

IT 002 – SOBRETENSÕES EM SISTEMAS ELÉTRICOS DE POTENCIA.

PARA RAIOS

Aplicação em redes de distribuição, subestações e linhas de transmissão



INTERNATIONAL STANDARD

NORME INTERNATIONALE

Surge arresters –
Part 4: Metal-oxide surge arresters without gaps for a.c. systems

Parafoudres –
Partie 4: Parafoudres à oxyde métallique sans éclateurs pour réseaux à courant alternatif

INTERNATIONAL STANDARD

NORME INTERNATIONALE



Surge arresters –
Part 4: Metal-oxide surge arresters without gaps for a.c. systems

Parafoudres –
Partie 4: Parafoudres à oxyde métallique sans éclateur pour réseaux à courant alternatif

INTERNATIONAL
ELECTROTECHNICAL
COMMISSION

COMMISSION
ELECTROTECHNIQUE
INTERNATIONALE

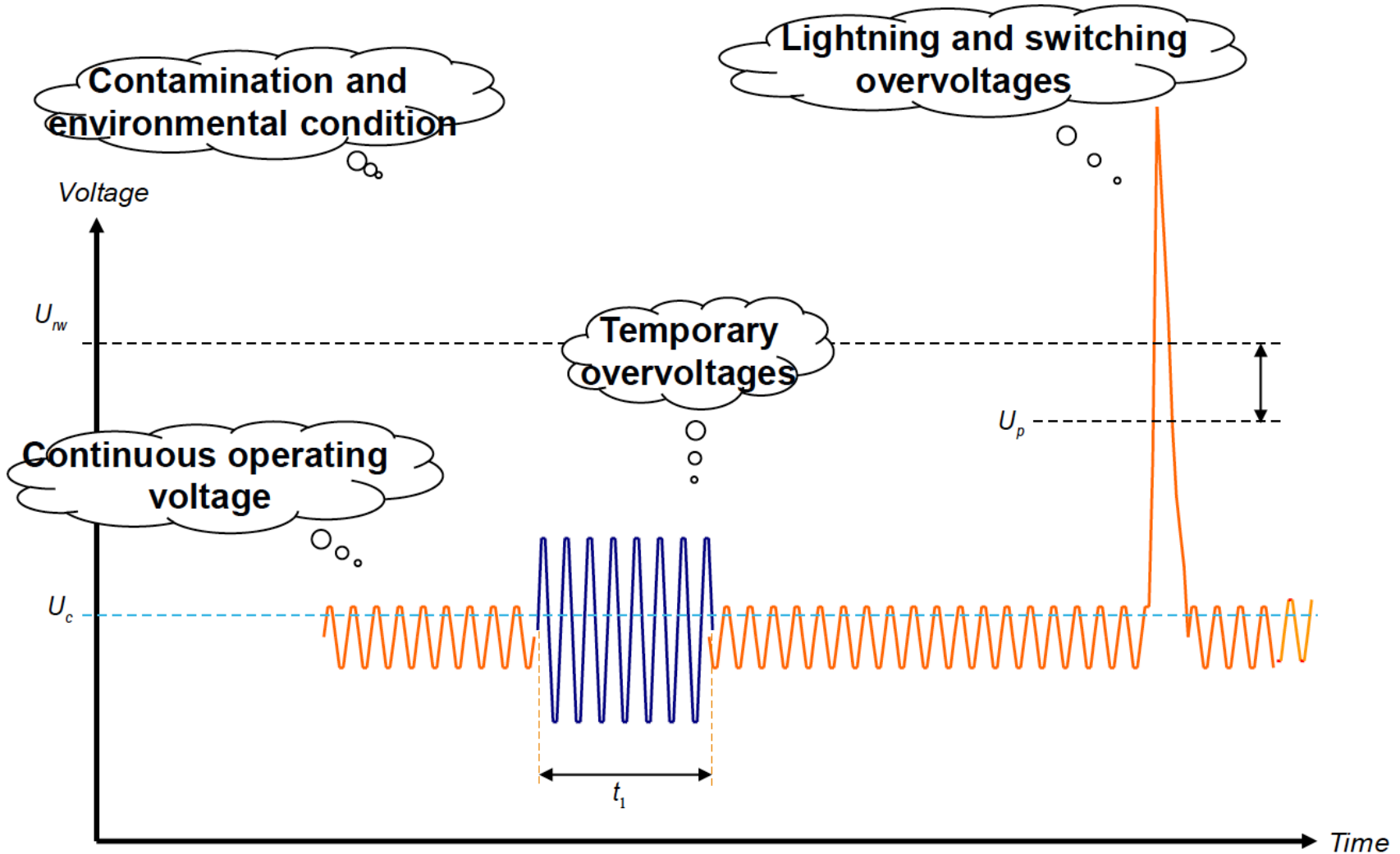
PRICE CODE **XH**
CODE PRIX

ICS 29.120.50; 29.240.10

ISBN 978-2-8322-1646-0

**Warning! Make sure that you obtained this publication from an authorized distributor.
Attention! Veuillez vous assurer que vous avez obtenu cette publication via un distributeur agréé.**

Proper selection of Surge Arresters



Natureza das sobretensões, classificação dos isolamentos, efeitos das sobretensões sobre os isolamentos e princípios básicos de coordenação do isolamento.

Natureza das sobretensões

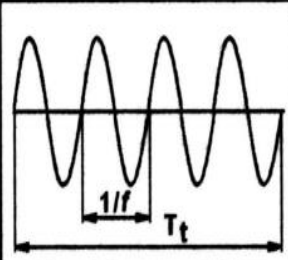
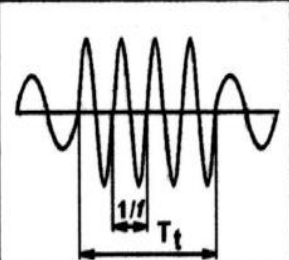
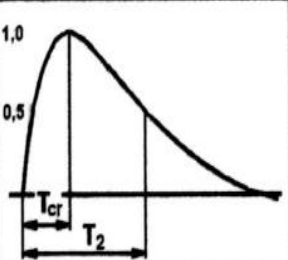
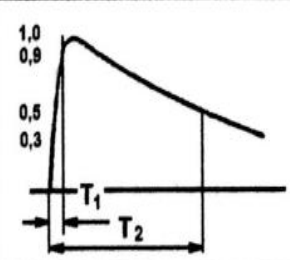
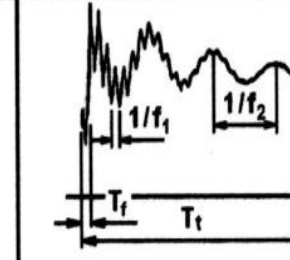
Os estudos de sobretensões nos sistemas elétricos têm adquirido uma maior importância nos últimos anos, à medida que se tem elevado os níveis de tensão dos sistemas e devido à necessidade de sistemas cada vez mais confiáveis e econômicos.

Sobretensão transitória – caracterizada por uma sobretensão de curta duração, com tempo de duração de alguns milissegundos ou menos, de natureza oscilatória ou não oscilatória, e usualmente fortemente amortecida.

De acordo com a NBR 6939, as sobretensões transitórias apresentam a seguinte classificação:

- **Sobretensões de frente lenta:** sobretensão transitória, usualmente unidirecional, com tempo até a crista tal que $20 \mu\text{s} < T1 \leq 5000 \mu\text{s}$, e tempo até o meio valor (na cauda) $T2 \leq 20 \text{ ms}$. Podem originar-se de faltas, operações de chaveamento ou descargas atmosféricas diretas nos condutores de linhas aéreas.
- **Sobretensões de frente rápida:** sobretensão transitória, usualmente unidirecional, com tempo até a crista tal que $0,1 \mu\text{s} < T1 \leq 20 \mu\text{s}$, e tempo até o meio valor (na cauda) $T2 \leq 300 \mu\text{s}$. Podem originar-se de operações de chaveamento, descargas atmosféricas ou faltas nos sistemas.

Sobretensões de frente muito rápida: sobretensão transitória, usualmente unidirecional, com tempo até a crista tal que $T_{10} \leq 1 \mu s$, duração total $T_t \leq 3 T_{10}$, e com oscilações superimpostas de frequências $30 \text{ kHz} < f < 100 \text{ MHz}$. Podem originar-se de faltas ou operações de chaveamento em subestações isoladas a gás (GIS);

Classe	Baixa frequência		Transitório		
	Contínua	Temporária	Frente lenta	Frente rápida	Frente muito rápida
Forma da tensão					
Faixas de formas de tensão	$f = 50 \text{ Hz ou } 60 \text{ Hz}$ $T_t \geq 3600 \text{ s}$	$10 \text{ Hz} < f < 500 \text{ Hz}$ $3600 \text{ s} \geq T_t \geq 0,03 \text{ s}$	$5000 \mu\text{s} \geq T_{cr} > 20 \mu\text{s}$ $T_2 \leq 20 \text{ ms}$	$20 \mu\text{s} \geq T_1 > 0,1 \mu\text{s}$ $T_2 \leq 300 \mu\text{s}$	$100 \text{ ns} \geq T_r > 3 \text{ ns}$ $0,3 \text{ MHz} < f_1 < 100 \text{ MHz}$ $30 \text{ kHz} < f_2 < 300 \text{ kHz}$ $T_t \leq 3 \text{ ms}$
Forma normalizada da tensão	$f = 50 \text{ Hz ou } 60 \text{ Hz}$ T_t^*	$48 \text{ Hz} \leq f \leq 62 \text{ Hz}$ $T_t = 60 \text{ s}$	$T_{cr} = 250 \mu\text{s}$ $T_2 = 2500 \mu\text{s}$	$T_1 = 1,2 \mu\text{s}$ $T_2 = 50 \mu\text{s}$	*
Ensaio normalizado de tensão suportável	*	Ensaio de frequência fundamental de curta duração	Ensaio de impulso de manobra	Ensaio de impulso atmosférico	*

*) A ser especificado pela norma do respectivo equipamento.

Classificação da isolação e efeito das sobretensões sobre os isolamentos

Os isolamentos utilizados nos sistemas elétricos abrangem os espaçamentos de ar, os isolamentos sólidos, os imersos em líquido isolante e os gases, podendo ser classificados como sendo para uso externo ou interno.

Os materiais isolantes de equipamentos utilizados nos sistemas elétricos têm um comportamento que depende do tipo de solicitação elétrica aplicada /4/, sendo o processo de disrupção do meio dielétrico influenciado por vários fatores /2/:

- a amplitude, forma do impulso e a polaridade da tensão aplicada;
- a distribuição do campo elétrico na isolação: campo elétrico uniforme ou não uniforme, eletrodos adjacentes ao espaçamento considerado e seu potencial;
- o tipo de isolante utilizado, se gasoso, líquido, sólido ou compósito;
- o conteúdo de impurezas e a presença de não-homogeneidades localizadas;

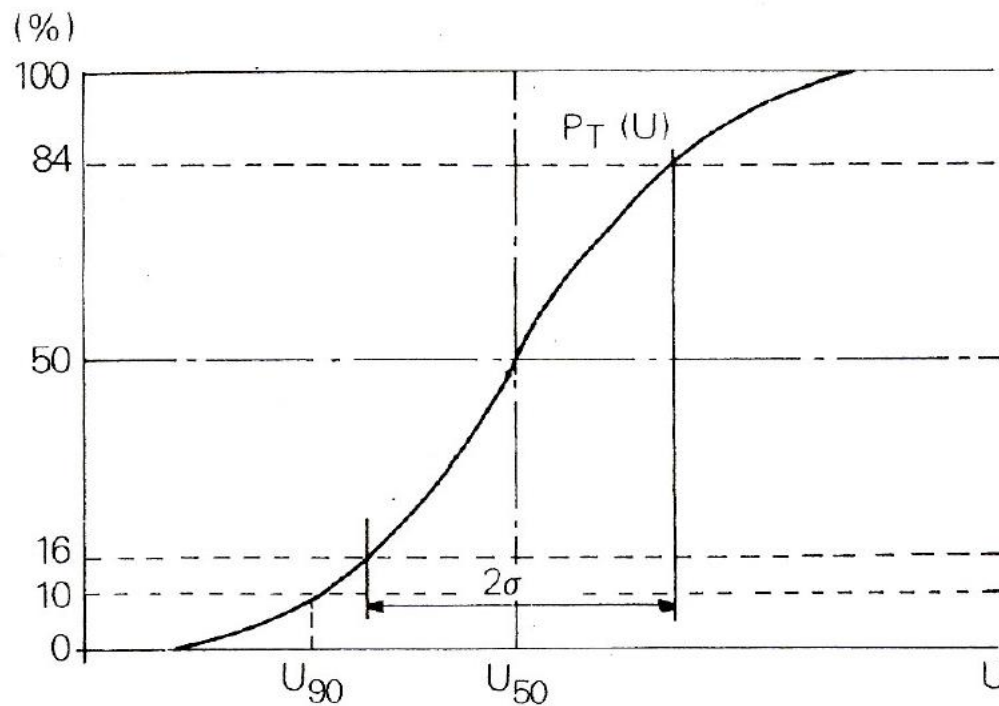
ISOLAÇÃO

auto-recuperante ou isolação não auto-recuperante.

As isolações auto-recuperantes (também conhecidas como auto-regenerativas), são aquelas que recuperam integralmente as suas propriedades isolantes após a ocorrência de uma descarga disruptiva provocada pela aplicação de uma tensão de ensaio. Os isolamentos externos em ar, alguns isolamentos internos em gás e alguns isolamentos líquidos apresentam propriedades auto-recuperantes.

As isolações não auto-recuperantes são aquelas que perdem parcialmente ou não recuperam integralmente as suas propriedades isolantes após a ocorrência de uma descarga disruptiva provocada pela aplicação de uma tensão de ensaio, ou seja, após uma descarga ocorre a danificação parcial ou total das suas propriedades dielétricas. Os dielétricos sólidos apresentam propriedades não recuperantes.

O comportamento de suportabilidade de uma isolação frente às sobretensões apresenta, em geral, uma natureza aleatória. Uma isolação submetida a uma solicitação dielétrica devido a uma sobretensão poderá apresentar descarga. Portanto, é possível associar o comportamento do material isolante à probabilidade de falha da isolação. Ao se considerar sobretensões de mesma forma de onda, porém com diferentes amplitudes, é possível associar para cada amplitude U_i uma probabilidade de falha da isolação $P(U_i)$.



Curva de probabilidade de descarga da isolação

Método de acréscimo e decréscimo – Classe 2 pela NBR 6936

Neste método também conhecido como “*Up and Down*”, são efetuadas várias séries de m aplicações de tensão com mesma forma de onda e valor de crista em diferentes níveis de tensão U_i . De acordo com o resultado da série de aplicações precedentes, o nível de tensão U_i para cada série de aplicações deve ser acrescido ou reduzido, em relação ao nível anterior, de um valor ΔU .

O valor de tensão com 50% de probabilidade de descarga disruptiva (U_{50}) e seu respectivo desvio padrão σ , podem ser obtidos a partir das equações abaixo:

$$U_{50} = \frac{\sum n_v \cdot U_v}{\sum n_v} \pm \frac{\Delta U}{2}$$

$$\delta = \frac{1,62}{\Delta U} \cdot \frac{\left[\sum n_v \cdot U_v^2 - \left(\frac{\sum (n_v \cdot U_v)^2}{\sum n_t} \right) \right]}{\sum n_t} + 0,047 \cdot \Delta U$$

n_v Número de descargas ou não descargas, dependendo qual o menor

ΔU Degrau de tensão utilizado durante o ensaio

Procedimento para a determinação da tensão crítica de descarga (tensão com 50% de probabilidade de descarga) para impulso atmosférico em um isolador polimérico, aplicado a sistemas com tensão nominal de 230 kV, pelo método de

Aplicação	Polaridade positiva			Polaridade negativa		
	U _{ens} (kV)	descarga	não desc.	U _{ens} (kV)	descarga	não desc.
1	1507	X		1557	X	
2	1462		X	1510		X
3	1507	X		1559	X	
4	1462	X		1512		X
5	1416		X	1557	X	
6	1462		X	1512		X
7	1507	X		1557	X	
8	1462		X	1513		X
9	1507	X		1557	X	
10	1462		X	1513		X
11	1507	X		1557	X	
12	1462	X		1512		X
13	1417		X	1557	X	
14	1462		X	1513	X	
15	1507	X		1467		X
16	1462		X	1513		X
17	1507	X		1560	X	
18	1462	X		1513		X
19	1417		X	1557	X	
20	1462		X	1513		X

A partir dos valores apresentados na tabela obtêm-se os valores de tensão com 50% de probabilidade de descarga disruptiva de 1469,7 kV e 1528,5 kV, para as polaridades positiva e negativa, respectivamente. Esses valores devem ser corrigidos para as condições atmosféricas normalizadas, considerando os procedimentos anteriormente descritos.

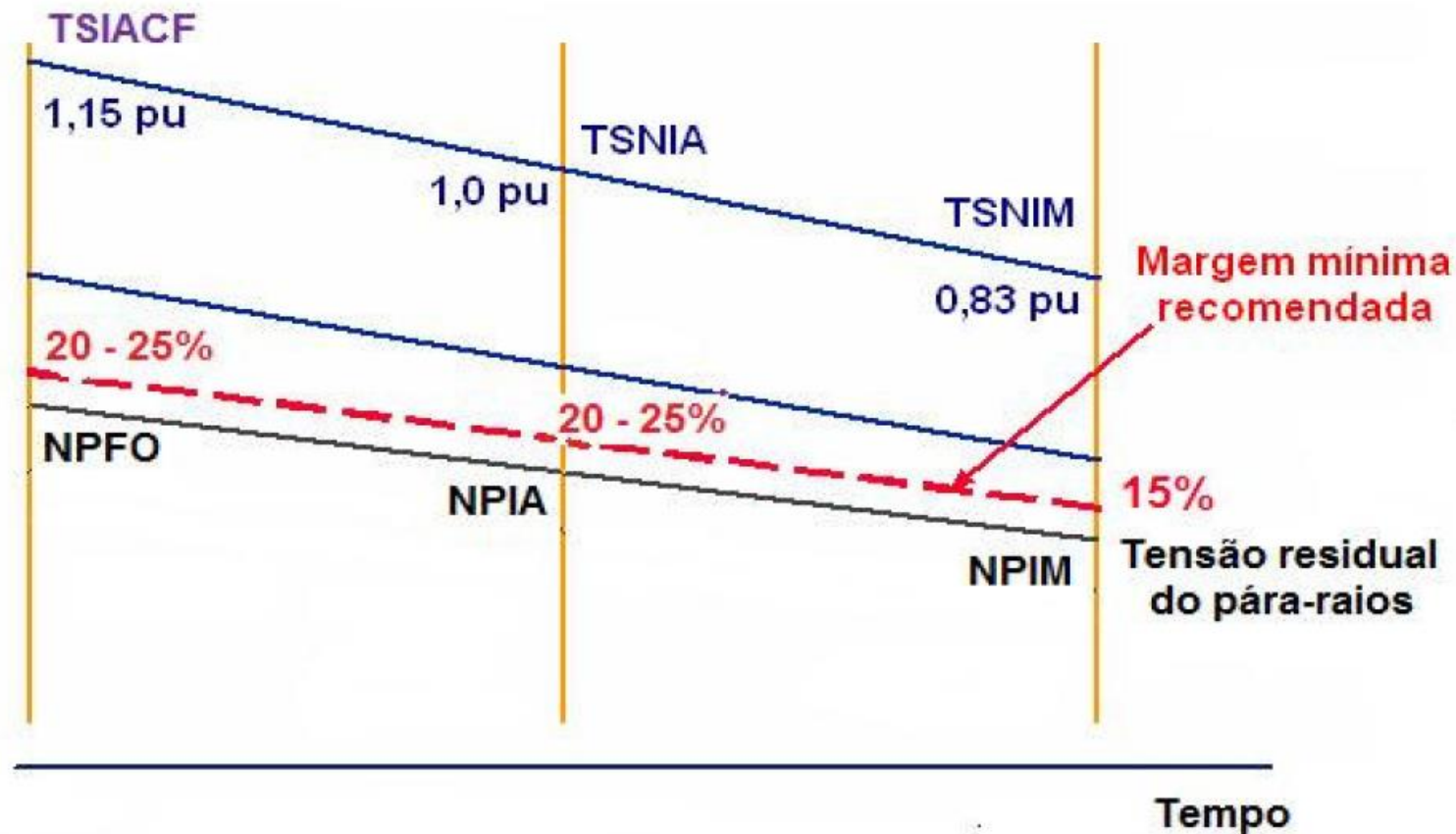
Método determinístico (ou convencional) de coordenação do isolamento

O método determinístico é normalmente aplicado quando não se dispõe de nenhuma informação estatística (obtida mediante ensaios) sobre as taxas de falhas esperadas para o equipamento durante a sua operação /2/.

Margens de proteção recomendadas

$$MP = \frac{\text{Tensão suportável mínima do isolamento}}{\text{Máxima sobretensão imposta ao isolamento}}$$

Dentre os possíveis dispositivos atualmente utilizados para reduzir o efeito das sobretensões sobre os equipamentos instalados nas redes elétricas o **pára-raios** tem se mostrado como o mais eficaz. Os pára-raios têm como função principal limitar as sobretensões transitórias elevadas que aparecem nos terminais dos equipamentos / sistemas por ele protegidos a níveis pré-estabelecidos, de modo que após a ocorrência de uma sobretensão os isolamentos desses equipamentos não fiquem com as suas características comprometidas.



O entendimento dessa figura é de fundamental importância para se definir a localização correta dos pára-raios, objetivando a proteção adequada de um sistema elétrico, especialmente no caso de pára-raios instalados em subestações,

$$MP_1 = \frac{TSIACF}{NPFO}$$

TSIACF
NPFO

Tensão suportável de impulso atmosférico cortada do equipamento
Nível de proteção do pára-raios para frente de onda

$$MP_2 = \frac{TSNIA}{NPIA}$$

TSNIA
NPIA

Tensão suportável nominal de impulso atmosférico do equipamento
Nível de proteção do pára-raios para impulso atmosférico

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

TSNIM
NPIM

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

Exemplo

Utilizar o método determinístico de coordenação do isolamento para determinar as margens de proteção oferecidas pelo pára-raios a um equipamento com tensão máxima de operação de 145 kV, apresentando uma tensão suportável para impulso atmosférico de 550 kV.

Dados do pára-raios: Tensão nominal: 120 kV

Tensão residual para impulso íngreme - 10 kA: 344 kV

Tensão residual p/ impulso atmosférico - 10 kA: 324 kV

Tensão residual p/ impulso de manobra - 0,5 kA: 244 kV

Desprezar os efeitos dos cabos de conexão e da distância de separação entre o pára-raios e o equipamento a ser protegido.

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

$$\begin{aligned} \text{TSIACF} &= 1,15 \cdot \text{TSNIA} & \rightarrow & \quad \text{TSIACF} = 1,15 \cdot 550 & \rightarrow & \quad \text{TSIACF} = 633 \text{ kV} \\ \text{NPFO} &= 344 \text{ kV} & & & & \end{aligned}$$

$$\text{MP}_1 = \frac{\text{TSIACF}}{\text{NPFO}}$$

$$\text{MP}_1 = \frac{633}{344}$$

$$\text{MP}_1 = 1,84 = 84\%$$

Determinação da margem de proteção 2 (impulso atmosférico normalizado)

$$\text{TSNIA} = 550 \text{ kV} \quad \text{NPIA} = 324 \text{ kV}$$

$$\text{MP}_2 = \frac{\text{TSNIA}}{\text{NPIA}}$$

$$\text{MP}_2 = \frac{550}{324}$$

$$\text{MP}_2 = 1,70 = 70\%$$

Determinação da margem de proteção 3 (impulsos de manobra)

$$\begin{aligned} \text{TSNIM} &= 0,83 \cdot \text{TSNIA} & \rightarrow & \quad \text{TSNIM} = 0,83 \cdot 550 & \rightarrow & \quad \text{TSNIM} = 457 \text{ kV} \\ \text{NPIM} &= 244 \text{ kV} \end{aligned}$$

$$\text{MP}_3 = \frac{\text{TSNIM}}{\text{NPIM}}$$

$$\text{MP}_3 = \frac{457}{244}$$

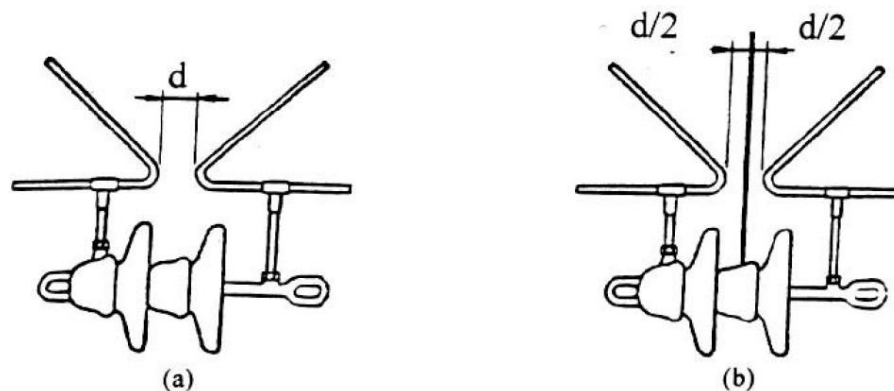
$$\text{MP}_3 = 1,87 = 87\%$$

Evolução dos dispositivos de proteção contra sobretensões

A função básica dos dispositivos de proteção contra sobretensões é a de reduzir as amplitudes das sobretensões transitórias nos terminais dos equipamentos ou dos sistemas protegidos a níveis pré-estabelecidos e operacionalmente aceitáveis.

Dentre os dispositivos existentes para este fim, os **pára-raios** têm se mostrado geralmente como os mais eficazes e efetivos.

Centelhadores com dielétrico de ar (centelhador tipo “chifre”)



Centelhadores com dielétrico de ar

Construção simples e de baixo custo;

Utilizados geralmente em redes de média tensão com baixas correntes de curto-circuito e na entrada de algumas subestações de 69 kV e 230 kV;

Característica de proteção varia com as condições atmosféricas;

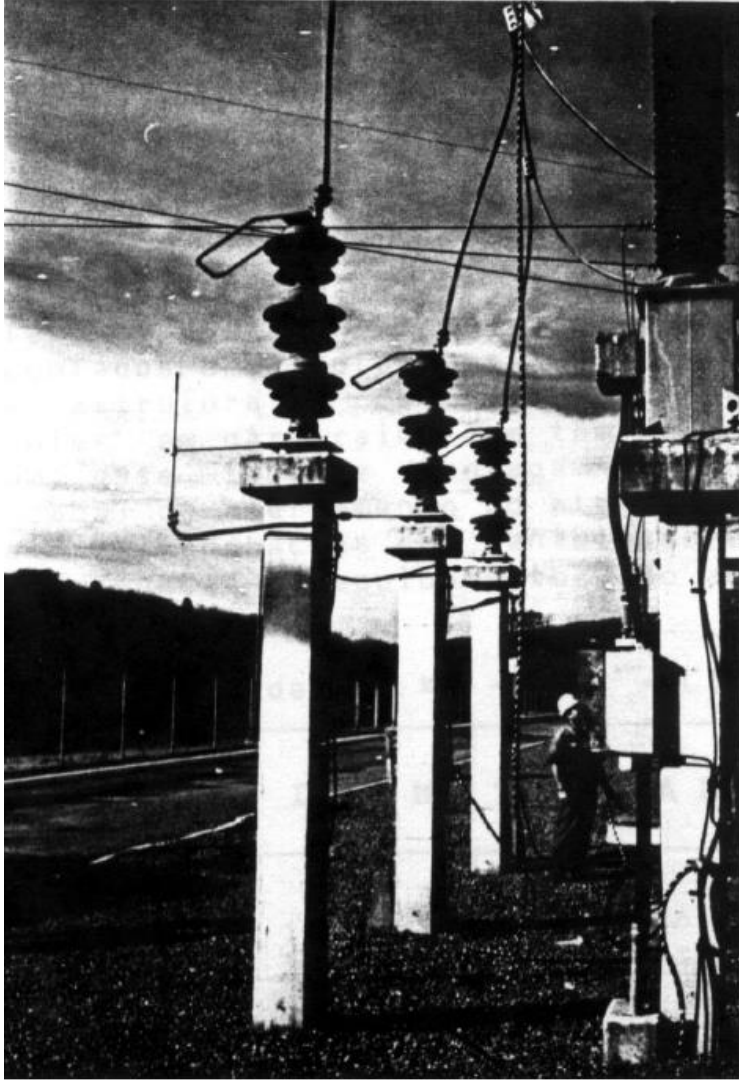
Dificuldade na extinção da corrente subsequente.

Erosão dos eletrodos dos centelhadores, com variação progressiva nos seus níveis de proteção;

Durante a operação do centelhador, há um corte brusco da tensão disruptiva (elevado efeito dv/dt), ocasionando uma solicitação severa na isolação entre espiras dos enrolamentos de transformadores e reatores.

Centelhadores com dielétrico de ar – 230 kV





Centelhadores com dielétrico de ar também têm sido utilizados por algumas empresas concessionárias de energia elétrica na entrada de subestações com tensões nominais até 138 kV.

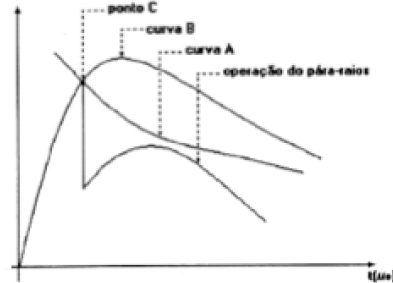
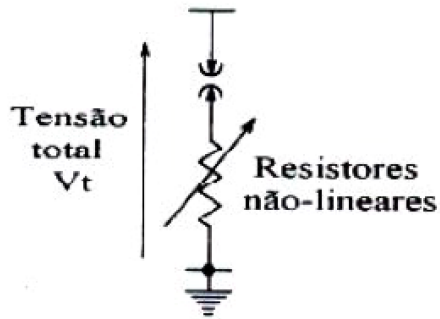
Nesta aplicação, a distância entre os centelhadores deve ser ajustada para operar somente em situações transitórias quando o disjuntor da subestação estiver em condição aberta.

Pára-raios de Carbetto de Silício (SiC)

Estes pára-raios eram formados basicamente por centelhadores montados em série com resistores não-lineares (denominados nas normas ANSI como elementos válvula). Vários tipos de materiais foram originariamente empregados para a confecção dos resistores não-lineares, tais como Hidróxido de Alumínio, Óxido de Ferro e Sulfeto de Chumbo.

Posteriormente, foram desenvolvidos resistores não-lineares de Carbetto de Silício (SiC) formado a partir dos cristais de Carbetto de Silício. Estes pára-raios, ainda hoje utilizados nos sistema elétricos, apresentam um conjunto de centelhadores montados em série os blocos de resistores não-lineares de SiC.

Pára-raios de SiC com centelhadores



⇒ Em condição de regime permanente:

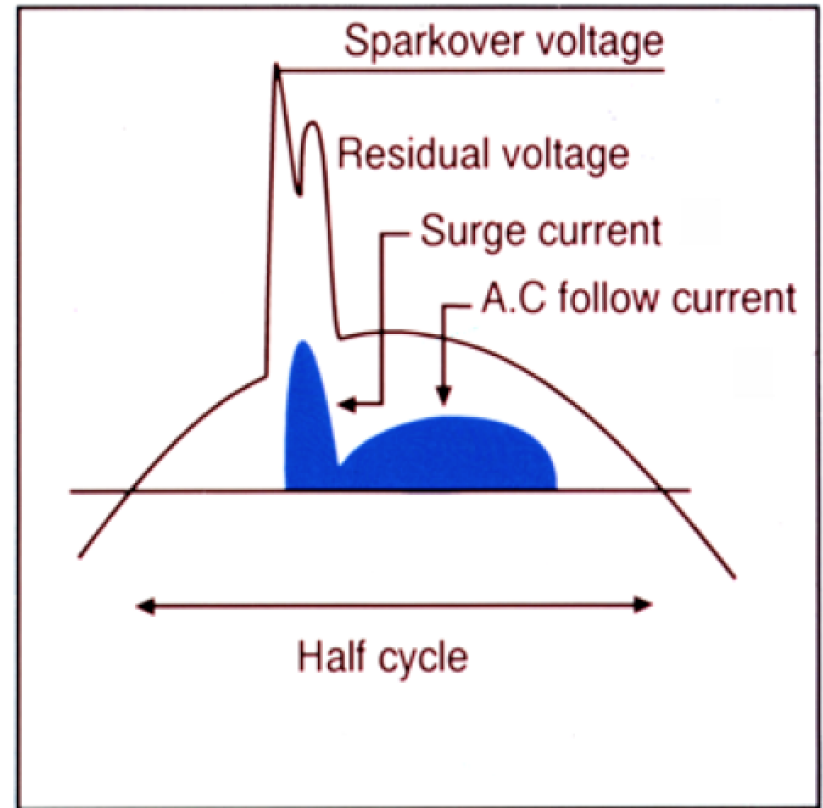
$$Z_{\text{gap}} \gg Z_{\text{resistores}} \Rightarrow V_{\text{pára-raios}} \cong V_{\text{gap}}$$

⇒ Após a interrupção dos centelhadores:

$$Z_{\text{gap}} \cong 0 \ll Z_{\text{resistores}} \Rightarrow V_{\text{pára-raios}} \cong V_{\text{resistores}}$$

⇒ Após a passagem da corrente de descarga:

$$I_{60\text{Hz}} = f(V_{\text{pára-raios}}, Z_{\text{resistores}})$$



Pára-raios de SiC

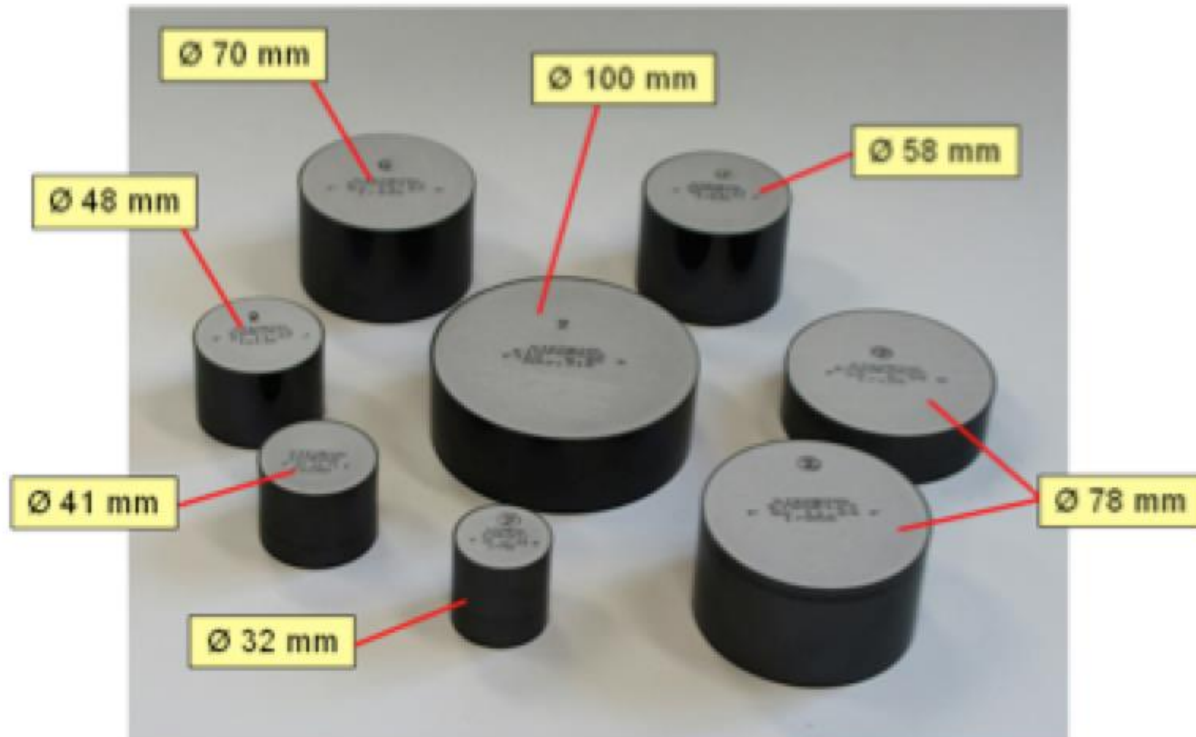
Pára-raios de **Óxido de Zinco (ZnO)** sem centelhadores

A tecnologia dos varistores de SiC perdurou sem concorrência até o final da década de 60, quando um novo tipo de dispositivo utilizado para a proteção contra sobretensões foi desenvolvido pela Matsushita Electrical Co. Ltd.

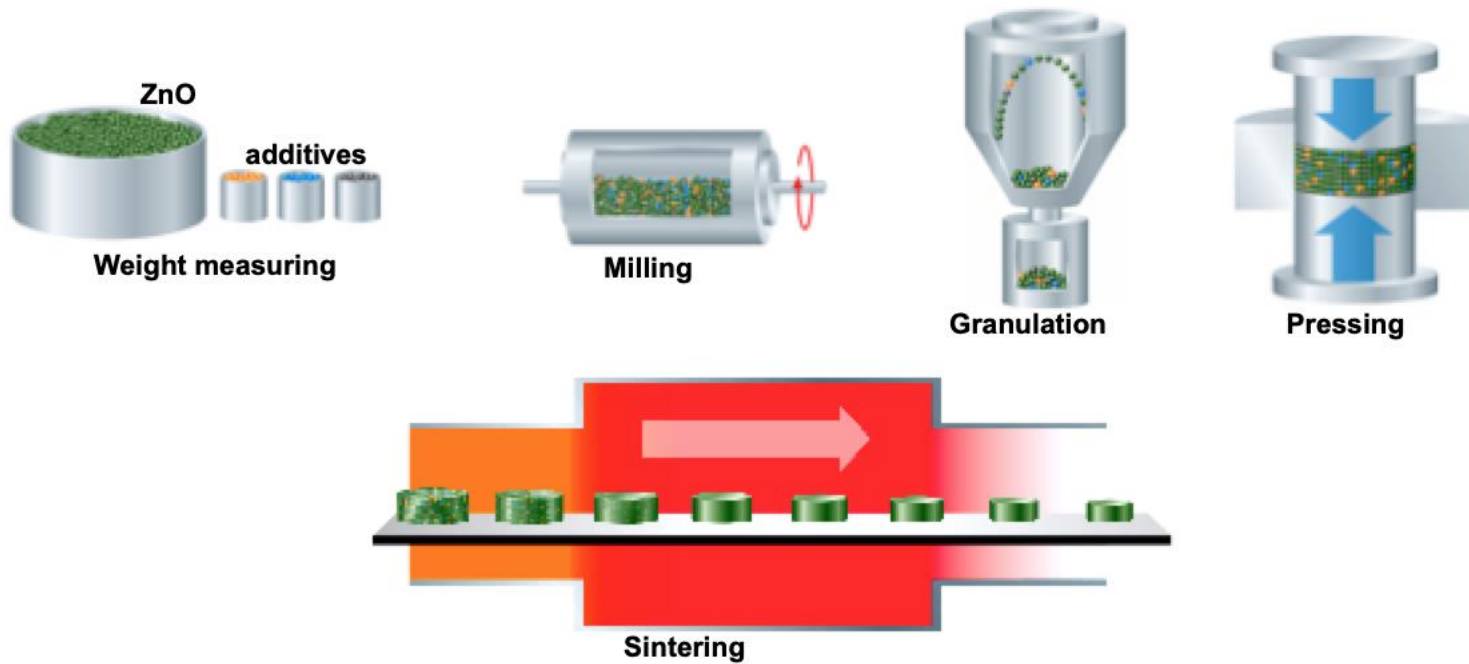
Este dispositivo, formado por elementos cerâmicos a base de Óxido de Zinco (ZnO) e pequenas quantidades de outros óxidos metálicos adicionados ao ZnO, apresenta um elevado grau de não linearidade na sua característica “tensão x corrente”, proporcionando aos elementos de **ZnO baixos valores de corrente na região de operação**, associado a uma boa estabilidade quando continuamente solicitados pela tensão normal de operação.

Pára-raios de ZnO sem centelhadores

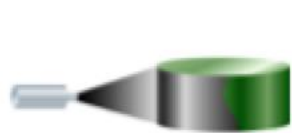
Constituídos basicamente por um conjunto de resistores não-lineares de ZnO.



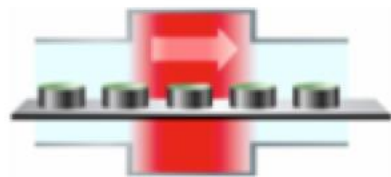
Processo básico de manufatura dos varistores de ZnO



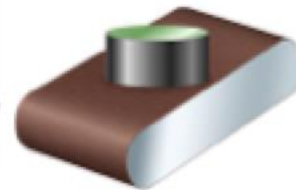
Processo básico de manufatura dos varistores de ZnO



Application glass



Glazing



Grinding



Electrode

Pára-raios de Óxido de Zinco com centelhadores

Neste projeto, os centelhadores são adicionados em série aos elementos não-lineares de ZnO e têm como função principal "isolar" o pára-raios do sistema sob condições de regime permanente, reduzindo a possibilidade de degradação dos elementos de ZnO, que são geralmente de características inferiores àqueles utilizados na montagem dos pára-raios sem centelhadores. Desta forma, os centelhadores utilizados nesse projeto podem ser de construção simplificada, quando comparados aos utilizados na montagem dos pára-raios de SiC.

Pára-raios de Óxido de Zinco (ZnO) com invólucro polimérico

Uma evolução tecnológica bastante significativa surgiu em meados da década de 80, com a utilização de invólucros poliméricos. Até então, praticamente todos os pára-raios produzidos utilizavam o invólucro de porcelana.

Diversos estudos realizados apontam a penetração de umidade devido a perda de estanqueidade do invólucro de porcelana como sendo a principal causa de falha verificada nos pára-raios ao longo do tempo.

No Brasil, as empresas concessionárias de energia elétrica e grandes consumidores industriais vêm utilizando este tipo de pára-raios desde o início da década de 90. Desde então, o processo de **aquisição de pára-raios poliméricos** vem crescendo ano a ano, com uma grande quantidade de pára-raios com invólucros poliméricos atualmente instalados em redes de distribuição, em linhas de transmissão e em subestações com tensões nominais até 500 kV.

Aplicação de pára-raios

Terminologia aplicada aos pára-raios

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 as sobretensões dinâmicas permissíveis no sistema, sendo permitido ultrapassar este valor somente nas condições estabelecidas explicitamente pelo fabricante do pára-raios considerado.

Máxima tensão contínua de operação (MCOV):

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

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.

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.

Disrupção

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

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.

Tensão disruptiva de frequência fundamental

Tensão disruptiva de impulso

Este conceito é aplicável para impulsos atmosféricos e de manobra.

Corrente de descarga

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

Corrente de descarga nominal do pára-raios:

Valor de crista da corrente de descarga com forma de impulso 8/20 μ s utilizado 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.

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 impulso e da taxa de crescimento da corrente;
- da amplitude da corrente de descarga.

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.

Capacidade de absorção de energia

A capacidade de absorção de energia pode ser entendida a partir das propriedades intrínsecas dos elementos varistores (capacidade de absorção de energia intrínseca) e das propriedades térmicas dos projetos de pára-raios (capacidade de absorção de energia térmica).

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. Essa terminologia é aplicada a pára-raios sem centelhadores.

Classificação dos pára-raios

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 /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 /3/

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 o 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

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 /4/, 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.

A IEC 60.099.4 /4/, 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 (A_{ef})
	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

Corrente de descarga nominal	Valor eficaz da corrente de falta (kA _{ef})			Corrente de baixa intensidade (A _{ef})
	Nominal	Correntes reduzidas		
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

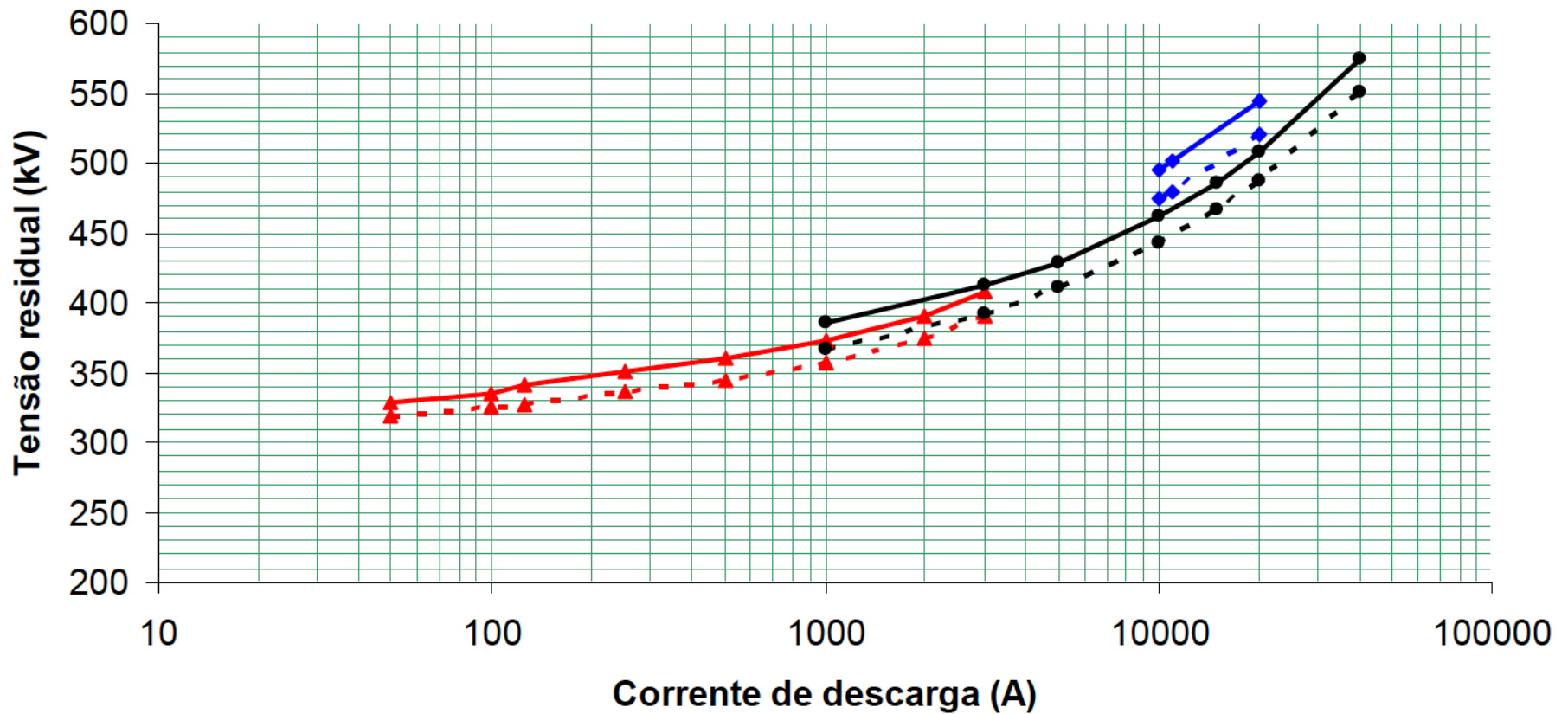
Característica de proteção dos pára-raios

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.

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 /4/, pela combinação dos seguintes ensaios:

- Tensão residual para impulso de corrente com frente íngreme de $1 \mu\text{s}$;
- Curva característica "tensão residual x corrente de descarga 8/20 μs ";
- Tensão residual para impulso de manobra.



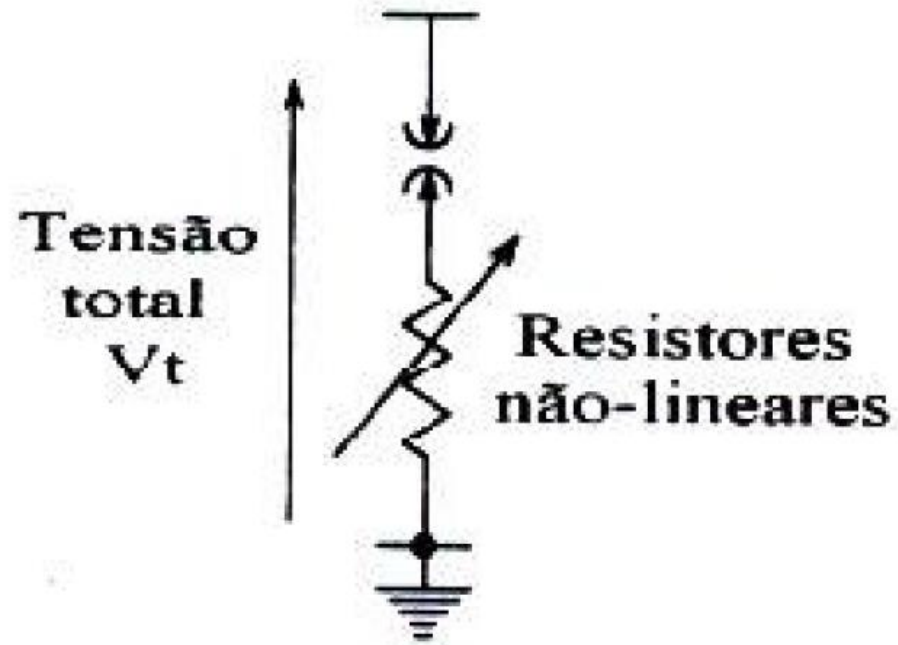
características de proteção de um determinado pára-raios com tensão nominal de 192 kV, aplicado em sistemas de 230 kV.

Tensão Nominal U_r (kV_{ef})	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	-----	-----

Tensão Nominal U_r (kV_{ef})	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

Níveis máximos de proteção de pára-raios sem centelhadores

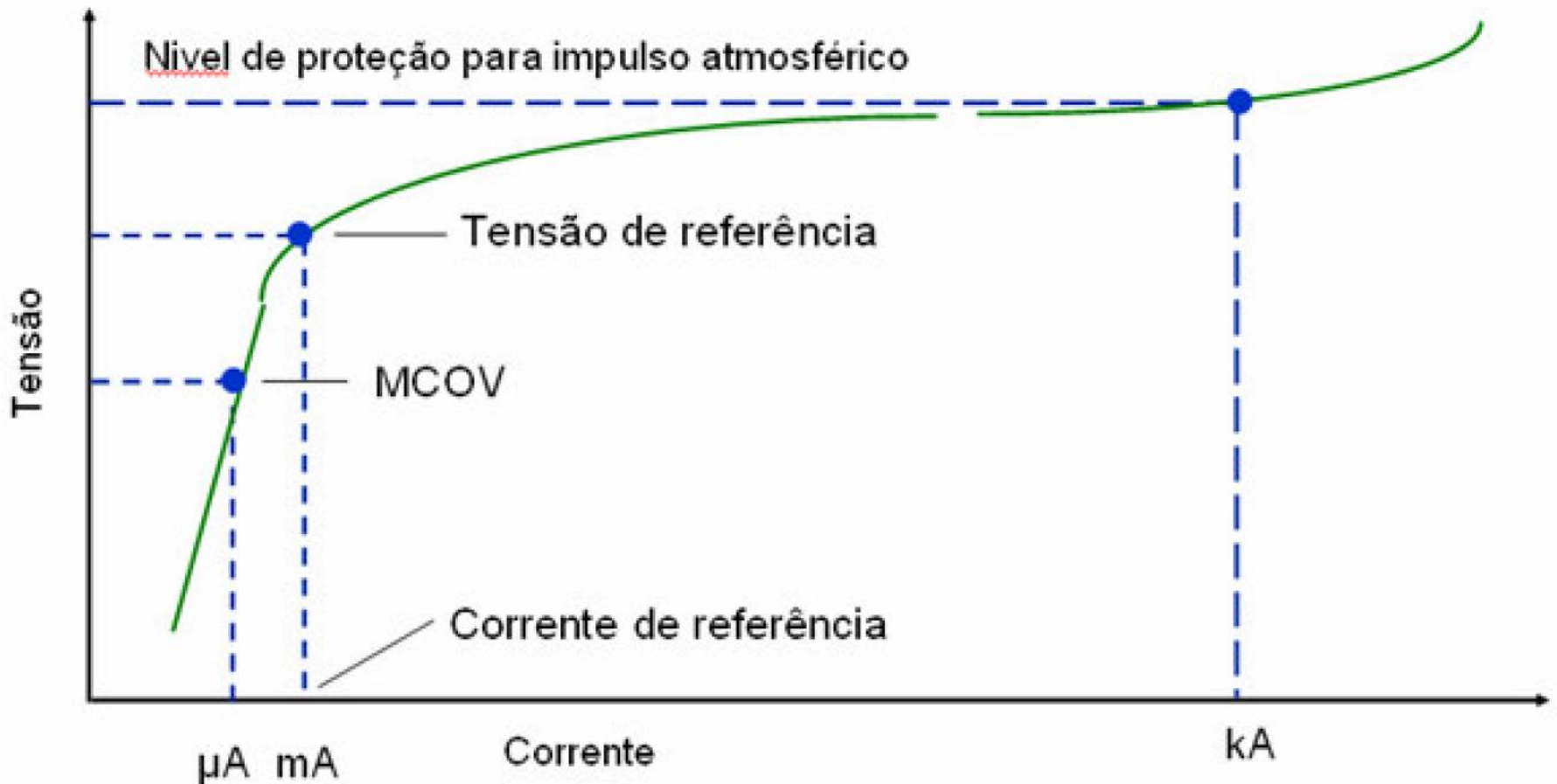
Princípio de operação dos pára-raios



Circuito representativo de um pára-raios com centelhadores

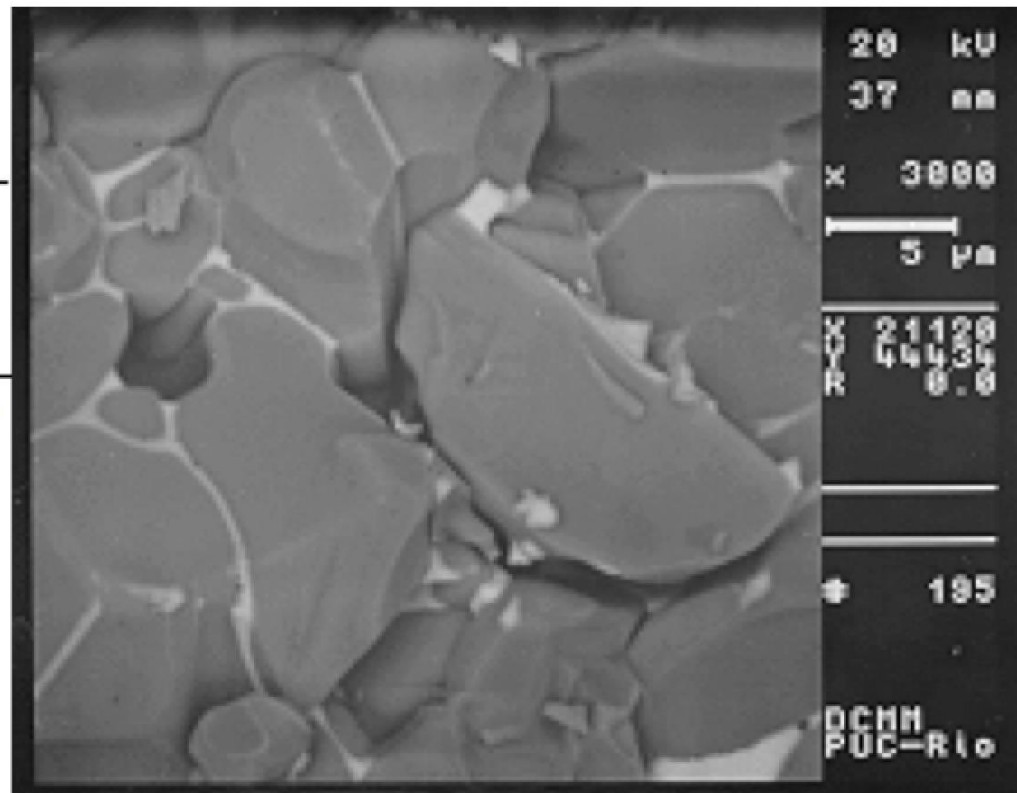
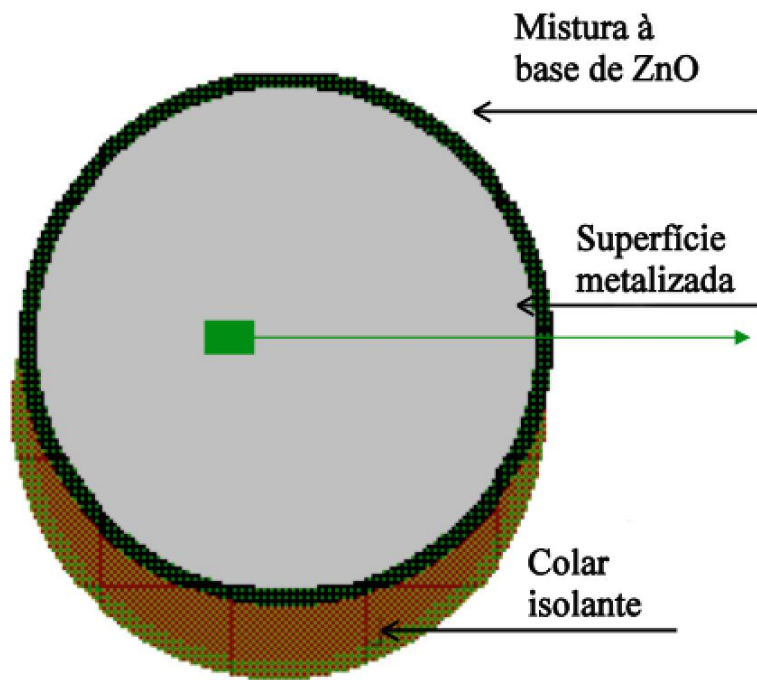
Princípio de operação dos pára-raios sem centelhadores

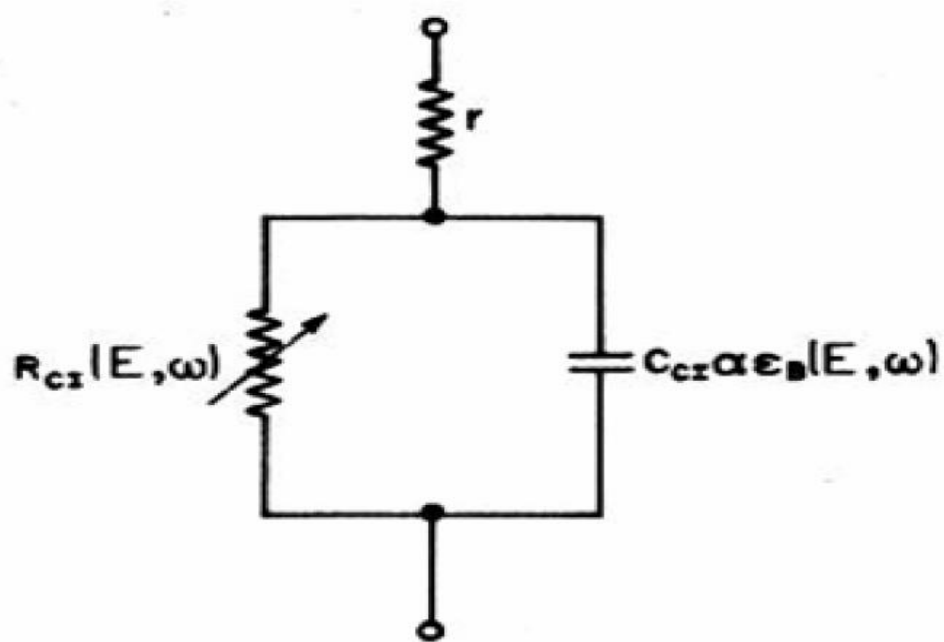
A não utilização dos centelhadores torna os projetos de pára-raios de ZnO mais simplificados, além de oferecer muitas vantagens em suas características de proteção e de operação.



Pára-raios de ZnO sem centelhadores

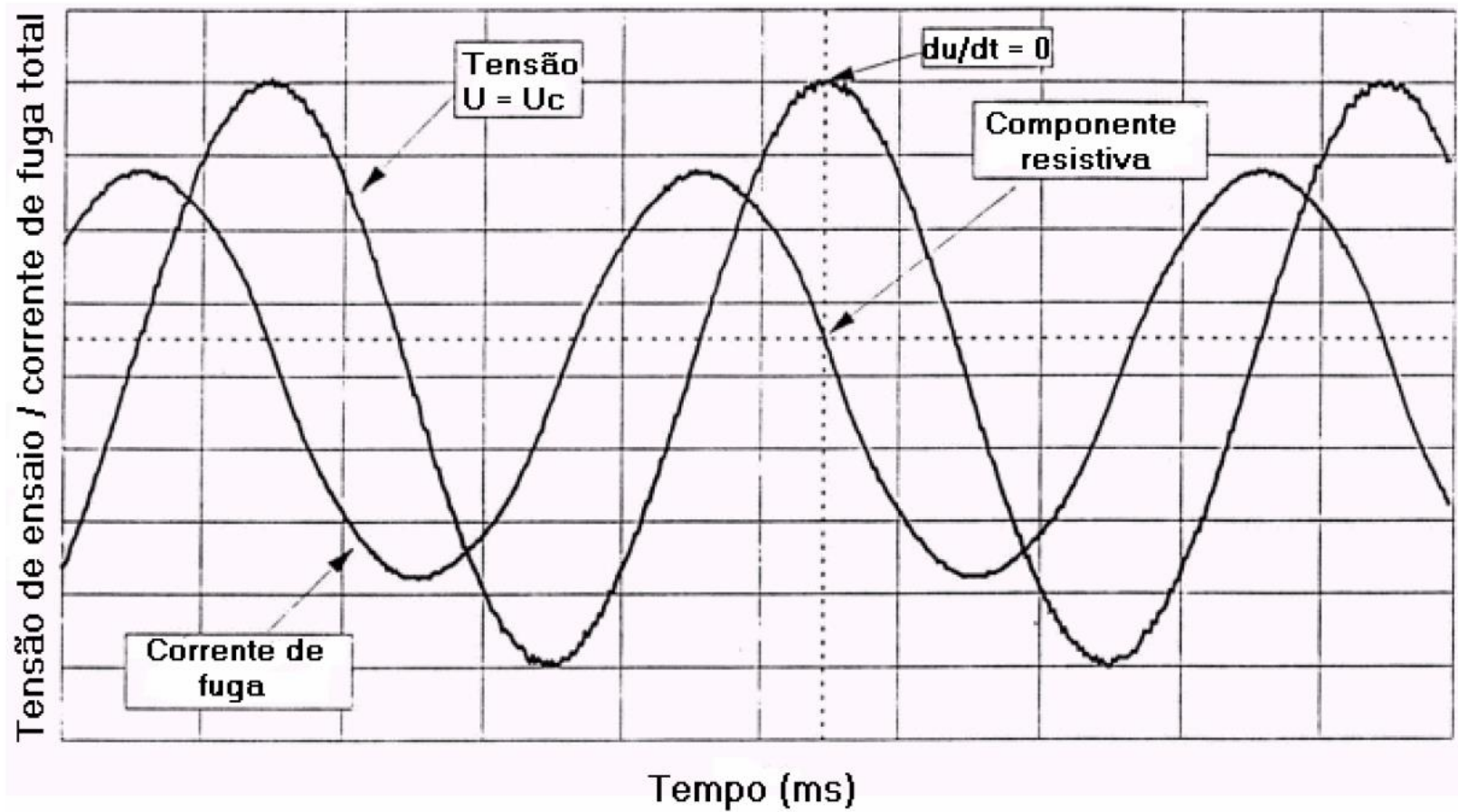
Princípio de funcionamento - microestrutura



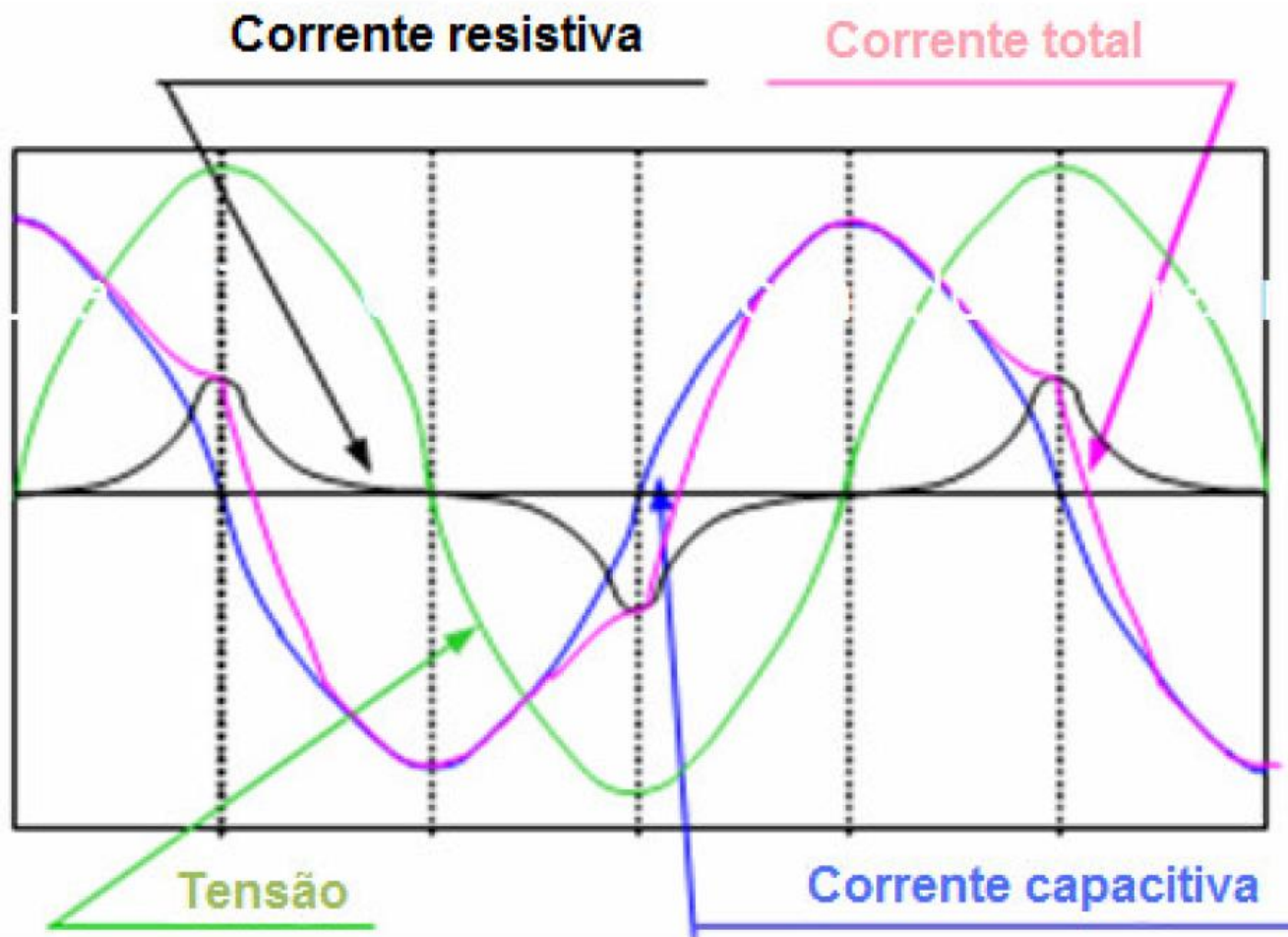


Circuito equivalente simplificado para um elemento de ZnO

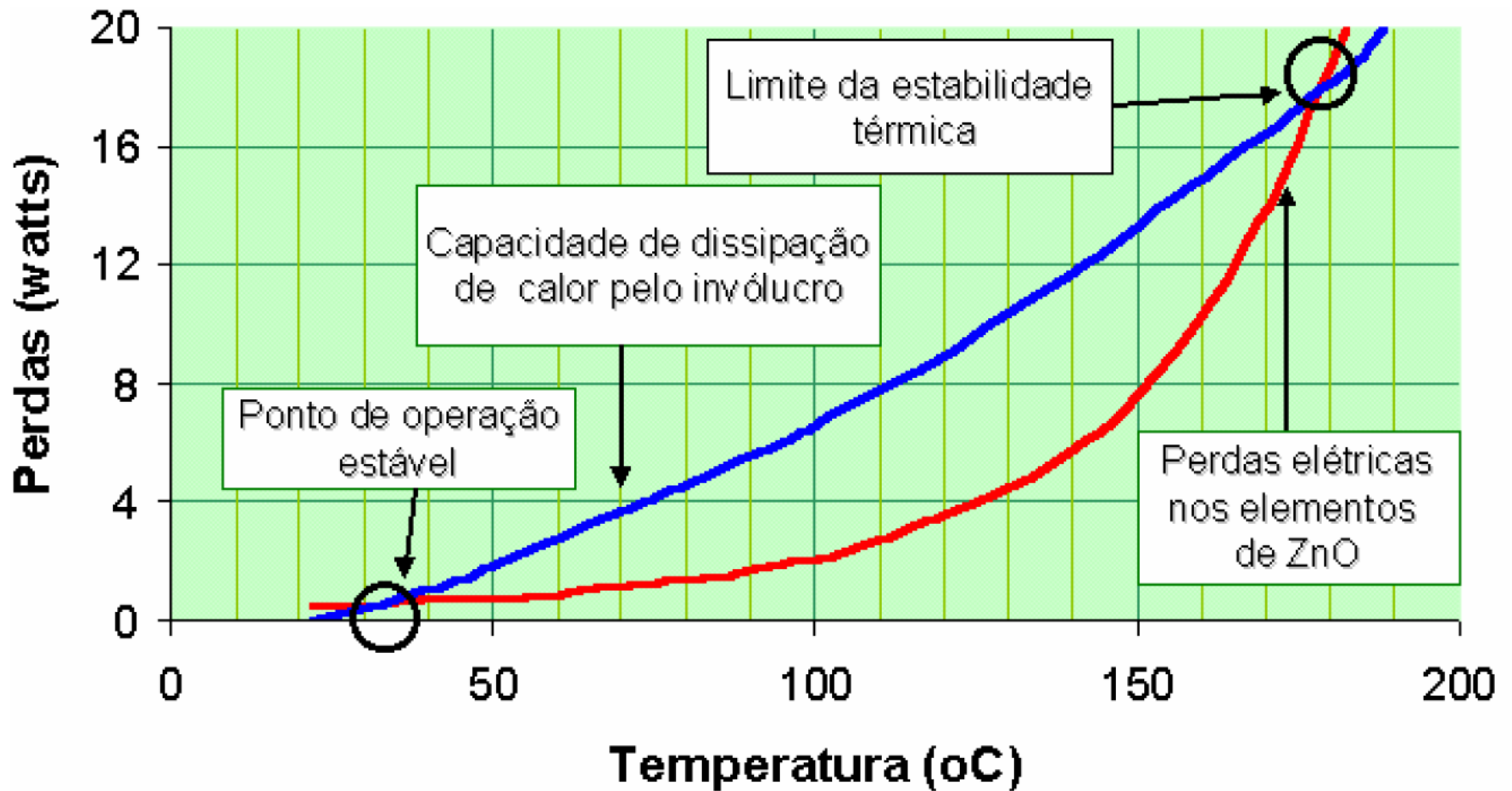
figura r representa a resistência dos grãos de ZnO, R_{CI} a resistência não-linear da região intergranular e C_{CI} a capacitância formada pelos grãos de ZnO separados pela região intergranular. Os valores de R_{CI} e C_{CI} são dependentes do campo elétrico e da frequência, sendo R_{CI} fortemente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



Característica da corrente de fuga de um pára-raios



Corrente de fuga total e suas componentes capacitativa e resistiva



Curvas com as características da potência consumida por um elemento de ZnO e da potência dissipada pelo invólucro

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

Os pára-raios ao serem instalados nos sistemas elétricos têm por finalidade proteger os equipamentos 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.

Determinar a máxima tensão eficaz fase-terra a frequência fundamental, a ser considerada no ponto de instalação do pára-raios

seleção da tensão nominal do pára-raios

No caso da aplicação de pára-raios sem centelhadores, a escolha da tensão nominal será baseada em duas premissas, 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 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.***

Determinar a energia a ser absorvida pelos 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 redes aéreas de distribuição e linhas de transmissão; descargas sobre as estruturas ou sobre os cabos pára-raios de linhas e redes, provocando descargas disruptivas de retorno *"backflashover"* nas cadeias de isoladores; ou descargas sobre as estruturas próximas às redes, linhas e subestações.

- **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 (volts);
- U_{CFO} Tensão disruptiva crítica (polaridade negativa) de isolamento da linha de transmissão ou da rede de distribuição (volts);
- Z_0 Impedância transitória monofásica da linha de transmissão / rede (ohms);
- 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 subsequentes. Valor típico: 300 μ s.

- **Energização e religamento de linhas:**

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

- E_{PR} Energia absorvida pelo pára-raios durante a manobra (joules);
- U_{ps} Nível de proteção para impulso de manobra do pára-raios (volts);
- U_L Amplitude da sobretensão no ponto de aplicação do pára-raios, não considerando a presença do pára-raios (volts);
- Z_0 Impedância transitória monofásica da linha / rede (ohms);
- T_d Tempo de transito da onda viajante ao longo da linha, igual ao comprimento da LT dividido pela velocidade de propagação da onda na linha (segundos).

Manobra de bancos de capacitores ou cabos

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

- E_{PR} Energia absorvida pelo pára-raios durante a manobra do banco (joules);
- C Capacitância do banco de capacitores ou do cabo (μF);
- V_{sis} Tensão de operação fase-terra, valor de crista (kV);
- V_R Tensão nominal do pára-raios (valor eficaz) (kV).

Energia absorvida pelos pára-raios

Sobretensões devido a manobra de LT's (IEC 60.099-5):

A energia absorvida por um pára-raios durante a ocorrência de uma manobra de linha pode ser estimada a partir da equação abaixo:

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

E_{PR} Energia absorvida pelo pára-raios durante a manobra (joules);

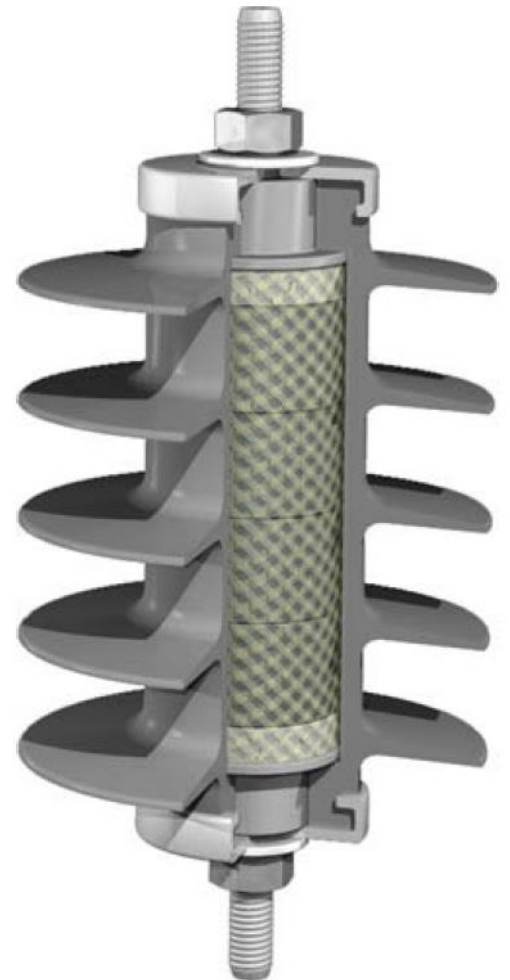
U_{ps} Nível de proteção para impulso de manobra do pára-raios (volts);

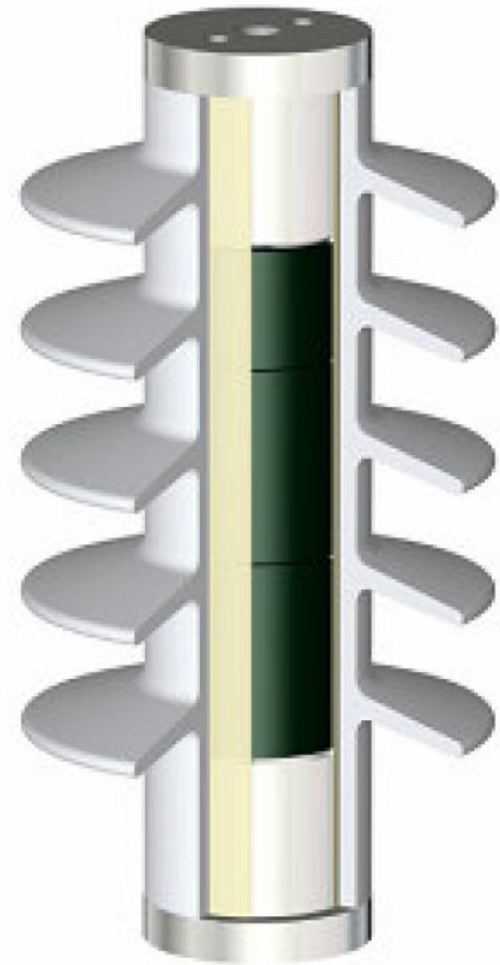
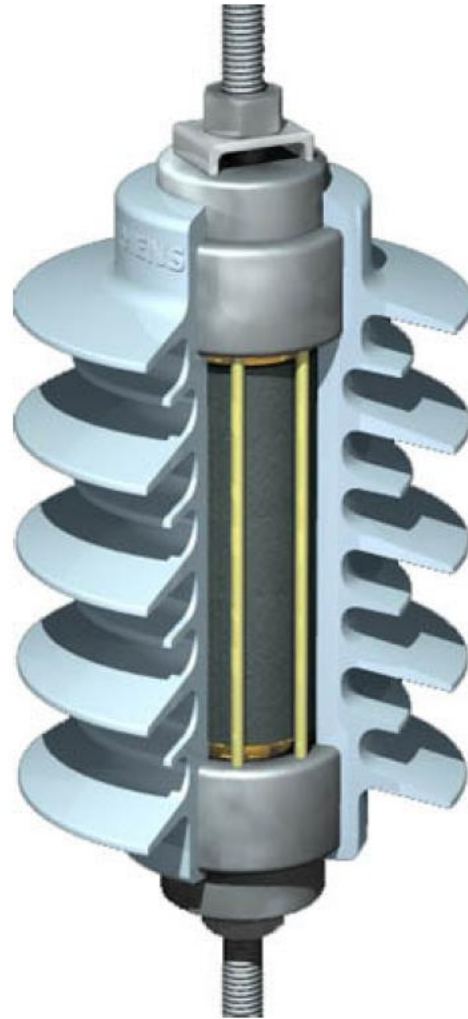
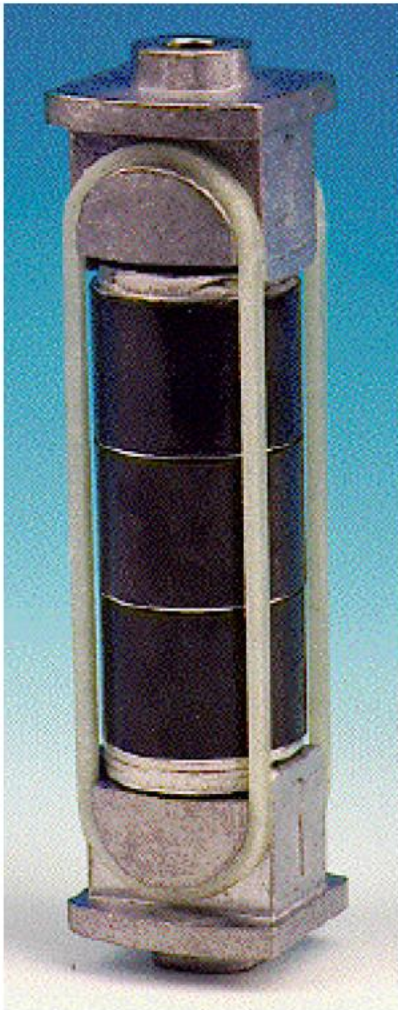
U_L Amplitude da sobretensão no ponto de aplicação do pára-raios, não considerando a presença do pára-raios (volts);

Z_0 Impedância transitória monofásica da linha / rede (ohms);

T_d Tempo de transito da onda viajante ao longo da linha, igual ao comprimento da LT dividido pela velocidade de propagação da onda na linha (segundos).

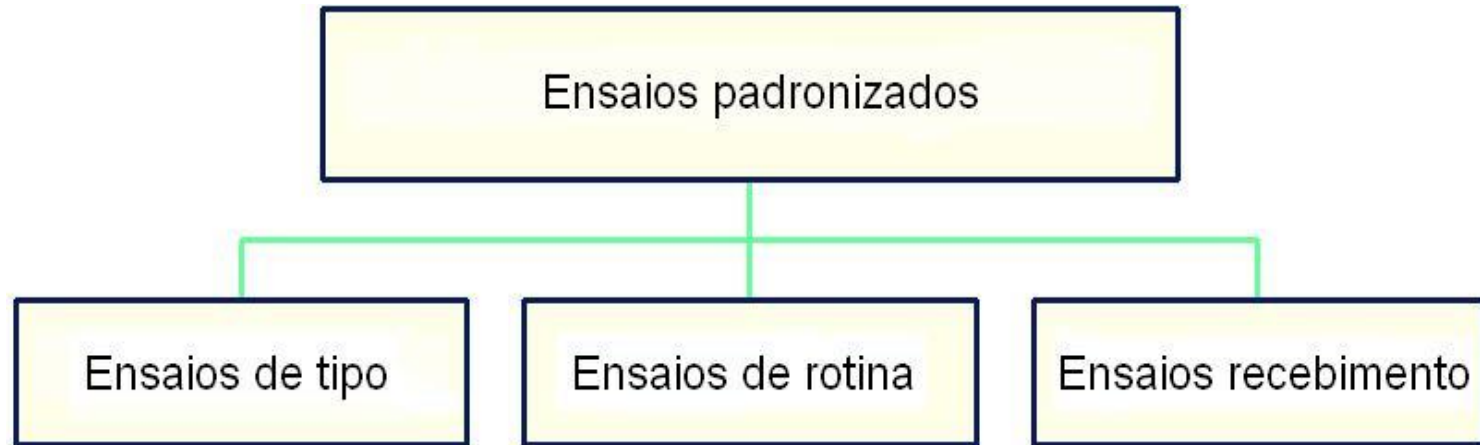
ZnO com invólucros de porcelana.





Detalhes de projetos de pára-raios tipo gaiola
Fotos de pára-raios de fabricação ABB, Siemens e Tyco
Bowthorpe

Classificação dos ensaios

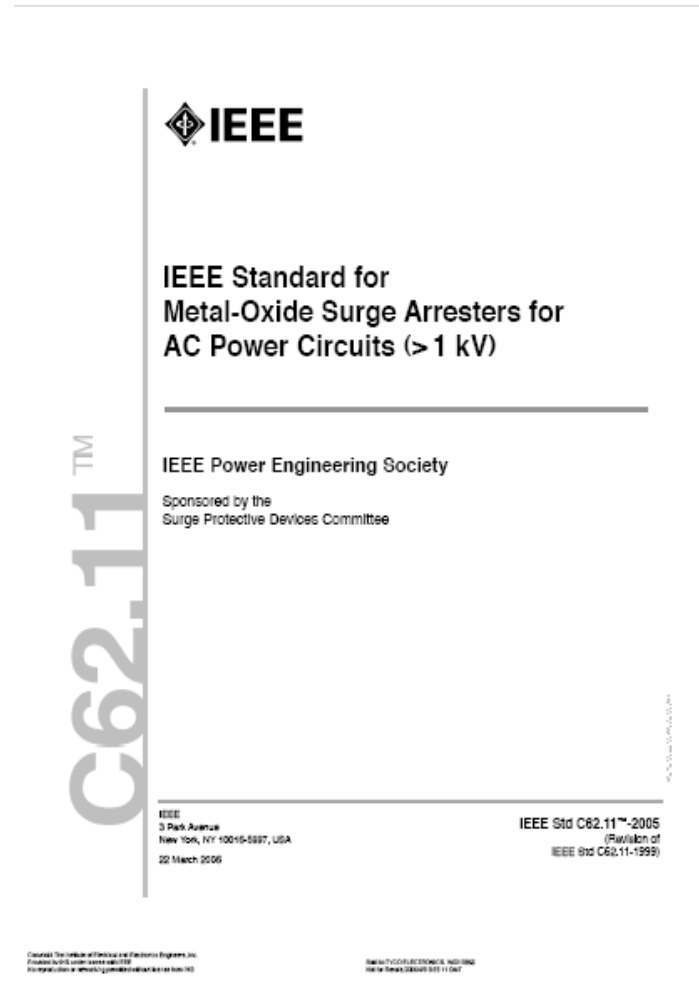
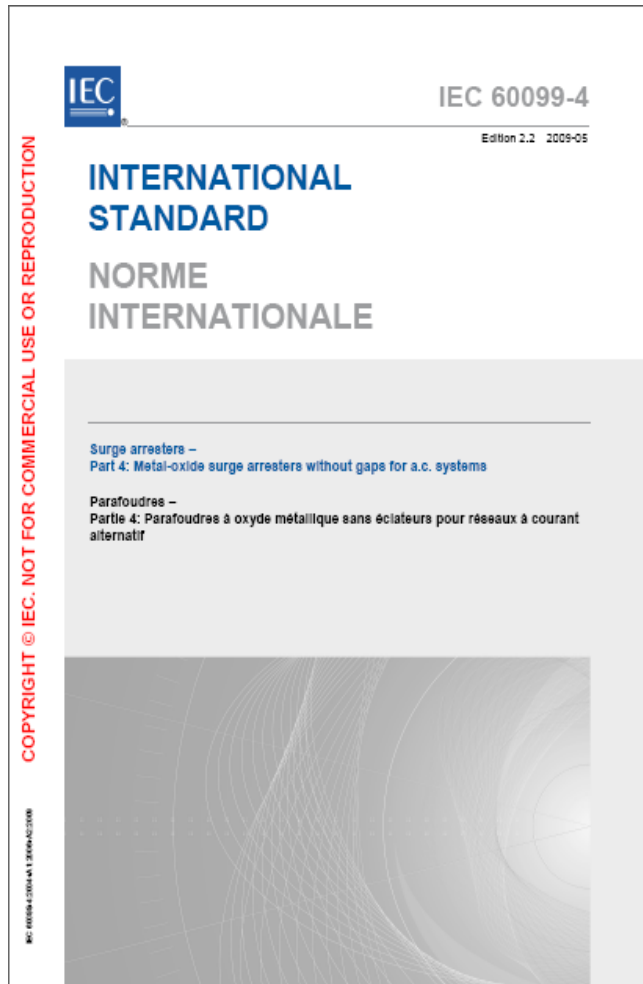


Principais normas aplicáveis a pára-raios sem centelhadores

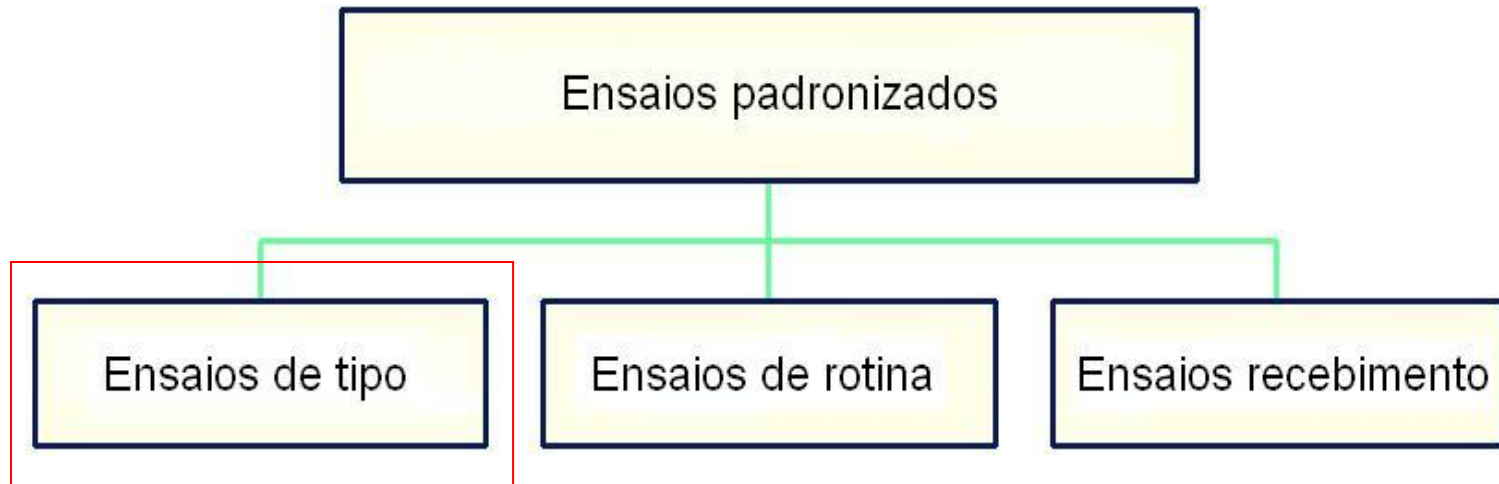
- ➔ IEC 60099-4 Ed. 2.1 – 2006: Surge Arresters - Part 4: "Metal-Oxide surge arresters without gaps for a.c. systems".
- ➔ ANSI C62.11/2005 "IEEE Standard for Metal-Oxide surge arresters for AC power circuits".

ENSAIOS EM PÁRA-RAIOS

Principais normas aplicáveis a pára-raios de ZnO



Classificação dos ensaios



Principais normas aplicáveis a pára-raios sem centelhadores

- ➔ IEC 60099-4 Ed. 2.1 – 2006: Surge Arresters - Part 4: "Metal-Oxide surge arresters without gaps for a.c. systems".
- ➔ ANSI C62.11/2005 "IEEE Standard for Metal-Oxide surge arresters for AC power circuits".

Classificação dos ensaios

Ensaio de tipo:

Conjunto de ensaios realizados em corpos-de-prova, específicos para cada ensaio, montados com componentes normais de fabricação, que tem por objetivo verificar as características de projeto do pára-raios e a conformidade do mesmo com as normas técnicas aplicadas.

Salvo acordo entre fabricante e o comprador, enquanto não houver alteração no projeto, nos materiais ou no processo de fabricação, estes ensaios não precisam ser repetidos.

Ensaaios em pára-raios de ZnO

Ensaaios de tipo:

1. Ensaaios de tensão suportável no invólucro sem a parte interna ativa
2. Ensaio de tensão residual
 - para impulso de corrente íngreme;
 - para impulso atmosférico;
 - para impulso de manobra;
3. Ensaaios de corrente suportável de impulso:
 - Ensaio de corrente de impulso retangular de longa duração, para pára-raios 2,5 kA e 5 kA;
 - Ensaio de descarga de linhas de transmissão: pára-raios 10 kA - classes 1 a 3; e 20 kA - classes 4 e 5;

Ensaio em pára-raios de ZnO

Ensaio de tipo:

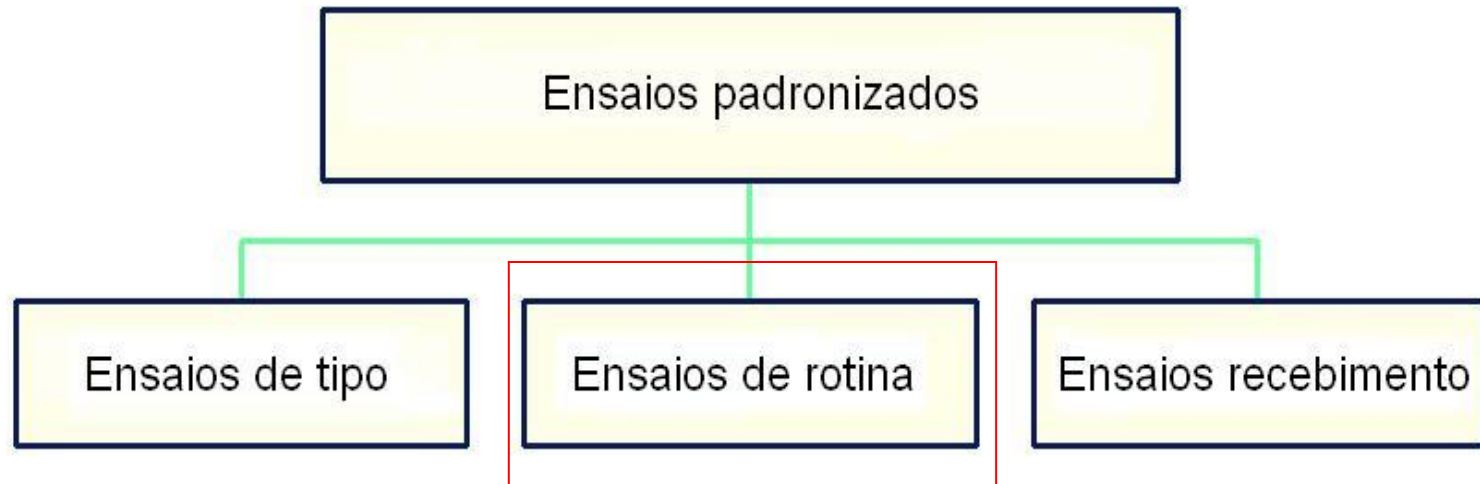
4. Ensaio de ciclo de operação:
 - Ensaio de ciclo de operação sob impulso de corrente elevada;
 - Ensaio de ciclo de operação sob impulso de manobra;
5. Levantamento da característica "tensão de frequência industrial x tempo";
6. Ensaio de corrente de curto-circuito;
7. Ensaio de tensão de radiointerferência e de ionização interna;
8. Ensaio do desligador automático, quando aplicável;
9. Ensaio de poluição artificial (ANSI / IEC);

Ensaio em pára-raios de ZnO

Ensaio de tipo:

10. Ensaio de estanqueidade;
11. Ensaio de medição das descargas parciais (IEC);
12. Ensaio de distribuição de corrente, em pára-raios com multi-colunas;
13. Ensaio aplicáveis a pára-raios poliméricos (*)
14. Ensaio de poluição artificial;
15. Ensaio mecânicos.

Classificação dos ensaios



Principais normas aplicáveis a pára-raios sem centelhadores

- ➔ IEC 60099-4 Ed. 2.1 – 2006: Surge Arresters - Part 4: "Metal-Oxide surge arresters without gaps for a.c. systems".
- ➔ ANSI C62.11/2005 "IEEE Standard for Metal-Oxide surge arresters for AC power circuits".

Classificação dos ensaios

Ensaio de rotina:

Consiste em um conjunto de ensaios realizados em cada elemento de pára-raios ou pára-raios completo, com o objetivo de verificar as características mínimas de qualidade e uniformidade de produção em conformidade com o projeto.

Ensaio em pára-raios de ZnO

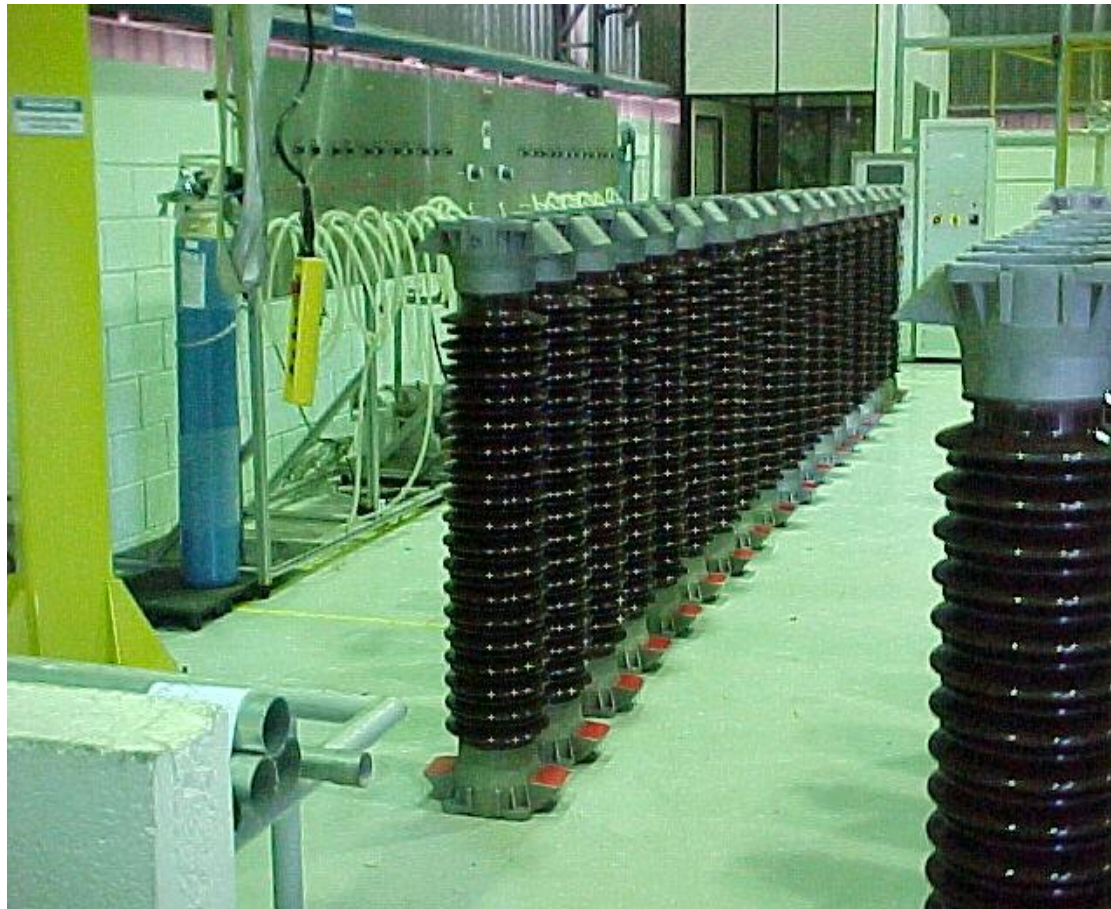
Ensaio de rotina:

1. Medição da tensão de referência;
2. Medição da tensão residual para impulso atmosférico à corrente de descarga nominal;
3. Ensaio de medição das descargas parciais;
4. Ensaio de distribuição de corrente, em pára-raios multi colunas;
5. Ensaio de estanqueidade.

ENSAIOS EM PÁRA-RAIOS

Ensaio em pára-raios de ZnO

Ensaio de rotina: ensaio de estanqueidade



Classificação dos ensaios



Principais normas aplicáveis a pára-raios sem centelhadores

- ➔ IEC 60099-4 Ed. 2.1 – 2006: Surge Arresters - Part 4: "Metal-Oxide surge arresters without gaps for a.c. systems".
- ➔ ANSI C62.11/2005 "IEEE Standard for Metal-Oxide surge arresters for AC power circuits".

Classificação dos ensaios

Ensaio de recebimento:

Consiste em um conjunto de ensaios realizados em elementos de pára-raios, ou pára-raios completo, na presença do comprador ou seu representante, com o objetivo de verificar a conformidade dos resultados obtidos com os valores garantidos pelo fabricante.

Ensaio em pára-raios de ZnO

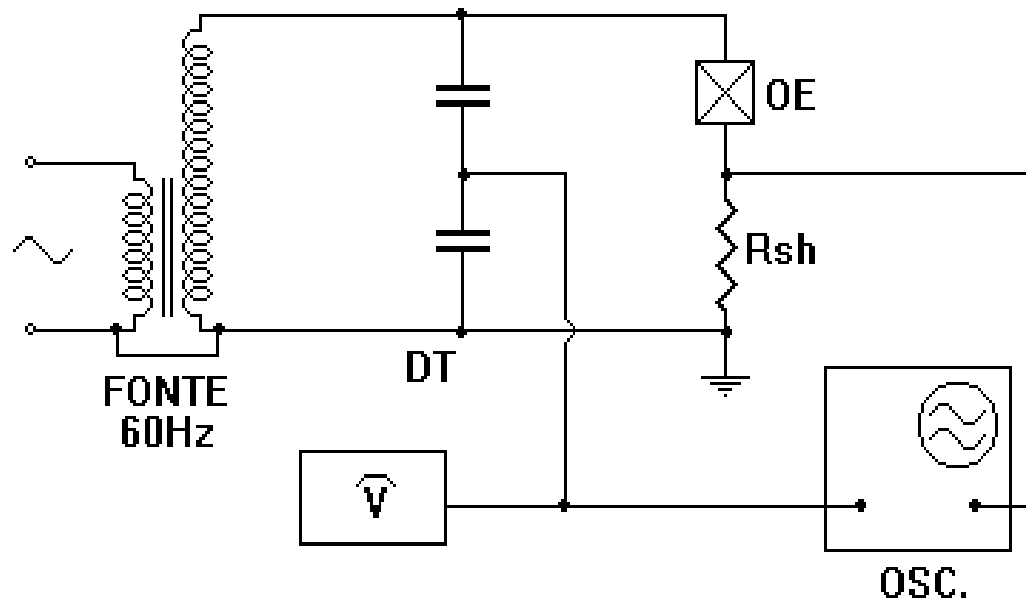
Ensaio de recebimento:

1. **Medição da tensão de referência;**
2. Medição da tensão residual para impulso atmosférico à corrente de descarga nominal
3. Medição de descargas parciais;
4. Medição da componente resistiva da corrente de fuga a MCOV (ET' s);
5. Ensaio de estanqueidade;
6. Ensaio especial de estabilidade térmica.

ENSAIOS EM PÁRA-RAIOS

Medição da tensão de referência

Circuito de ensaio e requisitos gerais



DT Divisor de tensão capacitivo relação apropriada

Rsh Derivador para medição da corrente de referência

ENSAIOS EM PÁRA-RAIOS

Medição da tensão de referência

Circuito de ensaio



ENSAIOS EM PÁRA-RAIOS

Medição da tensão de referência

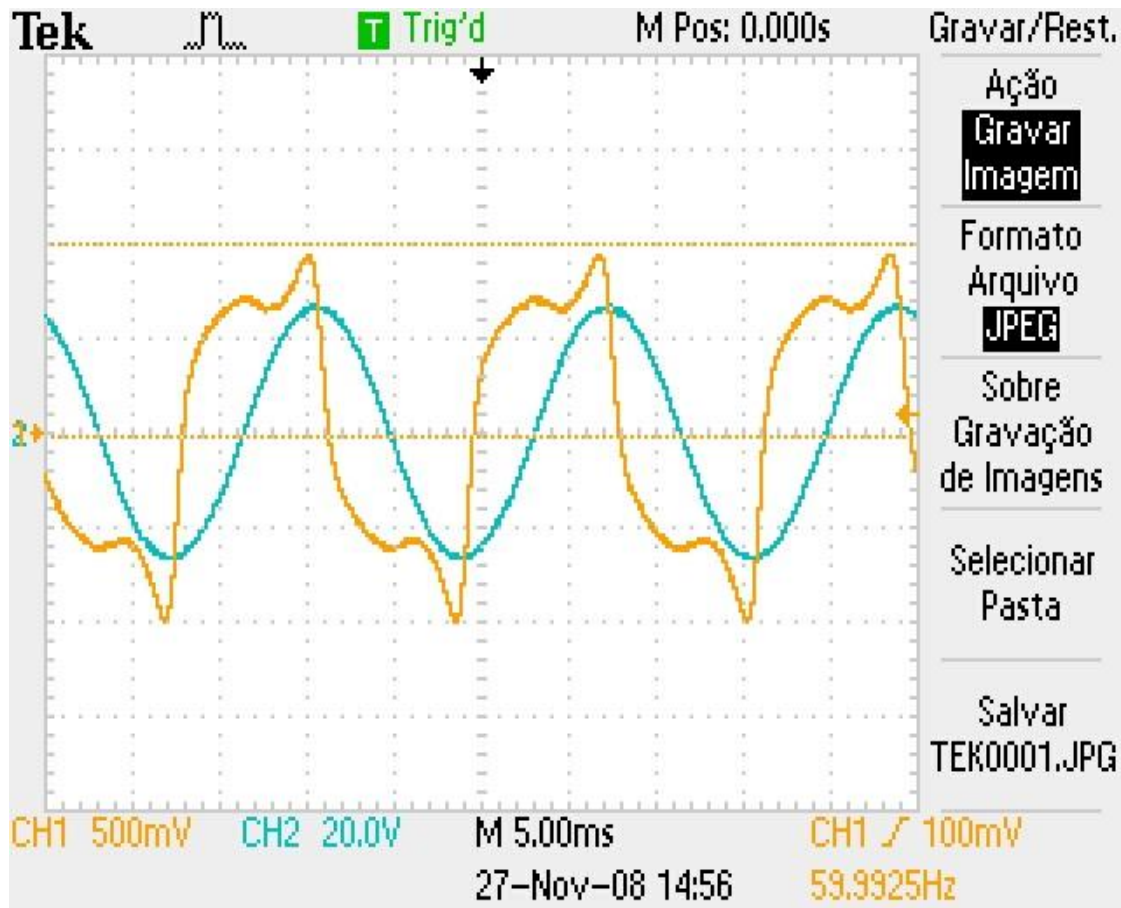
Circuito de ensaio



ENSAIOS EM PÁRA-RAIOS

Medição da tensão de referência

Registro de ensaio



Ensaio em pára-raios de ZnO

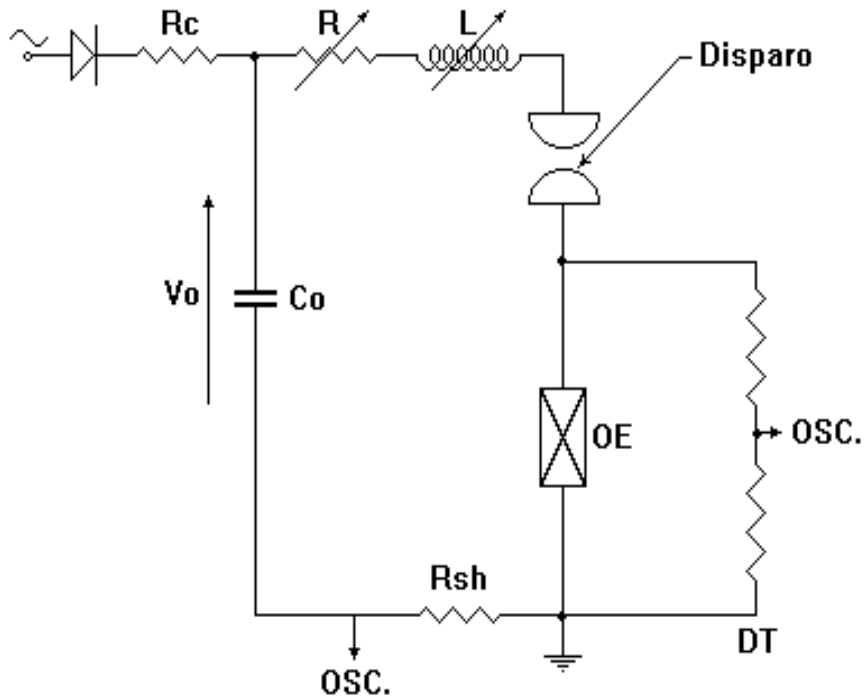
Ensaio de recebimento:

1. Medição da tensão de referência;
2. Medição da tensão residual para impulso atmosférico à corrente de descarga nominal;
3. Medição de descargas parciais;
4. Medição da componente resistiva da corrente de fuga a MCOV (ET' s);
5. Ensaio de estanqueidade;
6. Ensaio especial de estabilidade térmica.

ENSAIOS EM PÁRA-RAIOS

Ensaio de tensão residual em pára-raios

Circuito de ensaio e requisitos gerais



V_0 Tensão de carregamento do gerador de impulso de corrente

R_c Resistor de carregamento do gerador de impulso

C_0 Banco de capacitores para ajuste da forma de impulso

R e L Resistor e indutor para ajuste da forma de impulso

OE Objeto sob ensaio

DT Divisor de tensão resistivo

R_{sh} Derivador para medição da corrente de impulso

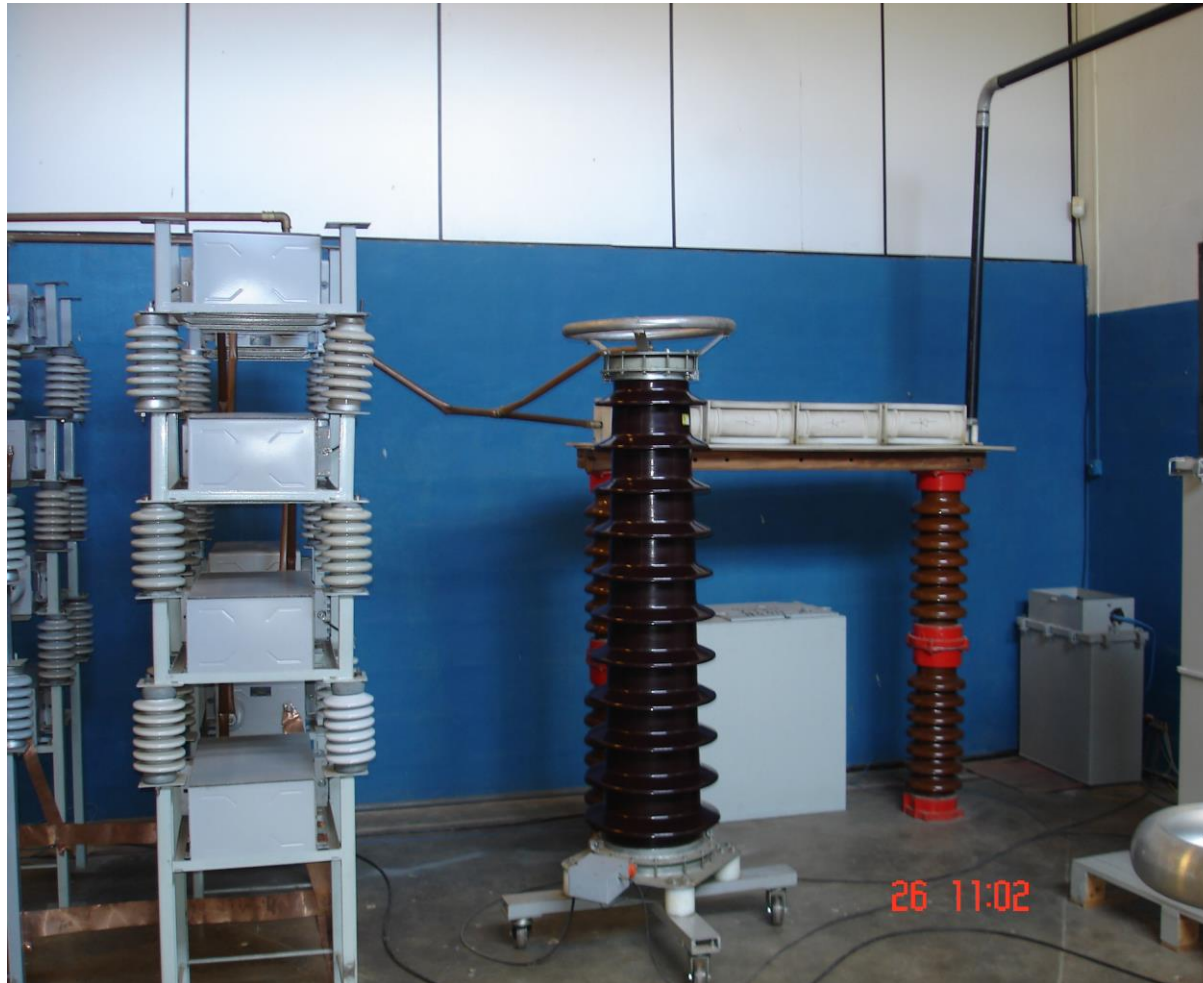
Tensão residual para impulso atmosférico

Circuito de ensaio



Tensão residual para impulso atmosférico

Circuito de ensaio



Tensão residual para impulso atmosférico

Circuito de ensaio



ENSAIOS EM PÁRA-RAIOS

Ensaio de tensão residual em pára-raios

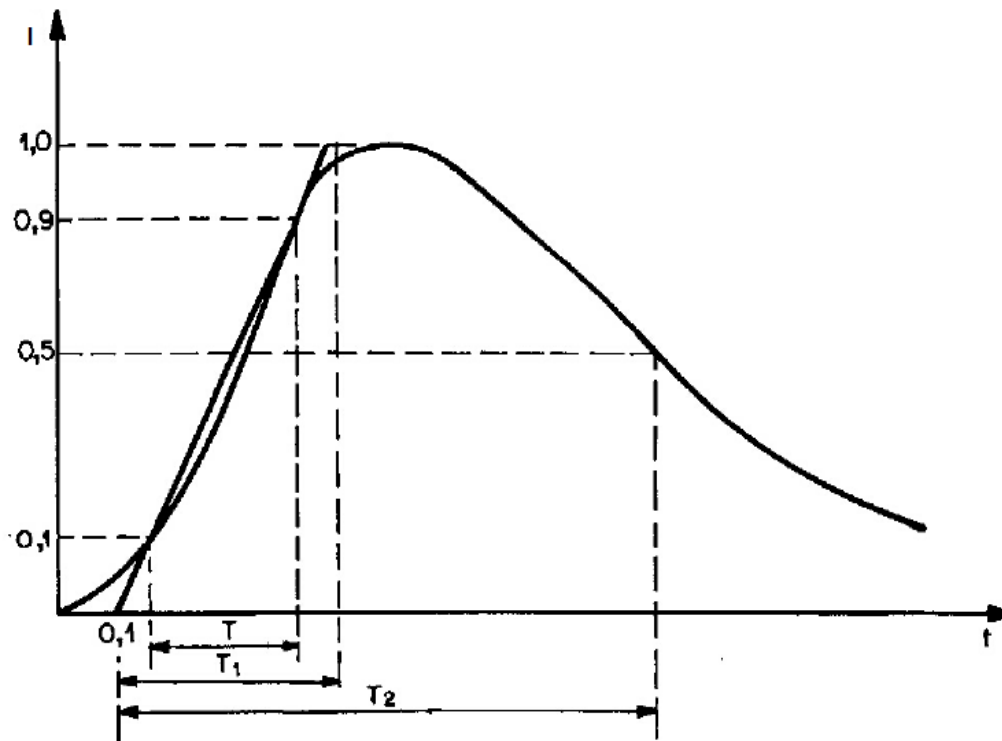
Circuito de ensaio e requisitos gerais



Gerador de impulsos de corrente

Forma de impulso normalizada

A forma de onda típica do impulso de corrente apresenta as seguintes formas de impulso: 8 / 20 μs ; 1 / 20 μs ; 30 / 60 μs ; e 4 / 10 μs .



Tolerância:

$$T_f = \pm 10\%$$

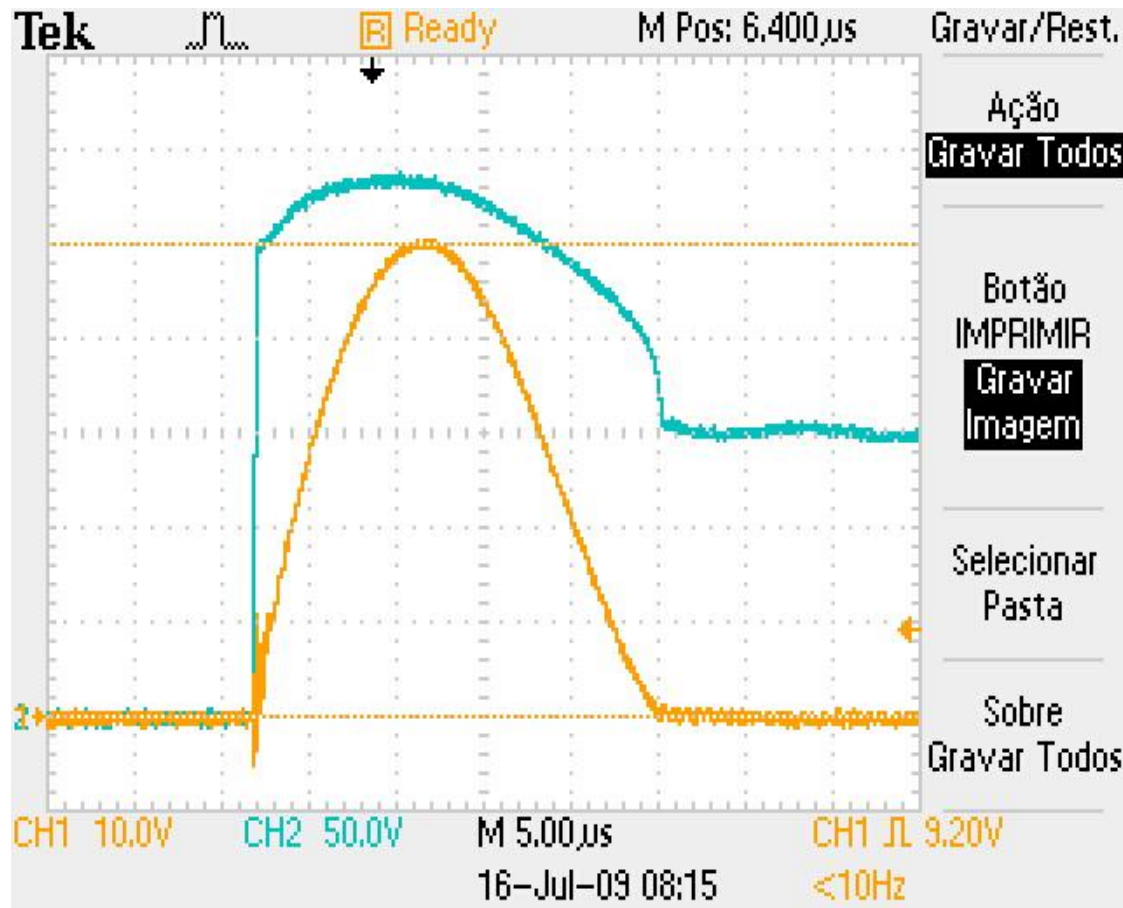
$$T_c = \pm 10\%$$

Valor de crista: $\pm 10\%$

ENSAIOS EM PÁRA-RAIOS

Tensão residual para impulso atmosférico

Registro de ensaio



Ensaio em pára-raios de ZnO

Ensaio de recebimento:

1. Medição da tensão de referência;
2. Medição da tensão residual para impulso atmosférico à corrente de descarga nominal;
3. **Medição de descargas parciais;**
4. Medição da componente resistiva da corrente de fuga a MCOV (ET' s);
5. Ensaio de estanqueidade;
6. Ensaio especial de estabilidade térmica.

ENSAIOS EM PÁRA-RAIOS

Medição de descargas parciais

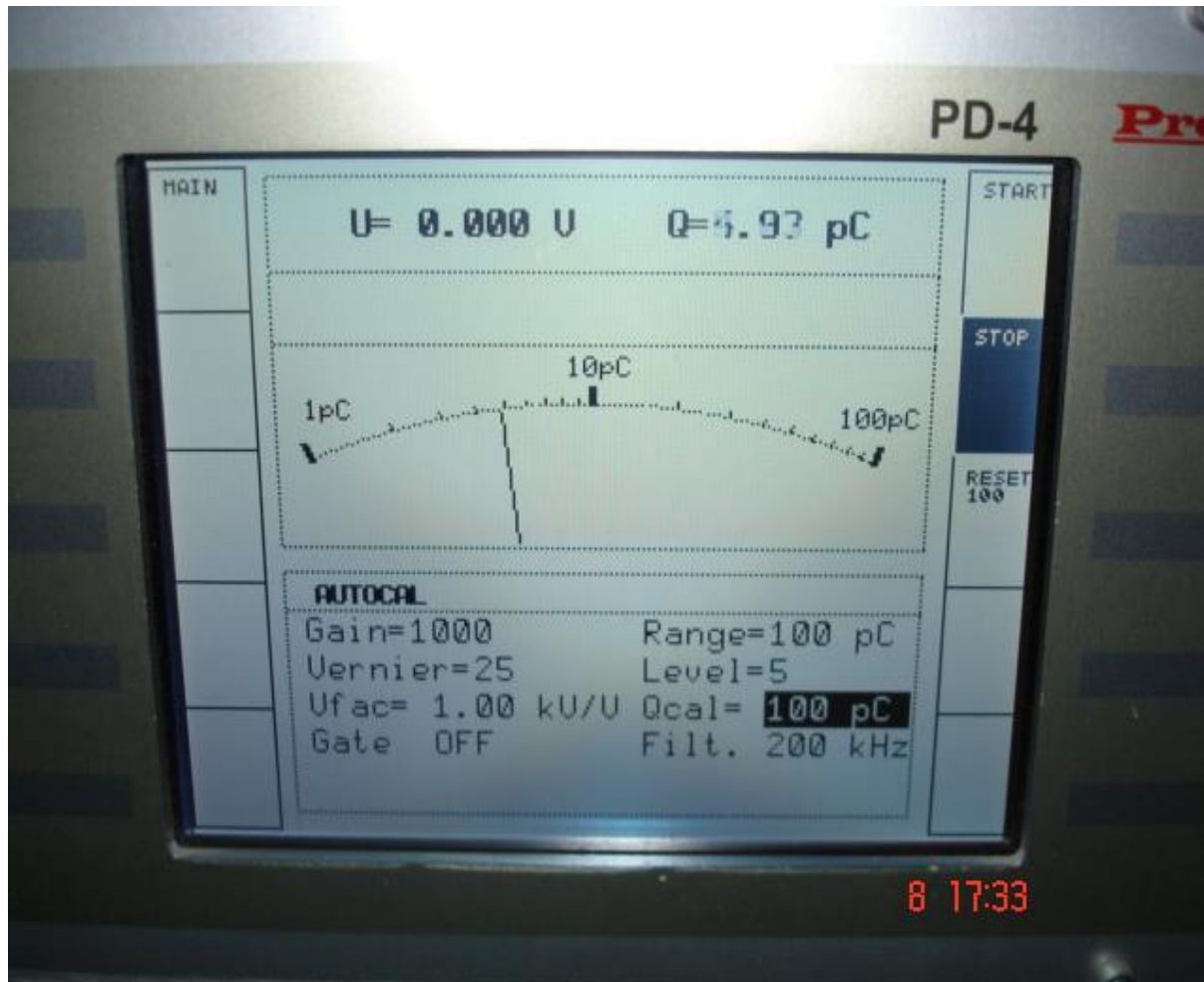
Sistema de medição



ENSAIOS EM PÁRA-RAIOS

Medição de descargas parciais

Sistema de medição



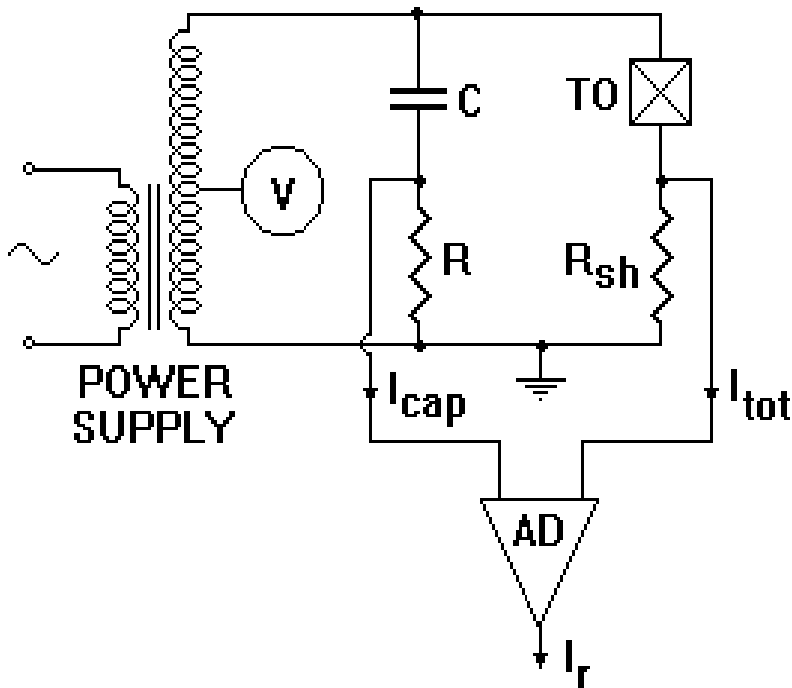
Ensaio em pára-raios de ZnO

Ensaio de recebimento:

1. Medição da tensão de referência;
2. Medição da tensão residual para impulso atmosférico à corrente de descarga nominal;
3. Medição de descargas parciais;
4. Medição da componente resistiva da corrente de fuga a MCOV ;
5. Ensaio de estanqueidade;
6. Ensaio especial de estabilidade térmica.

Medição da componente resistiva da corrente

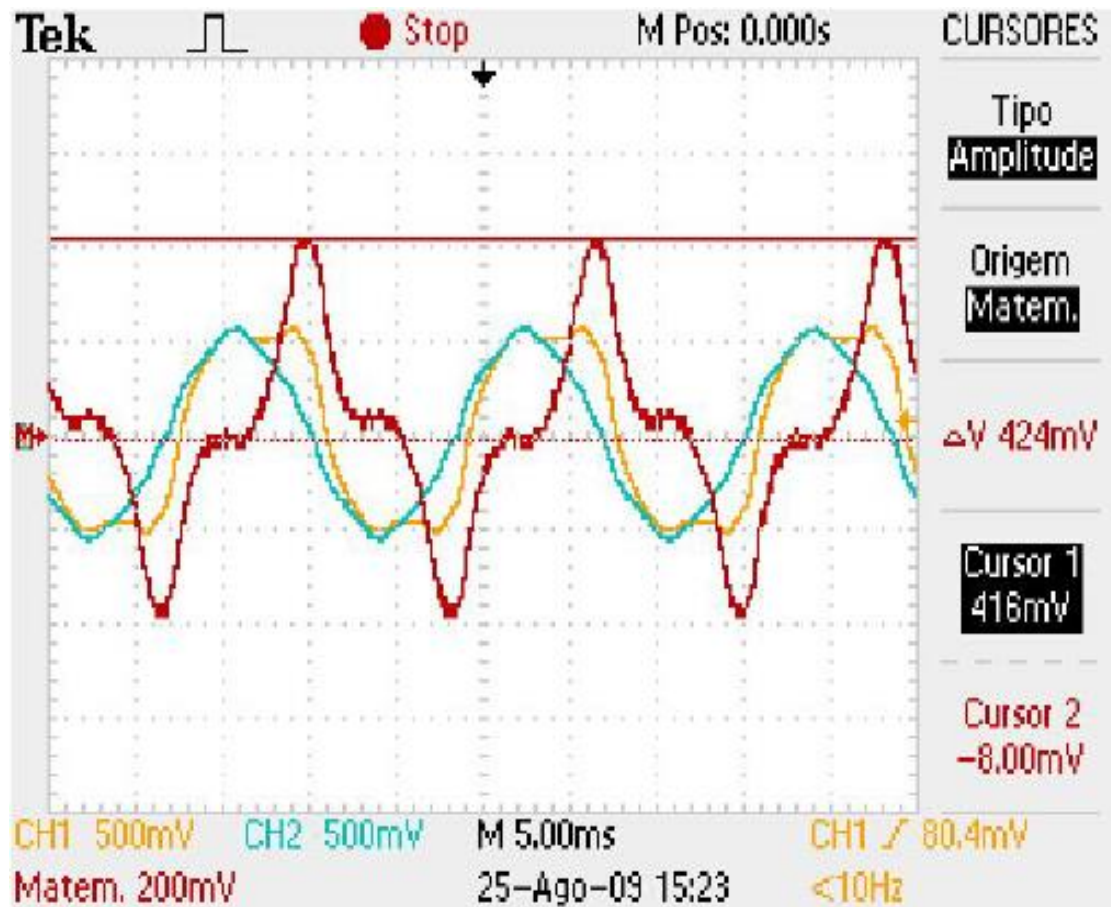
Circuito de ensaio e requisitos gerais



- C, R Capacitor e resistor para obtenção da componente resistiva da corrente
- TO Objeto sob ensaio
- R_{sh} Derivador para medição da corrente alternada
- AD Amplificador diferencial
- I_{tot} Corrente total
- I_r Componente resistiva da corrente

ENSAIOS EM PÁRA-RAIOS

Medição da componente resistiva da corrente @ MCOV - Registro de ensaio



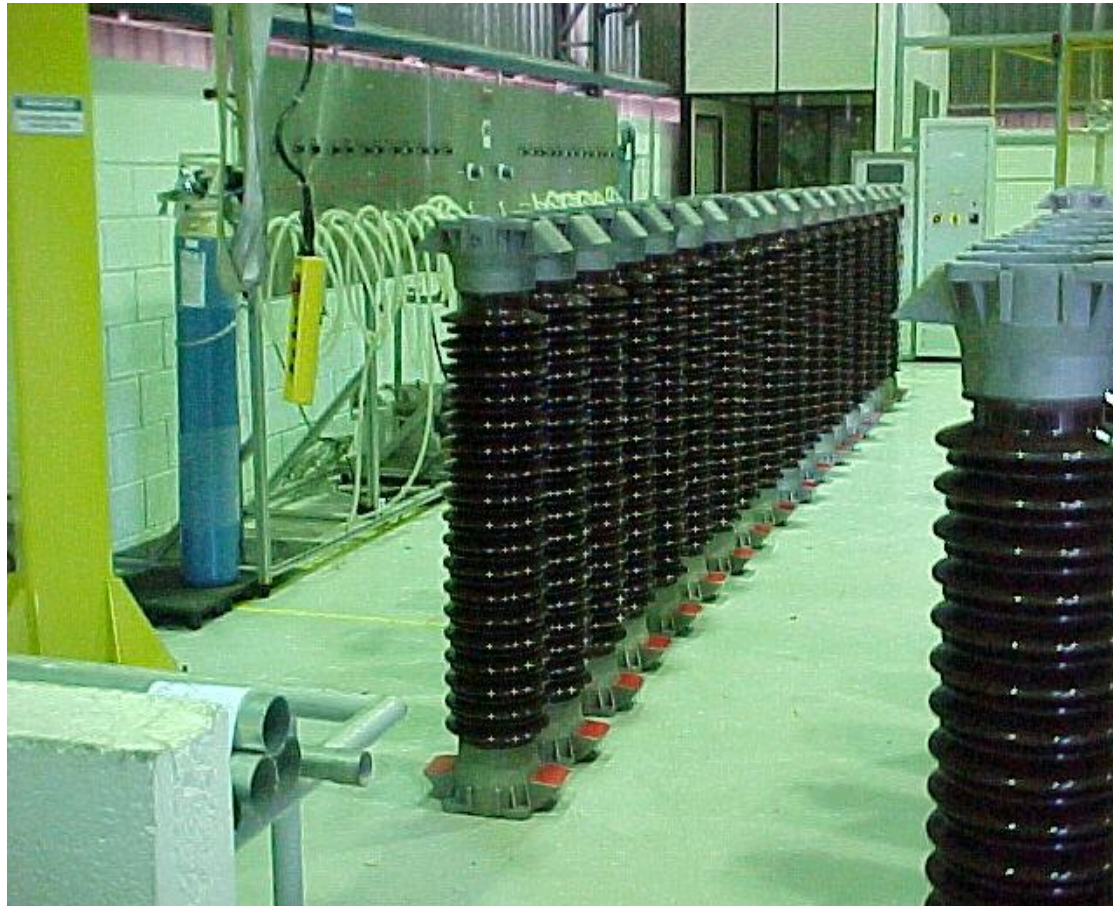
Ensaio em pára-raios de ZnO

Ensaio de recebimento:

1. Medição da tensão de referência;
2. Medição da tensão residual para impulso atmosférico à corrente de descarga nominal;
3. Medição de descargas parciais;
4. Medição da componente resistiva da corrente de fuga a MCOV (ET' s);
5. **Ensaio de estanqueidade;**
6. Ensaio especial de estabilidade térmica.

ENSAIOS EM PÁRA-RAIOS

Ensaio de estanqueidade



Ensaaios em pára-raios de ZnO

Ensaaios de recebimento:

1. Medição da tensão de referência;
2. Medição da tensão residual para impulso atmosférico à corrente de descarga nominal
3. Medição de descargas parciais;
4. Medição da componente resistiva da corrente de fuga a MCOV (ET' s);
5. Ensaio de estanqueidade;
6. Ensaio especial de estabilidade térmica.

ENSAIOS EM PÁRA-RAIOS

Ensaio de tipo



ENSAIOS EM PÁRA-RAIOS

Ensaio de tensão suportável do invólucro

- Para impulsos atmosféricos:

Tensão de ensaio igual a $1,3 \times$ Nível de proteção para impulso atmosférico do pára-raios (IEC 60.099-4).

- Para impulsos de manobra:

Pára-raios de 10 kA e 20 kA com $U_r \geq 200$ kV (IEC 60.099-4)

Tensão de ensaio igual a $1,25 \times$ Nível de proteção para impulso de manobra do pára-raios.

- A frequência industrial

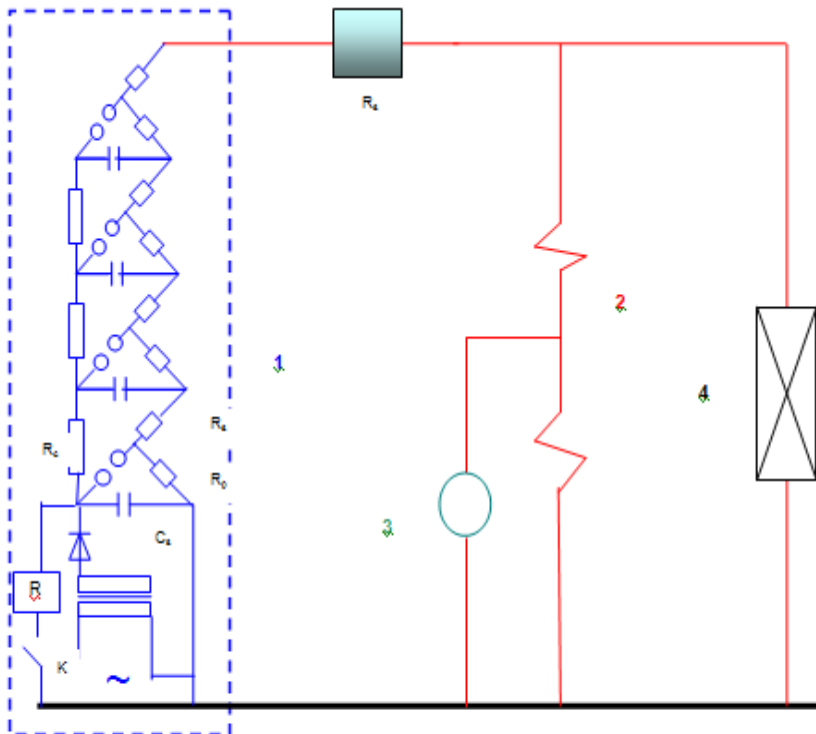
Pára-raios 1,5 kA; 5 kA; 10 kA; e 20 kA com $U_r < 200$ kV (IEC 60.099-4)

Tensão de ensaio (valor de crista) igual a $1,06 \times$ Nível de proteção para impulso de manobra do pára-raios.

ENSAIOS EM PÁRA-RAIOS

Ensaio de tensão suportável de impulso

Circuito de ensaios e requisitos gerais



1 – Gerador de impulsos; 2 – Divisor de Tensão;
3 - Sistema de medição de tensão; 4 - Objeto sob ensaio: corpo-de-prova

K chave de curto-circuito com fechamento automático ou manual em caso de falta de tensão ou abertura do circuito de segurança do laboratório. Esse sistema deve ser interligado com todas as portas de entrada e de saída do laboratório, devendo aterrar o gerador em caso de abertura de uma dessas portas.

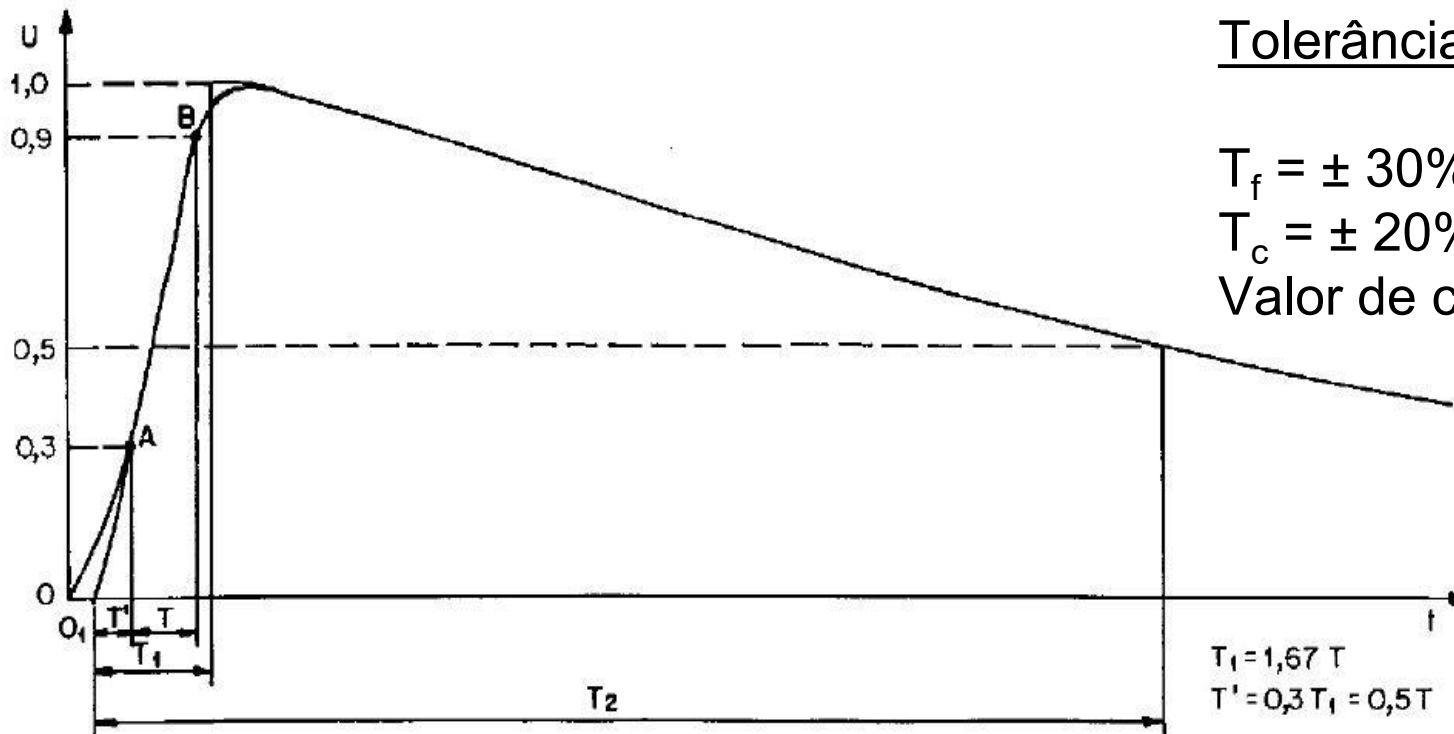


ENSAIOS EM PÁRA-RAIOS

Gerador de impulsos de tensão

Forma de impulso normalizada

A forma de onda da tensão representativa apresenta um tempo até a crista de $1,2 \mu\text{s}$, e tempo até meio valor de $50 \mu\text{s}$.



Tolerância:

$$T_f = \pm 30\%$$

$$T_c = \pm 20\%$$

Valor de crista: $\pm 3\%$

Ensaio de tensão suportável de impulso atmosférico - Procedimento tipo B

São aplicados ao objeto sob ensaio 15 impulsos de forma e polaridades especificadas, com o valor de crista igual ao valor da tensão suportável nominal.

Os requisitos desse ensaio são satisfeitos se não ocorrer mais do que duas descargas disruptivas na isolação auto-recuperante e se nenhuma indicação de falha for obtida na isolação não auto-recuperante, conforme o método de detecção definido pela Norma técnica.

ENSAIOS EM PÁRA-RAIOS

Ensaio de tensão residual em pára-raios

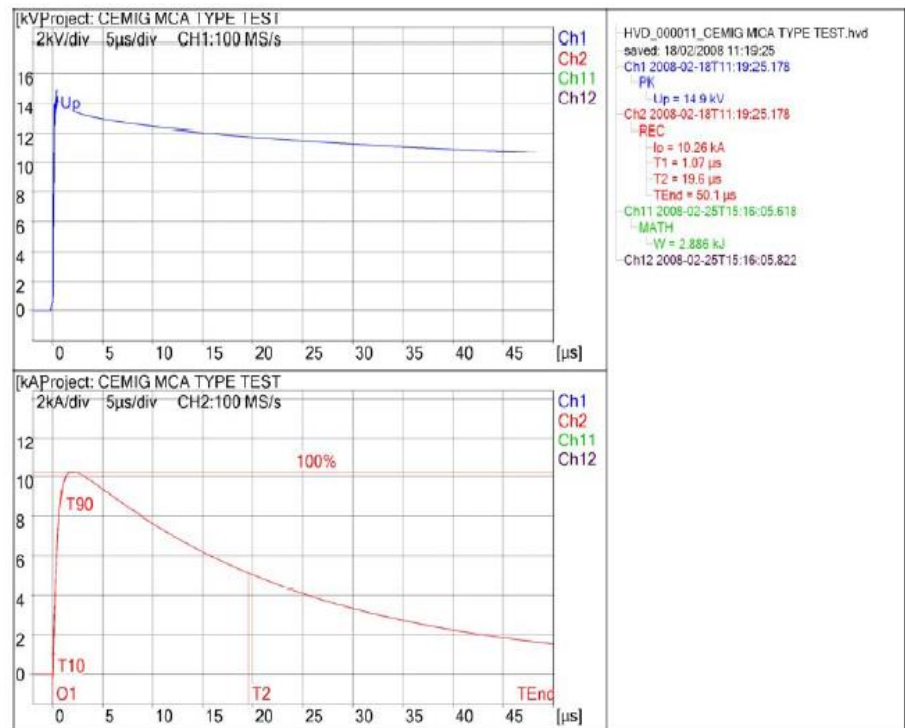


ENSAIOS EM PÁRA-RAIOS

Ensaio de Tensão residual (3 amostras)

Tensão residual para impulso de frente íngreme ($1/2 \mu\text{s}$)

Uma aplicação de impulso de corrente, com amplitude equivalente a corrente de descarga nominal do pára-raios



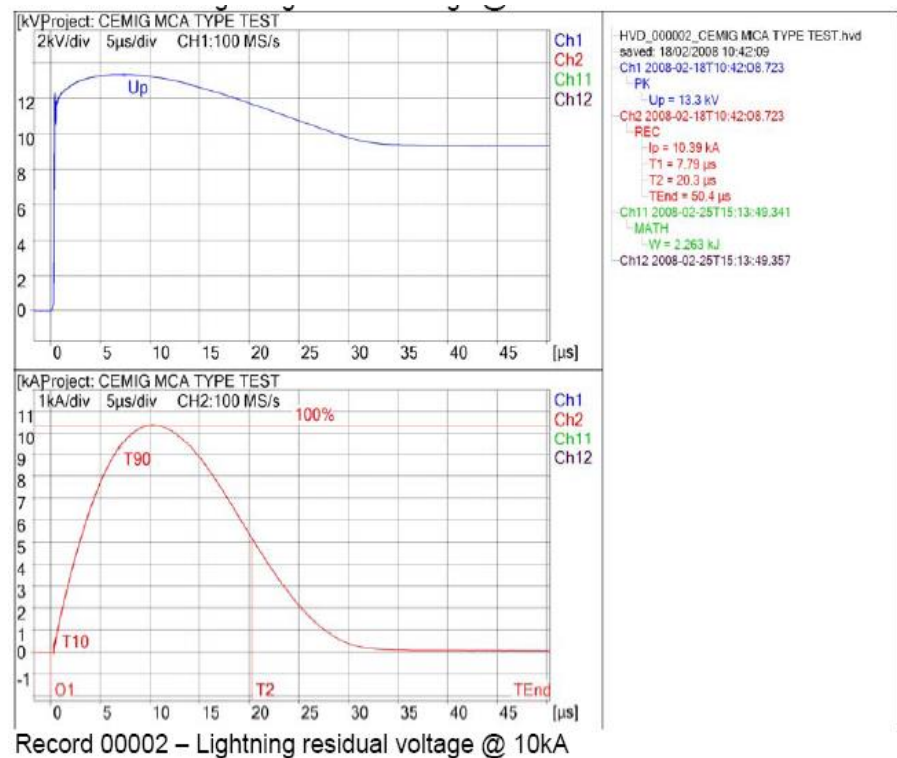
HVD_000011_CEMIG MCA TYPE TEST.hvd
saved: 18/02/2008 11:19:25
-Ch1 2008-02-18T11:19:25.178
-PK
-Up = 14.9 kV
-Ch2 2008-02-18T11:19:25.178
-REC
-Ip = 10.26 kA
-T1 = 1.07 μs
-T2 = 19.5 μs
-TEnd = 50.1 μs
-Ch11 2008-02-25T15:16:05.618
-MATH
-W = 2.888 kJ
-Ch12 2008-02-25T15:16:05.822

ENSAIOS EM PÁRA-RAIOS

Ensaio de Tensão residual (3 amostras) Tensão residual para impulso atmosférico (8/20 μ s)

Aplicação em cada amostra, de três impulsos de corrente, com amplitudes equivalentes a meia, uma e duas vezes a corrente de descarga nominal do pára-raios (IEC 60.099-4).

Obtém-se a curva Tensão residual x corrente de descarga

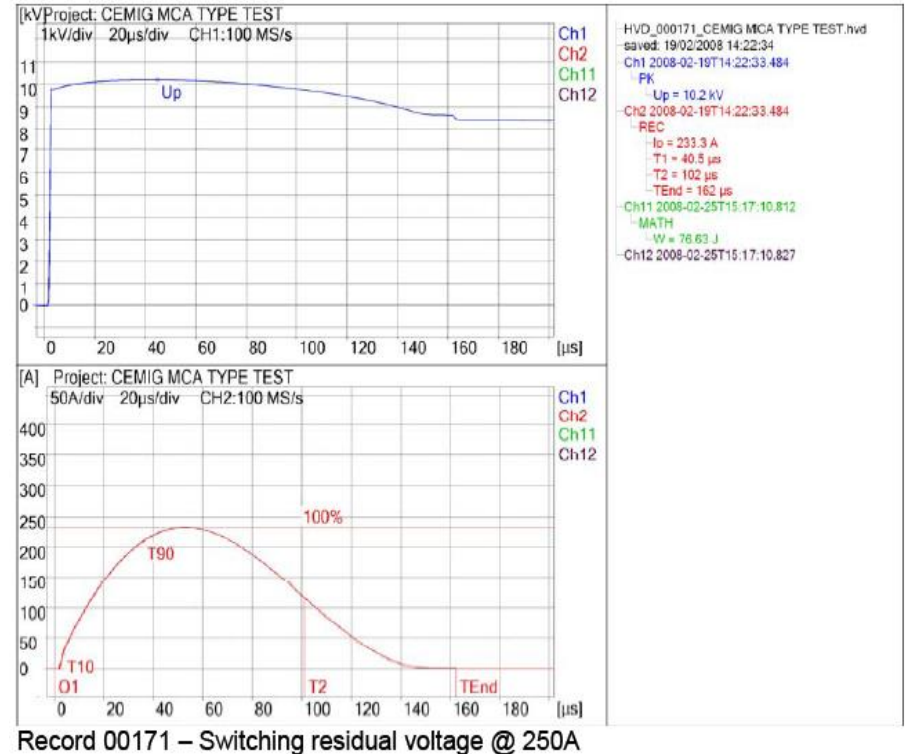


ENSAIOS EM PÁRA-RAIOS

Ensaio de Tensão residual (3 amostras)

Tensão residual para impulso de manobra (30/60 μ s)

Duas aplicações de impulso de corrente, com amplitudes definidas em função da amostra a ser ensaiada.



Requisitos para o ensaio de tensão residual a impulso de manobra

Corrente de descarga nominal do pára-raios (kA)	Classe de Descarga de Linha de Transmissão	Corrente de Crista (A)
20	4 e 5	500 e 2000
10	3	250 e 1000
10	1 e 2	125 e 500

Ensaio corrente suportável de longa duração

- **Impulso de corrente retangular:
pára-raios de 5 kA**

Aplicação de 18 impulsos de corrente, com amplitude de 150 A e duração virtual de crista de 2000 microsegundos.

- **Descarga de linhas de transmissão:
pára-raios de 10 kA (classes 1 a 3 de DLT); e
pára-raios de 20 kA (classes 4 e 5 de DLT)**

Aplicação de 18 impulsos de corrente, com os parâmetros do gerador de impulso definidos de acordo com a classe de descarga de linha da amostra ensaiada.

ENSAIOS EM PÁRA-RAIOS

Ensaio corrente suportável de longa duração Descarga de linhas de transmissão

Parâmetros para o ensaio de descarga de linha de transmissão em pára-raios de 10 kA e 20 kA

Classe do pára-raios (kA)	Classe de descarga de linha de transmissão	Impedância de surto do gerador Z (Ω)	Duração virtual de crista T (μ s)	Tensão de carga UL (kV c.c.)
10	1	4,9 Un	2000	3,2 Un
10	2	2,4 Un	2000	3,2 Un
10	3	1,3 Un	2400	2,8 Un
20	4	0,8 Un	2800	2,6 Un
20	5	0,5 Un	3200	2,4 Un

NOTAS

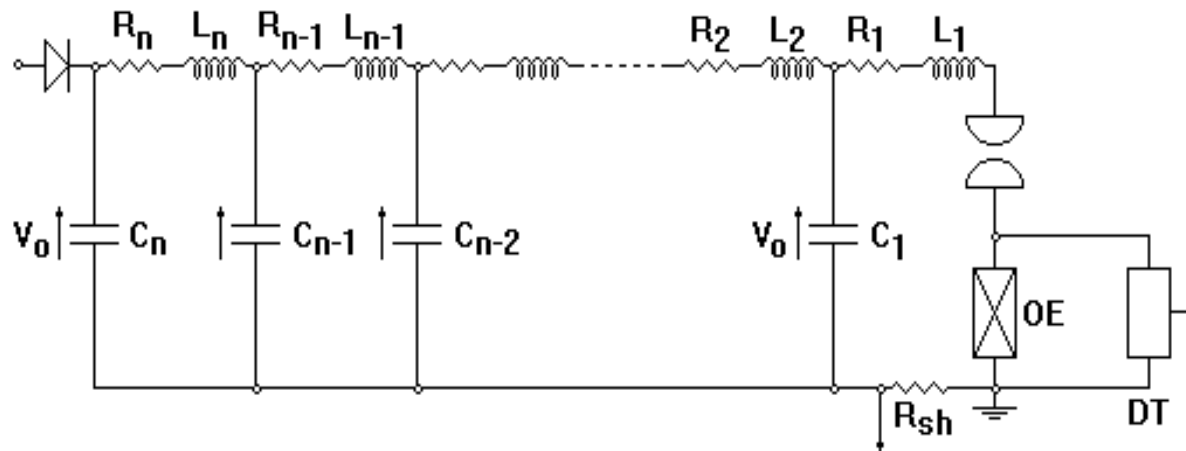
1 Un = Tensão nominal do corpo de prova, em kV (valor eficaz).

2 As classes 1 a 5 correspondem à capacidade de descarga de linha de transmissão, que é função da energia envolvida. A seleção da classe de descarga apropriada deve ser baseada nos requisitos do sistema, conforme descrito no anexo C.

ENSAIOS EM PÁRA-RAIOS

Ensaio corrente suportável de longa duração

Circuito de ensaios e requisitos gerais



n número de estágios do gerador de corrente

V_0 Tensão de carregamento do gerador

C_n L_n Capacitores e Indutores por estágio, para ajuste da forma de impulso;

OE Objeto sob ensaio

DT Divisor de tensão resistivo com relação apropriada

R_{sh} Derivador para medição da corrente de impulso

ENSAIOS EM PÁRA-RAIOS

Ensaio de corrente suportável de longa duração

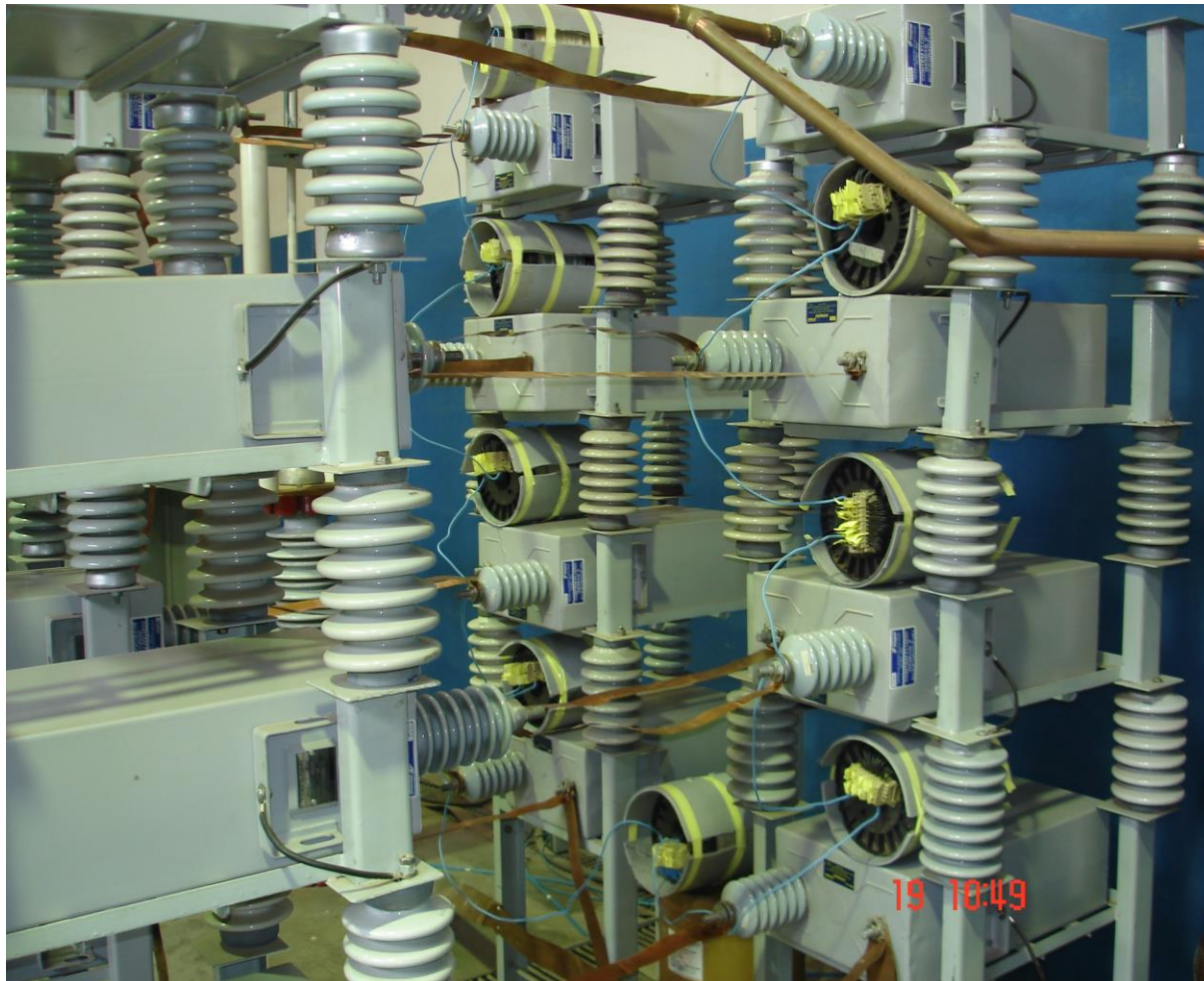
Circuito de ensaio



ENSAIOS EM PÁRA-RAIOS

Ensaio de corrente suportável de longa duração

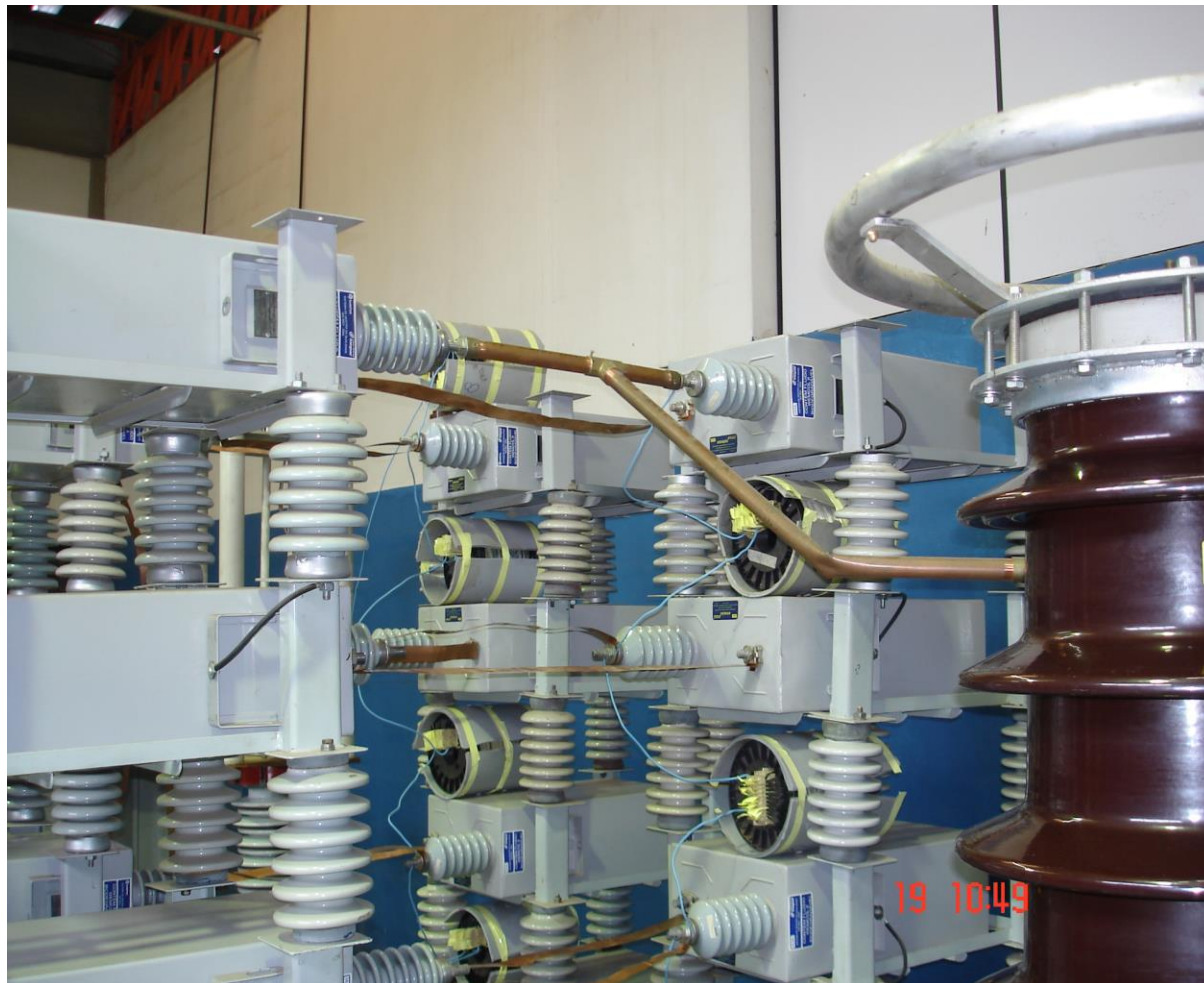
Circuito de ensaio



ENSAIOS EM PÁRA-RAIOS

Ensaio de corrente suportável de longa duração

Circuito de ensaio



ENSAIOS EM PÁRA-RAIOS

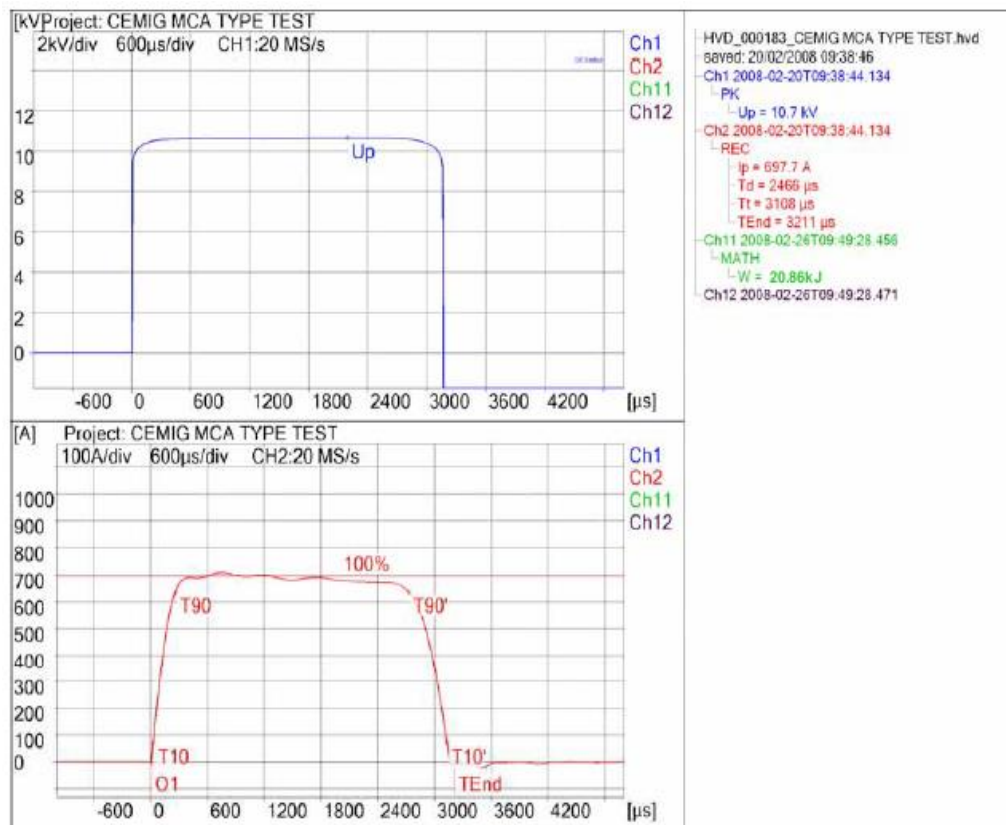
Ensaio de corrente suportável de longa duração

Circuito de ensaio



ENSAIOS EM PÁRA-RAIOS

Ensaio corrente suportável de longa duração Descarga de linhas de transmissão



Record 183 – Duty cycle: 1st shot of energy discharge

Ensaio de ciclo de operação

- para impulso de corrente elevada:
pára-raios de 1,5 kA; 5 kA; e 10 kA classe 1

- para impulso de manobra:
pára-raios de 10 kA (classes 2 e 3 de DLT); e
pára-raios de 20 kA (classes 4 e 5 de DLT)

ENSAIOS EM PÁRA-RAIOS

Ensaio de ciclo de operação

Ensaio de envelhecimento acelerado



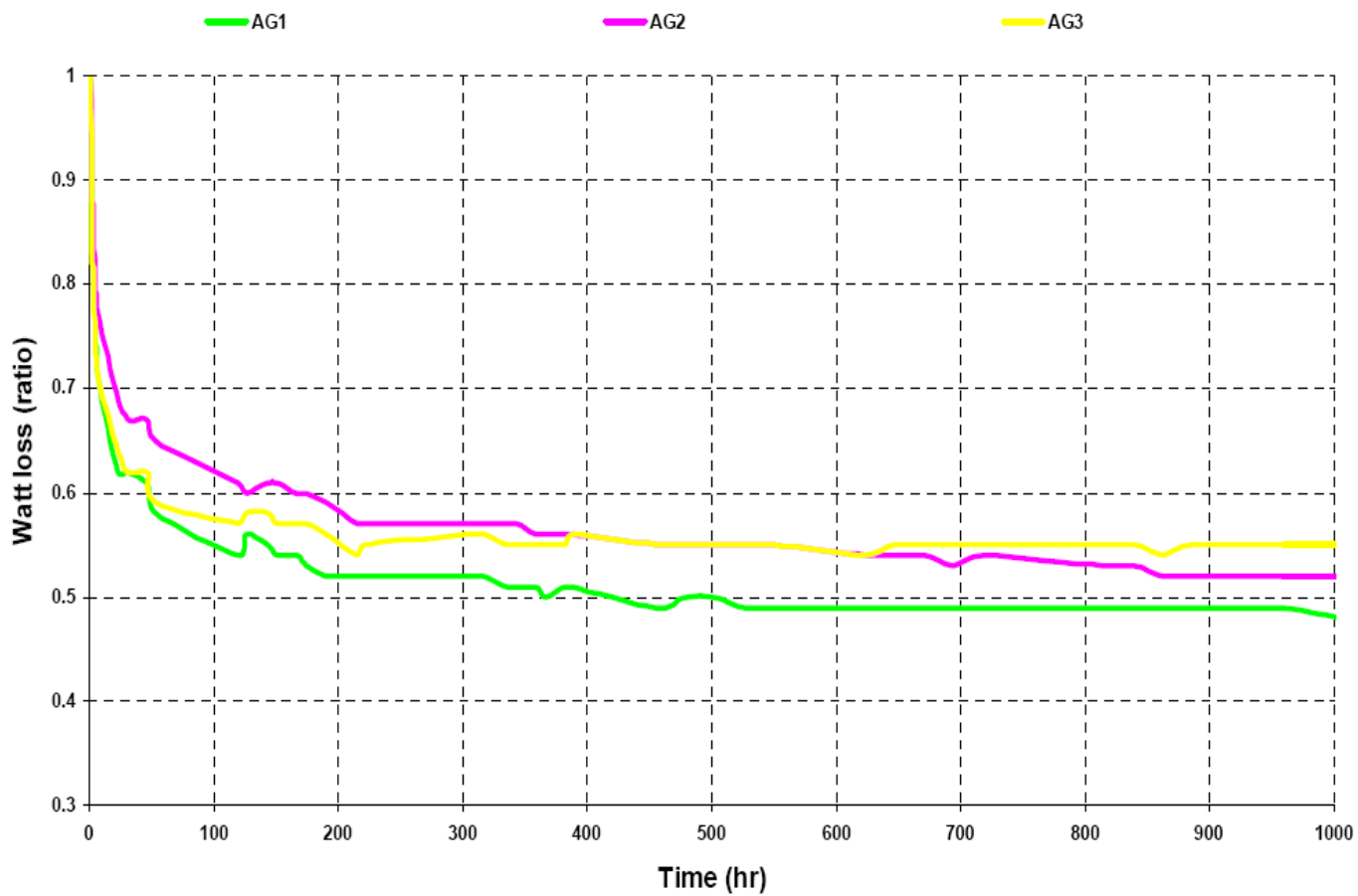
ENSAIOS EM PÁRA-RAIOS

Ensaio de ciclo de operação
Ensaio de envelhecimento acelerado



ENSAIOS EM PÁRA-RAIOS

Ensaio de ciclo de operação
Ensaio de envelhecimento acelerado



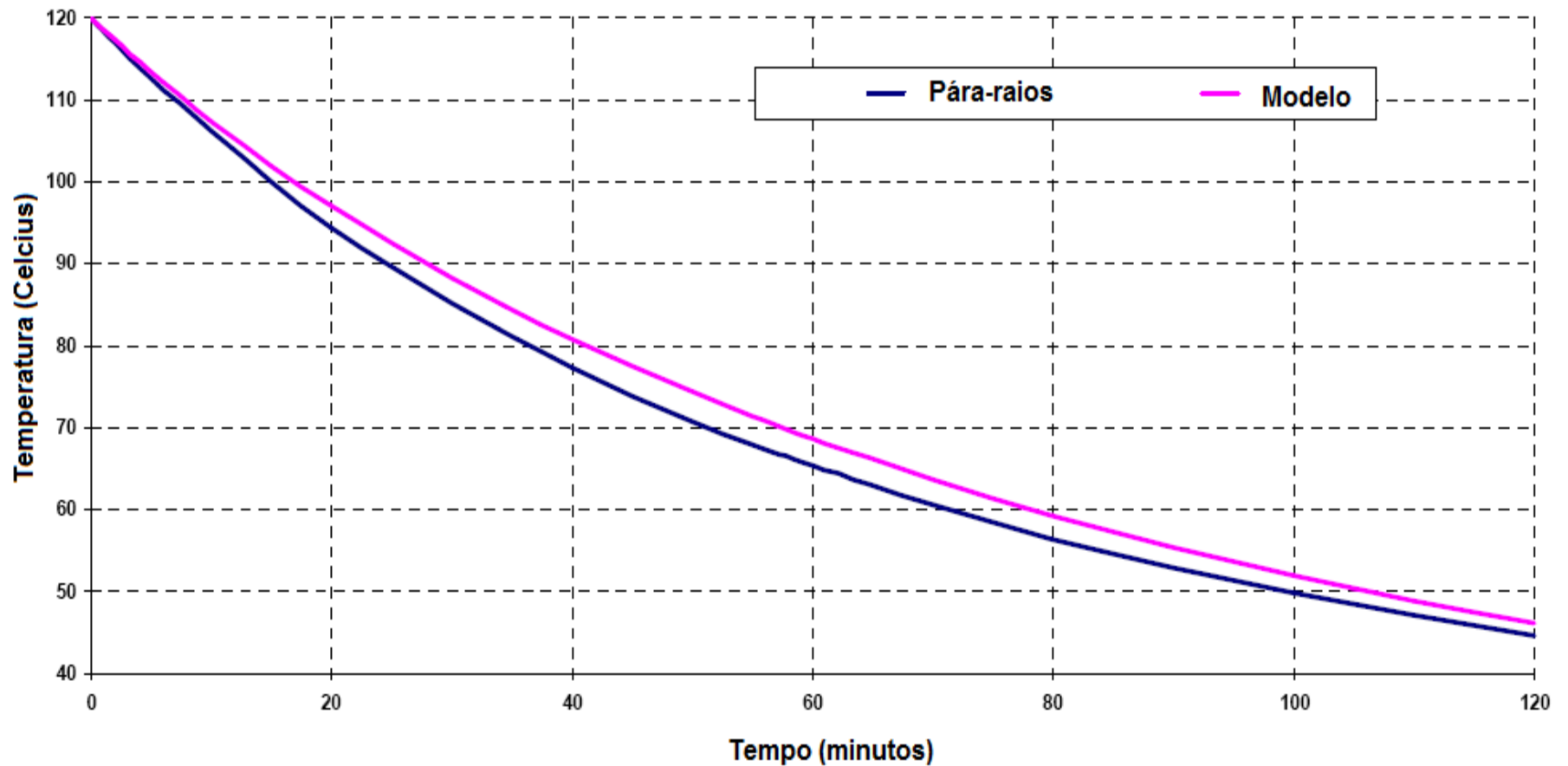
ENSAIOS EM PÁRA-RAIOS

Ensaio de ciclo de operação
Verificação da equivalência térmica



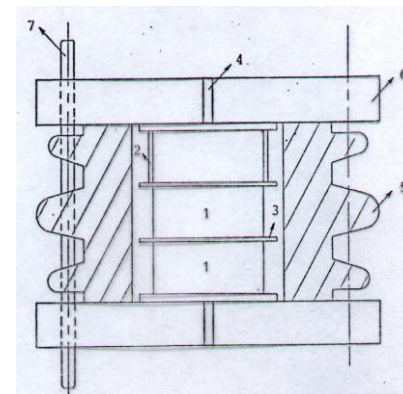
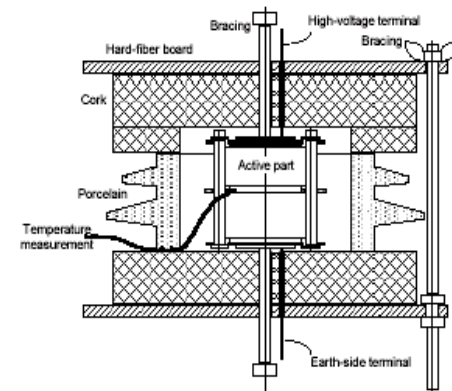
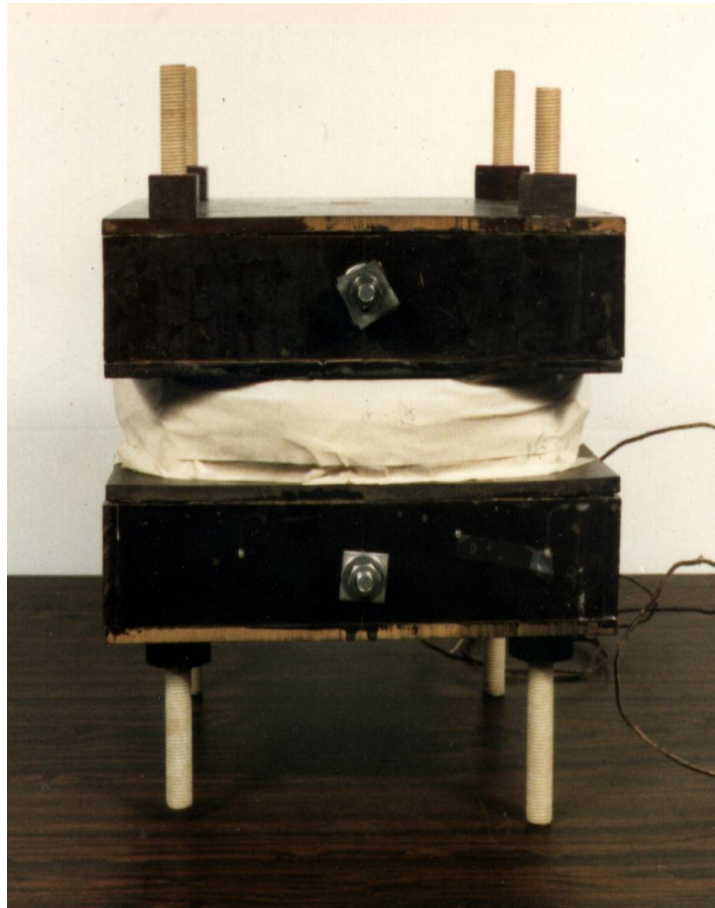
Ensaio de ciclo de operação

Verificação da equivalência térmica



ENSAIOS EM PÁRA-RAIOS

Ensaio de ciclo de operação
Verificação da equivalência térmica



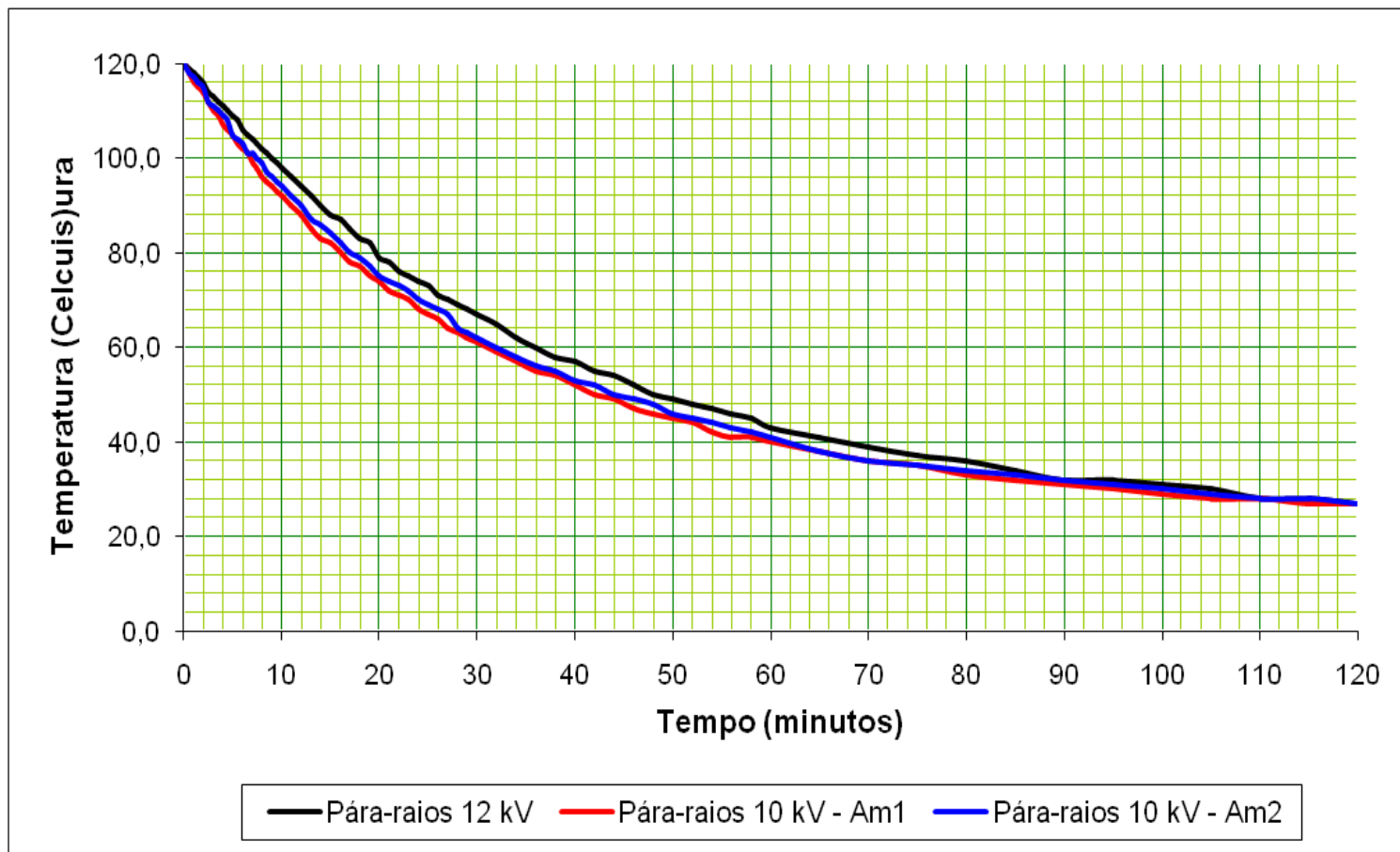
ENSAIOS EM PÁRA-RAIOS

Ensaio de ciclo de operação
Verificação da equivalência térmica



ENSAIOS EM PÁRA-RAIOS

Ensaio de ciclo de operação Verificação da equivalência térmica



ENSAIOS EM PÁRA-RAIOS

Ensaio de ciclo de operação

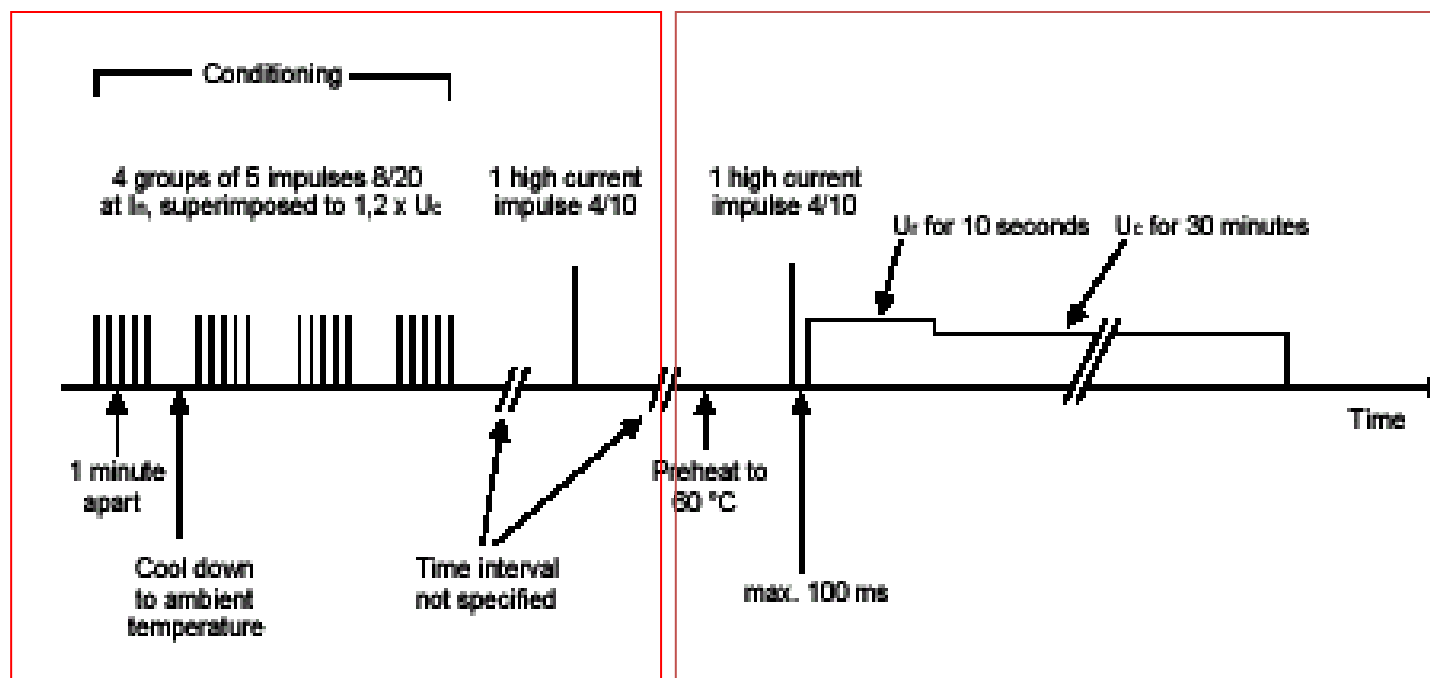
- para impulso de corrente elevada:
pára-raios de 1,5 kA; 5 kA; e 10 kA classe 1

[Procedimento de ensaio](#)

ENSAIOS EM PÁRA-RAIOS

Ensaio de ciclo de operação para impulso de corrente elevada

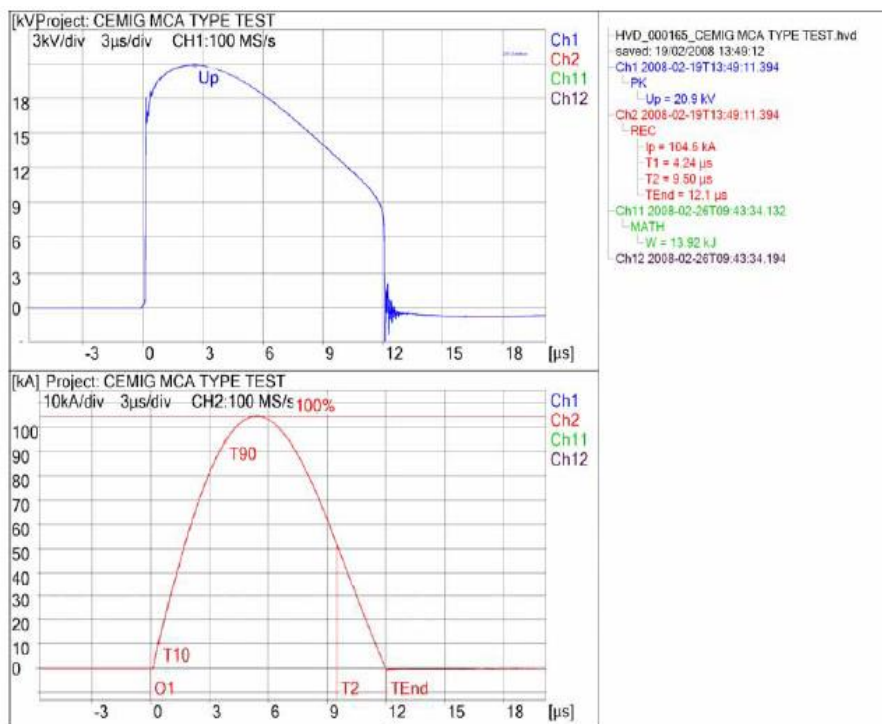
Pára-raios com corrente de descarga nominal de 1,5 kA, 5 kA e 10 kA classe 1 de DLT.



ENSAIOS EM PÁRA-RAIOS

Ensaio de ciclo de operação para impulso de corrente elevada

Impulsos de corrente com forma 4/10 e amplitude função das características das amostras ensaiadas



Record 165 – Pre-conditioning: 1st shot of hi-current

Valores de aplicação de impulsos de correntes elevadas

Classe do pára-raios (kA)	Valor de crista da corrente (kA)
20	100
10	100
5	65
1,5	10

ENSAIOS EM PÁRA-RAIOS

Ensaio de ciclo de operação para impulso de corrente elevada

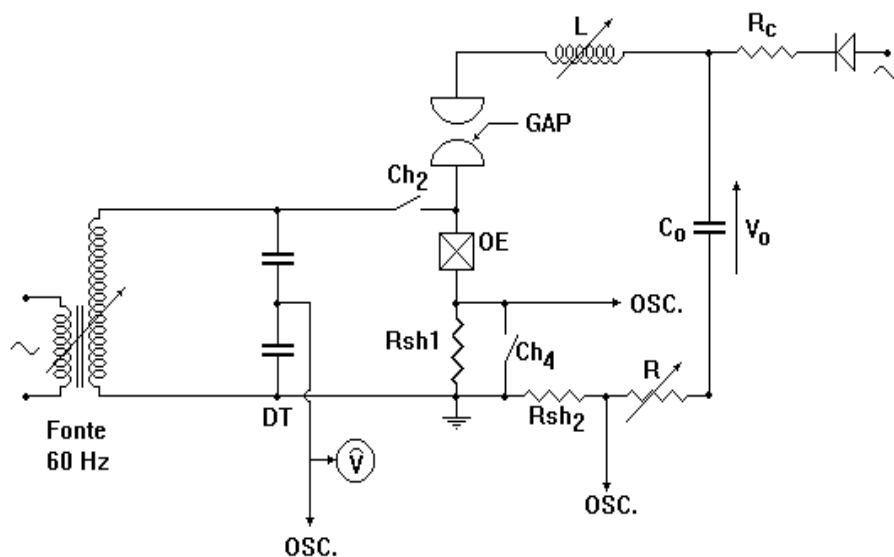


$T = (60 \pm 3)^{\circ}\text{C}$

ENSAIOS EM PÁRA-RAIOS

Ciclo de operação para impulso de corrente elevada

Circuito de ensaio e requisitos gerais



V_0 , R_c Tensão de carga do gerador e Resistor de carga, respectivamente;
 C_0 , R , L Banco de capacitores, resistor e indutor para ajuste da forma de impulso;

OE Objeto sob ensaio;

DT Divisor de tensão para medição da tensão de freqüência industrial;

R_{sh1} Derivador para medição da corrente alternada;

R_{sh2} Sistema de medição da corrente de impulso;

Ch₄ Chave - Fechada quando da aplicação do impulso de corrente.

ENSAIOS EM PÁRA-RAIOS

Ensaio de ciclo de operação

- para impulso de corrente elevada:
pára-raios de 1,5 kA; 5 kA; e 10 kA classe 1

Procedimento de ensaio

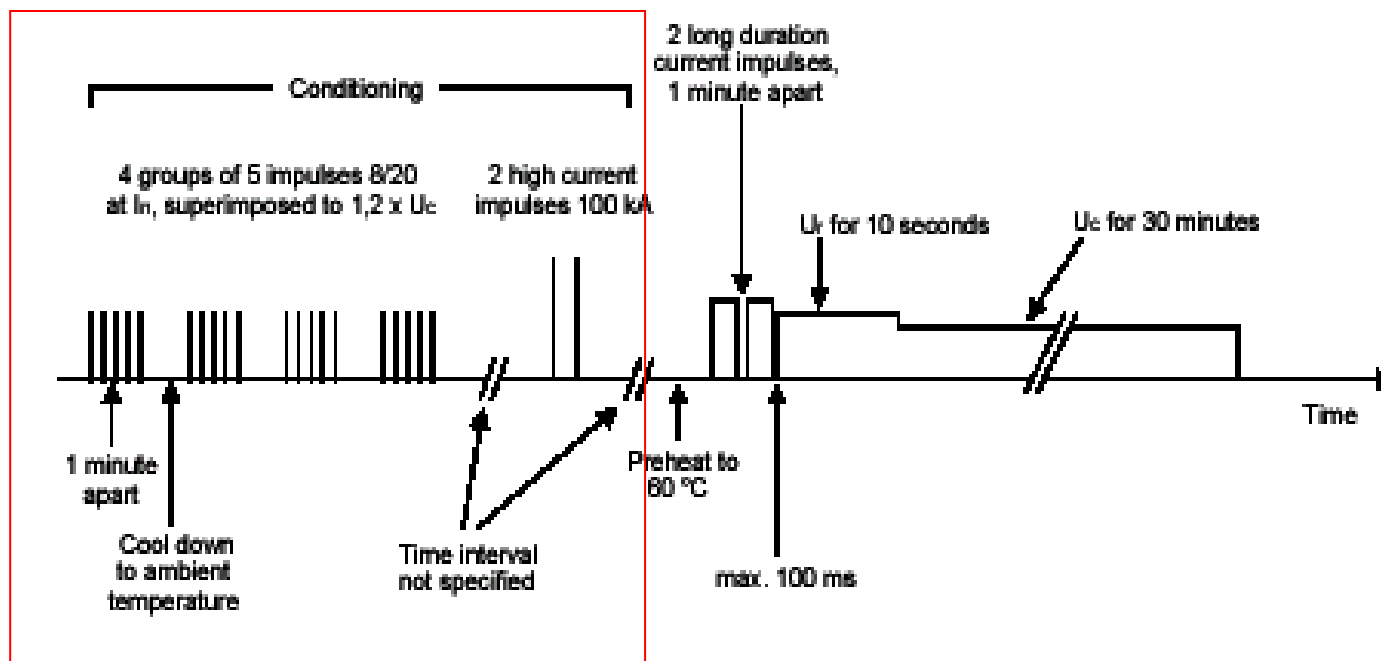
- para impulso de manobra:
pára-raios de 10 kA (classes 2 e 3 de DLT); e
pára-raios de 20 kA (classes 4 e 5 de DLT)

[Procedimento de ensaio](#)

ENSAIOS EM PÁRA-RAIOS

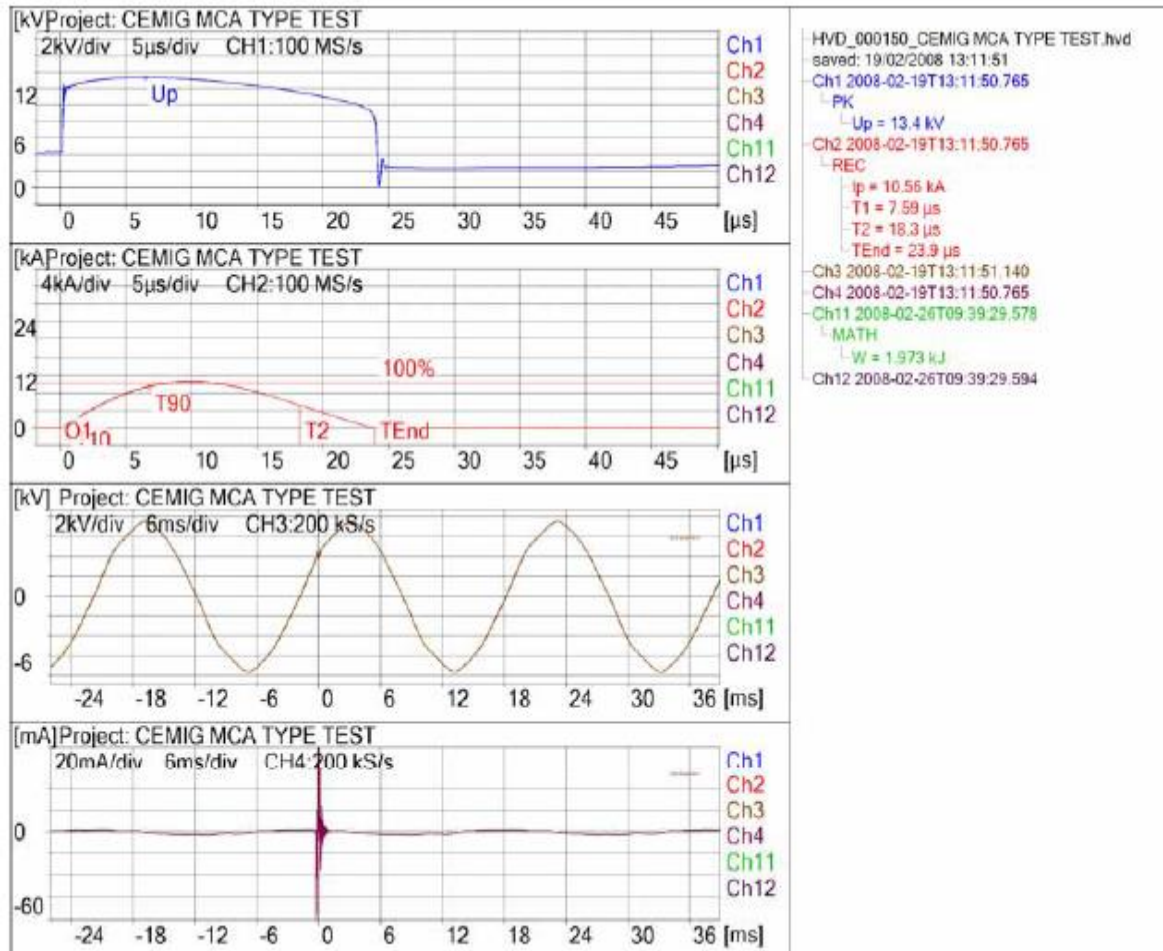
Ensaio de ciclo de operação para impulso de manobra

Pára-raios com corrente de descarga nominal de 10 kA classes 2 e 3 de DLT e 20 kA classes 4 e 5 DLT.



ENSAIOS EM PÁRA-RAIOS

Ensaio de ciclo de operação para impulso de manobra Ensaio de condicionamento

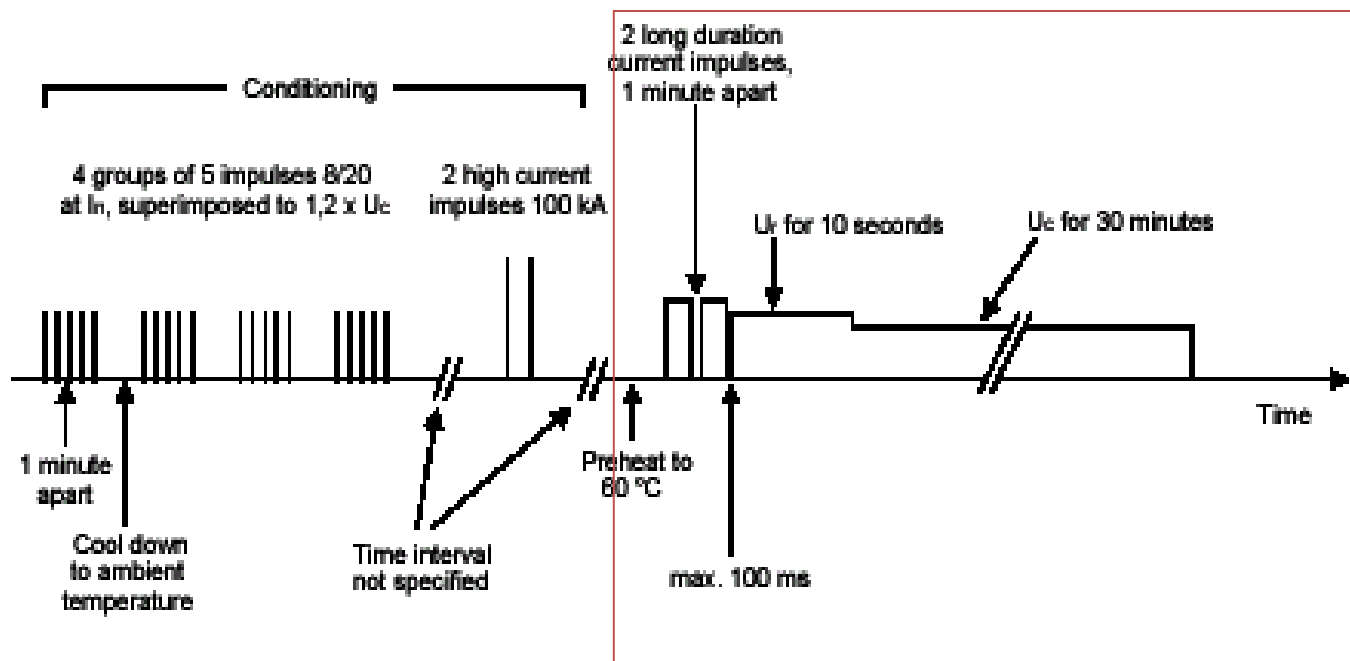


Record 150 – Pre-conditioning: Group 4, Shot 4 (Shot No.19 overall)

ENSAIOS EM PÁRA-RAIOS

Ensaio de ciclo de operação para impulso de manobra

Pára-raios com corrente de descarga nominal de 10 kA classes 2 e 3 de DLT e 20 kA classes 4 e 5 DLT.



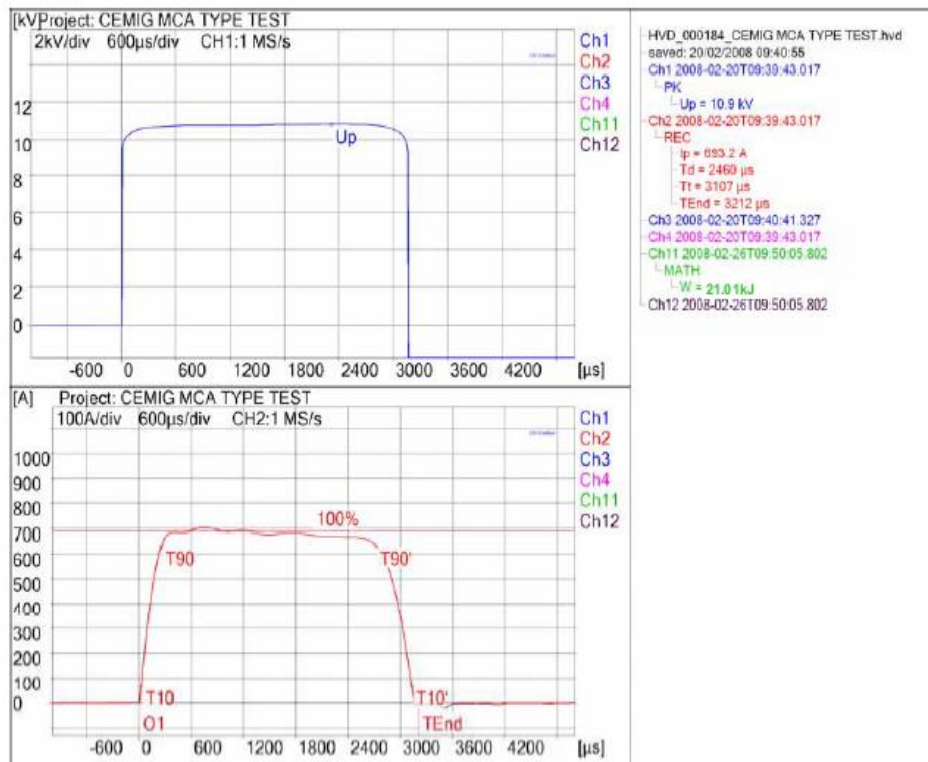
ENSAIOS EM PÁRA-RAIOS

Ensaio de ciclo de operação para impulso de manobra



ENSAIOS EM PÁRA-RAIOS

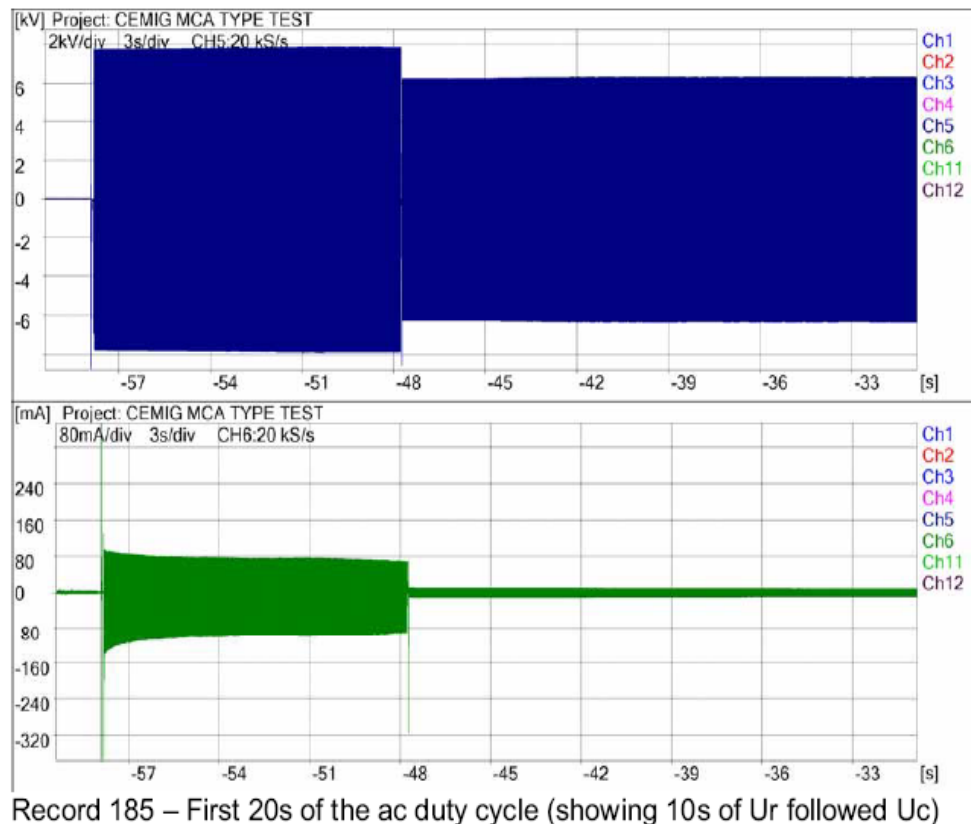
Ensaio de ciclo de operação para impulso de manobra Verificação da estabilidade térmica



Aplicação de dois impulsos de descarga de linhas de transmissão,
(no exemplo classe 3).

ENSAIOS EM PÁRA-RAIOS

Ensaio de ciclo de operação para impulso de manobra Verificação da estabilidade térmica



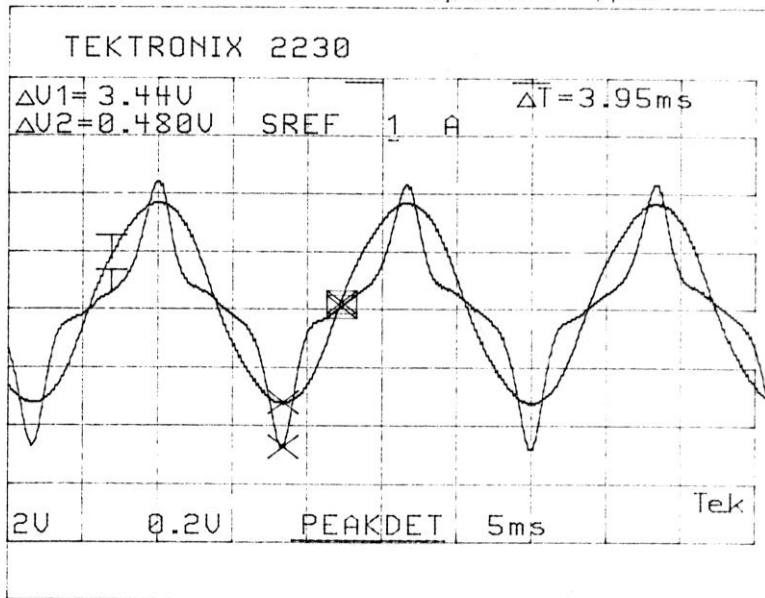
Aplicação da tensão nominal da seção sob ensaio por 10 s,
seguida da aplicação da MCOV por trinta minutos

ENSAIOS EM PÁRA-RAIOS

Ensaio de ciclo de operação para impulso de manobra

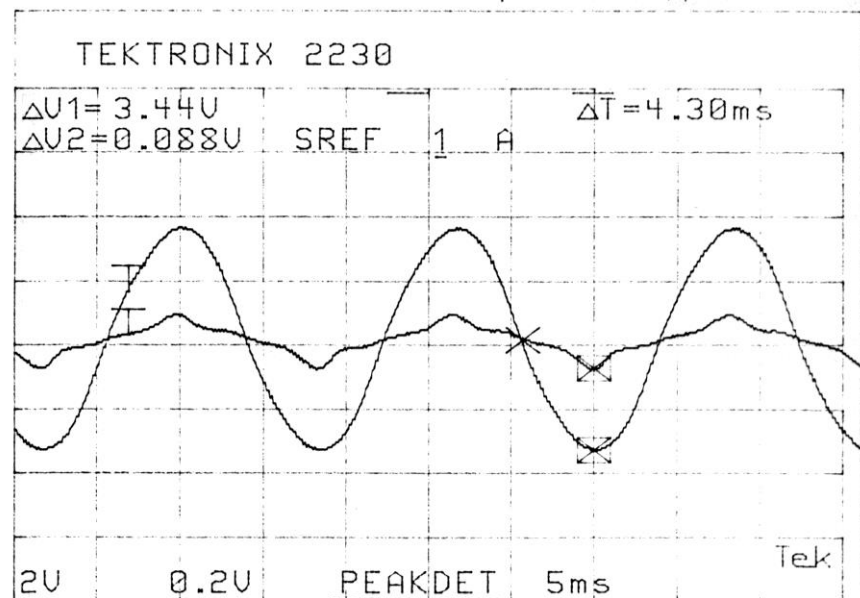
osc. nº 43 - Após 1 minuto da aplicação da MCOV

Tensão aplicada: 699,6V_{cr}/mm
Comp. resist. corrente: 78,9 µA/mm



osc. nº 46 - Após 30 minutos da aplicação da MCOV

Tensão aplicada: 699,6V_{cr}/mm
Comp. resist. corrente: 78,9 µA/mm

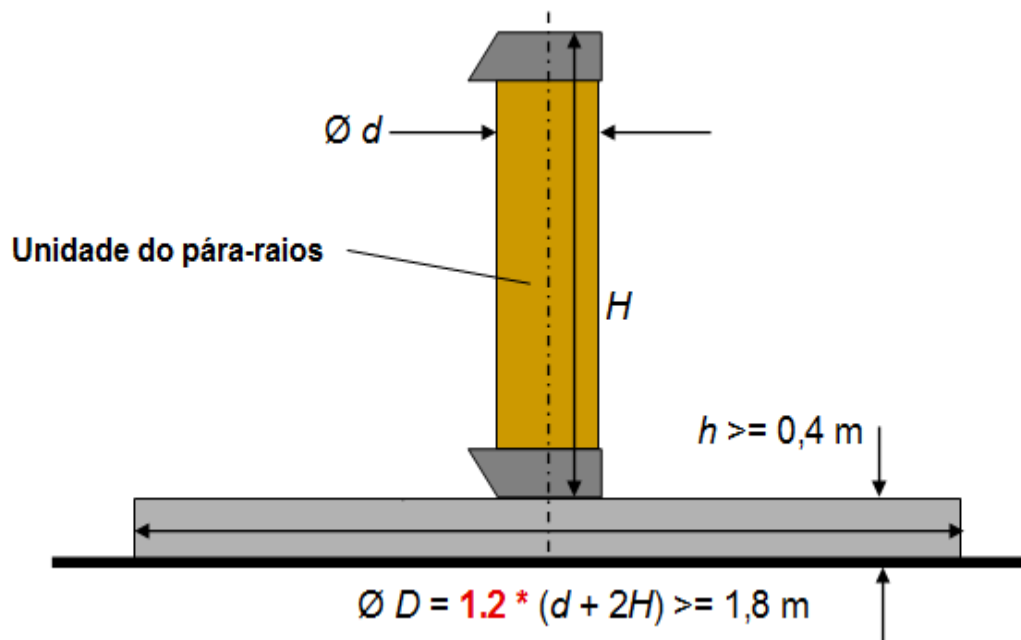


Verificação da estabilidade térmica, através da medição da corrente resistiva 2 minutos e 30 minutos após a aplicação da MCOV

ENSAIOS EM PÁRA-RAIOS

Ensaio em pára-raios de ZnO

Ensaio de corrente de curto-circuito



Critério de aprovação

- Diâmetro do círculo de ensaio aumentado em 20 %
- Partes com até 60 g são permitidas fora do círculo de ensaio

Ensaio em pára-raios de ZnO

Ensaio de corrente de curto-circuito

Table O.1 – Method of preparing arresters with a pressure relief device for conducting short-circuit current

Short-circuit current	Arrester preparation
Rated short-circuit current	External fuse wire
Reduced short-circuit currents	External fuse wire
Low short-circuit current	Overvoltage

Table O.2 – Method of preparing arresters without a pressure relief device for conducting short-circuit current

Short-circuit current	Arrester preparation
Rated short-circuit current	Internal fuse wire or overvoltage
Reduced short-circuit currents	Internal fuse wire or overvoltage
Low short-circuit current	Overvoltage

ENSAIOS EM PÁRA-RAIOS

Ensaio em pára-raios de ZnO

Ensaio de corrente de curto-circuito

Arrester class = nominal discharge current A	High current			Low current
	Rated short-circuit current I_S 100 % A	Reduced short-circuit currents ≈ 50 % A ≈ 25 %		Short-circuit current with a duration of 1 s ^a A
20 000 or 10 000	80 000	50 000	25 000	600 ± 200
20 000 or 10 000	63 000	25 000	12 000	600 ± 200
20 000 or 10 000	50 000	25 000	12 000	600 ± 200
20 000 or 10 000	40 000	25 000	12 000	600 ± 200
20 000 or 10 000	31 500	12 000	6 000	600 ± 200
20 000, 10 000 or 5 000	20 000	12 000	6 000	600 ± 200
10 000 or 5 000	16 000	6 000	3 000	600 ± 200
10 000, 5 000, 2 500 or 1 500	10 000	6 000	3 000	600 ± 200
10 000, 5 000, 2 500 or 1 500	5 000	3 000	1 500	600 ± 200

Ensaio em desligadores automáticos



A

Ensaio de tipo – IEC 60.099-4 / 09

- Ensaio de tensão residual
- Ensaio de ciclo de operação
- Ensaio de corrente suportável de longa duração
- Levantamento da curva característica “tempo versus corrente”

ENSAIOS EM PÁRA-RAIOS

Ensaio em pára-raios de ZnO

Ensaio de poluição artificial com respeito a solicitações térmicas em pára-raios multi-unidades com invólucro de porcelana – Anexo F

Considerações mecânicas – Ensaio de momento fletor - Anexo N

Ensaio em pára-raios de ZnO

Ensaio específico a pára-raios poliméricos:

Com o crescimento do mercado dos pára-raios com invólucro polimérico, ensaios específicos têm se mostrado muito importantes para a avaliação do desempenho desses pára-raios:

Ensaio mecânico;

Ensaio de penetração de umidade;

Ensaio de envelhecimento acelerado do invólucro.

ENSAIOS EM PÁRA-RAIOS

Ensaio em pára-raios de ZnO

Ensaio específicos a pára-raios poliméricos:

Ensaio de penetração de umidade: tem por objetivo simular as condições que propiciam a entrada de umidade no interior dos pára-raios.

Ensaio mecânicos: verifica o desempenho dos pára-raios com invólucros poliméricos quando submetidos a solicitações mecânicas representativas daquelas que ocorrem em campo.

Ensaio de envelhecimento acelerado do invólucro isolante: verifica o desempenho do material polimérico utilizado no invólucro do pára-raios, quando submetido a diferentes condições ambientais.

ENSAIOS EM PÁRA-RAIOS

Ensaio de envelhecimento acelerado do invólucro isolante

Exemplo de ciclo diário de envelhecimento sob tensão (NBR 15122)

Tempo (h)	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20	22	24
Tensão de ensaio	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
Chuva	■	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□
Aquecimento (50 °C)	□	■	■	□	□	□	■	■	□	□	□	■
Umidade Relativa (95%)	□	□	■	□	□	□	□	■	□	□	□	□
Névoa Salina (7 kg/m ³)	□	□	□	■	■	□	□	□	■	■	□	□
Radiação Solar (UV)	■	■	□	□	□	■	■	□	□	□	■	■

■ - em operação

□ - fora de operação

