns kilohms (no caso de pára-raios de ZnO com centelhadores).

Desta forma, a tensão do sistema estará aplicada quase que em sua totalidade sobre o conjunto de centelhadores, originando uma corrente de fuga que flui através do pára-raios da ordem de dezenas de microampères a alguns miliampères, dependendo do projeto construtivo do centelhador utilizado. A curva característica "tensão disruptiva de impulso (atmosférico ou de manobra) x tempo para disrupção" desse tipo de pára-raios é apresentado na curva A da Figura III.1.

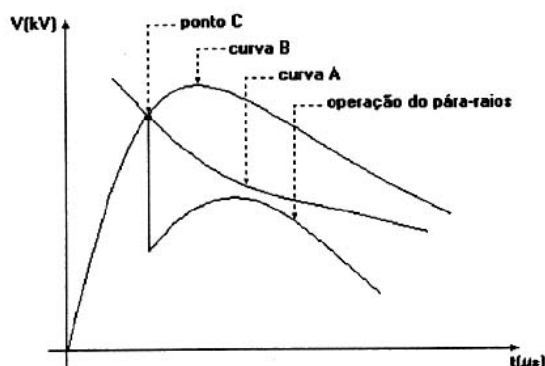


Figura III.1 –Princípio básico de funcionamento de um pára-raios com centelhadores

Ao ocorrer uma sobretensão de origem atmosférica ou de manobra no sistema (curva B da Figura III.1), caracterizada por uma forma de onda, amplitude e duração, haverá a disrupção dos centelhadores no instante em que a amplitude da

sobretensão atingir o ponto da curva característica “tensão disruptiva de impulso x tempo” do pára-raios (ponto C da Figura III.1).

Neste instante flui pelo pára-raios uma corrente de descarga, cuja amplitude depende das características do sistema e do pára-raios. Devido as características não-lineares dos blocos de SiC (ou de ZnO) a impedância dos elementos não-lineares durante a passagem da corrente de descarga é de alguns poucos ohms.

O produto da corrente de descarga que flui pelo pára-raios com a impedância dos elementos não-lineares produz uma tensão entre os terminais dos elementos. Se desprezarmos a tensão de arco dos centelhadores essa tensão, denominada **tensão residual**, estará aplicada entre os terminais do pára-raios.

Pelo fato dos centelhadores do pára-raios estarem conduzindo, uma vez terminada a sobretensão fluirá através do pára-raios uma corrente de frequência fundamental, denominada corrente subsequente. A amplitude dessa corrente depende basicamente da amplitude da tensão de frequência fundamental, da impedância dos resistores não-lineares (que tende a retornar aos valores iniciais de regime permanente) e da polaridade da sobretensão em relação ao instante da sua ocorrência sobre a onda de tensão de frequência fundamental.

O pára-raios desempenhará satisfatoriamente o ciclo de serviço acima descrito se houver a extinção do arco nos centelhadores e a conseqüente interrupção da corrente subsequente. Este processo ocorre geralmente após a primeira passagem da corrente subsequente pelo zero (no caso de pára-raios com centelhadores parcialmente ativos) e antes do zero, no caso dos centelhadores ativos, providos de bobina de sopro magnético /5/.

Em pára-raios de SiC, a amplitude da corrente subsequente está na faixa de 50 a 200 A_{cr} para os pára-raios classe distribuição e de 100 a 250 A_{cr} em pára-raios classe estação.

No caso dos pára-raios de ZnO com centelhadores, a amplitude dessa corrente é geralmente da ordem de centenas de miliâmpères a $1A_{cr}$.

Deve ressaltada a importância da não-linearidade dos elementos na característica "tensão x corrente" para o bom desempenho dos pára-raios, os quais devem apresentar:

- uma impedância elevada em condições de regime permanente e posteriormente a passagem do impulso de corrente, de modo a facilitar a extinção do arco nos centelhadores quando da passagem da corrente de seguimento;
- uma impedância de valor mais baixo possível, quando da passagem do impulso de corrente, de forma a permitir uma proteção adequada aos equipamentos.

O ciclo de operação desse tipo de pára-raios pode ser visualizado na Figura III.2.

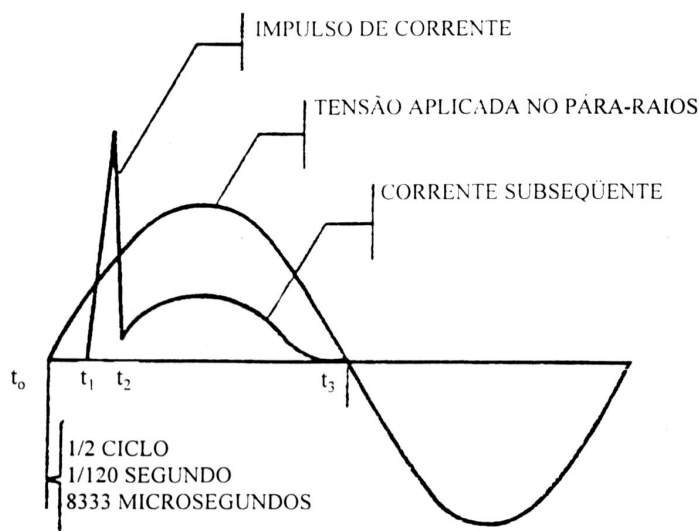


Figura III.2 – Ciclo de operação de um pára-raios com centelhadores

Em projetos de pára-raios com centelhadores, cuidados devem ser tomados com relação ao desempenho permanente e transitório desses pára-raios sob condições de ambientes poluídos, e com relação aos efeitos das capacitâncias na distribuição de tensão ao longo dos centelhadores que compõem os pára-raios. Em pára-raios aplicados a sistemas de Alta e Extra Alta Tensões, o efeito das capacitâncias parasitas também deve ser considerado /5/.

III.4.2 Princípio de operação dos pára-raios sem centelhadores:

A ausência dos centelhadores (elementos indispensáveis na montagem dos pára-raios de SiC) neste tipo de pára-raios deve-se a elevada não-linearidade na característica “tensão versus corrente” dos elementos de ZnO, associadas a sua estabilidade térmica e a sua elevada capacidade de absorção de energia para sobretensões temporárias e transitórias. A não utilização dos centelhadores torna os projetos de pára-raios de ZnO mais simplificados, além de oferecer muitas vantagens em suas características de proteção e de operação.

No entanto, pelo fato de não possuírem centelhadores os pára-raios de ZnO além de estarem permanentemente submetidos a tensão fase-terra de operação dos sistemas e a condições climáticas algumas vezes bastante adversas, podem ser eventualmente solicitados por sobretensões temporárias ou transitórias que impõe aos pára-raios uma quantidade de energia que deve ser dissipada para o meio externo, afim de garantir a estabilidade térmica do pára-raios.

Portanto, cuidados devem ser tomados quando da seleção do tipo e das características dos pára-raios, em função das reais necessidades dos sistemas.

A característica "tensão x corrente" típica de um elemento de ZnO é apresentada na Figura III.3.

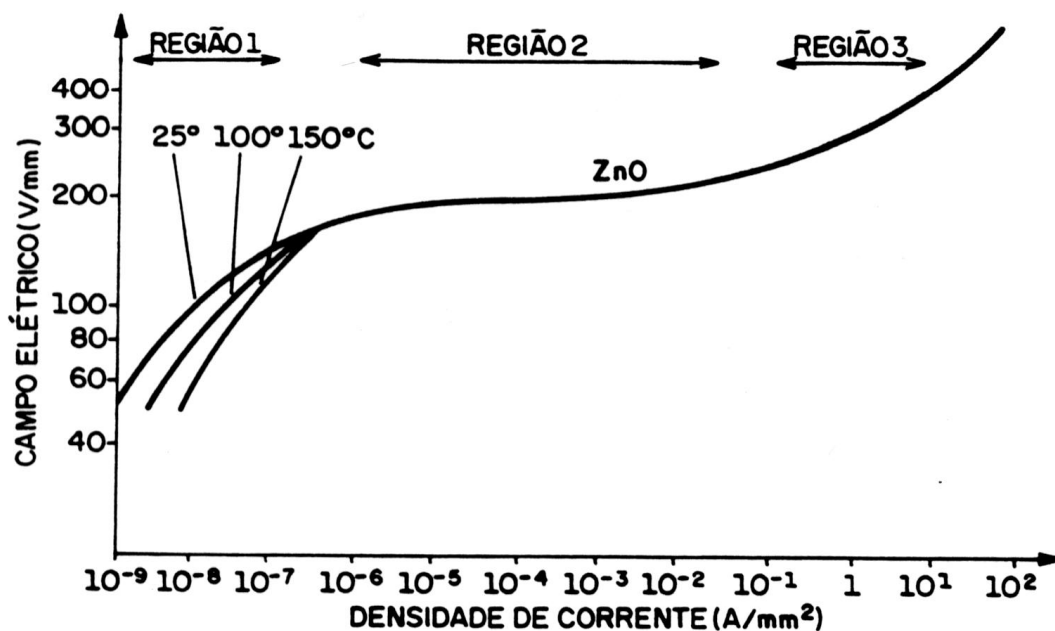


Figura III.3 – Característica “tensão x corrente” dos elementos de ZnO

É possível verificar da figura a existência de três regiões bem distintas:

- A região de baixas tensões aplicadas, correspondente a região de operação dos pára-raios em condições de regime permanente;
- A região altamente não-linear de tensões intermediárias, onde pequenas variações na tensão acarretam em grandes variações na corrente. Para esta região verifica-se uma pequena dependência da temperatura;
- Região de altas correntes, onde há a predominância dos grãos de ZnO.

A despeito das descargas atmosféricas e das solicitações de manobra, onde os pára-raios atuam como equipamentos limitadores, é esperado que os pára-raios de ZnO apresentem uma propriedade isolante em condições de regime permanente. Esta propriedade é essencial para a extensão da vida útil dos pára-raios e para a operação confiável de um sistema de potência.

O princípio básico de operação de um pára-raios de Óxido de Zinco (ZnO) pode ser entendido a partir do circuito elétrico equivalente simplificado para um elemento de ZnO, apresentado na Figura III.4.

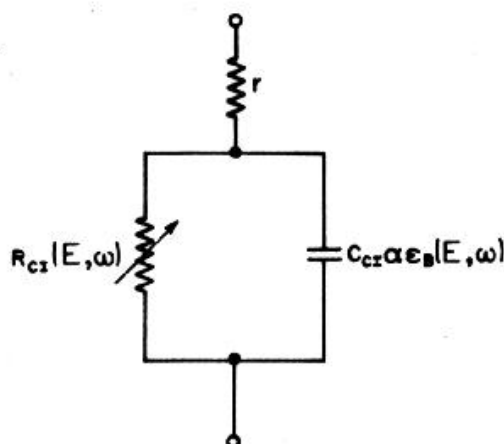


Figura III.4 - Circuito equivalente simplificado para um elemento de ZnO

Nesta figura r representa a resistência dos grãos de ZnO, R_{CI} a resistência não-linear da região intergranular e C_{CI} a capacitância formada pelos grãos de ZnO separados pela região intergranular. Os valores de R_{CI} e C_{CI} são dependentes do campo elétrico, da frequência e da temperatura.

Seja um pára-raios de ZnO sem centelhadores conectado entre uma fase e o terra de um sistema elétrico e energizado com uma tensão alternada de frequência fundamental. Em condições de regime permanente a relação entre a resistividade do material que compõe a região intergranular e a resistividade dos grãos de ZnO é da ordem de $10^{10} \Omega \cdot \text{cm}$.

Desta forma, durante a operação em regime permanente a tensão aplicada ao pára-raios é distribuída sobre as regiões intergranulares e os elementos de ZnO apresentam uma impedância extremamente elevada da ordem de Megohms, originando uma corrente de fuga contínua da faixa de microampères.

A corrente de fuga total que flui internamente pelos pára-raios de ZnO possui duas componentes: a componente capacitiva, predominante na tensão de operação do pára-raios e com forma de onda senoidal, sendo pouco influenciada pelo efeito da temperatura; e a componente resistiva, responsável pelas perdas no pára-raios, caracterizada por apresentar distorções harmônicas face às características não lineares das regiões intergranulares e cuja resistividade é variável e fortemente dependente do campo elétrico aplicado, da temperatura e da frequência.

A corrente de fuga total que flui pelo pára-raios para uma dada tensão aplicada será, portanto, o somatório das componentes capacitiva e resistiva, tomadas instantaneamente. Uma vez que esta corrente apresenta características não senoidais, pode-se utilizar a Série de Fourier para a determinação de suas componentes e do conteúdo de harmônicos presentes.

Aplicando-se a Série de Fourier aos pára-raios, tem-se:

$$i(t) = \frac{I_0}{2} + A_1 \cdot \text{sen}(wt) + B_1 \cdot \text{cos}(wt) + A_3 \cdot \text{sen}(3wt) + B_3 \cdot \text{cos}(3wt) + \dots + A_n \cdot \text{sen}(nwt) + B_n \cdot \text{Cos}(nwt)$$

onde $i(t)$ corresponde a corrente de fuga total que flui pelo pára-raios.

Assumindo-se que a corrente de fuga que flui pelo pára-raios apresenta uma característica tal que as formas de onda dos ciclos positivos e negativos sejam simétricas, o termo " $I_0/2$ " será nulo e a série de Fourier dessa função conterá somente harmônicos ímpares.

Considerando-se a tensão com forma de onda $v(t) = V_m \cdot \text{sen}(wt)$, os termos em seno correspondem a componente resistiva da corrente, enquanto que a componente capacitiva é definida pelos termos em coseno. Assim as componentes resistiva e capacitiva da corrente apresentam as seguintes características:

$$i_{\text{RES}}(t) = A_1 \cdot \text{sen}(wt) + A_3 \cdot \text{sen}(3wt) + A_5 \cdot \text{sen}(5wt) + \dots + A_n \cdot \text{sen}(nwt)$$

$$i_{\text{CAP}}(t) = B_1 \cdot \text{cos}(wt) + B_3 \cdot \text{cos}(3wt) + B_5 \cdot \text{cos}(5wt) + \dots + B_n \cdot \text{cos}(nwt)$$

Os termos $A_1 \cdot \text{sen}(wt)$ e $B_1 \cdot \text{cos}(wt)$ constituem a componente fundamental da corrente total (também denominada de 1º harmônico), enquanto que $A_n \cdot \text{sen}(nwt)$ e $B_n \cdot \text{cos}(nwt)$ constituem o n-ésimo termo e correspondem ao n-ésimo múltiplo inteiro da frequência fundamental.

A característica típica da corrente total que flui pelo pára-raios de ZnO quando da aplicação da máxima tensão de operação contínua do pára-raios é apresentada na Figura III.5 /6/. Na figura, a componente resistiva da corrente corresponde a amplitude da corrente no instante em que a tensão atinge a sua amplitude máxima.

Pára-raios novos geralmente apresentam, para a tensão operativa do sistema, uma componente resistiva com amplitude da ordem de 10% a 20% da corrente total, dependendo das características dos elementos de ZnO.

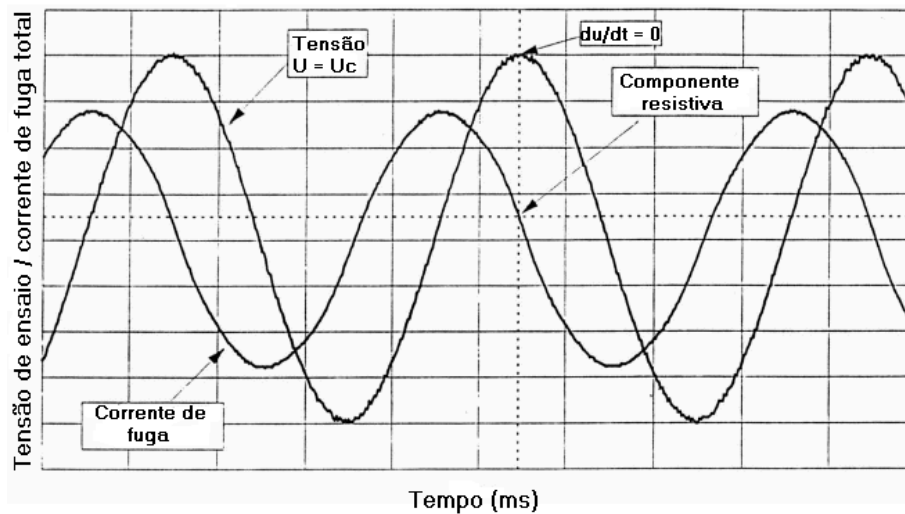


Figura III.5 – Corrente total dos pára-raios

Um exemplo da variação da componente resistiva da corrente e da corrente total com o campo elétrico aplicado e a temperatura é apresentado na Figura III.6, para um dado tipo de elemento de ZnO.

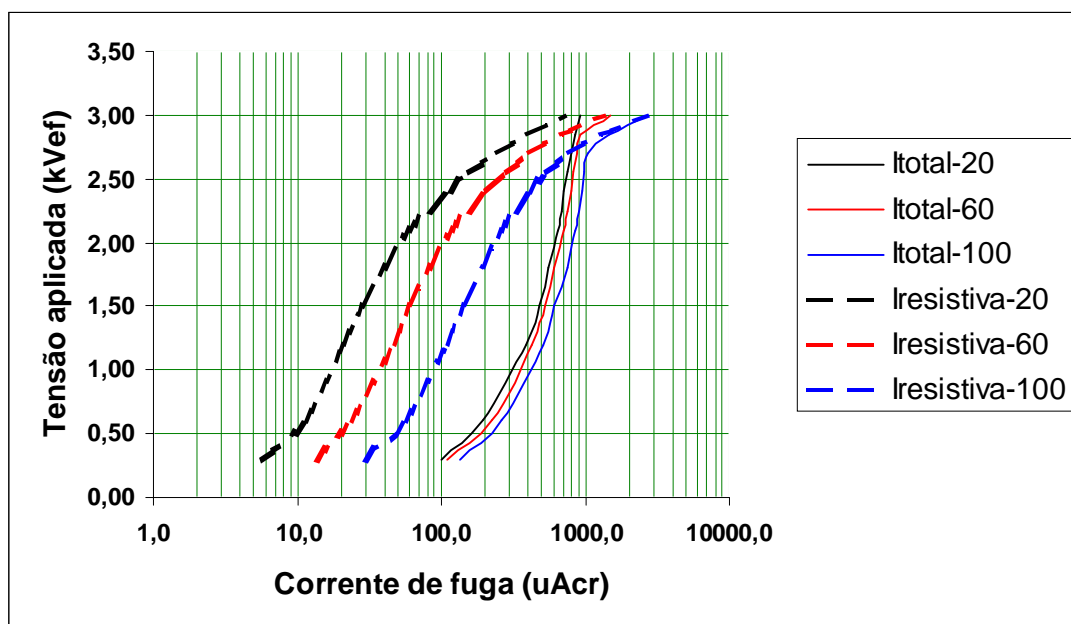


Figura III.6 - Variação da componente resistiva da corrente com o campo elétrico e a temperatura

Verifica-se na figura uma forte dependência da temperatura e do campo elétrico sobre a componente resistiva da corrente na região de operação do pára-raios (no exemplo, para tensões de 2,0 a 2,5 kV).

Para pequenos valores de tensões aplicados até as proximidades da máxima tensão contínua de operação observa-se uma característica aproximadamente linear para os elementos de ZnO, com uma variação da componente resistiva da corrente aproximadamente constante em relação a corrente total, ou seja, a resistividade da camada entre grãos se mantém aproximadamente constante. Para tensões acima deste valor, observa-se um aumento da componente resistiva da corrente em relação a corrente total, fato que pode ser entendido pela redução da resistividade das camadas entre grãos com o aumento do campo elétrico. O aumento da componente resistiva da corrente em relação a corrente total pode ser bem visualizado para tensões próximas a tensão de referência dos elementos de ZnO, onde há uma predominância da componente resistiva para a corrente total, devido a uma redução significativa da resistividade das camadas entre grãos.

Com relação a temperatura, observa-se o efeito do coeficiente de temperatura negativo para a resistência. Um aumento de temperatura através dos elementos de ZnO acarreta em um aumento na componente resistiva da corrente que circula através desses elementos. A variação da componente resistiva da corrente com a temperatura para um elemento de ZnO, quando da aplicação da máxima tensão contínua de operação, pode ser melhor visualizada na Figura III.7.

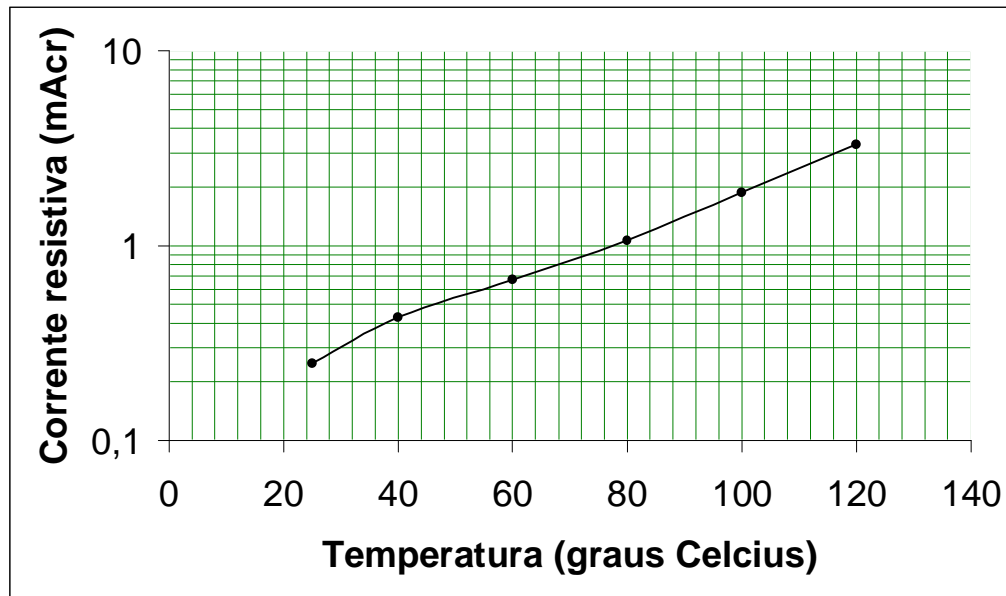


Figura III.7 –Variação da componente resistiva da corrente com a temperatura, para um elemento de ZnO diâmetro de 75 mm

Observa-se da figura uma variação exponencial da componente resistiva da corrente com a temperatura.

O comportamento da componente resistiva da corrente em função da temperatura é de fundamental importância para a avaliação e o diagnóstico corretos dos pára-raios instalados nos sistemas. O aumento da corrente resistiva que flui pelos pára-raios, para uma dada solicitação de tensão, acarreta em um aumento das perdas, reduzindo a capacidade de absorção de energia dos pára-raios, fato que pode conduzir à sua instabilidade térmica (incapacidade de dissipar uma determinada quantidade de energia proveniente de uma sobretensão temporária ou transitória), que leva a falha completa do pára-raios.

De forma a se detectar pára-raios degradados ou em fase de início de degradação, empresas concessionárias de energia elétrica e grandes consumidores industriais têm estabelecido procedimentos para medições periódicas da componente resistiva da corrente de fuga ou de seus componentes harmônicos, associado a um diagnóstico confiável das informações obtidas em campo. Estes procedimentos possibilitam, em muitas das vezes, a detecção de pára-raios envelhecidos e a retirada programada desses pára-raios de serviço antes da ocorrência da falha.

Quando da ocorrência de uma sobretensão de origem atmosférica ou de manobra caracterizada por uma forma de onda, amplitude e duração, haverá a condução do pára-raios no instante em que a amplitude da sobretensão atingir o ponto da curva característica "tensão residual x corrente de descarga".

Nesse instante, a resistência das regiões intergranulares se reduz abruptamente a valores da ordem de alguns poucos ohms, fluindo uma corrente de descarga cuja amplitude é função basicamente das características do sistema e do pára-raios.

A tensão residual que aparece nos terminais do pára-raios consiste no produto da corrente de descarga pela impedância dos elementos de ZnO.

Uma vez terminada a sobretensão, os terminais dos pára-raios ficarão novamente submetidos a tensão do sistema. Com a redução da tensão aplicada sobre os terminais dos pára-raios os elementos de ZnO retornam imediatamente a uma condição de elevada impedância.

No entanto, para que este tipo de pára-raios desempenhe satisfatoriamente o seu ciclo de serviço é necessário que os elementos de ZnO utilizados na montagem dos pára-raios sejam capazes de dissipar as energias absorvidas durante as sobretensões temporárias e transitórias e manter-se termicamente estáveis, quando da aplicação de tensão alternada de frequência fundamental, posteriormente a ocorrência da sobretensão. Diz-se que um pára-raios de ZnO é termicamente estável se após um ciclo de operação, responsável pela elevação de temperatura do pára-raios, a temperatura dos elementos de ZnO decresce com o tempo, quando o pára-raios é energizado a uma tensão contínua de operação especificada e para uma dada condição de temperatura.

Conforme descrito anteriormente, os pára-raios de ZnO estarão submetidos permanentemente a uma tensão de serviço fase-terra, além de eventuais solicitações devido às sobretensões temporárias e aos surtos atmosféricos ou de manobra. Tais solicitações podem provocar uma degradação progressiva na estrutura físico-química dos elementos de ZnO, que pode vir a afetar a sua estabilidade térmica. Portanto, a estabilidade térmica consiste em um ponto de especial atenção nos projetos de pára-raios sem centelhadores.

Existe uma temperatura crítica, que depende do projeto do pára-raios, da temperatura ambiente, das características térmicas do invólucro e da tensão aplicada, acima da qual os elementos de ZnO apresentam dificuldades de dissipar o calor gerado por efeito Joule. Ao absorver uma quantidade de energia elevada a temperatura dos elementos de ZnO aumenta rapidamente, com uma redução na sua resistência (decorrente do efeito do coeficiente de temperatura negativo para a resistência). Verifica-se então um aumento da componente resistiva da corrente de fuga com o aumento da temperatura pelos elementos de ZnO. Se o calor gerado pelos elementos de ZnO exceder a capacidade de dissipação de calor do pára-raios, ocorrerá uma avalanche térmica, resultado de uma realimentação positiva dada por: aumento de temperatura → aumento da componente resistiva da corrente → aumento do calor gerado → aumento da temperatura.

A compreensão do comportamento dos pára-raios de ZnO quanto a estabilidade térmica e o efeito de degradação físico-química dos elementos não-lineares de ZnO é feita com base na Figura III.8.

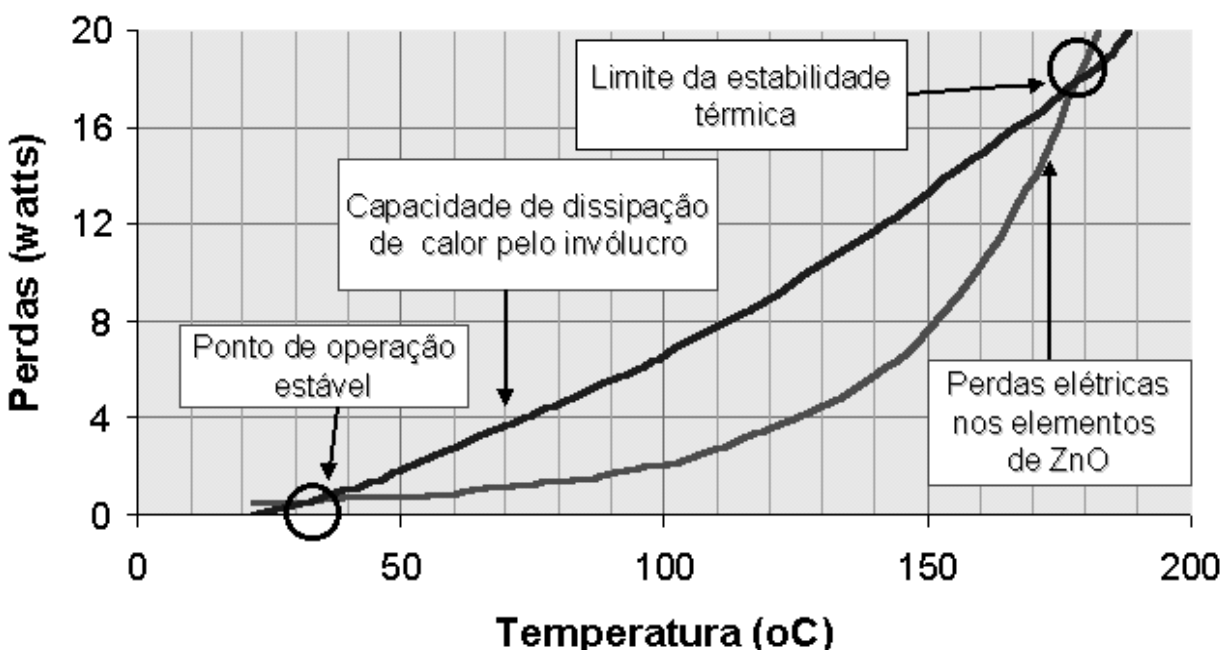


Figura III.8 – Características potência consumida por um elemento de ZnO e potência dissipada pelo invólucro

Como pode ser observado na figura, existem dois pontos de interseção entre as curvas de perdas elétricas nos elementos de ZnO e a capacidade de dissipação de calor pelo invólucro: o ponto de operação a baixa temperatura, denominado ponto de operação estável; e o limite de estabilidade, denominado ponto de limiar da estabilidade. Em ambos os pontos há a condição de equilíbrio térmico, ou seja, a potência gerada nos elementos de ZnO é igual a potência dissipada para o meio externo. Porém este equilíbrio é estável somente no ponto de operação estável.

Se a potência gerada pelos elementos de ZnO exceder a capacidade de dissipação de potência pelo invólucro haverá um excesso de energia sobre os elementos de ZnO com o aumento progressivo da temperatura, causando a instabilidade térmica e a danificação do pára-raios, se a temperatura estiver acima do limite de estabilidade. Se a temperatura estiver abaixo do ponto de operação, haverá uma tendência de sua elevação até o ponto de operação. Por outro lado, se a potência dissipada pelo invólucro exceder a potência gerada pelos elementos, a temperatura através do elemento de ZnO diminuirá com o tempo, tendendo a atingir a temperatura correspondente ao ponto de operação.

Para assegurar a estabilidade térmica estando o pára-raios de ZnO operando no seu ponto de operação (ponto de equilíbrio estável), a elevação de temperatura dos elementos de ZnO, após uma solicitação temporária ou transitória (correspondente a uma sobretensão atmosférica ou de manobra), deverá ser inferior a variação de temperatura entre os pontos de operação e de limite de estabilidade. Este conceito está diretamente relacionado a capacidade de absorção de energia do pára-raios.

A degradação físico-química acarreta em um aumento da potência gerada pelos elementos de ZnO para uma determinada condição de tensão e temperatura. Como consequência, há um deslocamento na curva de potência gerada pelos elementos de ZnO, estabelecendo-se novos pontos de operação e de limiar de estabilidade. Este deslocamento da curva, provoca uma redução na máxima elevação de temperatura permitida para assegurar a estabilidade térmica do pára-raios.

Comparando os princípios de funcionamento dos pára-raios com e sem centelhadores, pode-se verificar uma série de vantagens para os pára-raios sem centelhadores, entre os quais destacam-se:

- A simplicidade da construção, devido a ausência dos centelhadores, que aumenta a confiabilidade dos pára-raios;
- Características de proteção bem definidas devido a ausência dos centelhadores;
- Ausência de tensões disruptivas, eliminando os efeitos bruscos sobre os enrolamentos de transformadores e reatores;
- Ausência de correntes subsequentes;

- Melhor desempenho sob contaminação, proveniente de uma melhor distribuição de tensão ao longo do pára-raios;
- Maior capacidade de absorção de energia, com a possibilidade da utilização de pára-raios em paralelo;
- Os pára-raios de ZnO entram e saem de condução suavemente.

III.5 Critérios para seleção e aplicação dos pára-raios na proteção dos sistemas elétricos

Como já descrito anteriormente, os pára-raios ao serem instalados nos sistemas elétricos tem por finalidade proteger os equipamentos dos sistemas contra sobretensões atmosféricas ou de manobra. Quando aplicados na proteção de redes de distribuição ou linhas de transmissão, a função principal é a proteção contra descargas atmosféricas.

Vários aspectos devem ser considerados para a proteção dos equipamentos, entre os quais as características de proteção dos pára-raios (seção III.3 – Capítulo III), e o nível de suportabilidade dos equipamentos a serem protegidos (seção I.2 – Capítulo I). Apesar da proteção coordenada ser importante para toda a subestação, esta proteção é mais importante para os transformadores, devido ao seu custo e a complexidade do seu isolamento interno.

A seguir são apresentados os passos a serem seguidos para um estudo de seleção e aplicação dos pára-raios visando a coordenação do isolamento pelo método determinístico.

- (1) Determinar a máxima tensão eficaz fase-terra a frequência fundamental, a ser considerada no ponto de instalação do pára-raios:**
Esse parâmetro servirá como referência e corresponde a 1,0 pu.

- (2) Seleção da tensão nominal do pára-raios:**

O critério de seleção da tensão nominal do pára-raios dependerá do tipo de pára-raios utilizado:

A aplicação dos pára-raios com centelhadores requer a garantia de que em caso da ocorrência de uma sobretensão temporária no sistema, não irá ocorrer a interrupção dos centelhadores série evitando, desta forma, a absorção de uma energia que o pára-raios não possui condições de dissipar e que resultaria em sua falha.

Neste caso, para se evitar a falha do pára-raios devido a uma sobretensão temporária, a seleção da tensão nominal do pára-raios (U_n) deve ser igual ou superior a máxima sobretensão temporária no ponto de aplicação do pára-raios.

No caso da aplicação de pára-raios sem centelhadores, a escolha da tensão nominal será baseada em duas condições, descritas a seguir:

- (a) Os pára-raios sem centelhadores apresentam um valor limite de tensão eficaz de frequência fundamental que pode ser aplicado continuamente entre os seus terminais sem alterações no seu desempenho elétrico. Este valor de tensão é definido como a **Máxima Tensão Contínua de Operação (MCOV)** do pára-raios.
- (b) Devido a elevada capacidade de absorção de energia dos elementos de ZnO é possível que esses elementos absorvam, por um determinado tempo, uma quantidade de energia proveniente de sobretensões temporárias, e tenha condições de dissipá-la sem afetar as suas características de operação e de proteção. Essa característica do pára-raios é definida pela curva **“Tensão de frequência fundamental x tempo”** (**TOV_{PR}**) e depende basicamente das características dos elementos de ZnO utilizados.

Desta forma, quando da utilização de um pára-raios sem centelhadores, deve-se garantir que:

- **A MCOV do pára-raios seja igual ou superior à máxima tensão operativa do sistema no ponto de aplicação do pára-raios** e que,
- Quando da ocorrência de uma sobretensão temporária, a **característica tensão de frequência fundamental versus tempo do pára-raios deve exceder a característica amplitude da sobretensão temporária versus duração para o sistema.**

Uma curva típica “tensão de frequência fundamental versus tempo”, bem como os procedimentos para a seleção da tensão nominal de pára-raios aplicados em subestações são apresentadas no capítulo IV.

Como uma aproximação, 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. Para diferentes projetos de pára-raios este expoente varia entre 0.022 e 0.018. Valor médio considerado 0.02.

(3) Estimar a intensidade e a forma de onda da mais severa corrente de descarga do pára-raios:

Como regra geral, a corrente de descarga nominal de um pára-raios pode ser selecionada considerando-se:

- A importância e o grau de proteção desejado: os níveis de proteção determinados por correntes de maiores amplitudes e taxas de crescimento aumentam com a confiabilidade da proteção;
- Número de linhas conectadas quando da operação do pára-raios: devido a reflexões de ondas trafegantes, a corrente de descarga do pára-raios depende da impedância de surto de linhas e cabos conectados em paralelo;
- O nível de isolamento da linha: as correntes de descarga atmosférica prospectivas aumentam quando as linhas são providas de um maior nível de isolamento (postes de madeira totalmente isolados), a menos que a descarga ocorra tão próxima ao pára-raios que a impedância e o isolamento da linha não possam influenciar o surto;
- A probabilidade de ocorrência das descargas atmosféricas de amplitude elevada: a amplitude das correntes de descarga atmosféricas varia dentro de uma ampla faixa de valores. As linhas construídas em áreas de alta densidade de descarga para a terra possuem uma maior chance de serem atingidas por correntes de amplitude elevada;
- Desempenho da linha e as condições ambientais: as correntes de descarga atmosférica e suas taxas de crescimento são funções das taxas de ocorrência das descargas de retorno e das taxas de falha de blindagem das linhas (ou taxas de interrupção quando de linhas não blindadas) que estão dentro de alguma distância limite das subestações. Taxas de falha mais altas (mais baixas) aumentam (diminuem) a provável amplitude e taxa de crescimento da corrente de descarga do pára-raios.

As correntes de coordenação apropriadas para surtos atmosféricos dependem fortemente da eficiência da blindagem da linha.

Como visto anteriormente, no caso de linhas completamente blindadas o seu desempenho frente às descargas atmosféricas é baseada nas suas taxas de falhas de blindagem e de descarga de retorno. Se a posição do(s) cabo(s) pára-raios em relação aos condutores fase é tal que a linha possa ser considerada efetivamente blindada (protegida por descargas diretas), então o número de falhas da linha devido à descargas diretas nos condutores de fase é desprezível, sendo então as descargas de retorno o mecanismo predominante de descarga sobre a isolação da linha. Em ambos os casos a amplitude da corrente de descarga do pára-raios pode ser estimada por:

$$I_{MAX} = I_C = \frac{(2,4 \cdot U_{CFO} - V_r)}{Z_0}$$

I_{MAX}	Corrente de descarga que flui pelo pára-raios, em ampères.
I_C	Corrente de coordenação do pára-raios
U_{CFO}	Tensão disruptiva crítica de polaridade negativa da linha, em volts
V_r	Tensão residual do pára-raios para impulso atmosférico (para o valor estimado da corrente de coordenação), em volts.
Z_0	Impedância de surto monofásica da linha, em ohms.

Esta relação assume que a descarga disruptiva da linha ocorra à uma distância considerável da subestação, ou que os condutores fase são atingidos sem que isso resulte em uma descarga disruptiva. De outra forma, a porção da corrente de descarga total descarregada através do pára-raios pode variar consideravelmente em função de todos os parâmetros envolvidos.

Quando a blindagem não abrange toda a extensão da linha, torna-se provável uma maior corrente de descarga nos pára-raios. Neste caso, é necessário considerar:

- (1) A densidade de descargas para terra;
- (2) A probabilidade de descargas na linha que excedem um valor determinado;
- (3) O percentual da corrente de descarga total que descarrega através do pára-raios.

Para redes de distribuição e no caso de pára-raios instalados no final de linha uma estimativa da intensidade máxima de corrente de descarga que flui pelo pára-raios pode ser determinada pela seguinte equação:

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

I_{MAX}	Corrente de descarga que flui pelo pára-raios, em ampères.
E_0	Corresponde a 1,2 vezes o nível de isolamento para impulso atmosférico da linha, em volts.
V_r	Tensão residual do pára-raios para impulso atmosférico, em volts.
Z_0	Impedância de surto da linha, em ohms.

A experiência indica que um grau de proteção satisfatório é obtido se as seguintes recomendações forem observadas.

Faixa 1 - acima de 1 kV (Seção I.2):**Pára-raios de 5 kA, 10 kA ou 20 kA**

- Em sistemas da faixa 1, nos quais as distâncias entre os pára-raios são pequenas (menos de 5 km), os pára-raios dos transformadores de distribuição projetados para uma corrente de descarga nominal de 5 kA têm se mostrado suficientemente confiáveis, mesmo quando no caso dos transformadores conectados a linhas com postes de madeira e cruzetas não aterradas.
- Em sistemas com tensões até 72,5 kV, pára-raios projetados para uma corrente de descarga nominal de 5 kA podem ser adequados em áreas com baixa densidade de descargas para a terra e quando de linhas aéreas efetivamente blindadas e com baixa impedância de pé de torre. Os pára-raios com uma corrente de descarga nominal de 10 kA são mais adequados para instalações importantes particularmente em áreas com alta densidade de descargas para a terra ou de elevada resistência de aterramento.
- Em sistemas com tensões superiores à 72,5 kV, pára-raios com corrente de descarga nominal de 10 kA são geralmente recomendados.

Faixa 2: Pára-raios de 10 kA ou 20 kA

- Para sistemas com tensões menores ou iguais a 420 kV, pára-raios com corrente de descarga nominal de 10 kA geralmente são suficientes.
- Sistemas com tensões superiores a 420 kV, podem requerer pára-raios com corrente de descarga nominal de 20 kA.

(4) Determinar a capacidade de absorção de energia dos pára-raios:

Além de suportarem as energias provenientes das sobretensões temporárias, os pára-raios de ZnO devem ser capazes de absorver as energias provenientes das sobretensões transitórias que ocorrem nos sistemas, causadas por :

- Energização ou religamento de linhas longas;
- Abertura de bancos de capacitores ou cabos, através de disjuntores que permitam o reacendimento (restrike);
- Descargas atmosféricas diretas sobre os condutores fase das linhas aéreas de transmissão ou descargas sobre as estruturas próximas às subestações ou sobre os cabos pára-raios, provocando descargas de retorno "*backflashover*" nas cadeias de isoladores.

Estudos específicos envolvendo simulações computacionais devem ser realizados, de modo a se obter as máximas energias a serem absorvidas pelos pára-raios. A partir desses estudos, é definida a capacidade mínima de absorção de energia dos pára-raios, que deve ser maior do que as energias máximas obtidas nos estudos. No caso de pára-raios aplicados a sistemas de Extra Alta Tensões deve-se avaliar principalmente as energias absorvidas devido às sobretensões de frente lentas, geralmente oriundas de manobras nos sistemas.

Em muitas das vezes, a realização de estudos computacionais mais específicos não é de fácil implementação. Neste caso, conhecidos os níveis de proteção dos pára-raios, as energias absorvidas por esses podem ser estimadas pelas equações abaixo, apresentadas no Guia de Aplicação de pára-raios – referência IEC 99.5 /7/.

(4.1) Descargas atmosféricas:

$$E_{PR} = \left[2 \cdot U_{CFO} - N \cdot U_{pl} \cdot \left(1 + \ln \left(\frac{2 \cdot U_{CFO}}{U_{pl}} \right) \right) \right] \cdot \frac{U_{pl} \cdot T_d}{Z_0}$$

- E_{PR} Energia absorvida pelo pára-raios durante a descarga atmosférica (joules);
 U_{pl} Nível de proteção para impulso atmosférico do pára-raios (V);
 U_{CFO} Tensão disruptiva crítica (polaridade negativa) do isolamento da linha (V);
 Z_0 Impedância de surto monofásica da linha (Ω);
 N Número de linhas conectadas ao pára-raios;
 T_d Duração equivalente da corrente de descarga atmosférica (em segundos), incluindo a primeira descarga e as subseqüentes. Valor típico: 300 μ s.

A equação acima é obtida da integração de uma sobretensão com decaimento exponencial.

(4.2) Energização e religamento de linhas:

$$E_{PR} = 2 \cdot U_{ps} \cdot (U_L - U_{ps}) \cdot \frac{T_d}{Z_0}$$

- U_{ps} Nível de proteção para impulso de manobra do pára-raios (V);
 U_L Amplitude da sobretensão ao longo da linha (V);
 Z_0 Impedância de surto monofásica da linha (Ω);
 T_d Tempo de transito ao longo da linha, igual ao comprimento dividido pela velocidade de propagação da onda na linha (segundos).

(4.3) Manobra de bancos de capacitores ou cabo:

Os bancos de capacitores atualmente instalados em empresas concessionárias de energia elétrica e consumidores industriais variam de poucas dezenas a várias centenas de MVAR, sendo atualmente conectados tanto em Delta como em Estrela, podendo ser neste caso em estrela aterrada ou isolada.

Apesar de que uma parcela significativa dos disjuntores atualmente instalados são livres de “restrike”, em muitos dos casos estes bancos são chaveados várias vezes ao dia, aumentando a probabilidade da obtenção de transitórios elevados resultantes dessas manobras.

Além disso, os procedimentos para a verificação do comportamento do disjuntor de “restrike-free” inclui um número limitado de aplicações e ensaios. Desta forma, a utilização de pára-raios na proteção de bancos de capacitores não somente fornece proteção ao banco em caso de ocorrência de reacendimento “restrike”, como também reduz a probabilidade de ocorrência de “restrikes” uma vez que a carga residual armazenada sobre os capacitores é reduzida.

A aplicação de pára-raios na proteção de bancos de capacitores pode ser justificada por uma série de fatores, sendo os principais descritos a seguir /8/:

- Evitar as falhas nos capacitores em caso da ocorrência de reacendimento “restrike” ou falha nos disjuntores;
- Reduzir a probabilidade da ocorrência de “restrikes” múltiplos em disjuntores;
- Prolongar a vida útil dos capacitores instalados, através da redução dos elevados valores de sobretensões resultantes dos chaveamentos dos bancos;
- Proteger os bancos de capacitores conectados às linhas contra sobretensões transitórias de origem atmosférica.

A referência /7/ apresenta a seguinte equação para a determinação da energia absorvida pelos pára-raios durante manobras de bancos de capacitores:

$$E_{PR} = \frac{1}{2} \cdot C \cdot \left[(3 \cdot V_{sis})^2 - (\sqrt{2} \cdot V_r)^2 \right]$$

C Capacitância do banco de capacitores ou do cabo (μF);

U_o Tensão de operação fase-terra, valor de crista (kV);

U_R Tensão nominal do pára-raios, valor eficaz (kV).

A equação acima considera a situação mais crítica, correspondente a ocorrência de reacendimento em disjuntores “restrike” durante a manobra do banco de capacitores.

Um fator importante que deve ser considerado quando do estudo da absorção de energia devido a manobras de bancos de capacitores, é a relação entre a capacidade de absorção de energia e a corrente de descarga que flui pelo pára-raios. De acordo com as referências /8/ e /9/, a capacidade de absorção de energia dos elementos de ZnO apresenta uma dependência com as características da corrente de descarga: uma menor capacidade de absorção de energia é obtida para os elementos de ZnO quando da ocorrência de impulsos de corrente com menores durações.

A energização de um banco de capacitores ocasiona a circulação de correntes transitórias (correntes de “inrush”) de amplitudes elevadas e de curta duração, cuja frequência depende basicamente da capacitância do banco de capacitores e das indutâncias do circuito. A amplitude e os efeitos dessas correntes podem ser reduzidos por meio da utilização de equipamentos de manobra com pré-inserção de resistores série, ou reatores em série com os bancos, ou ainda uma combinação de ambos.

Geralmente a duração das correntes de descarga que fluem pelos pára-raios resultantes das manobras de bancos de capacitores, é muito menor do que as durações das correntes transitórias obtidas durante o ensaio de descarga de linhas de transmissão, definido pela norma técnica IEC 60.099-4 / 2001 /3/. Por outro lado, a amplitude das correntes provenientes de descargas de bancos de capacitores geralmente são maiores do que a amplitude das correntes representativas de manobras de linhas de transmissão estabelecidas na IEC.

Desta forma, para se definir a capacidade de absorção de energia requerida para os pára-raios, quando da proteção de bancos de capacitores, torna-se necessário determinar, além das energias a serem absorvidas, as características das correntes de descarga que fluem pelo pára-raios, resultantes das manobras do banco de capacitores.

Uma estimativa da corrente que flui pelo pára-raios durante a manobra de um banco de capacitores conectado em estrela aterrada, é proposta na referência /9/:

$$I_A = \frac{\sqrt{(2,6 \cdot V_{sis}^2 - (V_R - 0,82 \cdot V_{sis})^2)} \cdot \sqrt{(I_F \cdot C)}}{39 \cdot \sqrt{V_{sis}}}$$

I_A	Corrente que flui pelo pára-raios (kA);
V_{sis}	Tensão nominal do sistema (kV valor eficaz fase-fase);
V_R	Tensão residual para surto de manobra do pára-raios à corrente I_A (kV);
I_F	Corrente de falta do sistema no ponto de localização do pára-raios (kA);
C	Capacitância monofásica do banco de capacitores ou do cabo (μF).

Para capacitores shunt instalados em um banco trifásico aterrado, a capacitância monofásica do banco pode ser dada por:

$$C = \frac{Q_{bc} \cdot 10^6}{3 \cdot \omega \cdot V_{sis}^2}$$

C Capacitância monofásica do banco de capacitores (μF);
 Q_{bc} Potência reativa trifásica do banco de capacitores (MVar);
 V_{sis} Tensão nominal do sistema - valor eficaz fase-terra (kV);

Uma relação entre a capacidade de absorção de energia do pára-raios em função da corrente de descarga que flui por esse é apresentada na Figura III.9 /9/. Verifica-se na figura uma redução na capacidade de absorção de energia dos pára-raios a partir de uma amplitude de corrente de descarga estabelecida, quando da aplicação de impulsos de corrente de manobra com frequências mais altas.

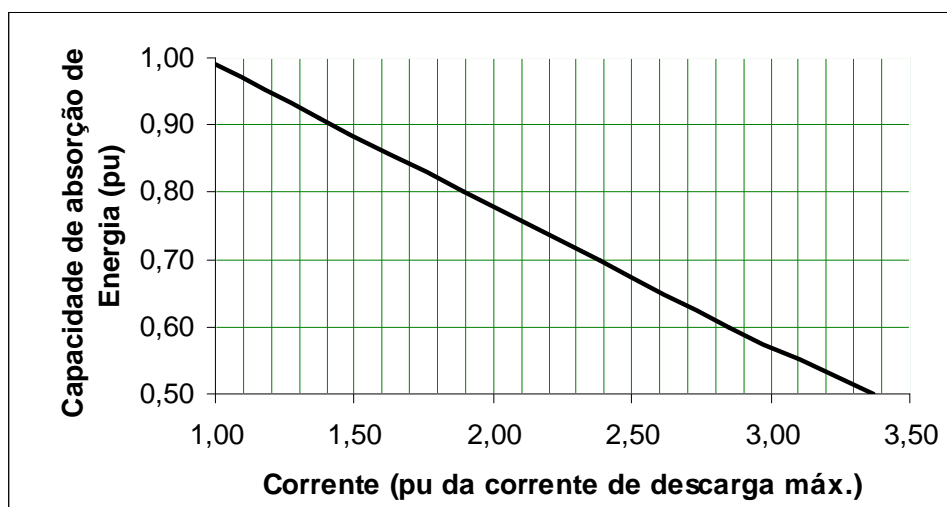


Figura III.9– Relação entre a capacidade de absorção de energia e a corrente de descarga que flui pelo pára-raios

A curva apresentada na figura é específica para um determinado fabricante /9/. É recomendável que os fabricantes apresentem informações referentes aos seus pára-raios, para uma análise mais criteriosa e precisa do comportamento dos pára-raios quando da manobra de bancos de capacitores. No entanto, na ausência dessas informações, pode-se considerar válida a aplicação da relação apresentada na figura acima.

A referência /8/ sugere considerar a capacidade de absorção de energia do pára-raios para descargas de bancos de capacitores equivalente a 80% do valor para a “energia de um impulso”, apresentado em seus catálogos técnicos.

Outro fator importante é conhecer a máxima corrente de descarga, a partir da qual poderá ocorrer uma redução na capacidade de absorção de energia do pára-raios.

Detalhes específicos quanto a determinação da capacidade de absorção de energia dos pára-raios aplicados em redes de distribuição e subestações encontram-se nos Capítulos IV e V, respectivamente.

Uma vez determinada as energias mínimas requeridas pelos pára-raios para os diferentes eventos e conhecendo-se a tensão nominal do pára-raios utilizado, é possível obter-se a energia necessária para os pára-raios, em kJ / kV da tensão nominal.

Outros casos podem resultar em grande absorção de energia pelo pára-raios como por exemplo, a utilização de fusíveis limitadores de corrente, ou quando da instalação de pára-raios com baixo nível de proteção.

As Figuras III.10 a III.12 abaixo, apresentam informações baseadas em ensaios experimentais. realizados em laboratório quanto às energias específicas absorvidas pelos pára-raios em kJ / kV nominal em função da relação entre a tensão residual do pára-raios e a sua tensão nominal /10/.

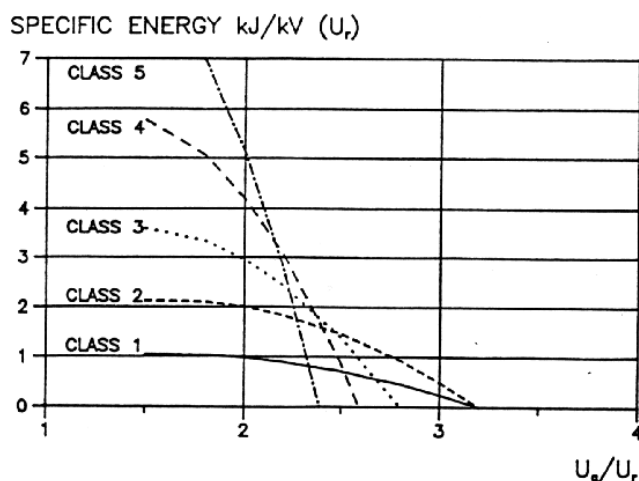


Figura III.10 Energia específica (kJ / kV nominal) em função da relação entre a tensão residual (U_a) e a tensão nominal (U_r) – Parâmetro: Descarga de linhas de transmissão

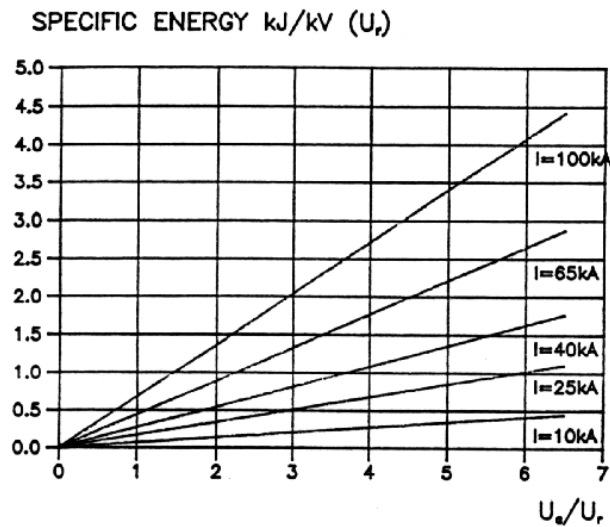


Figura III.11 Energia específica (kJ / kV nominal) em função da relação entre a tensão residual (U_a) e a tensão nominal (U_r) –
 Parâmetro: Impulso de corrente elevada 4/10 μ s. O nível de proteção válido para a amplitude da corrente considerada.

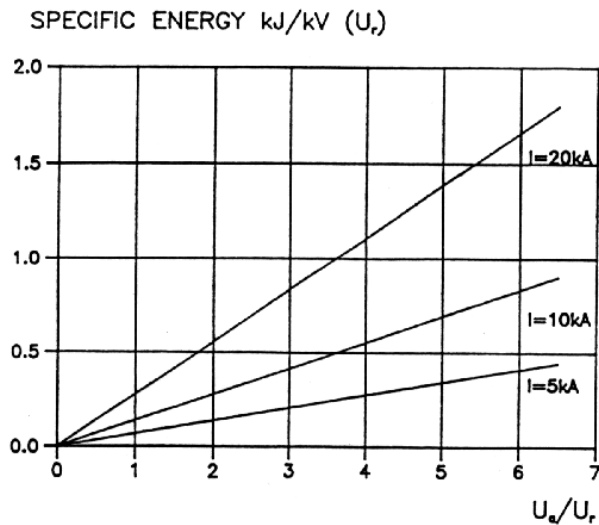


Figura III.12 Energia específica (kJ / kV nominal) em função da relação entre a tensão residual (U_a) e a tensão nominal (U_r) –
 Parâmetro: Impulso de corrente 8/20 μ s. O nível de proteção válido para a amplitude da corrente considerada.

(5) Definição da corrente suportável de falta:

De modo a evitar riscos a 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, em caso de sua eventual falha.

Em pára-raios com invólucro de porcelana ou poliméricos que apresentem espaçamentos internos de ar entre os elementos ativos e a parte interna do invólucro o dispositivo de alívio de sobrepressão deve atuar, de modo a evitar a fragmentação ou explosão do invólucro. No caso de pára-raios poliméricos sem espaçamentos internos de ar, esses devem suportar mecanicamente os esforços da corrente de curto-circuito sem liberação ou desprendimento de sua parte ativa.

No caso de uma eventual falha do pára-raios flui através desse uma corrente correspondente a corrente prospectiva de curto-circuito do sistema, que pode ser determinada por:

$$I_{FALTA} = \frac{P_{CC}(MVA)}{\sqrt{3} \cdot V_n}$$

I_{FALTA} Corrente de curto-circuito do sistema no ponto de instalação (kA_{ef});

P_{CC} Potência de curto-circuito do sistema no ponto de instalação (MVA);

V_n Tensão nominal do sistema (kV).

Conhecendo-se a corrente de curto-circuito do sistema é possível estabelecer a corrente de alívio de sobrepressão (para pára-raios de porcelana) ou a corrente suportável de falta (para pára-raios polimérico). Desta forma, os pára-raios devem ser dimensionados em função da máxima corrente de curto-circuito do sistema, no ponto de instalação do pára-raios.

(6) Condições de serviço (ambientais):

Quando da especificação de um pára-raios deve-se levar em consideração as condições ambientais em relação ao ponto de instalação do pára-raios.

Os níveis de poluição, aplicados a invólucros de porcelana, são definidos pela norma técnica IEC 60.815, de acordo com 4 níveis:

- Nível de poluição leve: distância de escoamento de 16 mm / kV_{fase-fase}
- Nível de poluição moderado: distância de escoamento de 20 mm / kV_{fase-fase}
- Nível de poluição alto: distância de escoamento de 25 mm / kV_{fase-fase}
- Nível de poluição muito alto: distância de escoamento de 31 mm / kV_{fase-fase}

O usuário deve especificar a distância mínima de escoamento em função das características da região onde os pára-raios serão instalados. Pára-raios com invólucro de porcelana apresentam geralmente distâncias de escoamento na ordem de $20 \text{ mm} / \text{kV}_{\text{fase-fase}}$, enquanto que os pára-raios com invólucro polimérico apresentam valores geralmente superiores a $25 \text{ mm} / \text{kV}_{\text{fase-fase}}$.

(7) Determinar as características de proteção do pára-raios escolhido:

Uma vez definida as características do pára-raios o próximo passo é obter os seus níveis de proteção para impulsos atmosférico e de manobra.

A característica de proteção dos pára-raios depende basicamente do tipo de pára-raios utilizado, devendo estar abaixo dos valores normalizados.

(8) Localizar o pára-raios o mais próximo possível do equipamento a ser protegido:

Os pontos de aterramento dos pára-raios e dos equipamentos devem, se possível, ser interligados eletricamente.

(9) Determinar a tensão na isolação a ser protegida, que resultará da limitação imposta ao pára-raios, levando em conta as distâncias de separação e outros fatores aplicáveis ao ponto de utilização.

No Capítulo I, foram apresentadas informações sobre os princípios básicos de coordenação do isolamento não sendo considerados, naquele momento, os efeitos dos cabos de conexão e da distância de separação entre os pára-raios e os equipamentos protegidos.

No entanto, de forma a otimizar a proteção dos equipamentos devido as sobretensões, deve-se determinar a tensão nos terminais dos equipamentos protegidos considerando os efeitos dos cabos de conexão e da distância de separação.

As correntes de descarga ao fluírem através da indutância dos cabos de ligação dos pára-raios provocam uma queda de tensão ($V_L = L \cdot di / dt$) que deve ser adicionada a tensão residual do pára-raios correspondente a amplitude da corrente de descarga. O comprimento total desses cabos é medido do ponto no qual é realizada a conexão da linha ao terminal de alta tensão do pára-raios até o ponto em que é feita a interconexão do ponto de neutro pára-raios com o terra do equipamento protegido.

Um valor de tensão usualmente utilizado é de $5,25 \text{ kV} / \text{metro de cabo de ligação}$, para uma taxa de crescimento da corrente de $4 \text{ kA} / \mu\text{s}$.

Embora as tensões nos cabos de ligação dos pára-raios desenvolvidas nos níveis de coordenação do isolamento de 10 kA e 20 kA com forma 8/20 μ s sejam aproximadamente um quarto e metade do valor de 5,25 kV / metro, respectivamente, é importante manter os comprimentos tão curtos quanto possível. O efeito do comprimento dos cabos de conexão é mais crítico em redes expostas a descargas diretas e localizadas em regiões com elevada incidência de descargas atmosféricas, onde impulsos de corrente atmosféricos podem apresentar amplitudes e taxas de crescimento bem superiores aos usualmente utilizados. Por exemplo, para uma taxa de crescimento da corrente de 10 kA/ μ s, o acréscimo de tensão devido aos efeitos de conexão será de 13 kV/m de conexão. Comprimentos excessivos dos cabos de ligação podem eliminar o fator de segurança definido para a margem de proteção para impulsos atmosféricos.

Os pára-raios de distribuição são utilizados freqüentemente para proteção de um único equipamento e, portanto, devem ser conectados tão próximo quanto possível do equipamento protegido o que reduz os efeitos da distância de separação.

Já os pára-raios classe estação apresentam geralmente uma distância de separação em relação aos equipamentos protegidos, distância esta que provoca uma tensão que deve ser adicionada a tensão residual dos pára-raios quando da determinação da tensão nos terminais dos equipamentos protegidos. Como regra geral, a tensão no equipamento protegido é maior que a tensão residual do pára-raios. Por conseguinte, é sempre recomendável a redução da distância de separação entre o pára-raios e o equipamento protegido a um valor mínimo possível.

Detalhes quanto aos procedimentos para a determinação do efeito da distância de separação são apresentados no Capítulo IV.

(9). Determinar as tensões suportáveis nominais de impulso da isolação a ser protegida (seção I.2 – Capítulo I).

(10). Verificar se as margens de proteção estão adequadas:

A margem de proteção para surtos atmosféricos ou de manobra é definida como a diferença entre o nível mínimo de suportabilidade do equipamento e o nível máximo de proteção do pára-raios para as sobretensões acima, acrescidos dos efeitos dos cabos de conexão e da distância de separação, quando necessário.

Quanto maior for a margem de proteção, menores riscos de danos por sobretensões terão os equipamentos protegidos.

A proteção adequada de um equipamento pode ser realizada com base em comparações de pontos distintos da curva “tensão x tempo”.

Existem três relações de proteção em uso que comparam os níveis de proteção com os níveis de suportabilidade correspondentes, conforme apresentado na seção I.3.2, adicionando-se os efeitos dos cabos de conexão e da distância de separação.

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

TSIACF	Tensão suportável de impulso atmosférico cortado na frente
NPFO	Nível de proteção do pára-raios para frente de onda
ΔV	Tensão a ser adicionada ao nível de proteção do pára-raios devido aos efeitos dos cabos de conexão e da distância de separação entre o pára-raios e o equipamento protegido.

Para isolamento em óleo, em ar e sólidos de origem inorgânica a tensão suportável de impulso atmosférico cortado na frente pode ser considerada como sendo igual a 1,15 vezes a tensão suportável nominal de impulso atmosférico. Para isolamento sólido de origem orgânica a tensão suportável de impulso atmosférico cortado é considerada como sendo igual a tensão suportável nominal de impulso atmosférico.

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

TSNIA	Tensão suportável nominal de impulso atmosférico
NPIA	Nível de proteção do pára-raios para impulso atmosférico
ΔV	Tensão a ser adicionada ao nível de proteção do pára-raios devido aos efeitos dos cabos de conexão e da distância de separação entre o pára-raios e o equipamento protegido.

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

TSNIM	Tensão suportável nominal de impulso de manobra
NPIM	Nível de proteção do pára-raios para impulso de manobra

Equipamentos aplicados em sistemas de Alta e Extra Alta tensões apresentam as características de suportabilidade para surtos de manobra definidas (Tabela A.3 – Seção I.2 – Capítulo I).

Já no caso dos equipamentos aplicados a sistemas de distribuição e de transmissão com máximas tensões operativas até 245 kV (Tabela A.2 – Seção I.2 – Capítulo I), não se dispõe geralmente das informações referentes a suportabilidade a surtos de manobra. Neste caso, considera-se a suportabilidade para surtos de manobra como sendo equivalente a 83% da tensão suportável nominal de impulso atmosférico.

Como regra geral, as margens de proteção MP1 e MP2 devem ser no mínimo de 20%. Todavia, na prática, tem-se observado a existência de sistemas de proteção com margens de proteção (MP) muito acima de 20%. Quando os pára-raios são conectados diretamente ao equipamento protegido os efeitos de separação e dos cabos de conexão são minimizados. Neste caso, a margem de proteção MP1 usualmente pode ser desprezada.

III.6 Referências bibliográficas

- /1/ NBR 5287, "Pára-raios de resistor não-linear a Carboneto de Silício (SiC) para circuitos de potência de corrente alternada – Especificação", 1988.
- /2/ IEC 99-1 "Surge Arresters - Part 1: "Non-linear resistor type gapped surge arresters for a.c. systems", 1991.
- /3/ IEC 60099-4 "Surge Arresters - Part 4: "Metal-Oxide surge arresters without gaps for a.c. systems", 2001.
- /4/ ANSI C62.11, "IEEE Standard for Metal-Oxide surge arresters for AC power circuits", 1993.
- /5/ Martinez, M.L. B., "Pára-raios Convencionais a Carboneto de Silício", Seminário Técnico - Técnicas e Critérios de Monitoramento de Pára-raios de SiC e ZnO em Subestações e Avaliação dos Resultados, Rio de Janeiro, 29 e 30 de Abril de 2002.
- /6/ Draft IEC 37/195/CDV, "Surge Arresters – Section 6: Diagnostic indicators of metal-oxide surge arresters in service", Amendment 1 to IEC 99-5, 1998
- /7/ IEC 99-5, "Surge arresters – Part 5: Selection and application recommendations", First Edition, 1996.
- /8/ ABB Technical information "Guidelines for Selection of surge Arresters for Shunt Capacitor Banks".
- /9/ Ohio Brass Co., "Application Guide – DynaVar Metal-Oxide Surge Arresters", Bulletin EU-HR 10/90.
- /10/ Strenstron L., "Proposal for a test procedure to determine the arrester energy capability as function of the duration of current flow", SC33-92 (WG11) IWD.
- /11/ Dájuz, Ary. Et alii, "Equipamentos Elétricos – Especificação e Aplicação em Subestações de Alta Tensão", Furnas Centrais Elétricas, Universidade Federal Fluminense / EDUFF, 1985
- /12/ CEPEL / ELETROBRÁS, "Curso sobre Pára-raios de Distribuição, Estação e Linhas de Transmissão – CPAR", Outubro 1977.

- /13/ 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.
- /14/ De Franco, J. L., "Curso sobre pára-raios", CEPEL, Novembro 1986.
- /15/ ANSI IEEE Std C62.22, "IEEE Guide for the Application of Metal-Oxide surge Arresters for Alternating-Current Systems", 1991.