

IT 308 D – TOPICOS EM TECNICAS DE ALTA TENSÃO II.

PARTE 2

Pissolato Março 2020

EFEITO DAS SOBRETENSÕES SOBRE OS ISOLAMENTOS

Efeito das sobretensões sobre o isolamento

O comportamento de suportabilidade de uma isolação frente às sobretensões apresenta, em geral, uma natureza aleatória. Uma isolação submetida a uma sollicitação 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 $P(U_i)$.

EFEITO DAS SOBRETENSÕES SOBRE OS ISOLAMENTOS

Efeito das sobretensões sobre o isolamento Isolação auto-recuperante

A probabilidade de falha pode ser determinada através da realização de ensaios elétricos.

⇒ Tensão com 50% de probabilidade de descarga (tensão crítica de descarga da isolação).

⇒ Métodos de ensaios utilizados:

- **Método dos níveis múltiplos**
- **Método dos acréscimos e decréscimos**

EFEITO DAS SOBRETENSÕES SOBRE OS ISOLAMENTOS

Efeito das sobretensões sobre o isolamento Isolação não auto-recuperante

Não é viável economicamente definir a probabilidade de falha através de ensaios elétricos. A suportabilidade dielétrica pode ser alterada por:

- ⇒ Envelhecimento da isolação, devido a ciclos térmicos e mecânicos que alteram a composição físico e química dos materiais;
- ⇒ Processo de ionização sustentado, decorrente de uma tensão excessiva em um determinado ponto da isolação, acarretando em uma falha localizada na isolação.

CARACTERÍSTICAS DA ISOLAÇÃO

Isolação dos equipamentos - Faixa 1

Tensão máxima do equipamento U_m [kV _{eficaz}]	Tensão suportável normalizada de frequência fundamental de curta duração [kV _{eficaz}]	Tensão suportável normalizada de impulso atmosférico [kV _{crista}]
0,6* (nota 1)	4*	-
1,2*	10	30*
3,6	10	20 40
7,2	20	40 60
12	28	60 75 95
15*	34*	95 110*
17,5	38	75 95
24	50	95 125 145
36	70	145 170 200*
52	95	250
72,5	140	325 350*
92,4*	150*	380*
	185	450
123	(185)	450
	230	550
145	(185)	(450)
	230	550
	275	650
170	(230)	(550)
	275	650
	325	750
245	(275)	(650)
	(325)	(750)
	360	850
	395	950
	460	1050

NOTAS

1 O nível de isolamento correspondente à $U_m = 0,6$ kV só é aplicável a secundário de transformador, cujo primário tem U_m superior a 1 kV.

2 Se os valores entre parêntesis forem considerados insuficientes para provar que as tensões suportáveis fase-fase especificadas são satisfeitas, ensaios adicionais de suportabilidade fase-fase são necessários.

* Indica valores não constantes na IEC 60071-1.

CARACTERÍSTICAS DA ISOLAÇÃO

Isolação dos equipamentos - Faixa 2

Tensão máxima do equipamento U_m [kV _{eficaz}]	Tensão suportável normalizada de impulso de manobra			Tensão suportável normalizada de impulso atmosférico [kV _{crista}]
	Isolação longitudinal (nota 1) [kV _{crista}]	Fase-terra [kV _{crista}]	Fase-fase (relação para o valor de crista fase-terra)	
300	750	750	1,50	850 950
	750	850	1,50	950 1050
362	850	850	1,50	950 1050
	850	950	1,50	1050 1175
420	850	850	1,60	1050 1175
	950	950	1,50	1175 1300
420/460*	950	1050	1,50	1300 1425
525	950	950	1,70	1175 1300
525/550*	950	1050	1,60	1300 1425
	950	1175	1,50	1425 1550
550*	950	1300	1,50	1550 1675
765	1175	1300	1,70	1675 1800
765/800*	1175	1425	1,70	1800 1950
	1175	1550	1,60	1950 2100

NOTAS
 1 Valor da componente do impulso do ensaio combinado aplicável.
 2 A introdução de U_m 1050 kV e 1200 kV e das tensões suportáveis associadas estão sob consideração.
 * Indica valores não constantes na IEC 60071-1.

PRINCÍPIOS DE COORDENAÇÃO DO ISOLAMENTO

Definição de Coordenação do isolamento

A **coordenação do isolamento** consiste em um conjunto de procedimentos utilizados na seleção de equipamentos elétricos, tendo-se em vista as tensões que podem se manifestar no sistema e levando-se em conta as características dos dispositivos de proteção, de modo a reduzir a níveis econômico e operacionalmente aceitáveis, a probabilidade de danos aos equipamentos e/ou interrupções do fornecimento de energia, causadas por aquelas tensões

PRINCÍPIOS DE COORDENAÇÃO DO ISOLAMENTO

A coordenação do isolamento é um processo de correlação da suportabilidade dielétrica mínima dos equipamentos elétricos com as sobretensões máximas esperadas e as características dos equipamentos para proteção contra surtos.

A coordenação do isolamento envolve:

- *Determinação das sobretensões;*
- *Seleção adequada dos níveis de suportabilidade do isolamento;*
- *Ensaio dielétricos;*
- *Dispositivos de proteção.*

PRINCÍPIOS DE COORDENAÇÃO DO ISOLAMENTO

Definição de Coordenação do isolamento

Método estatístico: É selecionado um determinado risco de falha levando-se em conta a natureza estatística das sobretensões e da suportabilidade do dielétrico. Sua utilização é normalmente limitada aos isolamentos auto-recuperantes e a tensões de operação > 300 kV

Método determinístico: São consideradas as maiores sobretensões esperadas acrescidas de uma margem de segurança (de 15 a 40%).

PRINCÍPIOS DE COORDENAÇÃO DO ISOLAMENTO

Coordenação do isolamento - Método estatístico

Método aplicado a isolamentos Auto-Recuperante

A fim de quantificar o número médio esperado de falhas / ano é necessário conhecer:

- ⇒ Os eventos que dão origem as sobretensões;
- ⇒ A freqüência anual de ocorrência desses eventos;
- ⇒ A distribuição estatística das amplitudes das sobretensões;
- ⇒ A distribuição da suportabilidade da isolamento (distribuições Gaussianas).

PRINCÍPIOS DE COORDENAÇÃO DO ISOLAMENTO

Coordenação do isolamento - Método determinístico

- ⇒ Normalmente aplicado quando *nenhuma informação estatística, obtida mediante ensaios*, sobre possíveis *taxas de falha do equipamento* esperadas durante a operação, está disponível.
- ⇒ Este método se baseia no dimensionamento dos isolamentos de maneira que esses apresentem *níveis de suportabilidade mínimos superiores às máximas sobretensões possíveis de serem impostas ao isolamento*, através da utilização de uma margem de segurança.

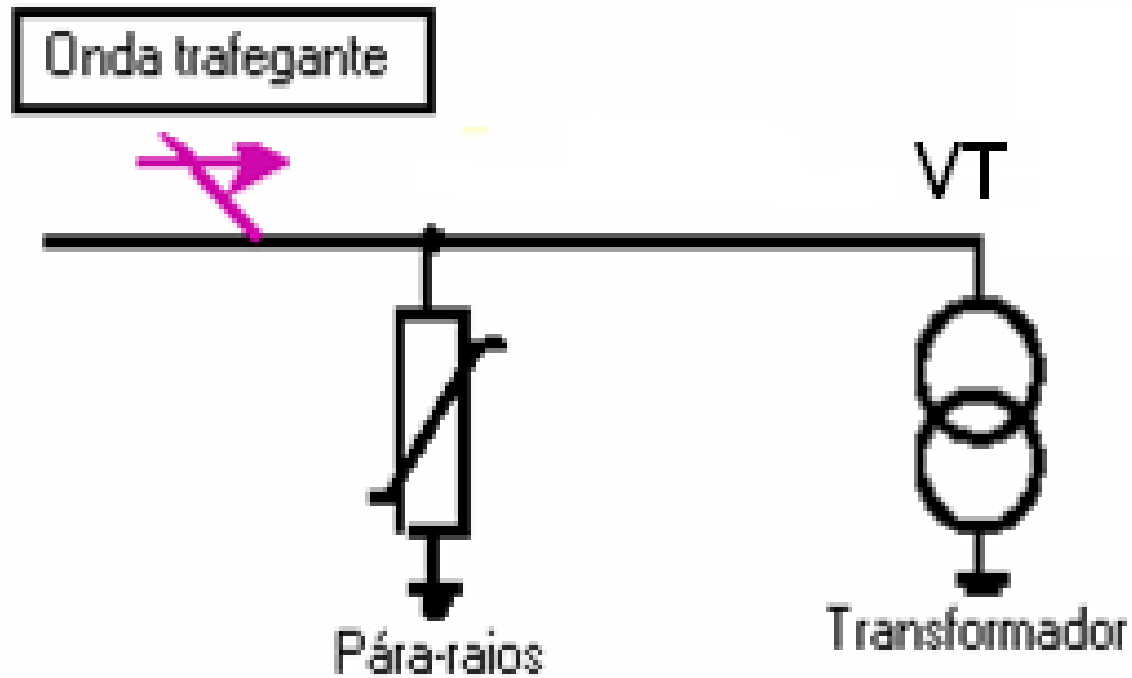
PRINCÍPIOS DE COORDENAÇÃO DO ISOLAMENTO

Coordenação do isolamento - Método determinístico

O método determinístico é o único que pode ser *utilizado no dimensionamento de isolamentos não auto-recuperantes*, visto não ser possível expressar o comportamento estatístico desses isolamentos frente às sobretensões.

PRINCÍPIOS DE COORDENAÇÃO DO ISOLAMENTO

Coordenação do isolamento - Método determinístico



CARACTERÍSTICAS DAS TENSÕES DE ENSAIOS E FORMAS DE ONDA

Definições para Corrente Contínua

- Valor da tensão de ensaio – V_m – É o seu valor médio aritmético
- Ondulação – É o desvio periódico do valor médio da tensão de ensaio
- Amplitude da ondulação – Definido conforme abaixo:

$$\textit{AmplitudeOndulação} = AO = (V_{\max} - V_{\min}) / 2$$

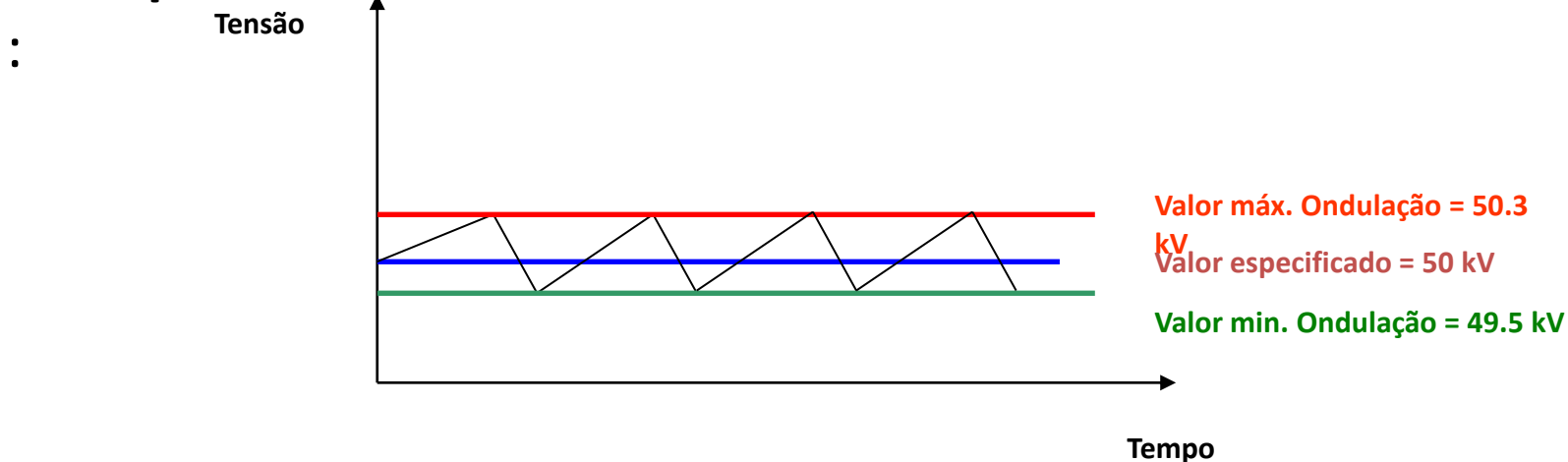
- Fator de ondulação – Definido conforme abaixo:

$$\textit{FatorOndulação} = FO = \textit{AmplitudeOndulação} / V_m$$

- Forma de Onda - Tolerâncias – Para ensaios com duração < 60 s a tensão de ensaio deve ser mantida dentro de 1% da tensão especificada. Para ensaio com duração > 60 s, a tensão de ensaio deve ser mantida dentro de 3% da tensão especificada. O fator de ondulação não deve exceder a 3% .

ARACTERÍSTICAS DAS TENSÕES DE ENSAIOS E FORMAS DE ONDA

- **Exemplo**



$$V_m = (V_{\max} + V_{\min}) / 2 \quad \longrightarrow \quad V_m = 49,9 \text{ kV}$$

$$AO = (V_{\max} - V_{\min}) / 2 \quad \longrightarrow \quad AO = 0,4 \text{ kV}$$

$$FO = AO / V_m \quad \longrightarrow \quad FO = 0,08 = 0,8\%$$

Obs: Máx. e Min. Valores respectivamente da tensão de ensaio:

<60s = 1% Valor especificado = 50,5 kV e 49,5 kV

>60s = 3% Valor especificado = 51,5 kV e 48,5 kV

ARACTERÍSTICAS DAS TENSÕES DE ENSAIOS E FORMAS DE ONDA

Definições para Corrente Alternada Senoidal

- Valor da tensão de ensaio – V_m – É o seu valor de pico dividido por $\sqrt{2}$
- Valor de crista – É o seu maior valor instantâneo. Não se deve levar em conta as oscilações a alta freqüência que aparecem por exemplo quando há descargas não disruptivas no circuito.
- Valor eficaz - RMS – É a raiz quadrada do valor médio dos quadrados dos valores que aparecem durante todo um ciclo, ou seja:

$$V_{rms} = \sqrt{\int_0^T \frac{1}{T} \cdot f(t)^2 dt}$$

Se $f(t)$ é uma senoide – $V_{rms} = V_{crista} / \sqrt{2}$

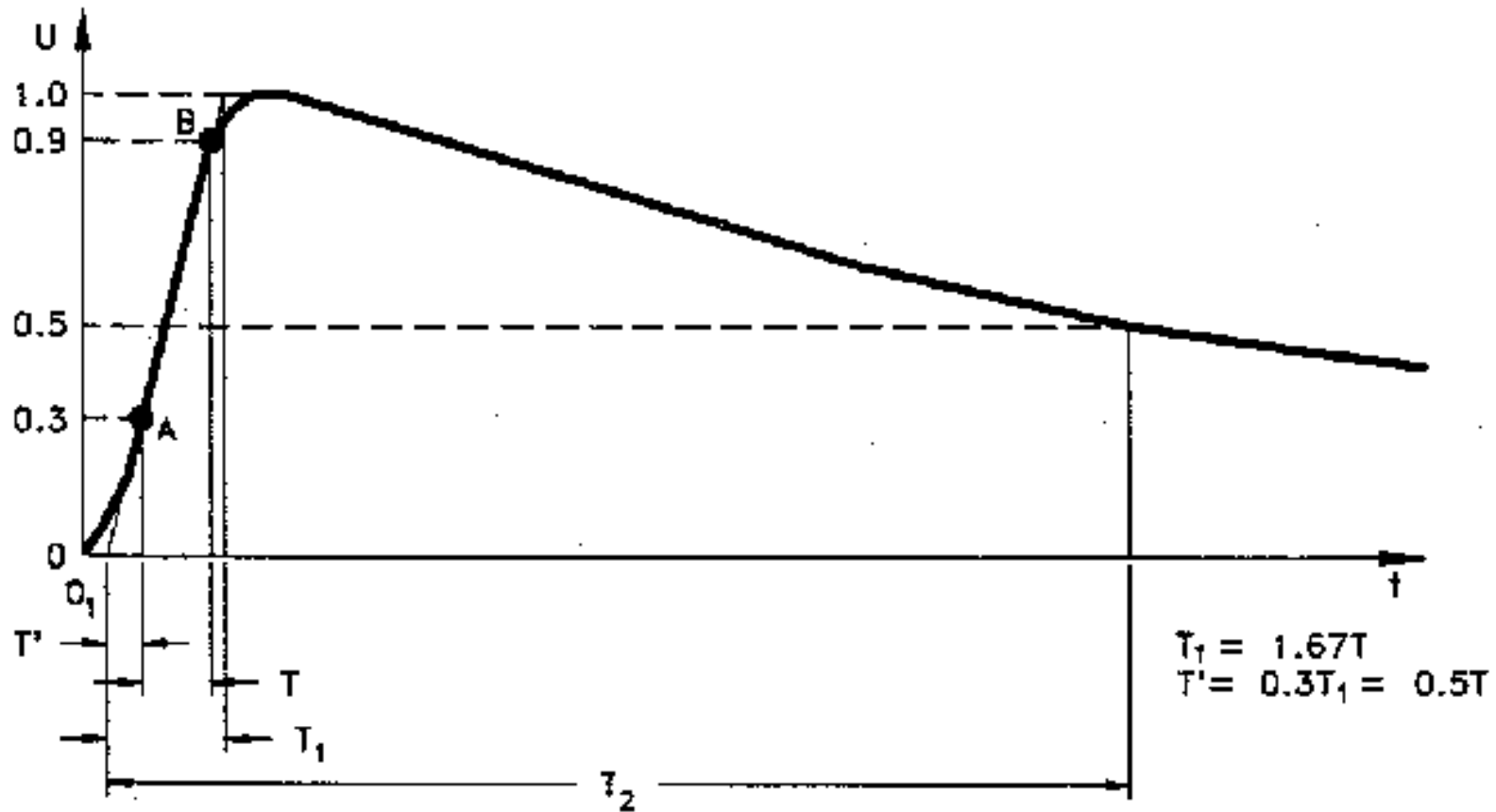
- Forma de onda: Deve ser uma tensão alternada com freqüência entre 45 e 65 Hz. A forma de onda deve ser senoidal com os dois ciclos idênticos. Um desvio ligeiro da forma de onda senoidal deve ser aceito, se a relação entre a o valor de crista e o valor eficaz medidos for de no máximo 5%. Para certos circuitos não usuais, um valor maior pode ser aceito. Notar que para objetos de ensaios de características não lineares pode afetar consideravelmente a forma de onda.
- NOTA: Pode geralmente ser assumido que as prescrições acima são respeitadas se o valor eficaz dos harmônicos não excedem a 5% do valor da fundamental

CARACTERÍSTICAS DAS TENSÕES DE ENSAIOS E FORMAS DE ONDA

Definições para Onda de Tensão de Impulso Atmosférico Pleno

- Impulso atmosférico pleno – É uma tensão ou corrente transitória, aperiódica e que normalmente cresce rapidamente a um valor de crista e decresce mais lentamente até zero. O valor da tensão de ensaio é o seu valor de crista. Em caso de oscilações temos as seguintes tolerâncias em relação aos valores especificados:
Valor de pico = 3%, Valor de frente = 20%, Valor de cauda = 30%
- Forma de onda – A forma de onda padrão definida é igual a: $1,2 \times 50 \text{ us}$, as tolerâncias acima se aplicam.
- Tempo de frente T_1 – É um parâmetro virtual, definido como $1,67 \times$ o intervalo de tempo T compreendido entre os instantes em que a tensão atinge 30% e 90% do valor de crista.
- Origem virtual O_1 – É o instante precedente igual a $0,3 \times T_1$. Para osciloscópios com escala linear de tempo é o instante de intersecção de uma linha passando pelos pontos $A = 30\%$ valor de crista e $B = 90\%$ do valor de crista e interceptando o eixo das abscissas.
- Tempo de cauda T_2 – É um parâmetro virtual, definido como o intervalo de tempo compreendido entre a origem convencional O_1 e o instante que a tensão atinge um valor igual a metade do valor de crista.

CARACTERÍSTICAS DAS TENSÕES DE ENSAIOS E FORMAS DE ONDA



TENSÕES DISRUPTIVAS

- **Tensões disruptivas** – São todas as tensões que sendo aplicada entre eletrodos de um isolamento não são suportadas pelo mesmo. A tensão disruptiva garantida de um objeto sob ensaio é o valor presumível especificado, que caracteriza a isolação. A ocorrência pode se dar por:

- Falha do isolamento, podendo esta ser interna ou externa;

Ex. de falha interna

Ex. de falha externa



TENSÕES DISRUPTIVAS

Definições para Onda de Tensão de Impulso Atmosférico Cortada

- Impulso atmosférico cortado – Impulso interrompido bruscamente por uma descarga disruptiva, provocando uma queda de tensão até zero, com ou sem oscilações. O corte pode dar-se na frente, no pico ou na cauda.
- Instante do corte T_c – É o instante onde se dá a queda de tensão característica.
- Tempo de corte T_c - É um parâmetro virtual, definido como o intervalo de tempo entre a origem virtual O_1 e o instante do corte.

TENSÕES DISRUPTIVAS

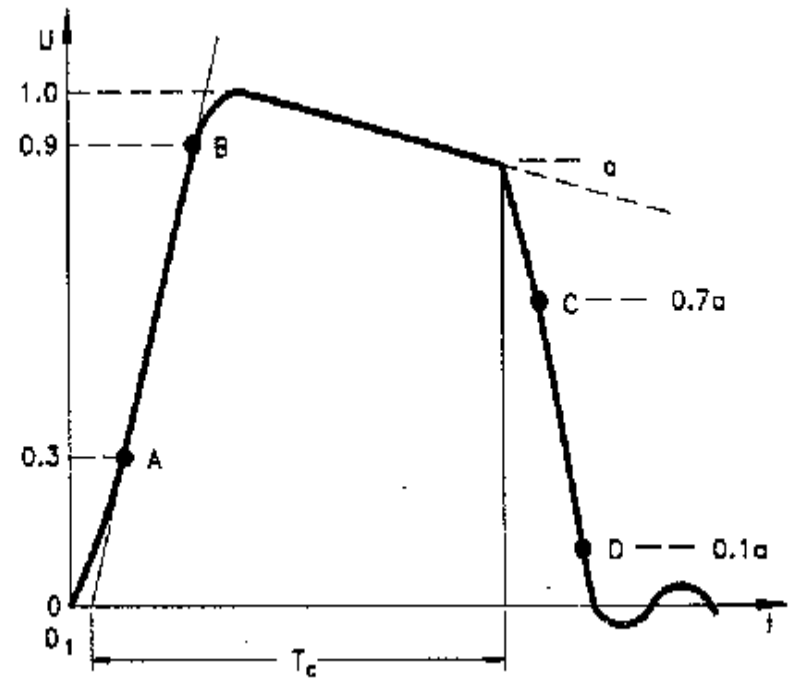
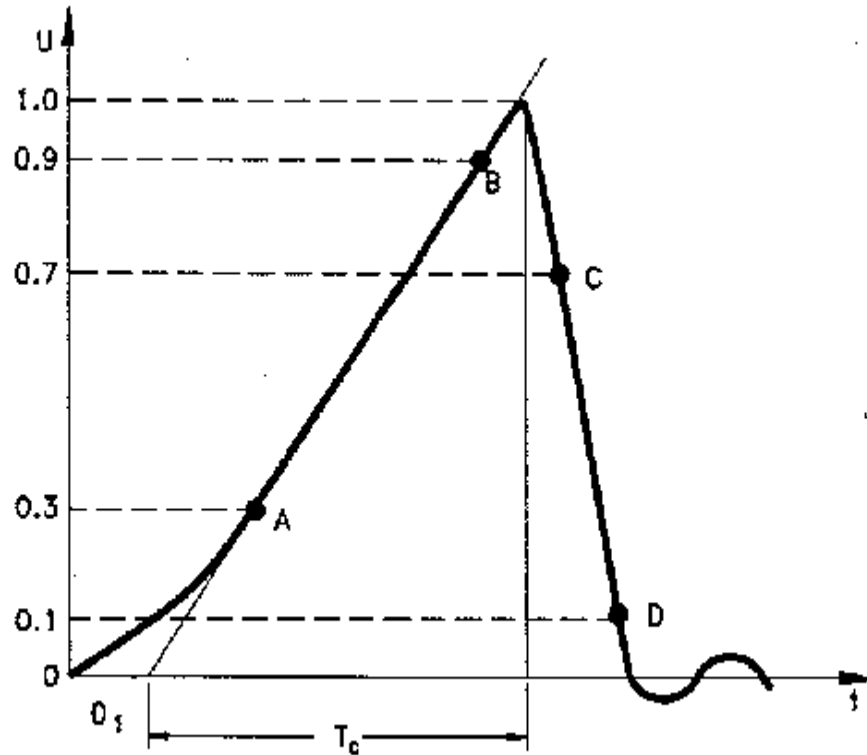
Definições para Onda de Tensão de Impulso Atmosférico Cortada

- Características relativas a queda de tensão durante a ruptura – As características convencionais da queda de tensão durante o corte são definidas pelos pontos C = 70% da tensão no instante da ruptura e D = 30% da tensão no instante da ruptura. A duração da queda de tensão é igual a $1,67$ x o intervalo de tempo entre os pontos C e D. A taxa de crescimento da queda de tensão é a relação entre o valor da tensão no instante da ruptura e a duração da queda de tensão.
- NOTA : A definição dos pontos C e D é realizada unicamente por necessidade de definição. Isto não quer dizer que se possa realizar esta medição com precisão requerida por qualquer sistema de medição tradicional.
- Parâmetros de definição – Um Impulso cortado é definido por:
 - 1 – Pela tensão de pico U , 2 – Pelo tempo de frente T_1 ,
 - 3 – Pela taxa de crescimento U / T_1

TENSÕES DISRUPTIVAS

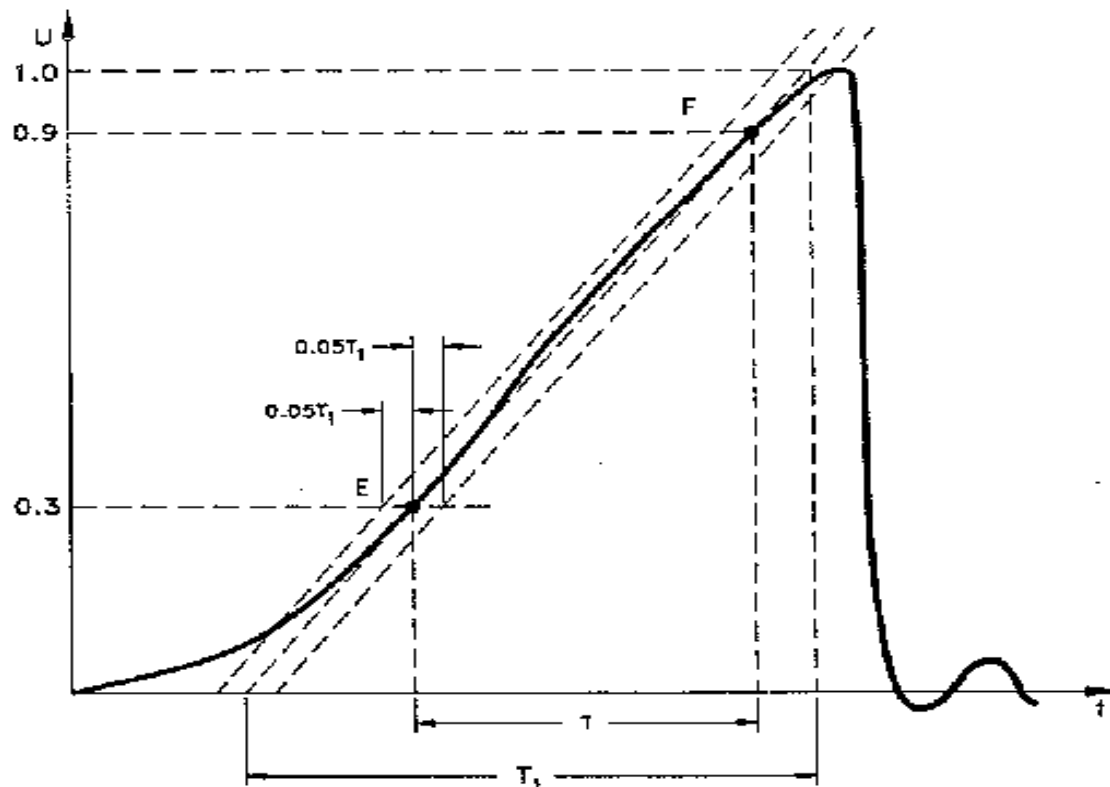
- Impulso cortado na frente

- Impulso cortado na cauda



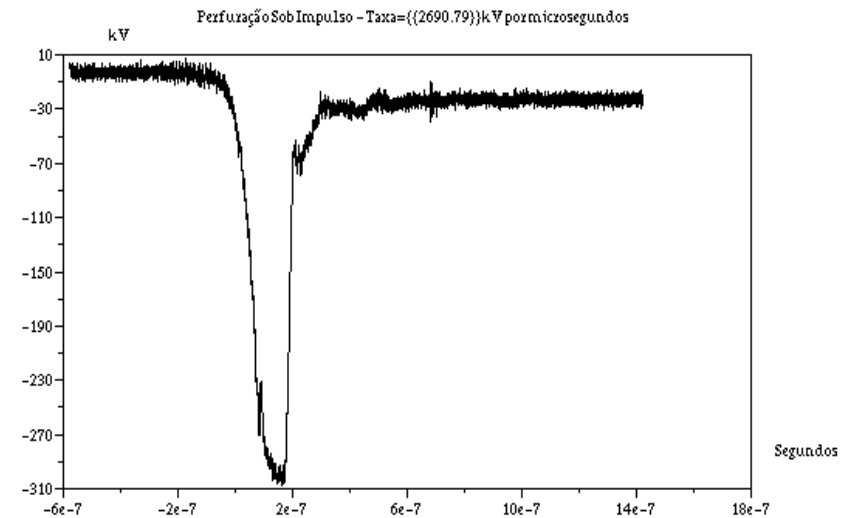
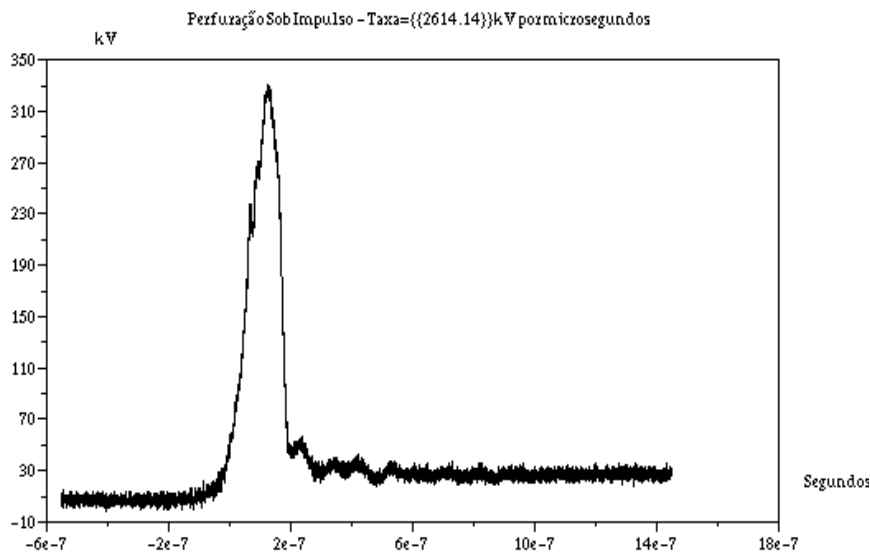
TENSÕES DISRUPTIVAS

- **Impulso cortado tendo uma frente linear** – Uma tensão impulsiva que cresce com uma taxa aproximadamente constante até o corte é descrita como uma onda de impulso cortada com uma frente linear. Para definir este impulso mais precisamente traça – se duas linhas paralelas a da tensão impulsiva variando de $+ / - 0,05 T_1$, se toda a onda de impulso de 30% do valor de pico até o instante do corte, estiver compreendida entre estas duas linhas ela é considerada linear.



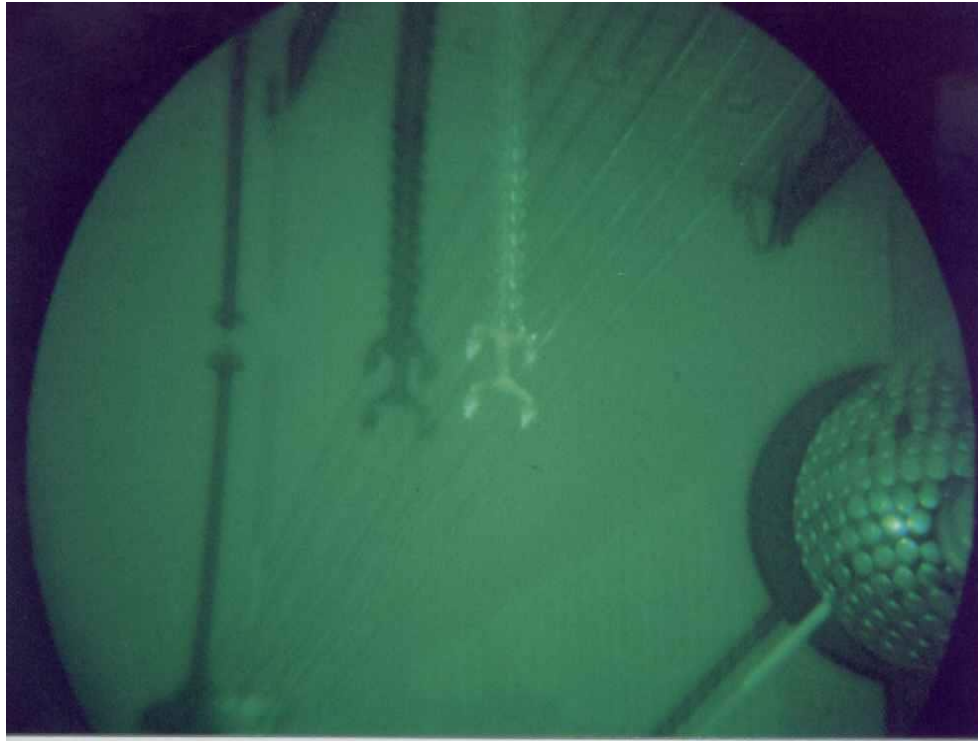
TENSÕES DISRUPTIVAS

Exemplos de ondas cortadas na frente



TENSÕES SUPORTÁVEIS (MANTIDAS)

- **Tensões Mantidas** – São todas as tensões que sendo aplicada entre eletrodos de um isolamento são suportadas pelo mesmo. A tensão mantida garantida de um objeto sob ensaio é o valor presumível especificado, que caracteriza a isolação.
- Normalmente são especificados valores garantidos sob chuva para isolamentos funcionamento em ambiente externo e tensão mantida a seco para ambiente interno.



COMPORTAMENTO ESTATÍSTICO DAS TENSÕES DISRUPTIVAS

- Os processos físicos envolvidos na formação de descargas disruptivas, envolvem fenômenos aleatórios, sendo assim métodos estatísticos devem ser empregados para conhecer-se o comportamento do isolamento frente solicitações elétricas. Com a finalidade de avaliação estatística os ensaios com tensões disruptivas podem ser divididos em 3 classes.
- **Classe 1** – Método dos níveis múltiplos – Para cada n níveis de tensão U_i ($i=1,2\dots n$), são efetuadas m aplicações das tensões especificadas, com a mesma forma de onda e valor de crista. Este procedimento se aplica principalmente a ensaios de impulso, mas pode ser também utilizado na execução dos ensaios de corrente contínua e alternada. Assim a cada U_i se associa uma probabilidade de descarga $p(U_i)$.

Nível de Tensão - U_i	U_1	U_2	U_3	U_4	U_n
Nº de aplicações - m	>10	>10	>10	>10	>10
Probabilidade – $p(U_i)$	$p(U_1)$	$p(U_2)$	$p(U_3)$	$p(U_4)$	$p(U_n)$

COMPORTAMENTO ESTATÍSTICO DAS TENSÕES DISRUPTIVAS

- Classe 2** – Método de acréscimo e decréscimo – Efetua-se várias séries de m aplicações de tensão da mesma forma e valor de crista em diferentes níveis de tensão U_i . O nível U_i para cada série de aplicações de tensão deve ser acrescido ou reduzido, em relação ao nível anterior de um valor ΔU , de acordo com o resultado da série de aplicações precedentes. Dois procedimentos são normalmente utilizados, de acréscimo e decréscimo suportável e de acréscimo e decréscimo disruptivo. O primeiro para baixas probabilidades de descarga e o segundo para altas probabilidades de descarga.
- Para avaliar o $U_{10\%}$ usualmente $m = 7$ e $n > / = 8$.

Nível de Tensão - U_i	U_1	U_2	U_3	U_4	U_n
Nº de aplicações - m	7	7	7	7	7
Probabilidade – $p(U_i)$	$p(U_1)$	$p(U_2)$	$p(U_3)$	$p(U_4)$	$p(U_n)$

- Para avaliar o $U_{50\%}$ usualmente $m = 1$ e $n > / = 20$

Nível de Tensão - U_i	U_1	U_2	U_3	U_4	U_n
Nº de aplicações - m	1	1	1	1	1
Probabilidade – $p(U_i)$	$P(U_{50\%})$				

COMPORTAMENTO ESTATÍSTICO DAS TENSÕES DISRUPTIVAS

- **Classe 3** – Repete-se n vezes um procedimento de ensaio que resulta em descarga disruptiva, isto pode ser conseguido aumentando – se a tensão ou mantendo – se a tensão constante até que ocorra uma descarga.
- Tais conjuntos de resultados é dado pelos n valores U_i ou tempo t_i nos quais ocorreram descargas disruptivas.
- Em particular pertencem a esta classe de ensaio impulsos que causam descargas disruptivas na frente
- Este procedimento pode ser usado para tensão contínua, alternada ou impulsos.
- Nota: Os cálculos da função de probabilidade para as 3 classes encontram-se no anexo a da NBR 6936 ou IEC 60.1.

FATORES DE CORREÇÃO ATMOSFÉRICO IEC 60060.1 / NBR 6936

- **Condições atmosféricas normalizadas:**

- Temperatura – $t_0 = 20 \text{ °C}$

- Pressão – $b_0 = 101,3 \text{ kPa}$

- Umidade absoluta – $h_0 = 11 \text{ g/m}^3$

Notas

1- A pressão de 101.3 kPa = 760 mm / Hg, então, $b = 0,1333H - \text{kPa}$

2 - A correção da coluna de mercúrio em função da temperatura, pode ser considerada como negligenciável.

FATORES DE CORREÇÃO ATMOSFÉRICO IEC 60060.1 / NBR 6936

- **Comportamento da descarga disruptiva** - A descarga disruptiva de uma isolação externa depende das condições atmosféricas em sua vizinhança. Normalmente a valor da tensão disruptiva em um intervalo de ar, cresce com o crescimento da densidade ou umidade.
- Se a descarga disruptiva dá-se sobre uma superfície isolante e a umidade excede 80% a descarga torna-se irregular e o valor medido da tensão no objeto sob ensaio desce significativamente.
- Para impulsos de tensão pode-se chegar a uma taxa de variação de 0,33 kV/Ponto da umidade relativa.

FATORES DE CORREÇÃO ATMOSFÉRICO IEC 60060.1 / NBR 6936

- Aplicando – se fatores de correção atmosférico uma tensão de ensaio medida em condições não normalizadas (t , b e h) pode-se corrigir este valor para as condições atmosféricas de referência (t_0 , b_0 e h_0), ou seja que teria se fosse o ensaio realizado nestas condições. Analogamente uma tensão de ensaio especificada nas condições atmosféricas de referência pode ser corrigida para as condições de ensaio vigentes ou atuais.
- A tensão disruptiva é proporcional ao fator de correção atmosférico k_t , que resulta da multiplicação de dois fatores de correção:

Fator de correção para a densidade do ar k_1 ; $t_0 = 20^0$

Fator de correção para a umidade do ar k_2 ; $p_0 = 1013$ hPa

Fator de correção total $k_t = k_1 \times k_2$ $h_0 = 11$ g/m³

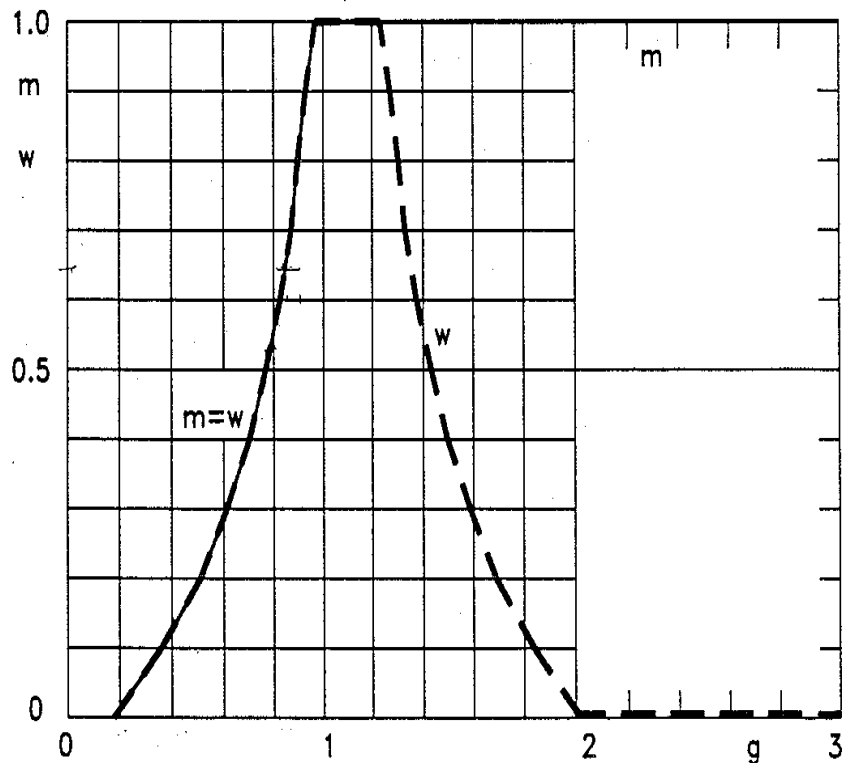
- Salvo especificação contrária do comitê de estudos específico, a tensão de ensaio a aplicar durante um ensaio de uma isolação externa é:

$$U = U_0 \times k_t$$

- Nota – Relatórios de ensaios devem sempre mencionar as condições atmosféricas atuais.

FATORES DE CORREÇÃO ATMOSFÉRICO IEC 60060.1 / NBR 6936

- **Fator de correção para densidade do ar** – Depende da densidade relativa do ar e pode ser expresso por:
 - $K_1 = \delta^m$, sendo $\delta = b/b_0 \times (273 + t_0 / 273 + t)$, com t e t_0 em graus Celsius e b e b_0 na mesma unidade (kPa ou mbar)



O parâmetro m é dado em função da linha de arco do isolamento considerado e de $g = U_B / 500 \times L \times \delta \times k$.

$U_b = U_{50\%}$ medido ou estimado. Para ensaios de Tensão Mantida = $1,1 \times U_{ensaio}$.

L = Linha de arco do isolamento considerado.

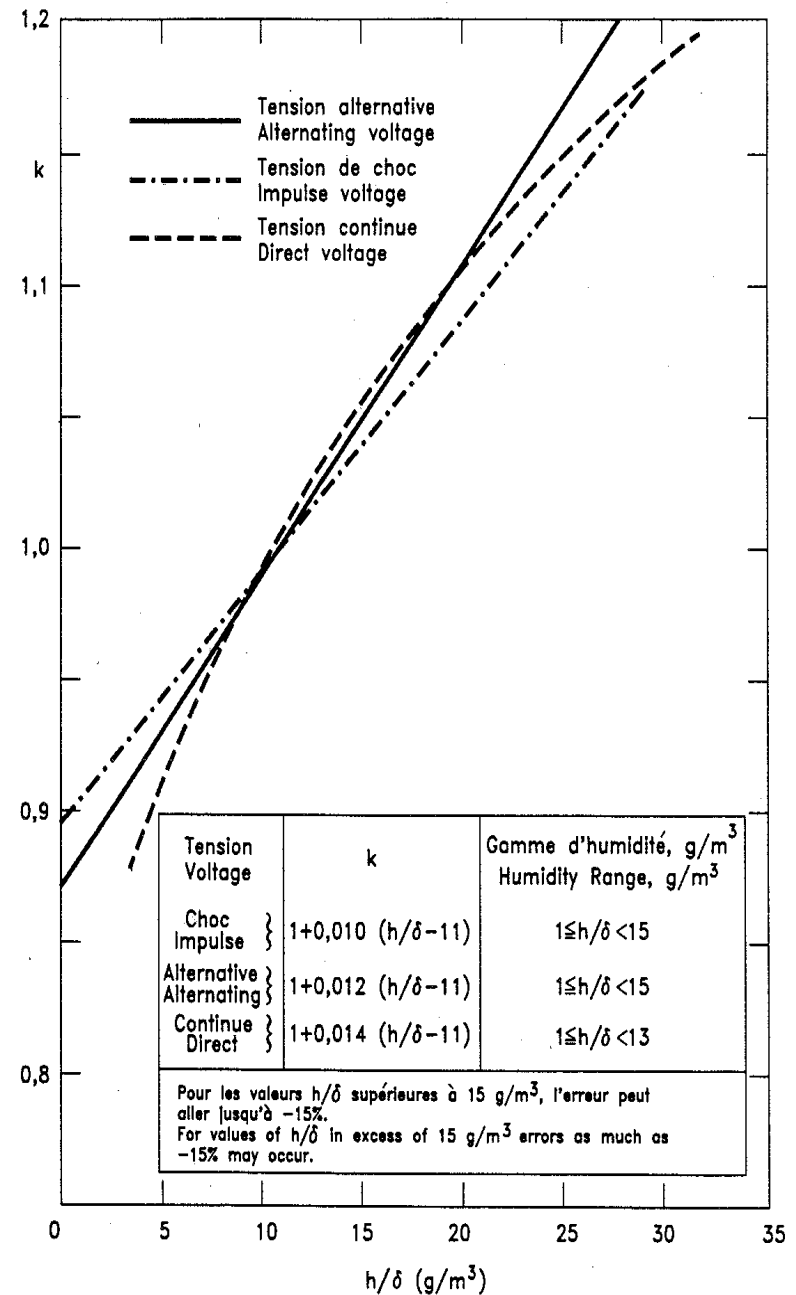
δ e k – Parâmetros calculados.

Para m maior ou igual que 1,0 metros $k_1 = \delta$

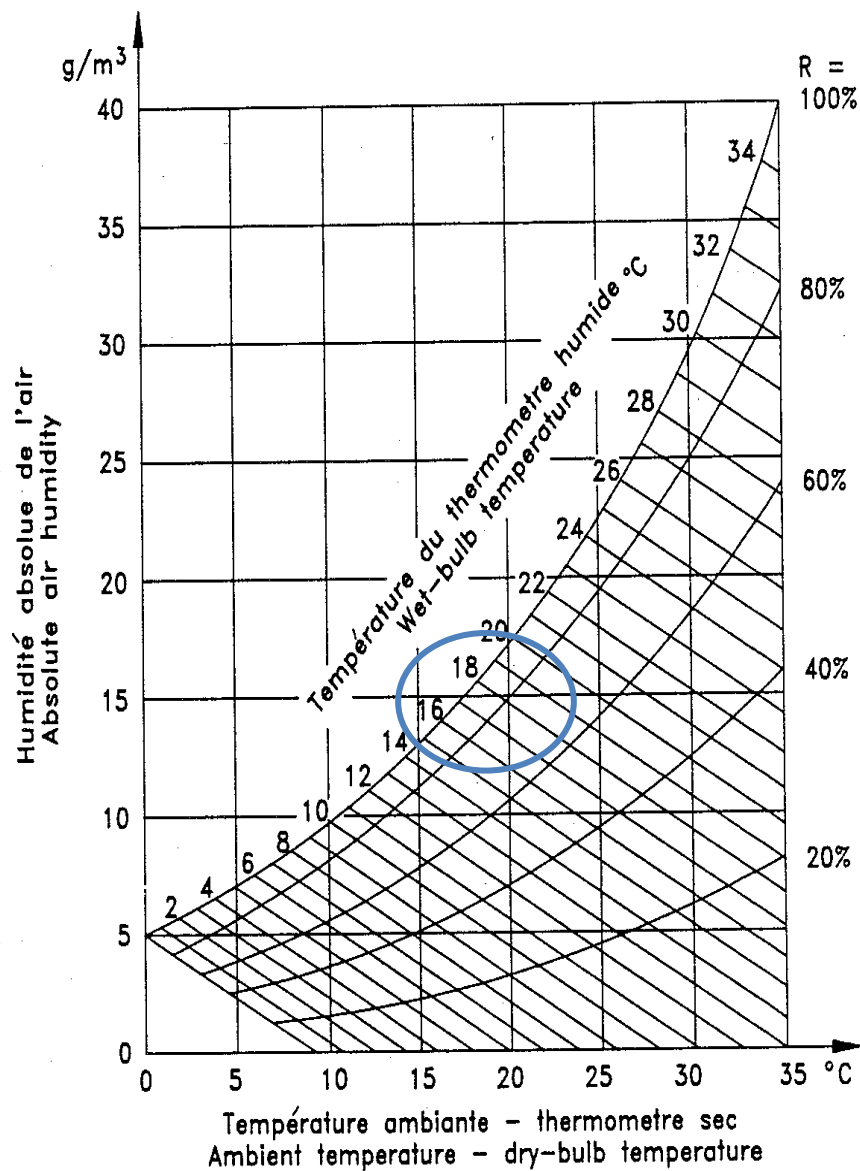
Nota: Linha de arco é a menor distância entre eletrodos de um isolador ou isolamento.

FATORES DE CORREÇÃO ATMOSFÉRICO IEC 60060.1 / NBR 6936

- **Fator de correção para umidade do ar** –
Depende da umidade absoluta e da densidade relativa do ar e pode ser expresso por:
 - $K_2 = k^w$, w é dado conforme parâmetro m em função da linha de arco.
- k é um parâmetro função do tipo de tensão de ensaio e que na prática pode ser expresso **em função da umidade absoluta h** e da densidade relativa δ , conforme curvas da figura ao lado.
- Para valores de h / δ maiores que 15 g/m³, as correções para umidade são ainda em estudo e as curvas da figura ao lado devem ser consideradas como limite.



FATORES DE CORREÇÃO ATMOSFÉRICO IEC 60060.1 / NBR 6936



Isto significa que para valores de δ próximos a 1 teremos, considerando o limite de 80% considerado em norma, as seguintes temperaturas máximas de trabalho:

$$T_{seco} = 20 \text{ }^{\circ}\text{C} \text{ e } T_{umido} = 18 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

Estas condições não são facilmente encontradas no Brasil, o que significa, que o ideal é ter-se um laboratório climatizado.

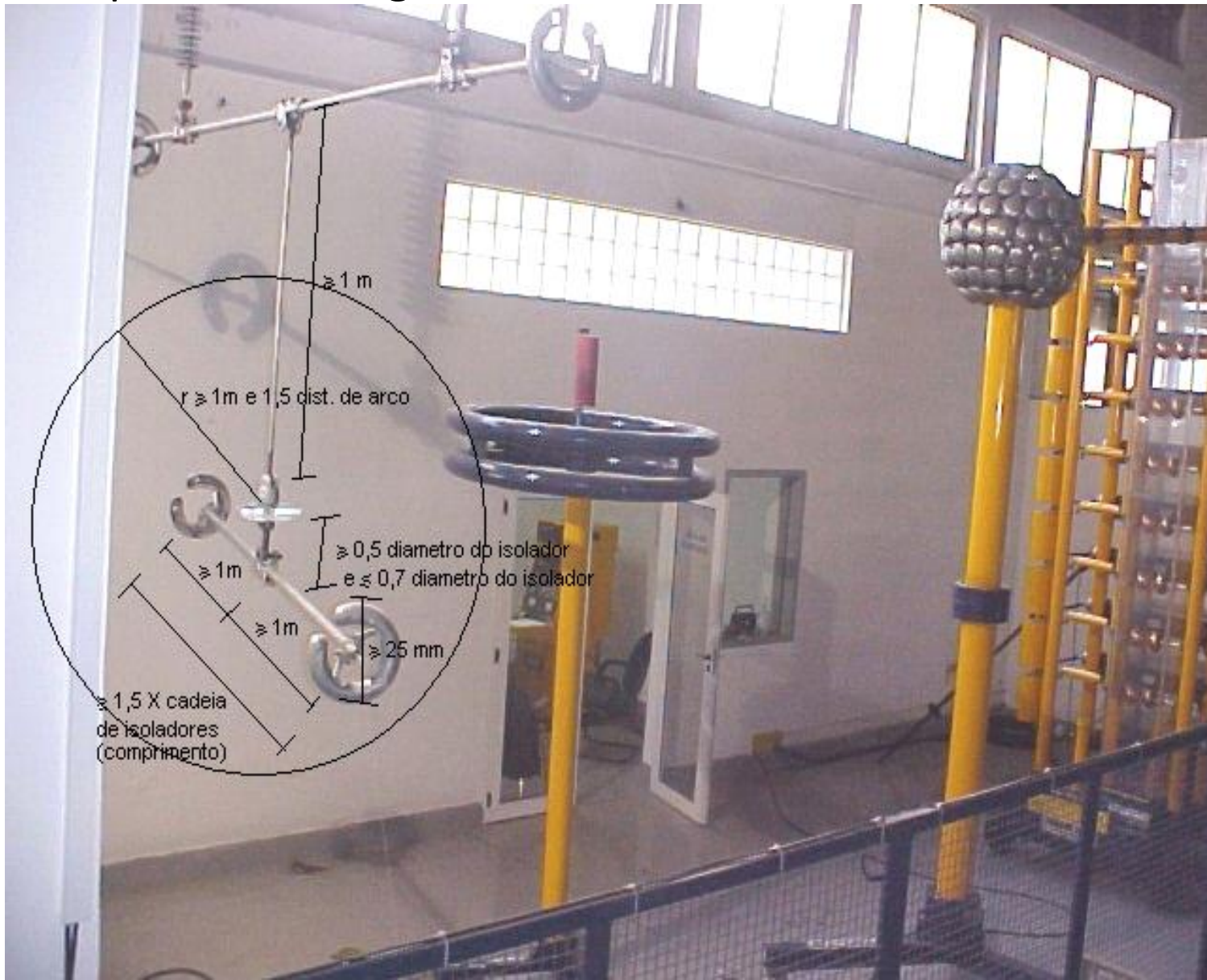
Isto é válido especialmente para tensões de impulso.

ENSAIOS DE TENSÃO A FREQUÊNCIA INDUSTRIAL

- **Exigências para montagem** – No momento do ensaio o objeto de ensaio deve estar completo com seus acessórios e deve ter sido fabricado de maneira representativa, ou seja, mão de obra, linha de fabricação e componentes usualmente utilizados. O laboratório responsável pelo ensaio deve se assegurar que o objeto sob ensaio está de acordo com as dimensões declaradas em desenho técnico aprovado.
- As características de interrupção ou suportabilidade de um objeto podem ser afetadas pela sua distância a objetos vizinhos ou a terra, por sua altura em relação ao solo ou pela disposição do condutor de ensaio. Estas condições devem ser definidas pelo comitê de estudos específico ao equipamento ensaiado.
- De maneira geral uma distância de $1,5x$ a menor distância de interrupção, garante que as influências dos objetos vizinhos são negligenciáveis.

ENSAIOS DE TENSÃO A FREQUÊNCIA INDUSTRIAL

- Exemplo de montagem:



ENSAIOS DE TENSÃO A FREQUÊNCIA INDUSTRIAL

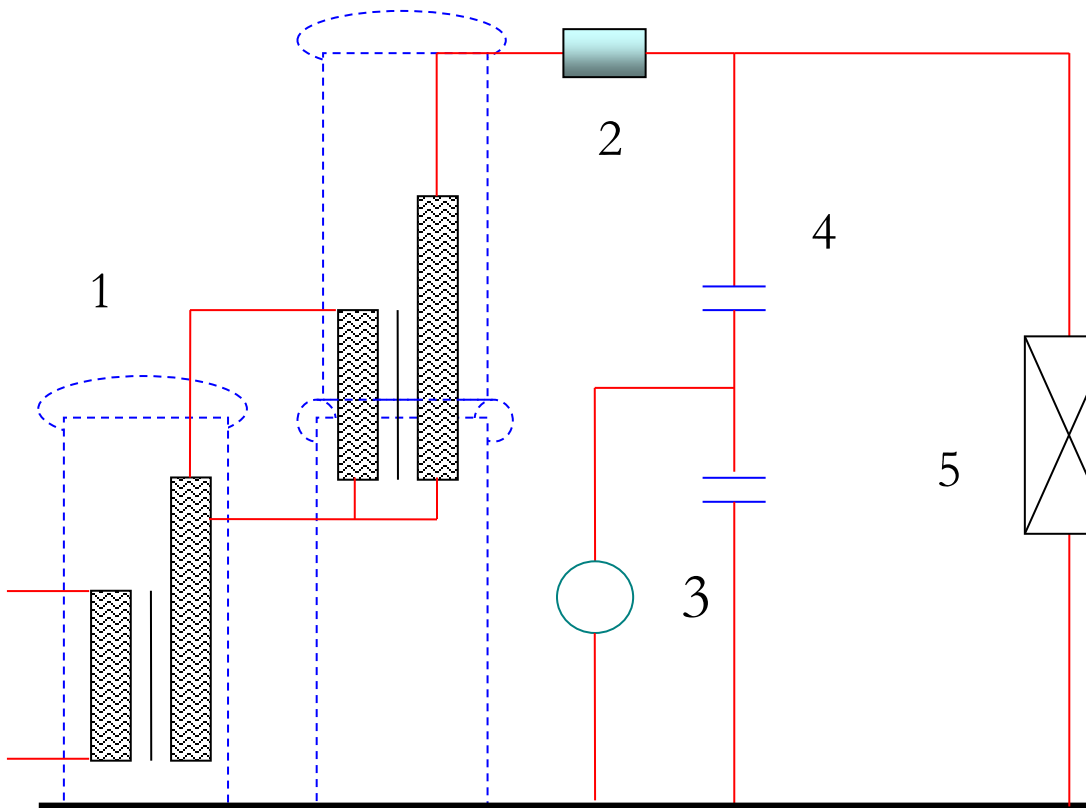
- **Sobretensões de origem interna** – Provocadas por:
 - Faltas nos sistemas (curto circuito);
 - Perda súbita de carga (rejeição de carga);
 - Efeito ferranti;
 - Ressonância e Ferro-ressonância;

ENSAIOS DE TENSÃO A FREQUÊNCIA INDUSTRIAL

- **Ensaio aplicáveis**
- **Tensão aplicada de serviço** – Corresponde a um ensaio de aplicação da tensão máxima de serviço e a frequência nominal. Eventualmente pode – se controlar o aquecimento, o nível de ionização, corrente de fuga, etc.
- **Sobretensões de origem interna** – Correspondem a um ensaio de curta duração, a frequência nominal, com controle da tensão aplicada e, eventualmente, comparação da qualidade do dielétrico antes e depois do ensaio.

ENSAIOS DE TENSÃO A FREQUÊNCIA INDUSTRIAL

- **Circuito básico de ensaios em F.I.**



-Onde:

1 - Transformador em Cascata

2- Resistência. de Proteção

3 - Voltímetro de Pico /
Osciloscópio

4 - Divisor de Tensão

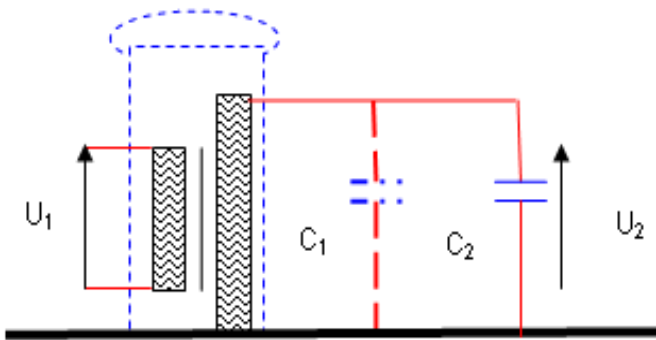
5 - Objeto sob Ensaio

ENSAIOS DE TENSÃO A FREQUÊNCIA INDUSTRIAL

- **Medição através do lado de baixa tensão do TRAFO**
- A medida da tensão no lado de baixa do transformador e a **determinação** da tensão de ensaio (lado de alta) multiplicando – se esta pela relação de transformação **não é correta**, pois há erros associados ao funcionamento dinâmico do transformador de ensaio e a capacitância do objeto sob ensaio. O erro associado é definido conforme a seguir:

ENSAIOS DE TENSÃO A FREQUÊNCIA INDUSTRIAL

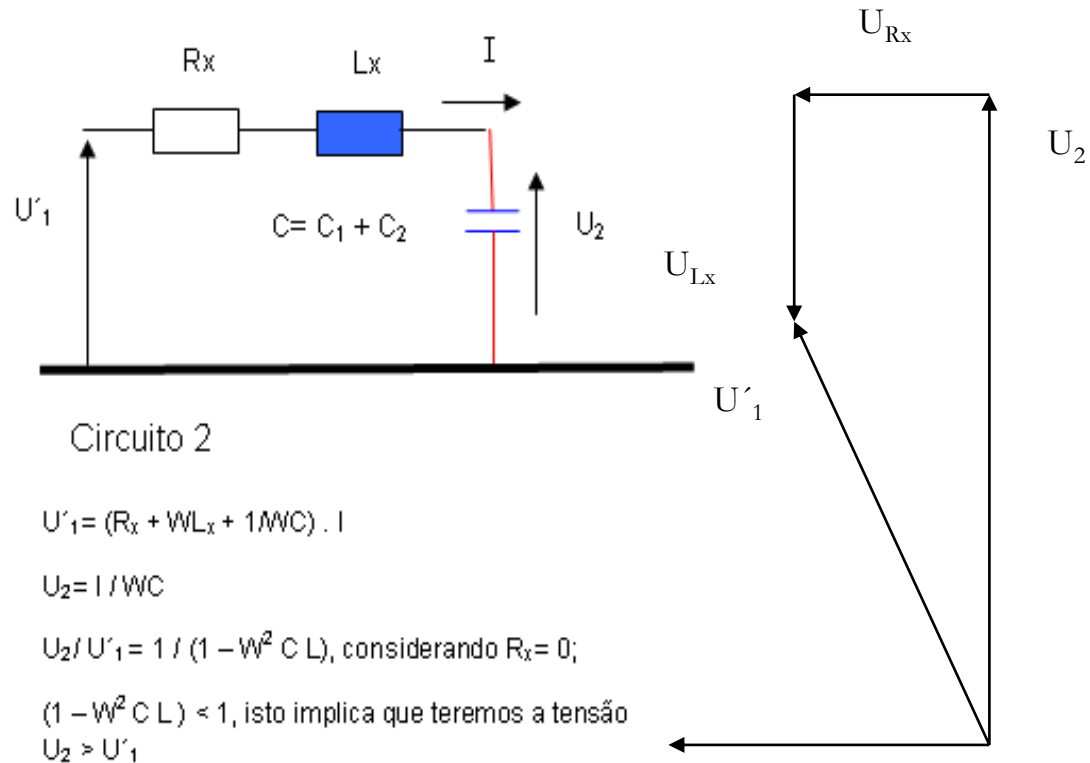
- Erro associado à leitura em baixa tensão:



Circuito 1

Onde:

- U_1 = Tensão no lado de baixa – Circuito 1
- U'_1 = Tensão no lado de baixa multiplicada pela relação de transformação – Circuito 2
- C_1 = Capacitância própria do transformador
- C_2 = Capacitância do objeto sob ensaio
- R_x e L_x = Parâmetros do circuito equivalente do trafo



Circuito 2

$$U'_1 = (R_x + \omega L_x + 1/\omega C) \cdot I$$

$$U_2 = I / \omega C$$

$$U_2 / U'_1 = 1 / (1 - \omega^2 C L), \text{ considerando } R_x = 0;$$

$(1 - \omega^2 C L) < 1$, isto implica que teremos a tensão $U_2 > U'_1$

ENSAIOS DE TENSÃO A FREQUÊNCIA INDUSTRIAL

- **Medida da tensão de ensaio em F.I.**
- **Divisor de Tensão:** realizada usualmente através de um divisor de tensão capacitivo. A tensão no lado de alta tensão é definida multiplicando – se a tensão lida no lado de baixa tensão do divisor pelo fator de escala (relação de transformação) do mesmo, determinada conforme “ensaio de determinação do fator de escala” da IEC 60.2. e deve ser próxima ou igual a:
 - $[1+ (C2/C1)] = U(\text{alta}) / U(\text{baixa})$ – Divisores Capacitivos
- Erros máximos permitidos de 1%.

ENSAIOS DE TENSÃO A FREQUÊNCIA INDUSTRIAL

- **Execução dos ensaios a seco em F.I. com tensão mantida**
- Aplica-se a tensão especificada a partir de um valor suficientemente baixo para evitar qualquer influência de sobre-tensões devido a chaveamentos.
- Aumenta-se a tensão continuamente até 75% do valor nominal, acima de 75% da tensão especificada, aumenta-se a tensão com uma taxa em torno de 2% de U por segundo.
- Se mantém a tensão pelo tempo especificado pela Norma. No final deste tempo se baixa a tensão até zero continuamente evitando chaveamentos que causem sobretensões podendo deteriorar o isolamento precocemente.
- O ensaio é considerado satisfatório se nenhuma descarga disruptiva ocorrer no tempo especificado.

ENSAIOS DE TENSÃO A FREQUÊNCIA INDUSTRIAL

- **Execução dos ensaios a seco em F.I. com tensão disruptiva**

Ensaio de Tensão disruptiva em F.I.

- Aumenta-se a tensão de ensaio até que a descarga disruptiva se produza sobre o objeto sob ensaio. Registra-se o valor da tensão no momento da disrupção.
- A Norma pertinente ao equipamento ensaiado define a velocidade de crescimento da tensão, o número de aplicações a realizar-se, o tempo entre aplicações e o procedimento de avaliação dos resultados dos ensaios.

ENSAIOS DE TENSÃO A FREQUÊNCIA INDUSTRIAL

- **Execução dos ensaios a seco em F.I. com tensão disruptiva**

Ensaio de Tensão disruptiva Garantida

- Aplica-se a tensão aumentando-se a mesma de maneira contínua até que se produza a descarga disruptiva no objeto, Registra-se o valor da descarga no momento da disrupção.
- O ensaio é considerado satisfatório se esta tensão não excede o valor da tensão de ensaio garantida em nenhuma das aplicações realizadas.
- A Norma pertinente define o número de aplicações e a velocidade de crescimento da tensão.

ENSAIOS DE TENSÃO A FREQUÊNCIA INDUSTRIAL

- **Execução dos ensaios em F.I. sob chuva** – O procedimento normalizado é o adotado para os ensaios a seco. As variáveis são relativas a chuva artificial produzida, conforme abaixo:
- O objeto sob ensaio deve ser aspergido com água possuindo uma resistividade e temperatura especificadas. A taxa de aspersão deve obedecer as condições específicas e medidas das componentes horizontal e vertical devem ser realizadas com aparelhagem adequada conforme definida na IEC 60.1 e NBR 6936.
- A posição do objeto de ensaio em relação as precipitações vertical e horizontal devem ser definidas pela Norma.

ENSAIOS DE TENSÃO A FREQUÊNCIA INDUSTRIAL

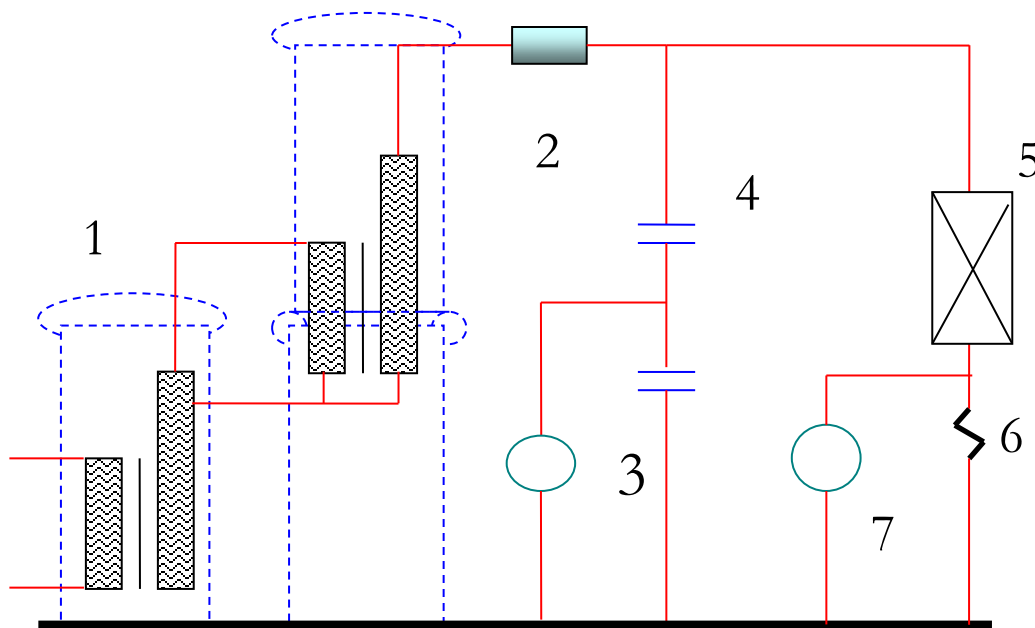
- Tabela com condições de ensaio normalizado sob chuva

Característica	Unidade de medida	Prática Européia	Prática Americana
Taxa de aspersão			
Vertical	mm / min	$1,0 \pm 0,5$	$5,0 \pm 0,5$
Horizontal	mm / min	$1,0 \pm 0,5$	$5,0 \pm 0,5$
Temperatura da água	°C	20	Ambiente ± 15 °C
Resistividade da água	$\Omega \times m$	100 ± 10	178 ± 27
Duração do ensaio	s	60	10

ENSAIOS DE TENSÃO A FREQUÊNCIA INDUSTRIAL

- **Medida da corrente de fuga a seco e sob chuva**

- Medida da corrente de fuga a seco ou **sob chuva**
- Sinal lido 1 – Tensão de pico / RMS da ordem de dezenas ou centenas de kV
- Sinal lido 2 – Tensão de pico da ordem de μV ou mV (para cálculo da corrente de fuga)



-Onde:

- 1 - Transformador em Cascata
- 2- Resistência. de Proteção
- 3 - Voltímetro de Pico / Osciloscópio
- 4 - Divisor de Tensão
- 5 - Objeto sob Ensaio
- 6 – Resistor
- 7 - Osciloscópio

ENSAIOS DE TENSÃO A FREQUÊNCIA INDUSTRIAL

- **Medida da tensão de ensaio em F.I.**
- **Ensaio a seco, é possível controlar quando aplicável:**
 - Tempo de subida e de aplicação da tensão, no caso de tensões disruptivas controla – se também o tempo até a ruptura, normalmente a partir de 75% do valor garantido até a ruptura. O comitê normativo específico do equipamento sob ensaio define este tempo em norma, caso contrário adotar a IEC 60.1.
 - Valor da tensão e carga mecânica aplicada (ensaio eletro-mecânico)
 - Valor da corrente de fuga.
 - Condições atmosféricas.
 - Temperatura – através de termopares.

ENSAIOS DE TENSÃO A FREQUÊNCIA INDUSTRIAL

- **Medida da tensão de ensaio em F.I.**
- Ensaio sob chuva, **é possível controlar quando aplicável**:
 - Tempo de subida e de aplicação da tensão, no caso de tensões disruptivas controla – se também o tempo até a disrupção, normalmente a partir de 75% do valor garantido, até a disrupção. O comitê normativo específico do equipamento sob ensaio define este tempo em norma, caso contrário adotar a IEC 60.1.
 - Valor da corrente de fuga.
 - Condições atmosféricas.
 - Temperatura – através de termopares.
 - Resistividade da chuva (Ωm) – 100 +/- 10 (prática europeia) e 178 +/- 27 (prática americana).
 - Precipitação da chuva (mm / min) - 1,5 +/- 0,50 (prática europeia) e 5,0 +/- 0,5 (prática americana).

ENSAIOS DE TENSÃO A FREQUÊNCIA INDUSTRIAL

- **Exigências para montagem** – No momento do ensaio o objeto de ensaio deve estar completo com seus acessórios e deve ter sido fabricado de maneira representativa, ou seja, mão de obra, linha de fabricação e componentes usualmente utilizados. O laboratório responsável pelo ensaio deve se assegurar que o objeto sob ensaio está de acordo com as dimensões declaradas em desenho técnico aprovado.
- As características de interrupção ou suportabilidade de um objeto podem ser afetadas pela sua distância a objetos vizinhos ou a terra, por sua altura em relação ao solo ou pela disposição do condutor de ensaio. Estas condições devem ser definidas pelo comitê de estudos específico ao equipamento ensaiado.
- De maneira geral uma distância de $1,5 \times$ a menor distância de interrupção, garante que as influências dos objetos vizinhos são negligenciáveis.

ENSAIOS ELÉTRICOS EM ALTA TENSÃO

Ensaio de tensões e de corrente de impulso (teoria e prática)



ENSAIOS DE TENSÃO E DE CORRENTES DE IMPULSO

Tensões suportáveis dos equipamentos - Faixa 1

Tensão máxima do equipamento U_m [kV _{eficaz}]	Tensão suportável normalizada de frequência fundamental de curta duração [kV _{eficaz}]	Tensão suportável normalizada de impulso atmosférico [kV _{crista}]
0,6* (nota 1)	4*	-
1,2*	10	30*
3,6	10	20 40
7,2	20	40 60
12	28	60 75 95
15*	34*	95 110*
17,5	38	75 95
24	50	95 125 145
36	70	145 170 200*

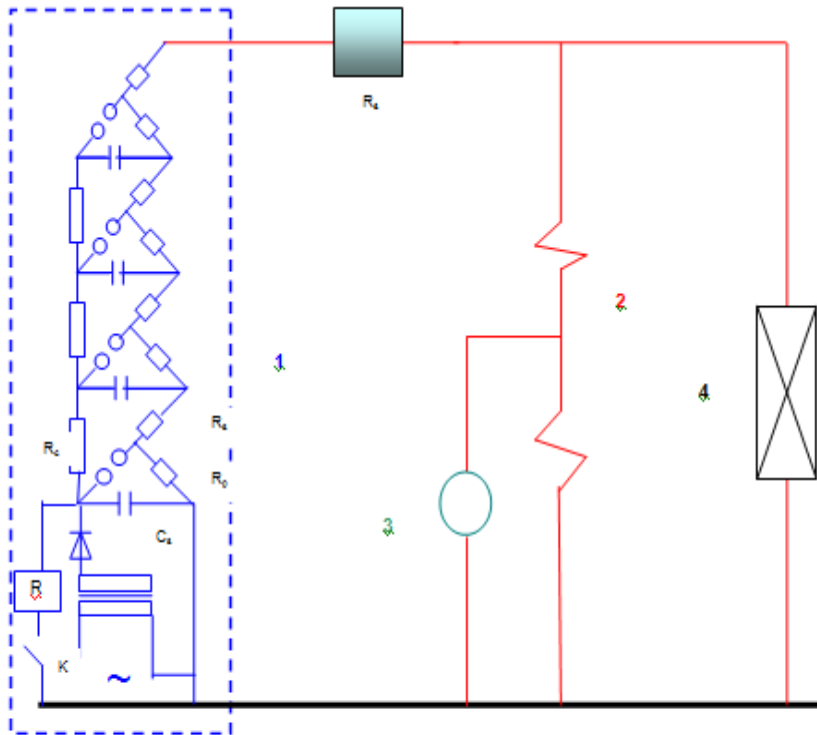
NOTAS

1 O nível de isolamento correspondente à $U_m = 0,6$ kV só é aplicável a secundário de transformador, cujo primário tem U_m superior a 1 kV.

ENSAIOS DE TENSÃO E DE CORRENTES DE IMPULSO

Ensaio de impulso de tensão

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 DE TENSÃO E DE CORRENTES DE IMPULSO

Ensaio de impulso de tensão

Circuito de ensaios e requisitos gerais



ENSAIOS DE TENSÃO E DE CORRENTES DE IMPULSO

Ensaio de impulso de tensão

Circuito de ensaios e requisitos gerais



Gerador de impulsos de tensão

Circuito de ensaios e requisitos gerais

O gerador de impulsos consiste basicamente de um conjunto de capacitores carregados em paralelo com uma tensão pré-ajustada.

Após a interrupção do gap, situado entre as esferas dos estágios do gerador, os capacitores ficam conectados em série permitindo assim a obtenção de impulsos de tensão com formas de impulso e amplitudes desejadas.

ENSAIOS DE TENSÃO E DE CORRENTES DE IMPULSO

Ensaio de impulso de tensão

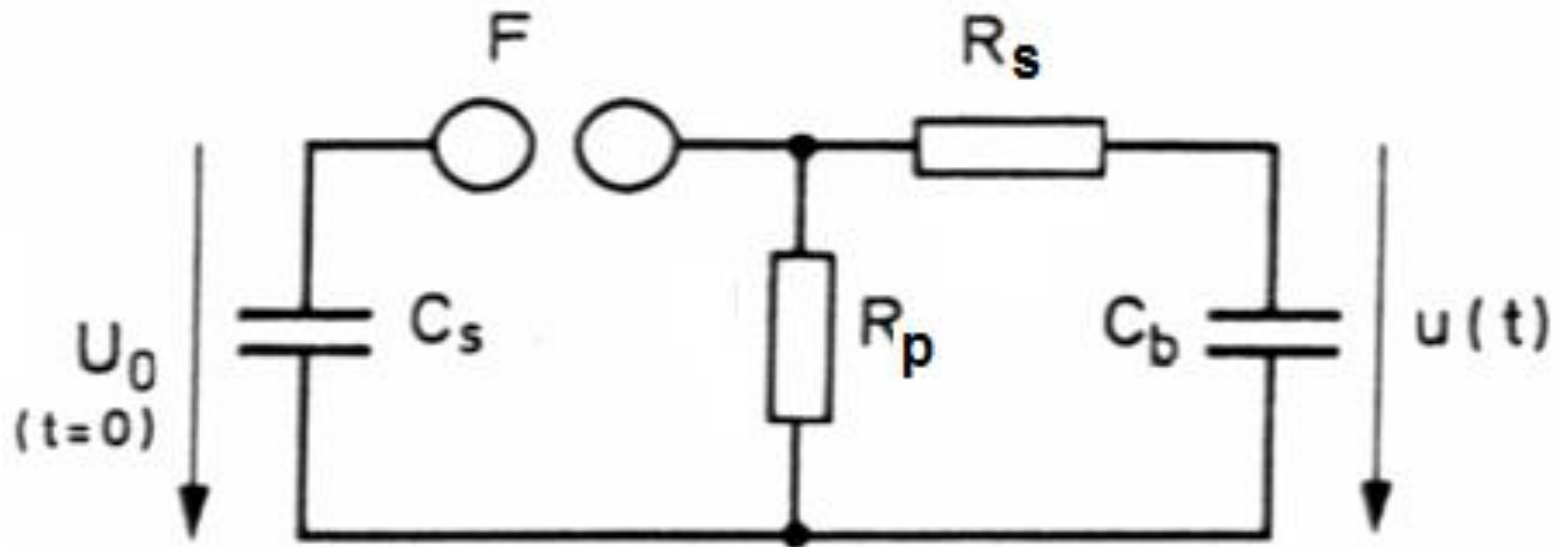
Circuito de ensaios e requisitos gerais



ENSAIOS DE TENSÃO E DE CORRENTES DE IMPULSO

Gerador de impulsos de tensão

Princípio básico de funcionamento



Gerador de impulsos de tensão

Princípio básico de funcionamento

Os capacitores de impulso C_s são carregados com uma tensão de carregamento U_0 pré-estabelecida. Ao ocorrer o centelhamento dos gaps situados entre as esferas dos estágios do gerador esta tensão é descarregada através do circuito carregando o capacitor de carga C_b .

A tensão de impulso $u(t)$ através dos terminais do capacitor C_b cresce do valor zero para o valor de crista, formando a frente de onda do impulso. O tempo necessário para o carregamento total de C_b depende da constante de tempo RC do circuito utilizado.

Gerador de impulsos de tensão

Princípio básico de funcionamento

A função principal do resistor série R_s é a de evitar oscilações na crista da onda de tensão, devendo seu valor ser tal que:

$$R_s \geq 2 \cdot \sqrt{L_T / C_T}$$

$$C_T = \frac{C_s \cdot C_b}{C_s + C_b}$$

L_T indutância total do circuito;

C_T capacitância equivalente do circuito no instante do carregamento

Gerador de impulsos de tensão

Princípio básico de funcionamento

Ao atingir o valor da tensão de crista $u(t)$, os capacitores de carga C_b e de impulso C_s se descarregam em paralelo através da resistência de cauda R_p , formando a cauda da onda de impulso.

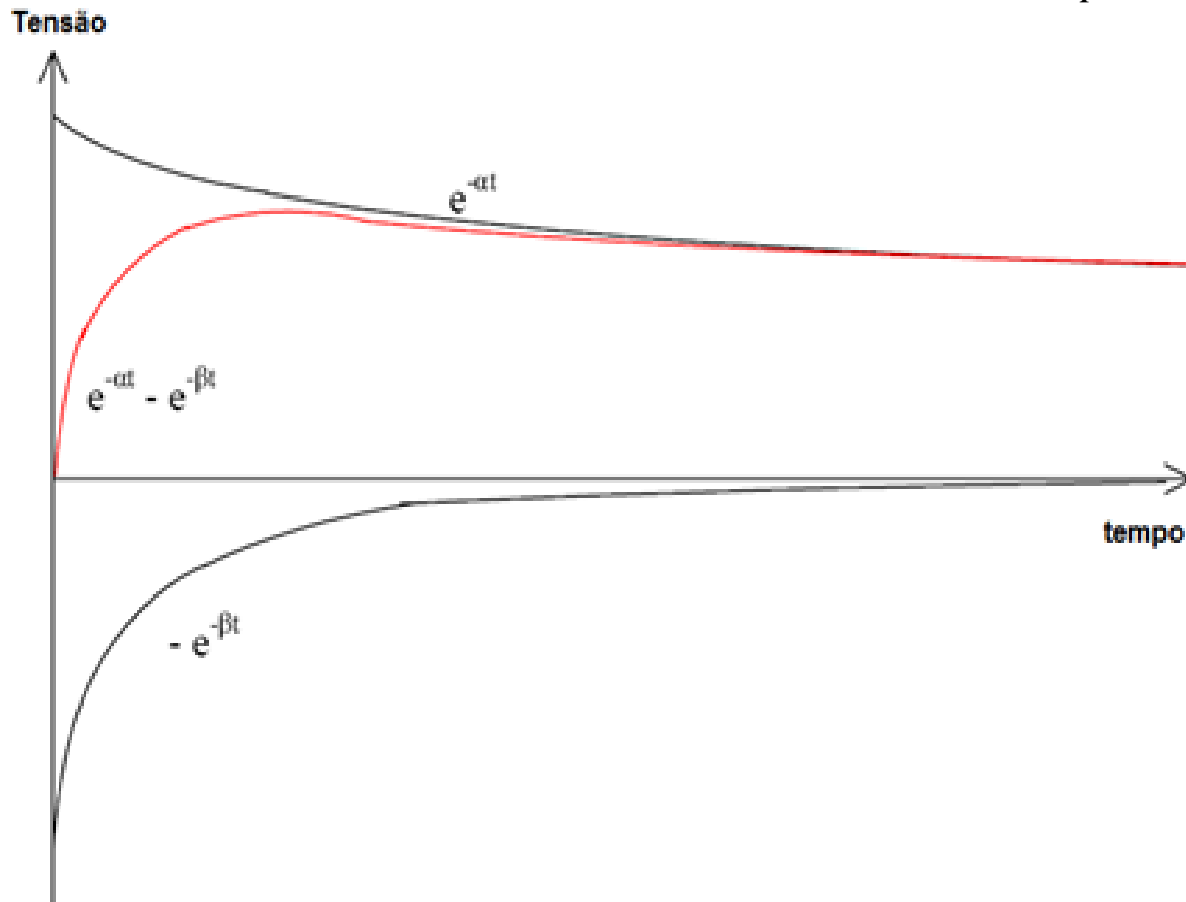
Deste modo, a forma de impulso de tensão apresenta uma característica de uma dupla exponencial, sendo a exponencial crescente função da constante de tempo $T_1 = R_s \cdot C_T$ e a exponencial decrescente função da constante de tempo $T_2 = R_p \cdot (C_s + C_b)$.

ENSAIOS DE TENSÃO E DE CORRENTES DE IMPULSO

Gerador de impulsos de tensão

Princípio básico de funcionamento

$$V(t) = V \cdot (e^{-\alpha t} - e^{-\beta t}) = \frac{U_0}{C_b \cdot R_p} \cdot \frac{1}{\beta - \alpha} \cdot (e^{-\alpha t} - e^{-\beta t})$$



$$\beta = \frac{1}{T_1}$$

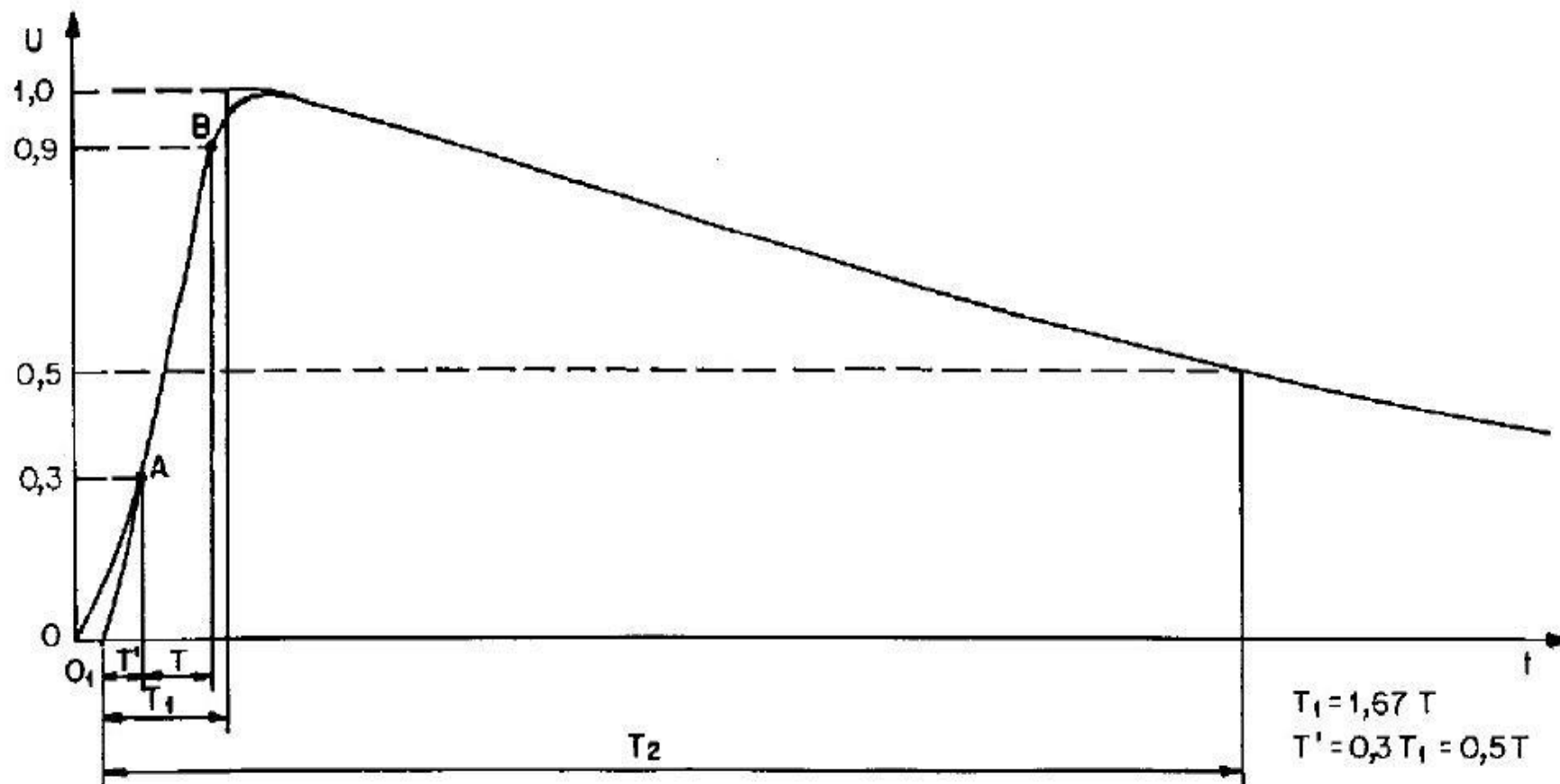
$$\alpha = \frac{1}{T_2}$$

ENSAIOS DE TENSÃO E DE CORRENTES DE IMPULSO

Gerador de impulsos de tensão

Forma de impulso normalizada

Para o impulso atmosférico normalizado: onda 1,2 / 50 μs , os valores de α e β podem ser dados aproximadamente por 0,0143 e 4,87, respectivamente.



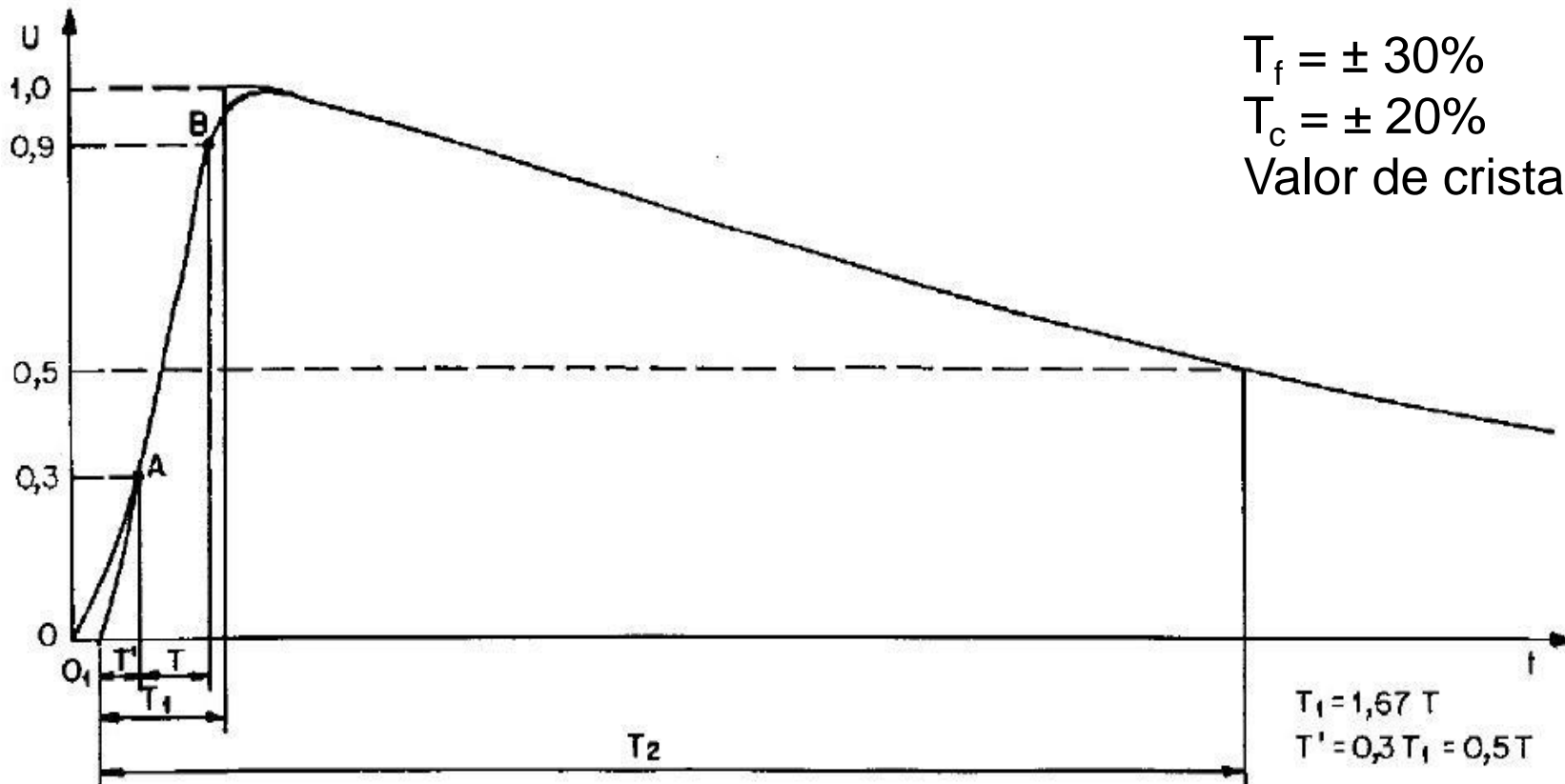
ENSAIOS DE TENSÃO E DE CORRENTES DE IMPULSO

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 $50 \mu\text{s}$.

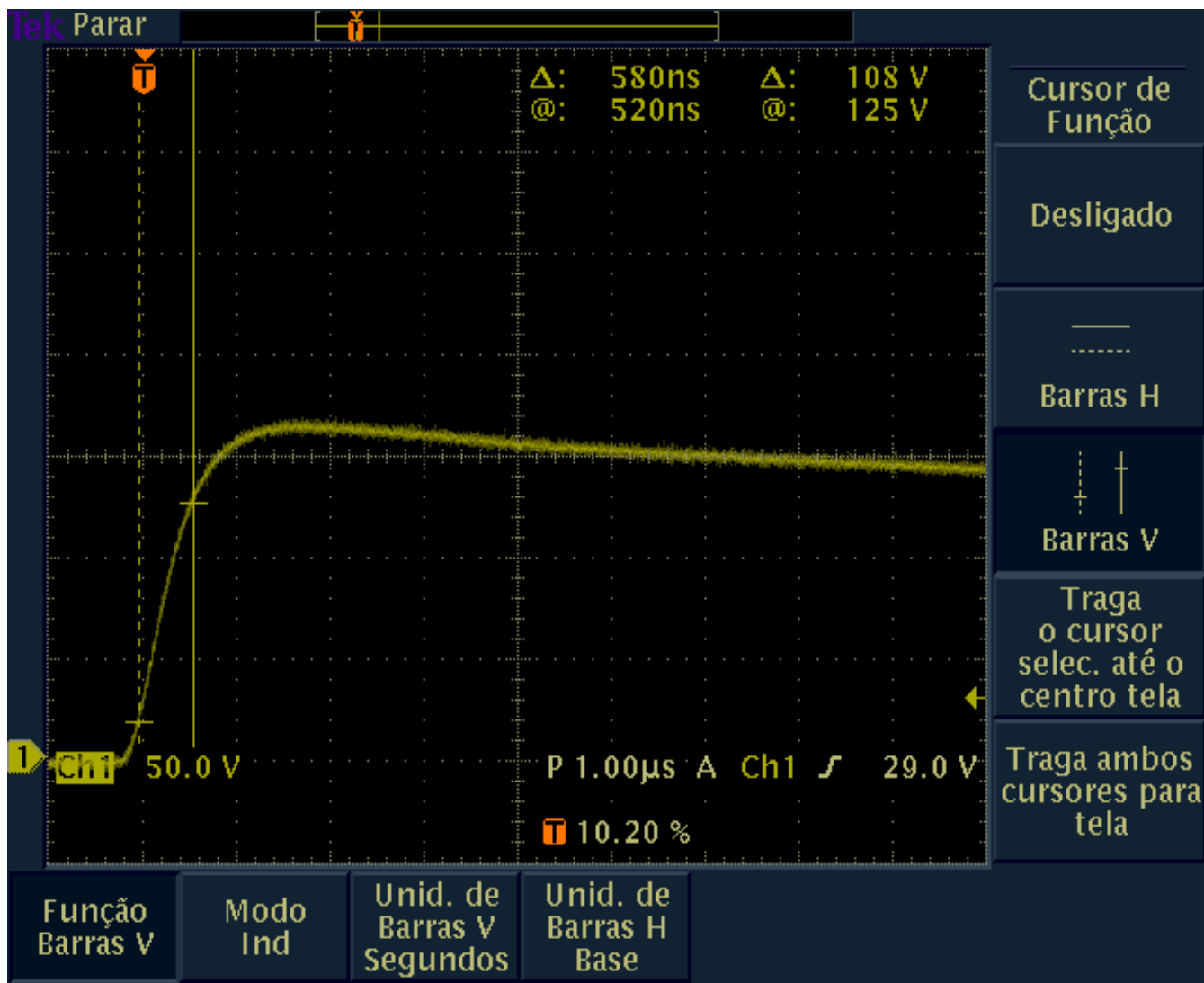
Tolerância:



ENSAIOS DE TENSÃO E DE CORRENTES DE IMPULSO

Gerador de impulsos de tensão

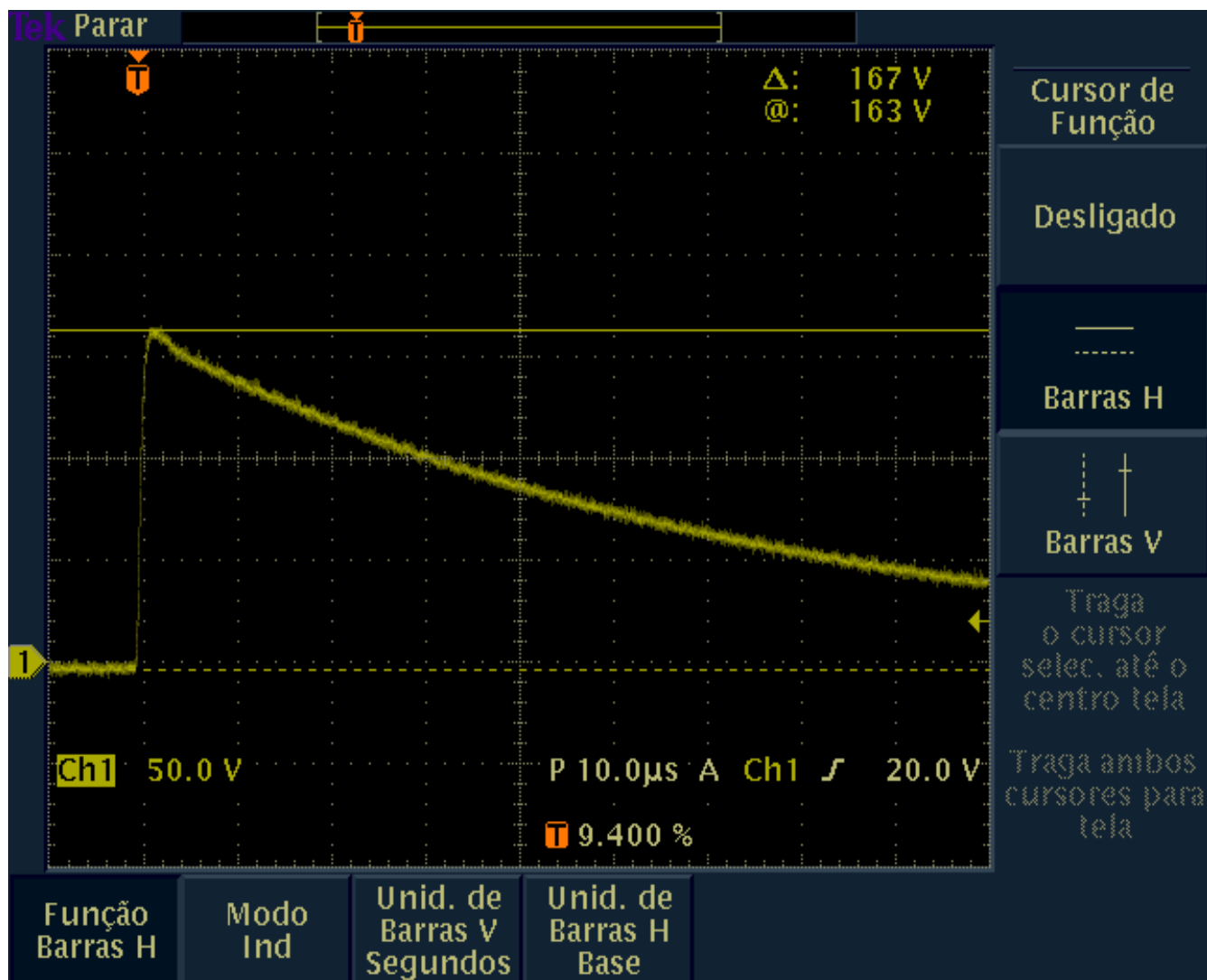
Forma de impulso normalizada



ENSAIOS DE TENSÃO E DE CORRENTES DE IMPULSO

Gerador de impulsos de tensão

Forma de impulso normalizada



Ensaio de impulso

Circuito de ensaios e requisitos gerais

O divisor de tensão a ser considerado deve ser dimensionado para suportar a tensão máxima de ensaio e apresentar uma relação de tensão nominal (ou Fator de Escala) adequada em relação às tensões máximas de ensaio e de entrada do sistema de medição. Para ensaios de impulso geralmente utilizam-se divisores do tipo resistivo ou misto, os quais devem estar em conformidade com os requerimentos indicados na Norma técnica do equipamento ensaiado.

ENSAIOS DE TENSÃO E DE CORRENTES DE IMPULSO

Ensaio de impulso de tensão

Circuito de ensaios e requisitos gerais



ENSAIOS DE TENSÃO E DE CORRENTES DE IMPULSO

Ensaio de impulso

Circuito de ensaios e requisitos gerais

O sistema de medição utilizado, acoplado ao divisor de tensão através dos cabos de medição, pode ser um osciloscópio para: registrar a forma do impulso e a amplitude do sinal de tensão; bem como verificar a sua conformidade em relação à Norma considerada. Voltímetros de pico também podem ser utilizados.



Procedimentos de ensaios de tensão

Ensaio de tensão suportável

O procedimento de ensaio recomendado depende do tipo da isolação do objeto sob ensaio. As Normas específicas do objeto sob ensaio devem indicar qual o procedimento de ensaio aplicável.

A Norma NBR 6936 define quatro procedimentos: tipos A, B, C e D. Nos procedimentos A, B e C são aplicadas ao objeto sob ensaio tensões de valor igual à tensão suportável nominal, enquanto que no procedimento D são aplicadas tensões com diferentes valores de crista.

Ensaio de tensão suportável

Análise estatística dos procedimentos de ensaio

Para se determinar a probabilidade P de que o objeto sob ensaio seja aprovado para uma determinada tensão suportável U_w , deve ser assumido que o objeto sob ensaio possui uma certa probabilidade P_d de descarga.

A probabilidade P de que no objeto sob ensaio ocorram n_{vd} descargas em uma série de n_v aplicações de tensão com uma probabilidade de descarga P_d (em uma aplicação).

Ensaio de tensão suportável

Procedimento tipo A

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

Os requisitos desse ensaio são satisfeitos se não for obtida nenhuma indicação de falha conforme o método de detecção definido pela Norma técnica específica do equipamento sob ensaio. Este procedimento é recomendável para ensaios em isolações não auto – recuperantes.

Ensaio de tensão suportável

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 específica do equipamento sob ensaio.

Ensaio de tensão suportável

Procedimento tipo C

São aplicados ao objeto sob ensaio 3 impulsos de forma e polaridades especificadas, com valor de crista igual ao valor da tensão suportável nominal.

Os requisitos desse ensaio são satisfeitos se não ocorrer nenhuma descarga disruptiva e não são satisfeitos se ocorrer mais do que uma descarga disruptiva no objeto sob ensaio.

Ensaio de tensão suportável

Procedimento tipo C

Se ocorrer no máximo uma descarga disruptiva na isolação auto-recuperante, nove impulsos adicionais devem ser aplicados e os requisitos desse ensaio são satisfeitos se não ocorrer nenhuma descarga disruptiva nesses impulsos adicionais. Não deve haver qualquer indicação de falha na isolação não auto-recuperante, conforme método de detecção definido na Norma técnica específica do equipamento sob ensaio.

De acordo com a NBR 6936 este procedimento corresponde à prática americana modificada de maneira a ser estatisticamente equivalente ao Procedimento B.

Ensaaios de tensão suportável

Procedimento tipo D

Para uma isolação auto-recuperante pode-se determinar a tensão que corresponde a uma probabilidade de descarga disruptiva de 10% (U_{10}), usando-se procedimentos estatísticos de ensaio.

O valor da tensão U_{10} pode ser obtido de duas formas:

ENSAIOS DE TENSÃO E DE CORRENTES DE IMPULSO

Determinação da tensão com 50% de probabilidade de descarga (tensão crítica de descarga da isolação).

➤ **Método dos níveis múltiplos:**

Este método consiste em aplicar sobre o isolamento uma série de n impulsos (pelo menos dez) em cada um dos níveis de tensão de ensaio U_i , mantendo-se a forma de impulso definida. A variação da amplitude entre os níveis de tensão ΔU deve ser aproximadamente igual ao desvio padrão σ .

Para cada amplitude de tensão U_i devem ser aplicadas n solicitações. A probabilidade de descarga disruptiva do isolamento para cada solicitação, poderá ser definida pela relação d/n , onde d corresponde ao número de descargas disruptivas verificadas no isolamento para uma dada solicitação e n o número total de solicitações.

ENSAIOS DE TENSÃO E DE CORRENTES DE IMPULSO

Determinação da tensão com 50% de probabilidade de descarga (tensão crítica de descarga da isolação).

➤ **Método dos níveis múltiplos:**

Quanto maior for o número de aplicações n , mais precisos serão os resultados obtidos.

A partir dos resultados obtidos é traçada em um papel adequado, uma reta que melhor represente esses pontos determinando-se, dessa forma, o valor da tensão de ensaio com 50% de probabilidade de ocorrência de descarga disruptiva.

ENSAIOS DE TENSÃO E DE CORRENTES DE IMPULSO

Determinação da tensão com 50% de probabilidade de descarga (tensão crítica de descarga da isolação).

➤ Método dos acréscimos e decréscimos:

Neste método, também conhecido como “*Up and Down*”, são efetuadas várias séries de m aplicações de tensão com mesma forma de impulso 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 .

ENSAIOS DE TENSÃO E DE CORRENTES DE IMPULSO

Determinação da tensão com 50% de probabilidade de descarga (tensão crítica de descarga da isolação).

➤ **Método dos acréscimos e decréscimos:**

Em um ensaio pelo procedimento de acréscimo e decréscimo disruptivo, aumenta-se o próximo nível de tensão U_i quando da primeira ocorrência de uma aplicação que não resulte em descarga no nível anterior, ou reduz-se o próximo nível de tensão U_i se todas as aplicações do nível anterior resultarem em descarga disruptiva. Para este procedimento, se obtém a estimativa de U_p para uma probabilidade de descarga disruptiva p maior do que 50%, considerando a expressão abaixo:

$$p = (0,5)^{1/m}$$

ENSAIOS DE TENSÃO E DE CORRENTES DE IMPULSO

Determinação da tensão com 50% de probabilidade de descarga (tensão crítica de descarga da isolação).

➤ **Método dos acréscimos e decréscimos:**

Quando $m = 1$, os dois procedimentos são coincidentes e correspondem ao método de acréscimo e decréscimo com 50% de probabilidade de descarga disruptiva. Neste caso, se após uma aplicação de tensão U_i não ocorrer descarga disruptiva no isolamento, a próxima aplicação terá um valor de tensão $U_i + \Delta U$, que corresponde ao degrau de tensão aproximadamente igual ao desvio-padrão σ . Se ocorrer descarga disruptiva na tensão U_i a próxima solicitação deverá apresentar uma amplitude $U_i - \Delta U$. O mesmo procedimento deverá se repetir para as demais aplicações, devendo ser aplicadas pelo menos 20 solicitações de tensão.

ENSAIOS DE TENSÃO E DE CORRENTES DE IMPULSO

Determinação da tensão com 50% de probabilidade de descarga (tensão crítica de descarga da isolação).

➤ **Método dos acréscimos e decréscimos:**

De acordo com a NBR 6936, o valor de tensão com 50% de probabilidade de descarga disruptiva (U_{50}) pode ser obtido por:

$$U_{50} = \frac{\sum n_v \cdot U_v}{\sum n_v}$$

$N_v \cdot U_v$ corresponde ao número de aplicações n à tensão U_i

A Norma NBR considera um desvio padrão de 3% para impulsos atmosféricos e de 6% para impulsos de manobra.

ENSAIOS DE TENSÃO E DE CORRENTES DE IMPULSO

Determinação da tensão com 50% de probabilidade de descarga
(tensão crítica de descarga da isolação).

Exemplo: método dos acréscimos e decréscimos:

Considere a realização do seguinte ensaio para determinação da tensão de U_{50} :

Aplicação	Tensão U (kV)	Descarga	Não descarga
1	95	x	
2	92		o
3	95	x	
4	92	x	
5	89		o
6	92		o
7	95		o
8	98	x	
9	95		o
10	98	x	
11	95	x	
12	92	x	
13	89		o
14	92	x	
15	89		o
16	92		o
17	95		o
18	98		o
19	101	x	
20	98		o

ENSAIOS DE TENSÃO E DE CORRENTES DE IMPULSO

Determinação da tensão com 50% de probabilidade de descarga
(tensão crítica de descarga da isolação).

Exemplo: método dos acréscimos e decréscimos:

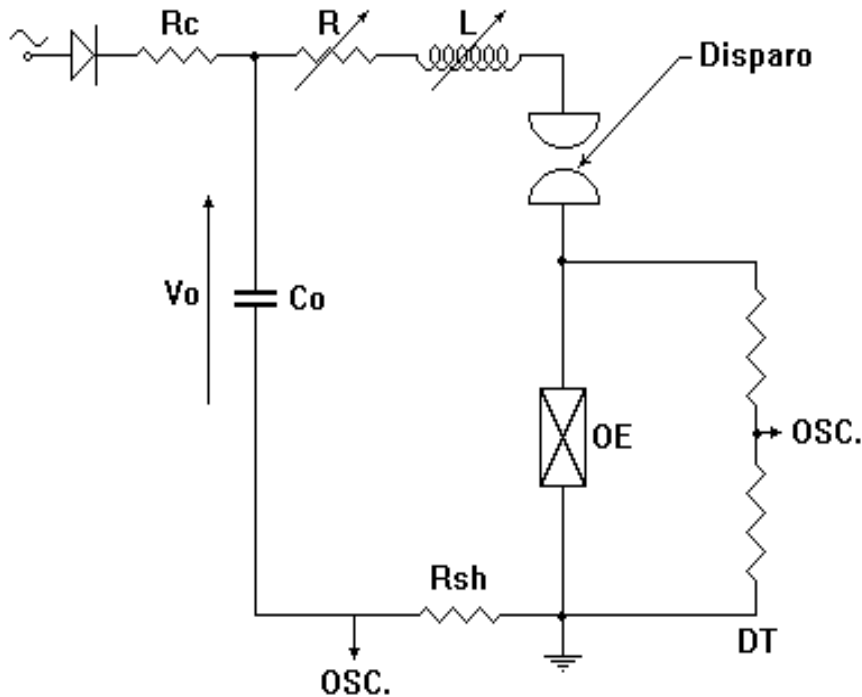
Tensão U (kV)	Número de aplicações	Número de descargas
89	3	0
92	6	3
95	6	3
98	4	2
101	1	1

$$U_{50} = \frac{\sum n_v \cdot U_v}{\sum n_v} = \frac{(3 \times 89) + (6 \times 92) + (6 \times 95) + (4 \times 98) + (1 \times 101)}{20} = 94,1 \text{ kV}$$

ENSAIOS DE TENSÃO E DE CORRENTES DE IMPULSO

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

ENSAIOS DE TENSÃO E DE CORRENTES DE IMPULSO

Ensaio de tensão residual em pára-raios

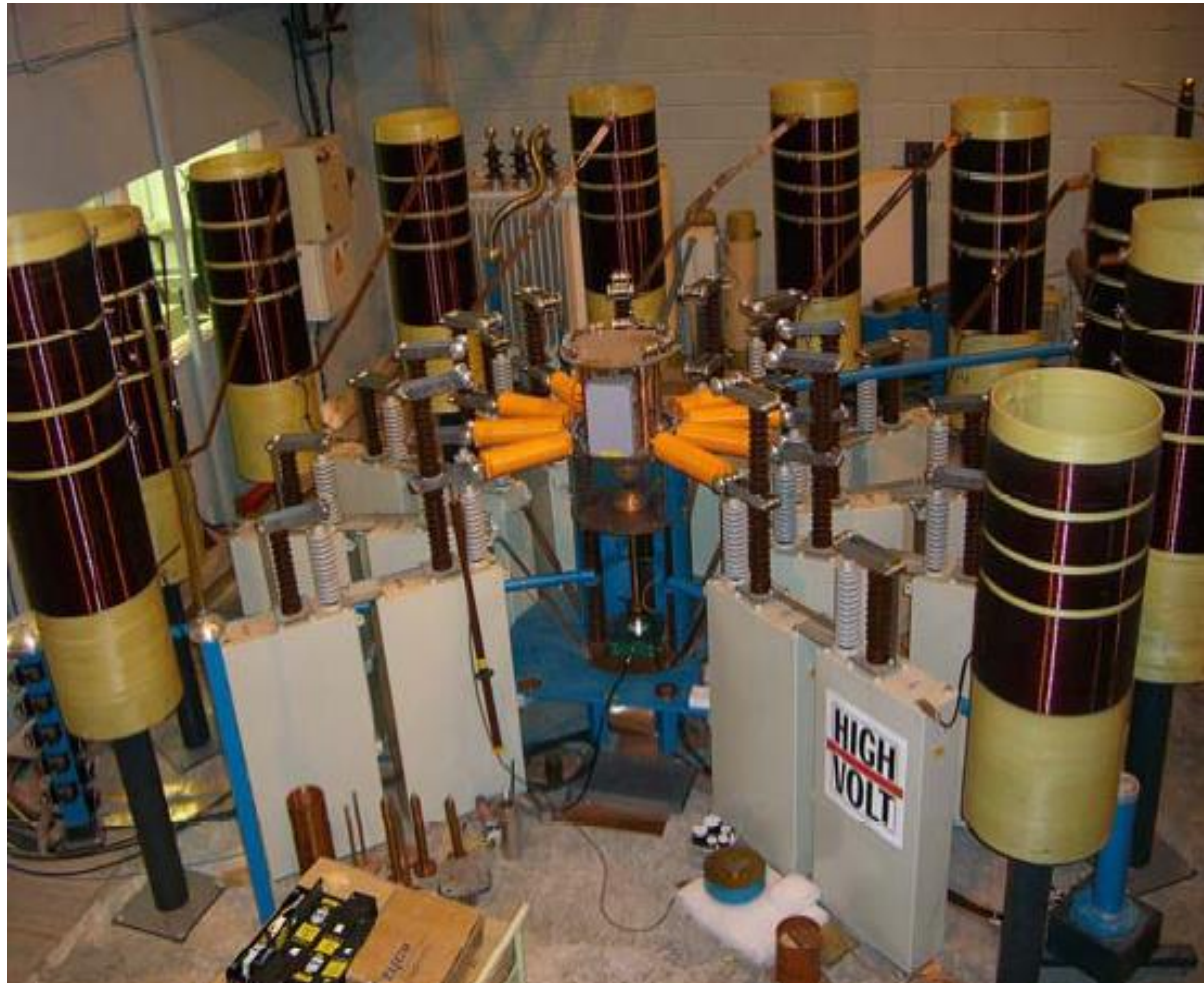
Circuito de ensaio e requisitos gerais



ENSAIOS DE TENSÃO E DE CORRENTES DE IMPULSO

Ensaio de tensão residual em pára-raios

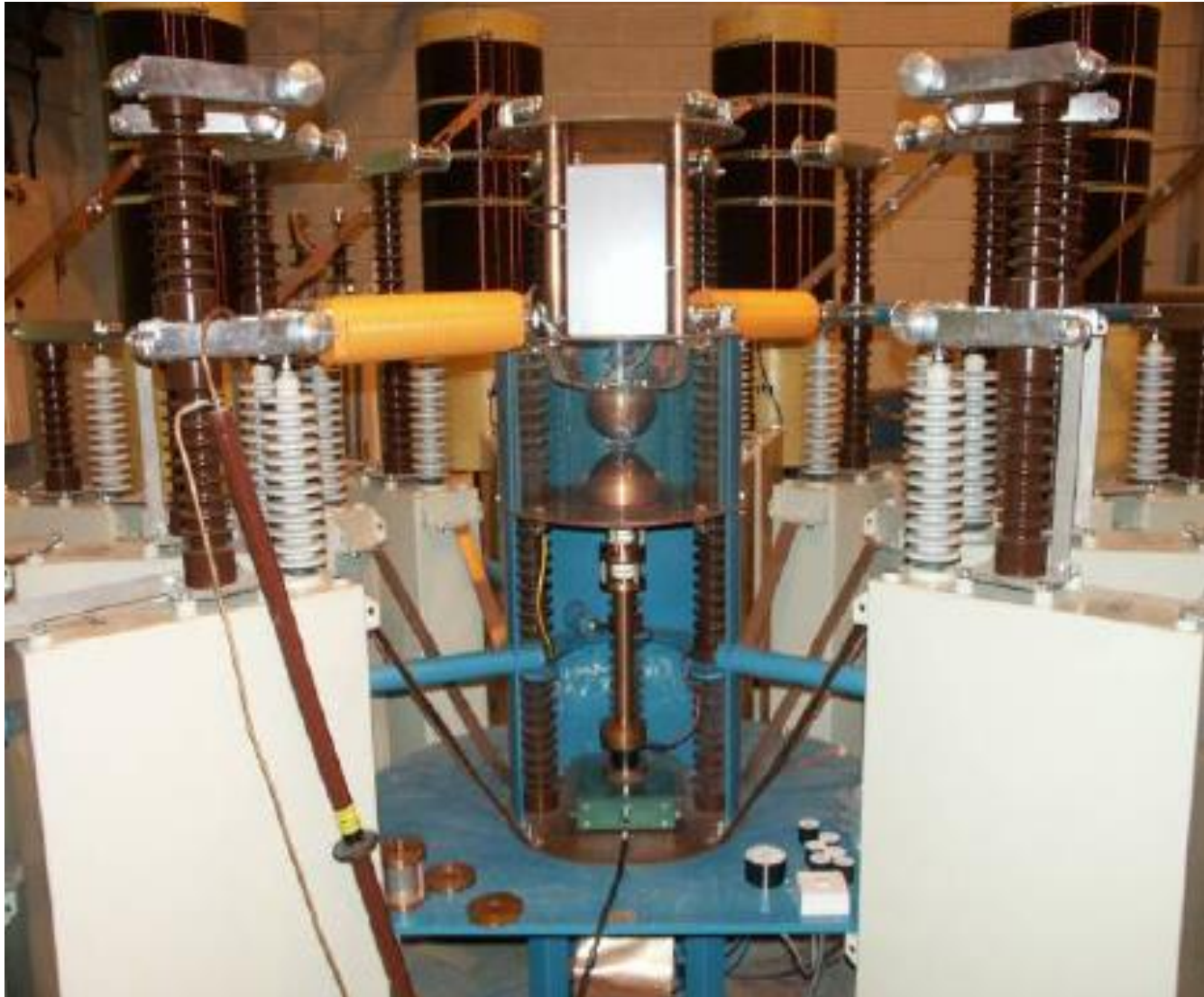
Circuito de ensaio e requisitos gerais



ENSAIOS DE TENSÃO E DE CORRENTES DE IMPULSO

Ensaio de tensão residual em pára-raios

Circuito de ensaio e requisitos gerais



ENSAIOS DE TENSÃO E DE CORRENTES DE IMPULSO

Ensaio de tensão residual em pára-raios

Circuito de ensaio e requisitos gerais



ENSAIOS DE TENSÃO E DE CORRENTES DE IMPULSO

Ensaio de tensão residual em pára-raios

Circuito de ensaio e requisitos gerais



ENSAIOS DE TENSÃO E DE CORRENTES DE IMPULSO

Ensaio de tensão residual em pára-raios

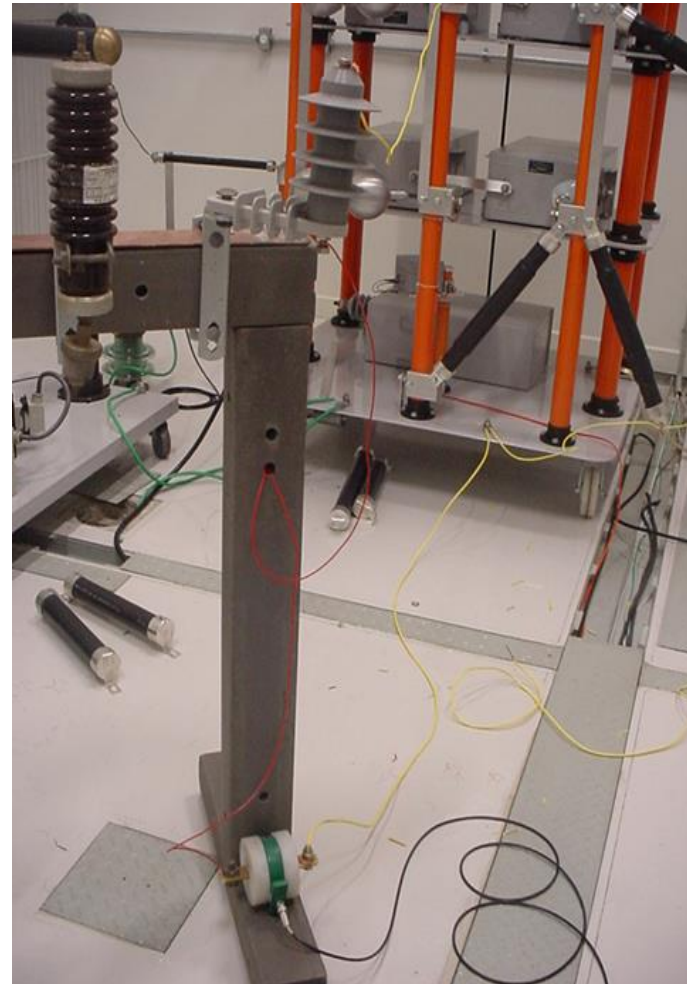
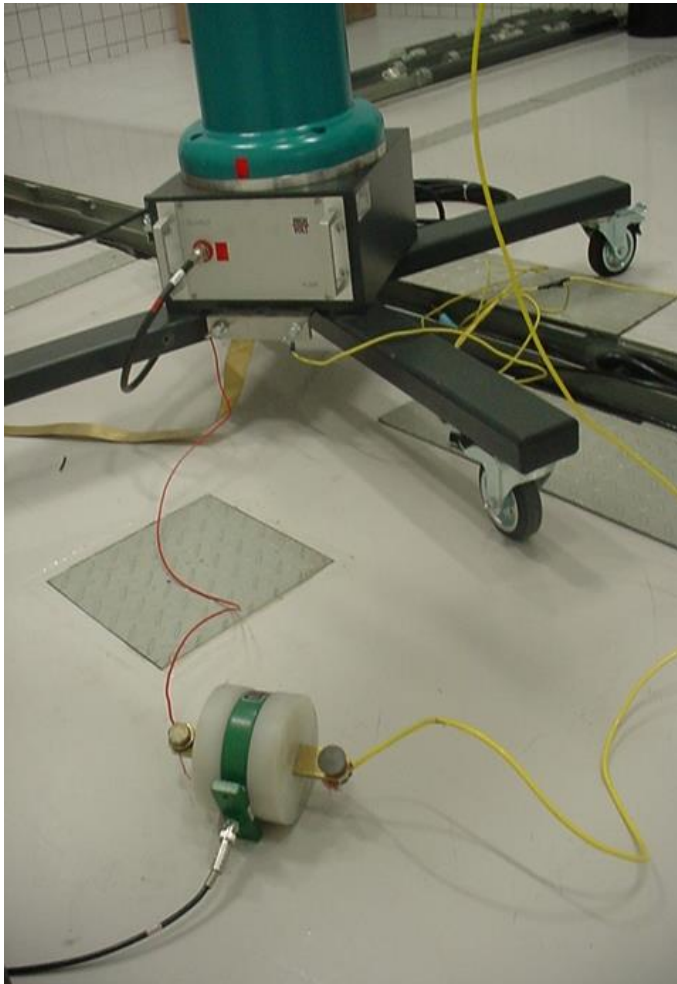
Circuito de ensaio e requisitos gerais



ENSAIOS DE TENSÃO E DE CORRENTES DE IMPULSO

Ensaio de tensão residual em pára-raios

Circuito de ensaio e requisitos gerais



ENSAIOS DE TENSÃO E DE CORRENTES DE IMPULSO

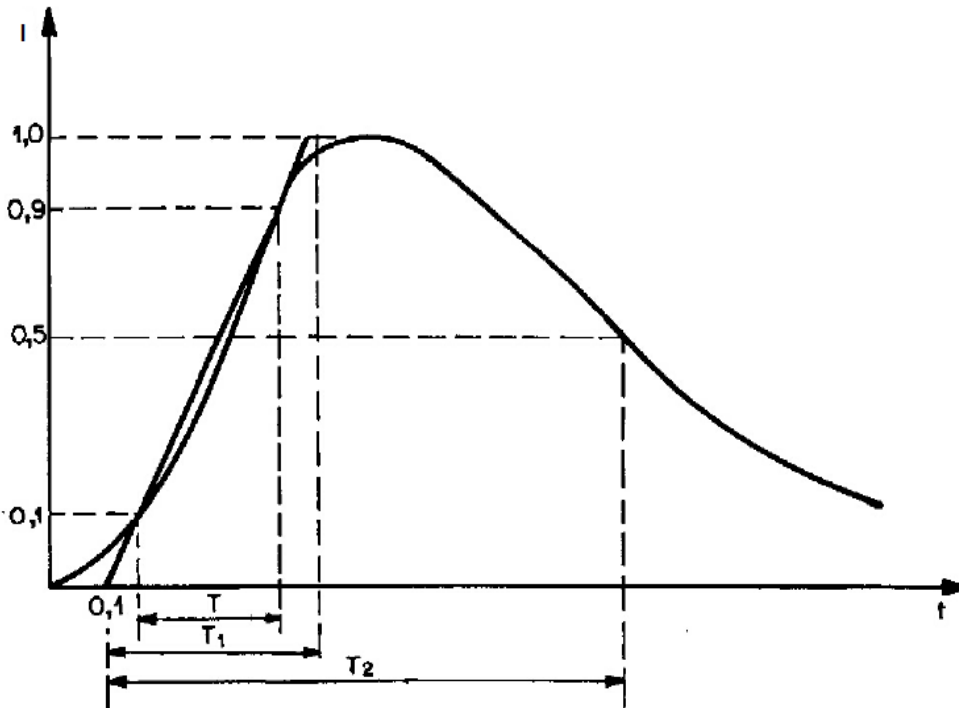
Gerador de impulsos de corrente

Forma de impulso da corrente

O impulso de corrente cresce até o valor de crista em um tempo curto e decresce a zero com forma exponencial ou senoidal fortemente amortecida.

Este impulso de corrente é definido pelo tempo de frente T_1 e pelo tempo até o meio valor T_2 .

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:

$$T_f = \pm 10\%$$

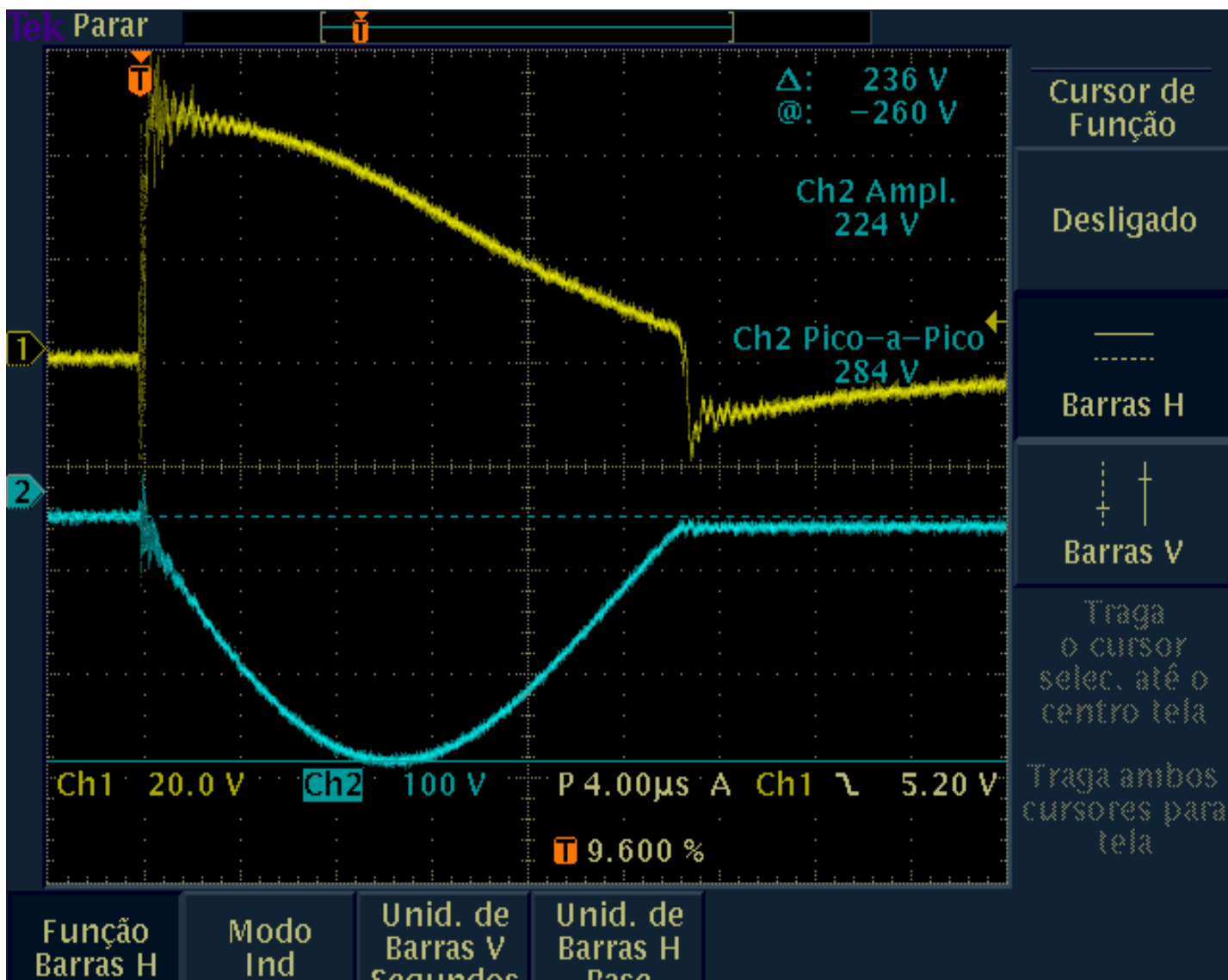
$$T_c = \pm 10\%$$

Valor de crista: $\pm 10\%$

ENSAIOS DE TENSÃO E DE CORRENTES DE IMPULSO

Gerador de impulsos de corrente

Forma de impulso normalizada



Ensaio de tensão residual em pára-raios

- ⇒ As características de proteção dos pára-raios dependem do tipo de pára-raios utilizado e devem ser comparadas com os níveis de suportabilidade dos equipamentos.
- ⇒ A tensão residual aumenta com o aumento da amplitude da corrente de descarga.
- ⇒ A tensão residual aumenta com a redução no tempo de frente da onda de corrente.

ENSAIOS DE TENSÃO E DE CORRENTES DE IMPULSO

Características de proteção para os pára-raios de ZnO sem centelhadores

As características de proteção são definidas pela IEC 60099-4/06, pela combinação dos seguintes ensaios:

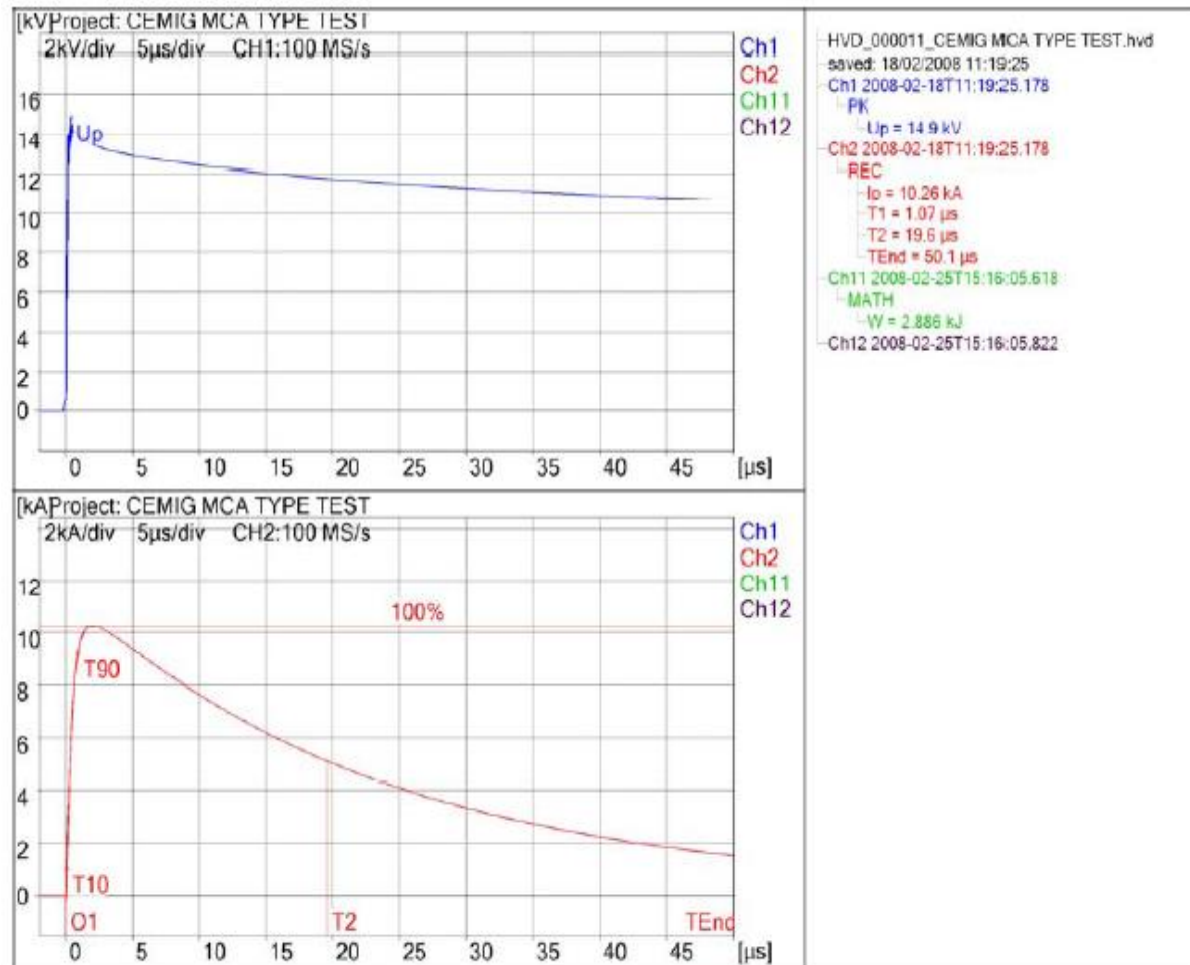
- ⇒ Tensão residual para impulso de corrente com frente íngreme de $1 \mu\text{s}$;
- ⇒ Curva característica "tensão residual x corrente de descarga $8/20 \mu\text{s}$ ";
- ⇒ Tensão residual para impulso de manobra.

ENSAIOS DE TENSÃO E DE CORRENTES DE IMPULSO

Ensaio de Tensão residual (3 amostras)

Tensão residual para impulso de frente íngreme (1/2 μ s)

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

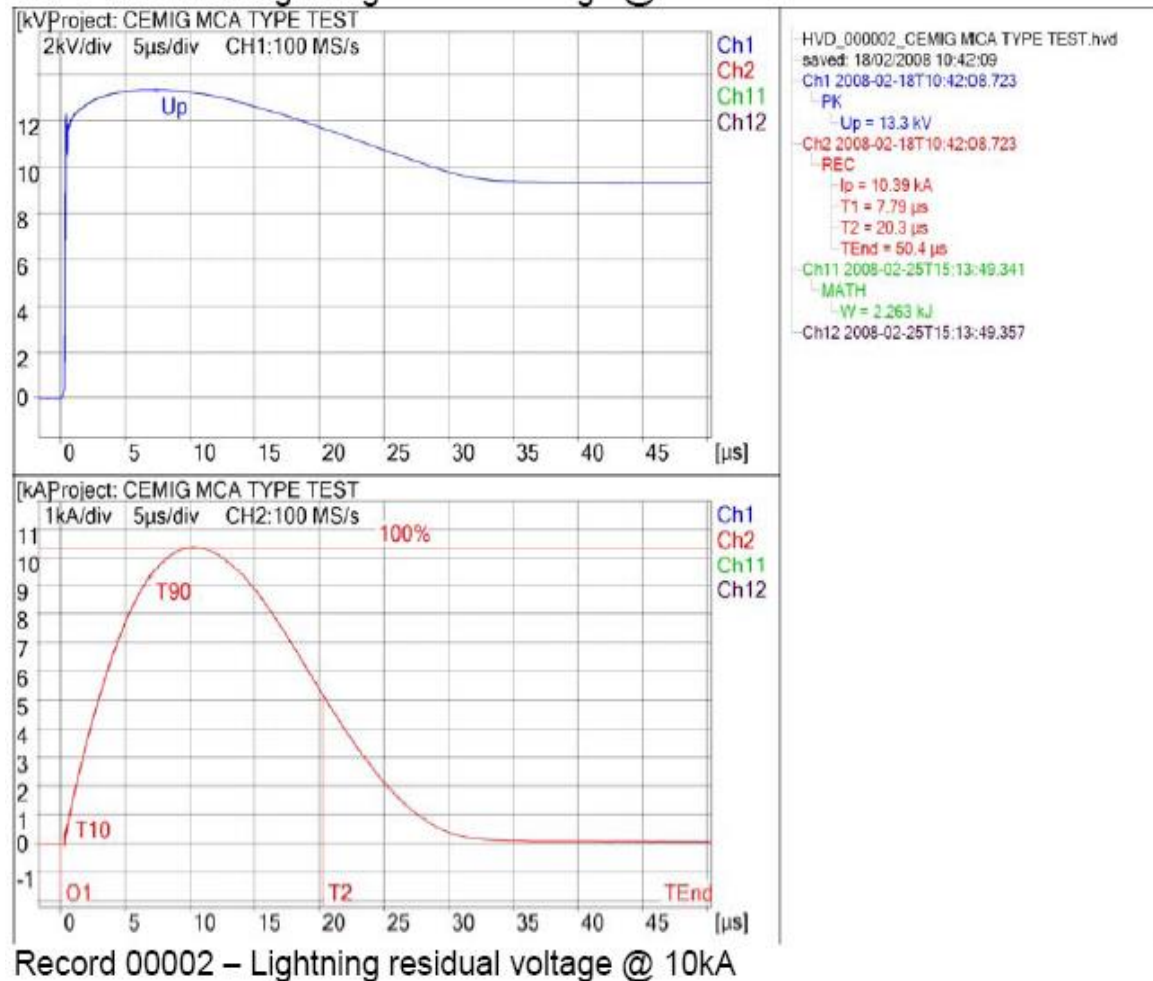


ENSAIOS DE TENSÃO E DE CORRENTES DE IMPULSO

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.

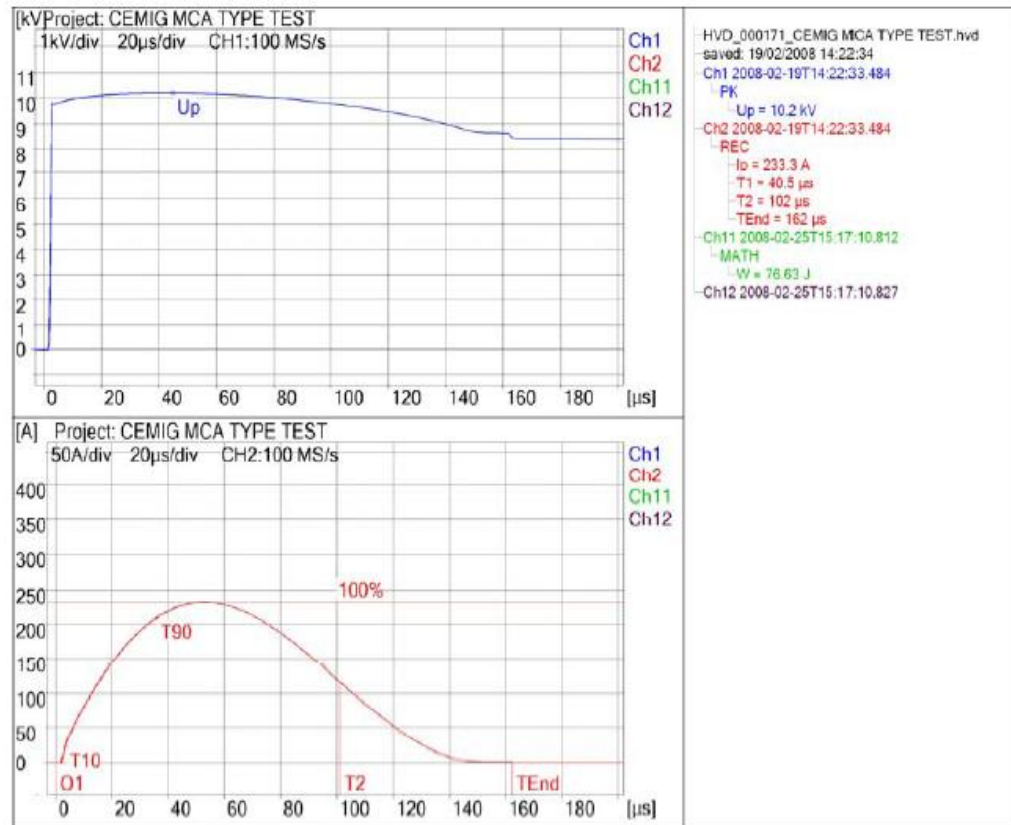
Obtem-se a curva Tensão residual x corrente de descarga



ENSAIOS DE TENSÃO E DE CORRENTES DE IMPULSO

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

REQUERIMENTOS PARA SISTEMAS DE MEDIÇÃO

- **Sistema de medição** – Conjunto completo de equipamentos adequados para medida em alta tensão.
 - Composto de:
 - Divisores de Tensão;
 - Shunts de corrente;
 - Cabos coaxiais / tri-axial;
 - Atenuadores;
 - Voltímetros RMS / pico;
 - Osciloscópio.
- Todos os componentes de um sistema de medição devem ser calibrados em conjunto, formando assim um sistema de medição.

REQUERIMENTOS PARA SISTEMAS DE MEDIÇÃO

- **Sistema de medição aprovado** – É um sistema de medição que atende as prescrições da IEC 60.2, devendo comportar os seguintes ensaios:
- **Determinação do fator de escala, podendo ser executado através de:**
 - Medida simultânea de entradas e saídas;
 - Calculado a partir da medida das impedâncias de alta e baixa;
 - O fator de escala de um shunt de corrente deve ser realizado com corrente contínua

REQUERIMENTOS PARA SISTEMAS DE MEDIÇÃO

- **Sistema de medição aprovado** – É um sistema de medição que atende as prescrições da IEC 60.2 e 60.3, devendo comportar os seguintes ensaios:
- **Linearidade**
 - O fator de escala deve ser confirmado para todo o range de utilização do divisor ou shunt. Este não deve variar de 1% da média obtida conforme exemplo abaixo:

Sistema de Referência (kV)	Sistema em calibração (V)	Fator de escala	Variação % relativa a M	Resultado
20	40	500,0	-0.67	OK
40	79	506,3	+0,59	OK
60	119	504,2	+0,17	OK
80	158	506,3	+0,59	OK
100	200	500,0	-0,67	OK
Média - M		503,36		

REQUERIMENTOS PARA SISTEMAS DE MEDIÇÃO

- **Sistema de medição aprovado** – É um sistema de medição que atende as prescrições da IEC 60.2 e 60.3, devendo comportar os seguintes ensaios:
- **Ensaio de estabilidade a curto termo**
 - A tensão ou corrente especificada deve ser aplicada ao dispositivo de medição de maneira contínua, no caso de impulsos na frequência máxima de utilização). O tempo de aplicação deve ser estimado em função da utilização.
 - O fator de escala deve ser medido antes e imediatamente após o fim da aplicação de tensão ou corrente. Os dois valores não devem diferir mais de 1%.

REQUERIMENTOS PARA SISTEMAS DE MEDIÇÃO

- **Sistema de medição aprovado** – É um sistema de medição que atende as prescrições da IEC 60.2 e 60.3, devendo comportar os seguintes ensaios:
- **Ensaio de estabilidade a longo termo de cada elemento**
 - As características de estabilidade, os efeitos da tensão e da corrente e os efeitos da temperatura sobre cada tipo de elemento constituinte de um sistema de medida aprovado, deve ser tal que o fator de escala não varie ao longo do tempo, entre os Ensaio de Determinação de Características, de mais que 1%.
 - Estas características podem ser obtidas das especificações do fabricante ou determinadas ao longo de ensaios sucessivos de Determinação das Características

REQUERIMENTOS PARA SISTEMAS DE MEDIÇÃO

- **Sistema de medição aprovado** – É um sistema de medição que atende as prescrições da IEC 60.2 e 60.3, devendo comportar os seguintes ensaios:
- **Ensaio de efeito da proximidade**
 - As variações no fator de escala ou em parâmetros característicos de um sistema de medição, devido a proximidade com paredes, outros objetos e a terra, podem ser determinadas por diferentes medições destas características, variando-se as distâncias.
 - Para cada gama de distâncias deve-se mostrar que o fator de escala não varie mais que 1%.

REQUERIMENTOS PARA SISTEMAS DE MEDIÇÃO

- **Sistema de medição aprovado** – É um sistema de medição que atende as prescrições da IEC 60.2 e 60.3, devendo comportar os seguintes ensaios:
- **Ensaio de comportamento dinâmico**
 - A resposta dinâmica de um sistema de medição deve ser realizada levando-se em conta as características de utilização, especialmente as distâncias a outros objetos, paredes e terra.
 - Deve-se medir, seja a resposta em frequência seja a resposta ao degrau.

REQUERIMENTOS PARA SISTEMAS DE MEDIÇÃO

- **Sistema de medição aprovado** – É um sistema de medição que atende as prescrições da IEC 60.2 e 60.3, devendo comportar os seguintes ensaios:
- **Ensaio de comportamento dinâmico**
 - Determinação da resposta em frequência – O sistema é excitado com uma tensão senoidal de amplitude conhecida e é medida a grandeza de saída. Esta medida é repetida para uma gama apropriada de frequência, podendo-se então traçar um gráfico da relação $V_{\text{Entrada}} / V_{\text{Saída}} \times \text{Frequência}$.
 - Desta forma têm – se o comportamento do sistema de medição em diversas frequências.
 - O sistema deve ser estável em até 10 x a frequência nominal

REQUERIMENTOS PARA SISTEMAS DE MEDIÇÃO

- **Sistema de medição aprovado** – É um sistema de medição que atende as prescrições da IEC 60.2 e 60.3, devendo comportar os seguintes ensaios:
- **Ensaio de comportamento dinâmico**
 - Determinação da resposta ao degrau - Para sistemas de impulso de tensão ou corrente. Aplica-se um degrau unitário no lado de alta do divisor, se este tiver associado atenuadores, estes devem fazer parte do circuito de ensaio / calibração. A saída é medida e o critério medindo – se T_{α}

REQUERIMENTOS PARA SISTEMAS DE MEDIÇÃO

- **Sistema de medição aprovado** – É um sistema de medição que atende as prescrições da IEC 60.2 e 60.3, devendo comportar os seguintes ensaios:
- **Ensaio de comportamento dinâmico**

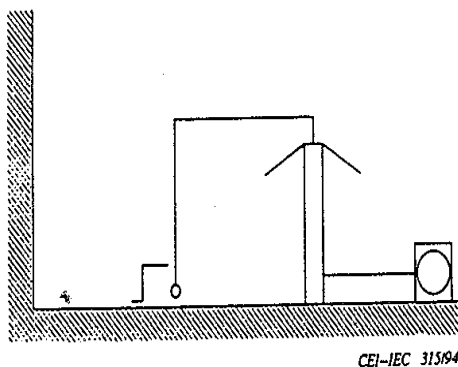


Figure C.1b

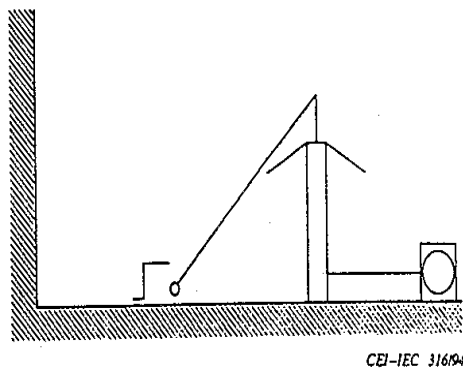


Figure C.1c

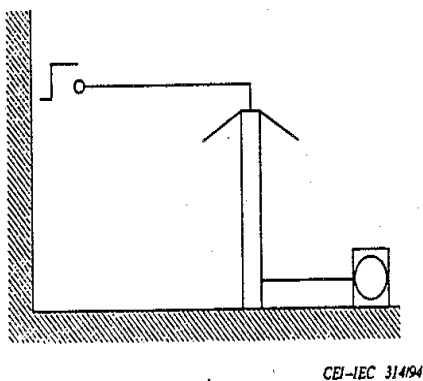


Figure C.1a

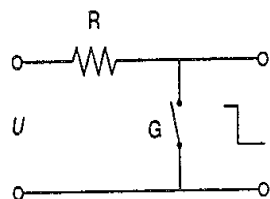
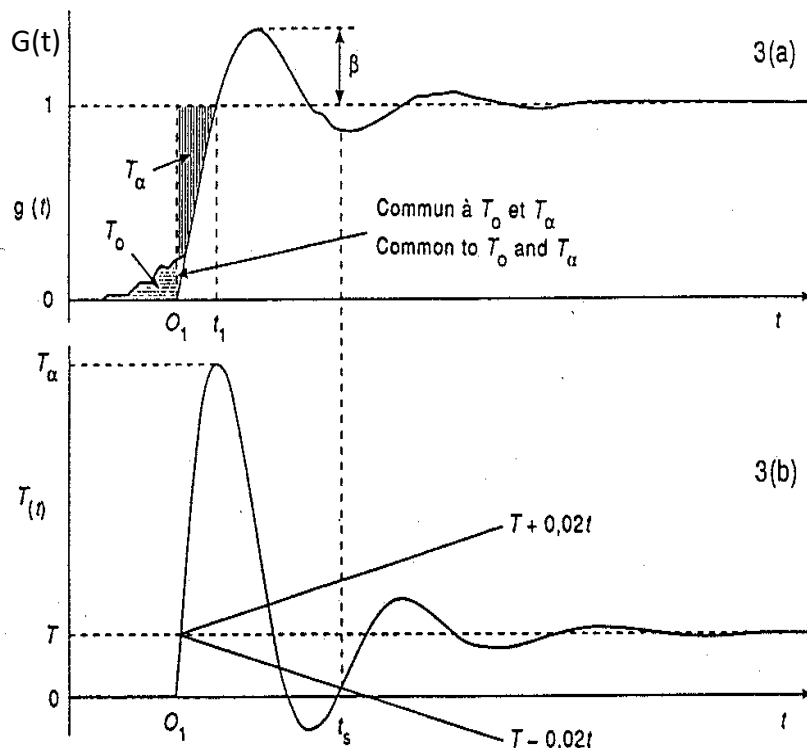


Figure C.1d

Possíveis arranjos de ensaio

REQUERIMENTOS PARA SISTEMAS DE MEDIÇÃO

- **Sistema de medição aprovado** – É um sistema de medição que atende as prescrições da IEC 60.2 e 60.3, devendo comportar os seguintes ensaios:
- **Ensaio de comportamento dinâmico**



$T\alpha$ = É o máximo valor da integral da resposta ao degrau Para onda plena
 $T\alpha < 30 \text{ ns}$
 Para onda cortada $T\alpha < 15 \text{ ns}$
 Para IEC 1211 $T\alpha < 3.0 \text{ ns}$

$$T\alpha = \int_0^{T\alpha} G(t) dt$$

REQUERIMENTOS PARA SISTEMAS DE MEDIÇÃO

- **Sistema de medição aprovado** – É um sistema de medição que atende as prescrições da IEC 60.2 e 60.3, devendo comportar os seguintes ensaios:
- **Ensaio de tensão ou corrente mantida**
 - Um equipamento de medição deve suportar a seco uma tensão ou corrente com forma de onda e frequência especificada de 110% da sua tensão ou corrente garantida. Quando estipulado ensaios sob chuva e sob poluição serão realizados com ensaios de tipo. O fator de escala não deve ser alterado neste ensaio.

REQUERIMENTOS PARA SISTEMAS DE MEDIÇÃO

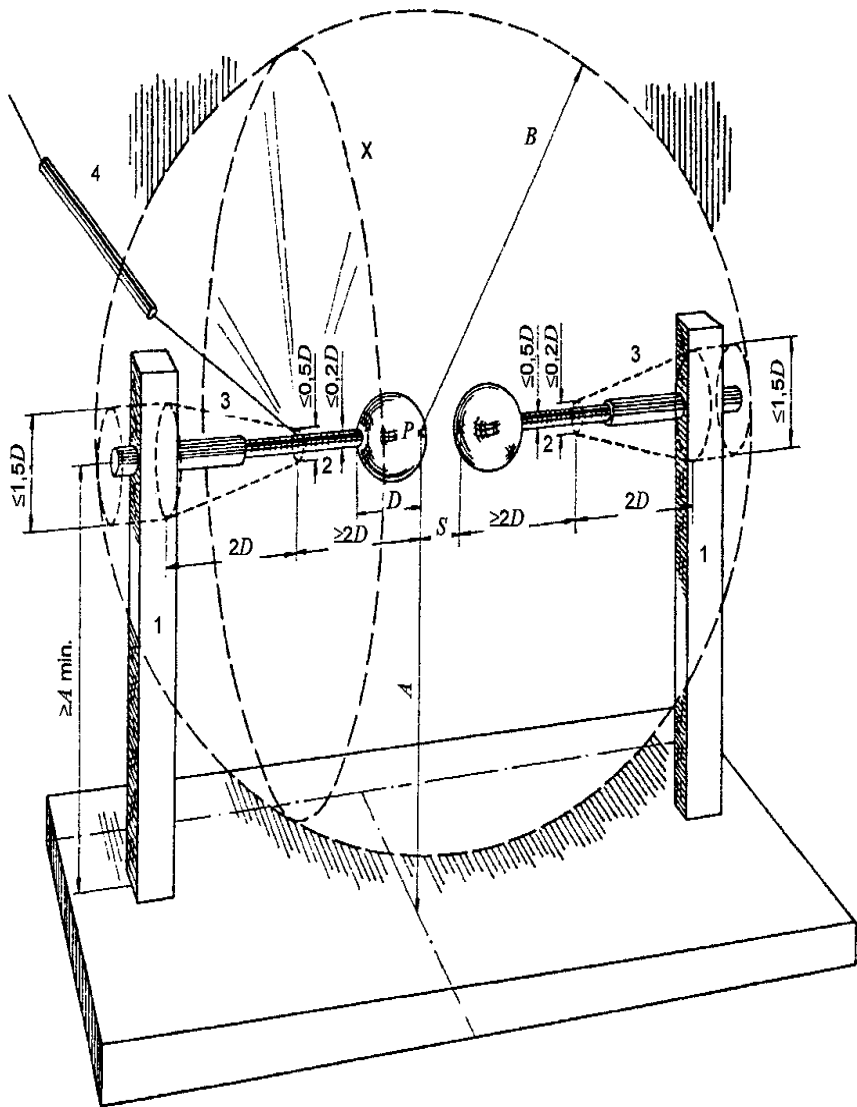
- **Calibração de um sistema de medição não aprovado através de um sistema de medição aprovado IEC 50052**
 - O espinterômetro como método de medida de tensão de crista deste a 75 anos.
 - As tabelas I e II da IEC 50052 são aceitas como consenso internacional.
 - O desvio obtido com estas tabelas não ultrapassam 3%.
 - Tipo de tensões passíveis de medir com o espinterômetro:
 - Tensão de impulso atmosférico
 - Tensão de impulso de manobra
 - Tensão alternada em F.I.
 - Tensão contínua

REQUERIMENTOS PARA SISTEMAS DE MEDIÇÃO

- **Calibração de um sistema de medição não aprovado através de um sistema de medição aprovado IEC 50052**
 - O espinterômetro e assim usado para calibração de um voltímetro ou osciloscópio conectado no lado de baixa do transformador. Este deve ser ligado em paralelo com o circuito de ensaio.
 - **Para cada espaçamento das esferas tem-se um valor de tensão de crista disruptiva tabelada, desta forma, é possível determinar-se o fator de escala para dado circuito de ensaio.**
 - Após definir-se o fator de escala para determinado circuito e durante o ensaio do equipamento que se deseja testar, o espinterômetro deve permanecer no circuito, sendo que as esferas do mesmo devem ser abertas em torno de mais 10% do valor relativo ao valor de tensão disruptiva especificado.

REQUERIMENTOS PARA SISTEMAS DE MEDIÇÃO

Espinterômetro horizontal



Key

- 1 Insulating support
- 2 Sphere shank
- 3 Operating gear, showing maximum dimensions
- 4 High-voltage connection with series resistor

P Sparking point of high-voltage sphere

A Height of *P* above earth plane

B Radius of space free from external structures

X Item 4 not to pass through this plane within a distance *B* from *P*

NOTE The figure is drawn to scale for a 25 cm sphere-gap at radius spacing.