

IT 002- SOBRETENSÕES EM SISTEMAS ELÉTRICOS DE POTÊNCIA

PARTE 1

José Pissolato Filho
Outubro 2022

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 dielétrico;*
- *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.

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:

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

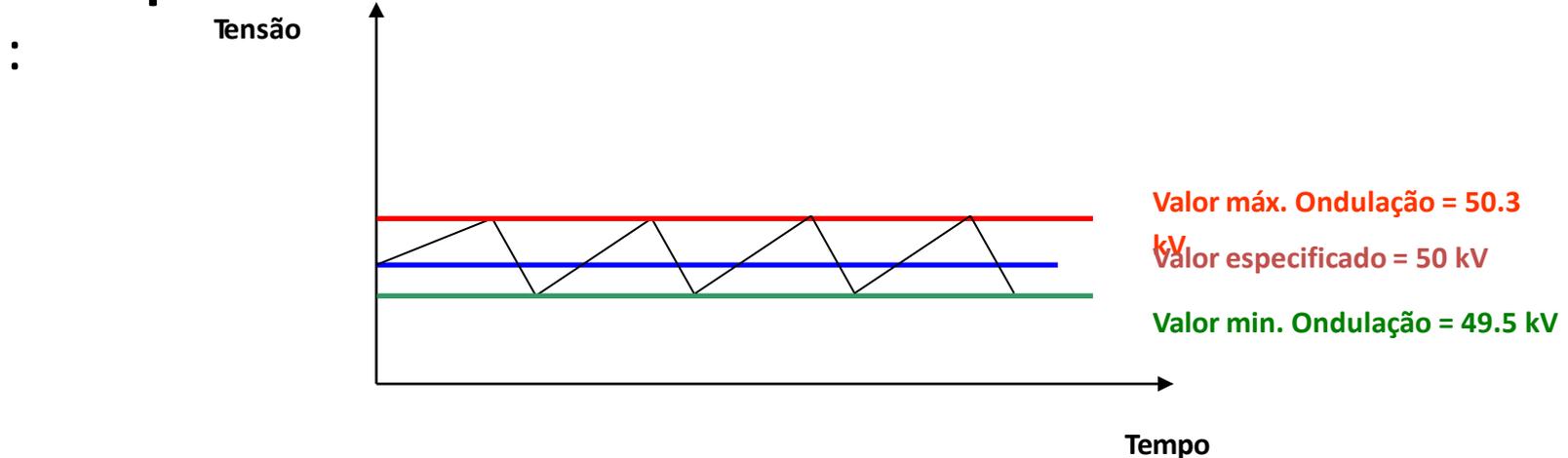
- Fator de ondulação – Definido conforme abaixo:

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

- 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% .

CARACTERÍSTICAS 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

CARACTERÍSTICAS 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 – $V_{rms} = V_{crista} / \sqrt{2}$

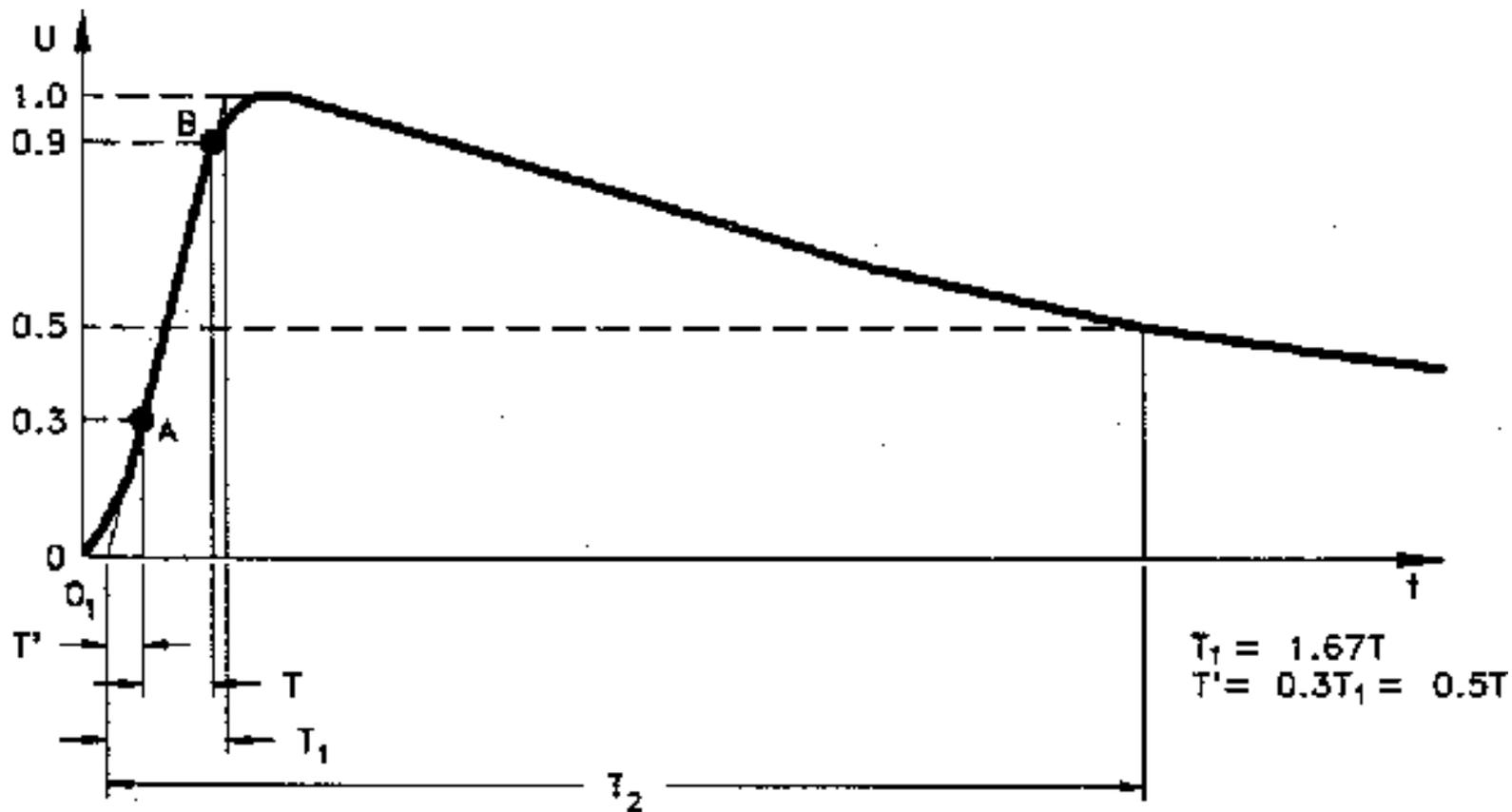
- Forma de onda: Deve ser uma tensão alternada com freqüência entre 45 e 65 Hz. A forma de onda deve ser senoidal com os dois ciclos idênticos. Um desvio ligeiro da forma de onda senoidal deve ser aceito, se a relação entre a o valor de crista e o valor eficaz medidos for de no máximo 5%. Para certos 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



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.

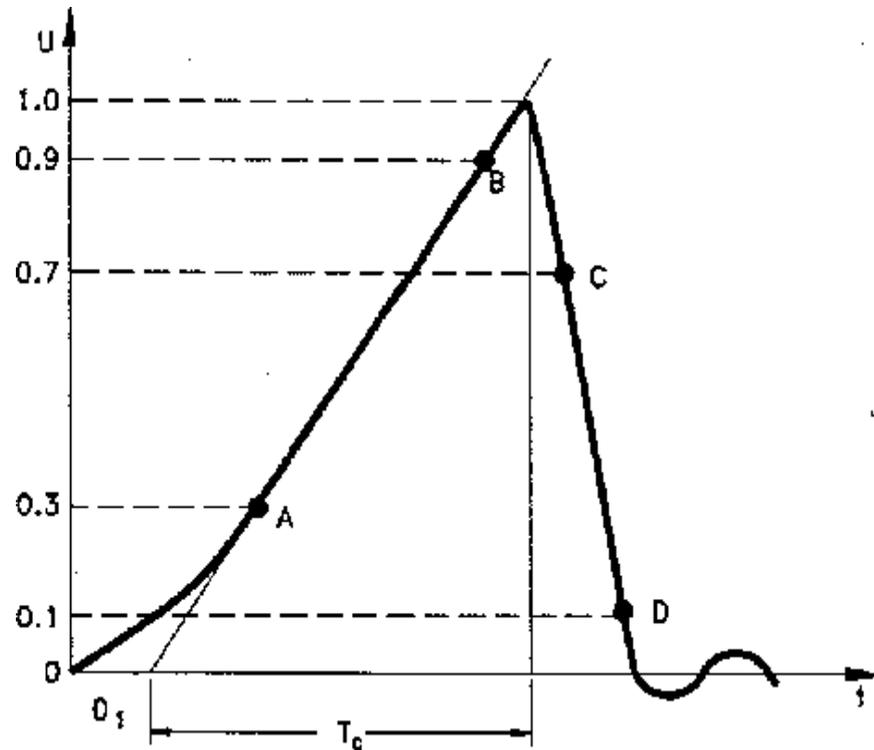
TENSÕES DISRUPTIVAS

Definições para Onda de Tensão de Impulso Atmosférico Cortada

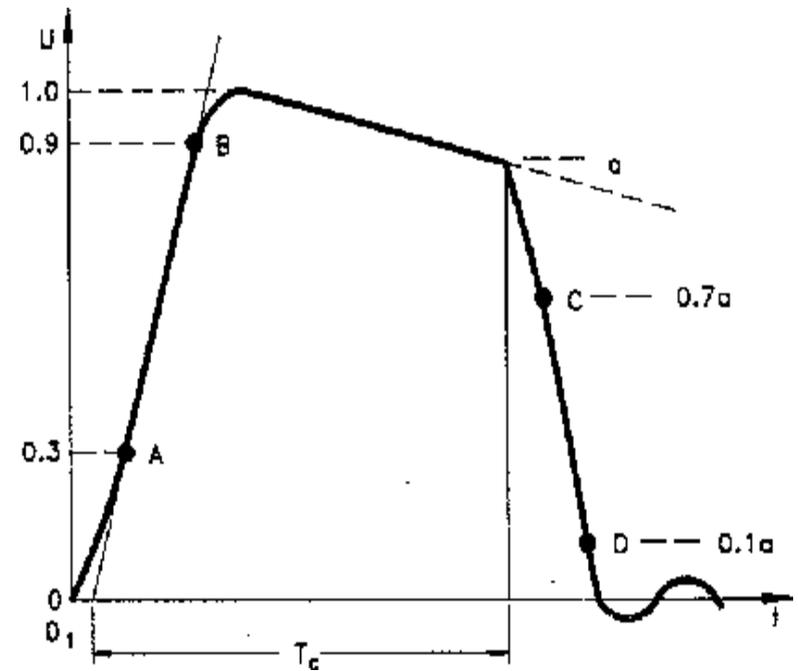
- Características relativas a queda de tensão durante a ruptura – As características convencionais da queda de tensão durante o corte são definidas pelos pontos C = 70% da tensão no instante da ruptura e D = 30% da tensão no instante da ruptura. A duração da queda de tensão é igual a $1,67$ x o intervalo 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

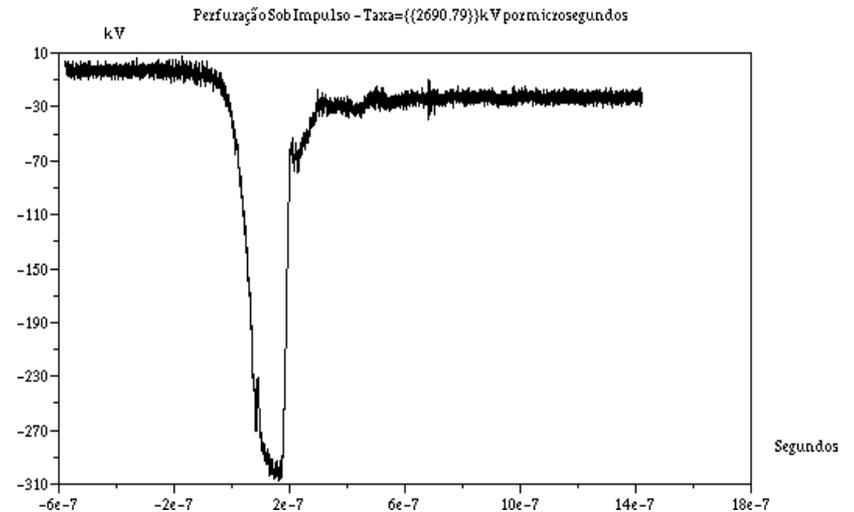
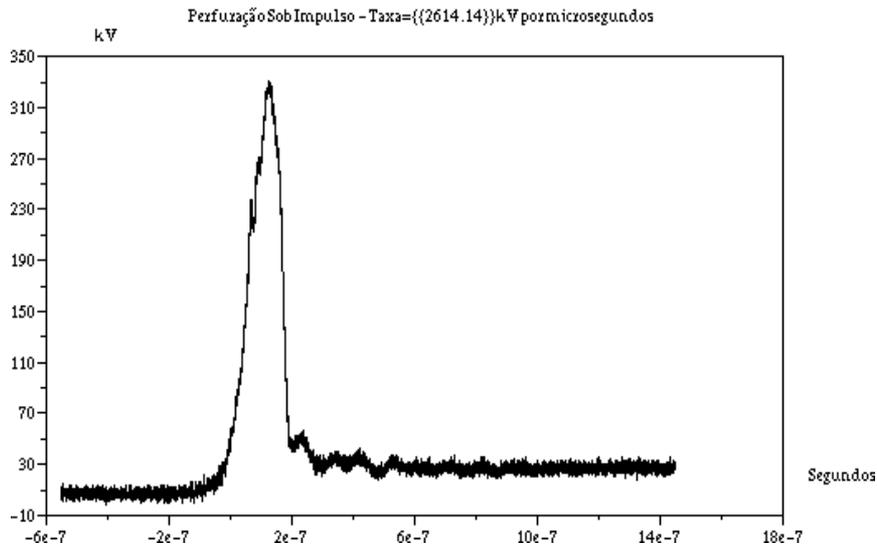


- Impulso cortado na cauda



TENSÕES DISRUPTIVAS

Exemplos de ondas cortadas na frente



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 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

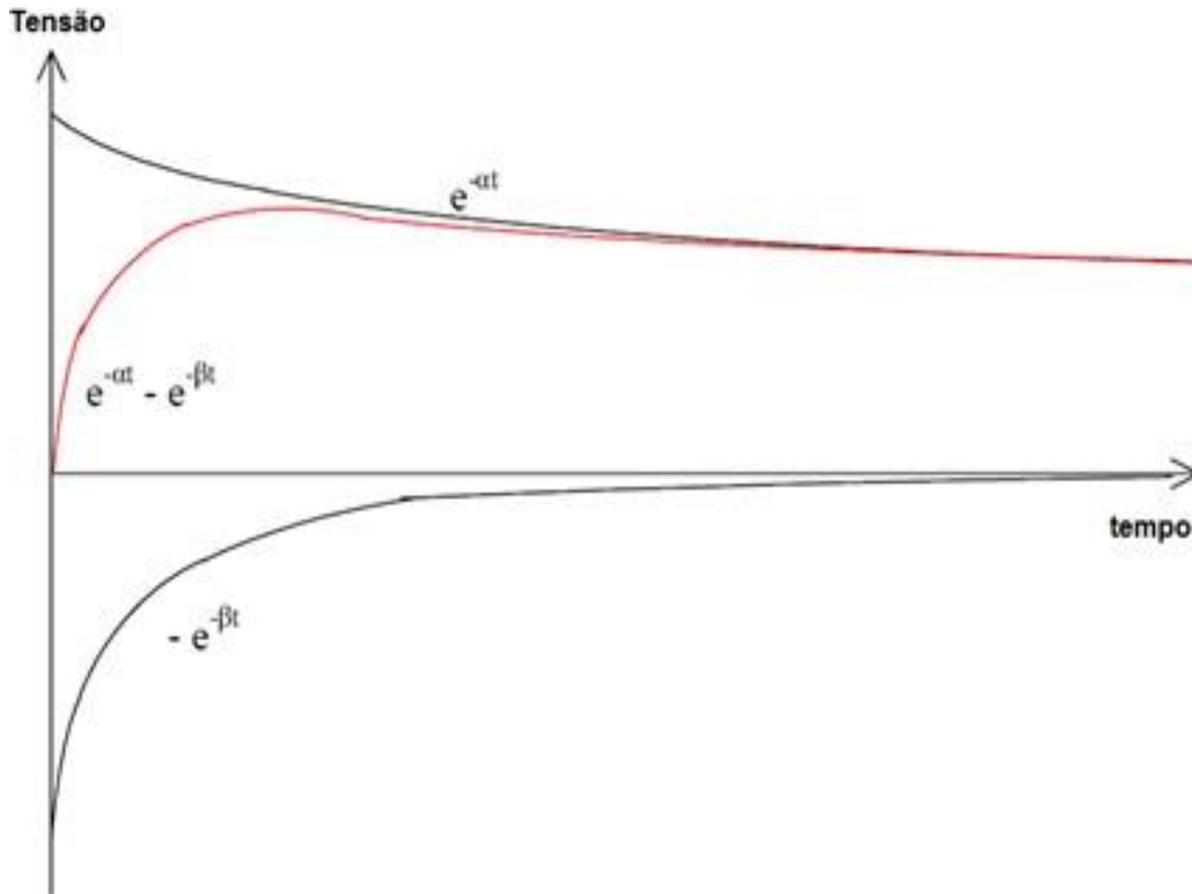
- **Medida da tensão de ensaio em F.I.**
- Ensaio sob chuva, é possível controlar quando aplicável:
 - Tempo de subida e de aplicação da tensão, no caso de tensões disruptivas controla – se também o tempo até a disrupção, normalmente a partir de 75% do valor garantido, até a disrupção. O comitê normativo 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 E DE CORRENTES DE IMPULSO

Gerador de impulsos de tensão

Princípio básico de funcionamento

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



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

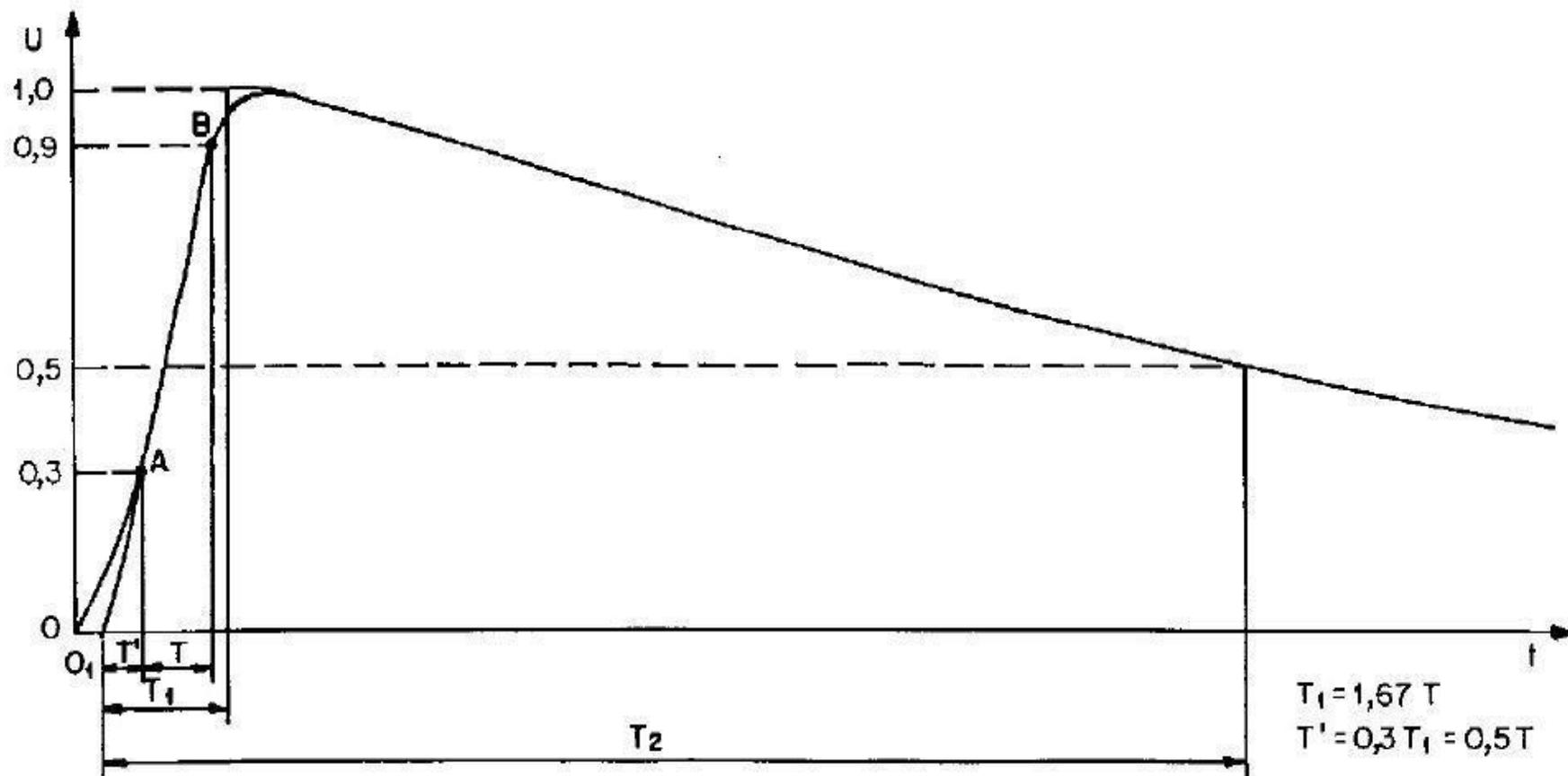
$$\alpha = \frac{1}{T_2}$$

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.



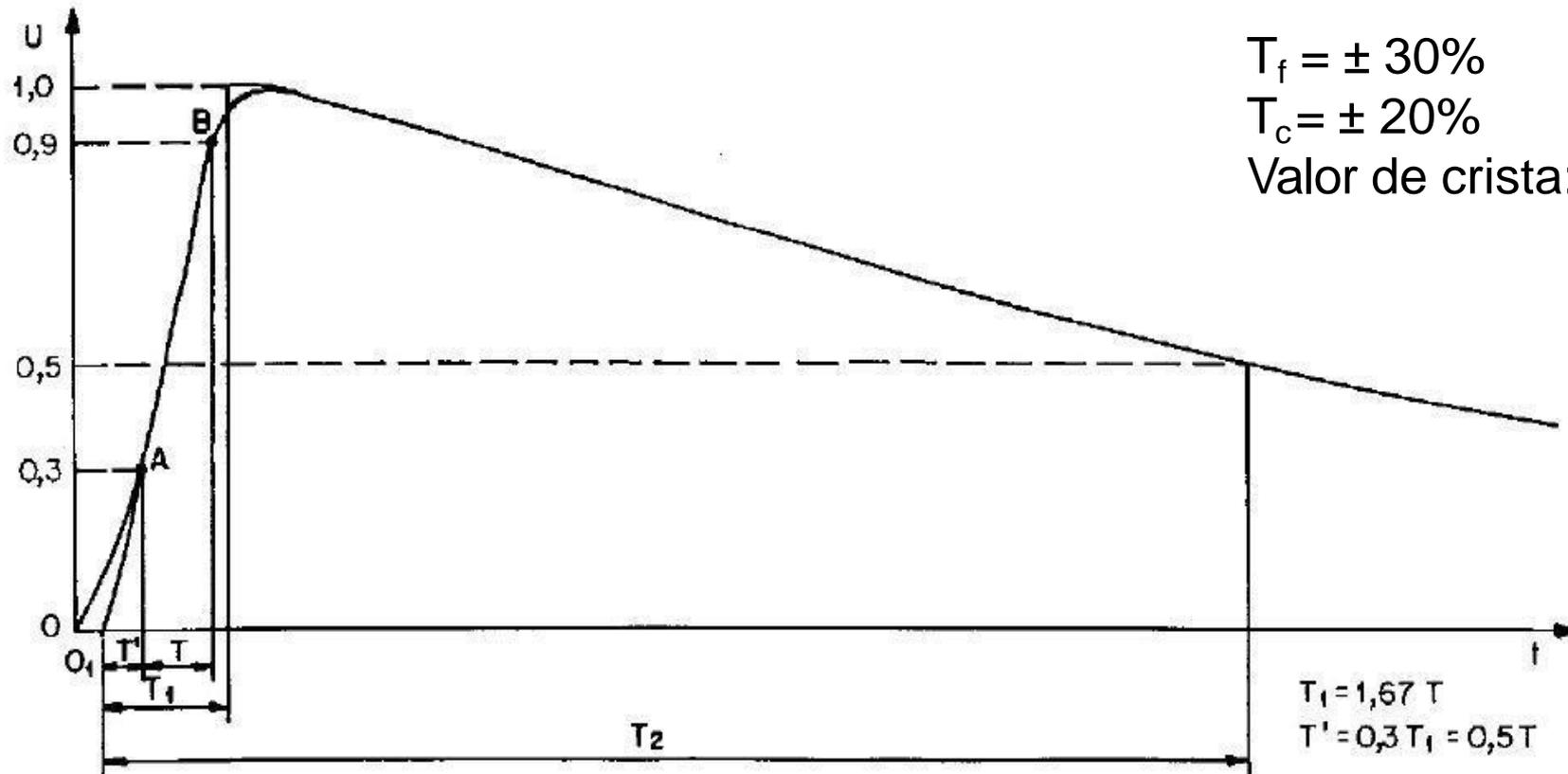
ENSAIOS DE TENSÃO E DE CORRENTES DE IMPULSO

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:



$$T_f = \pm 30\%$$

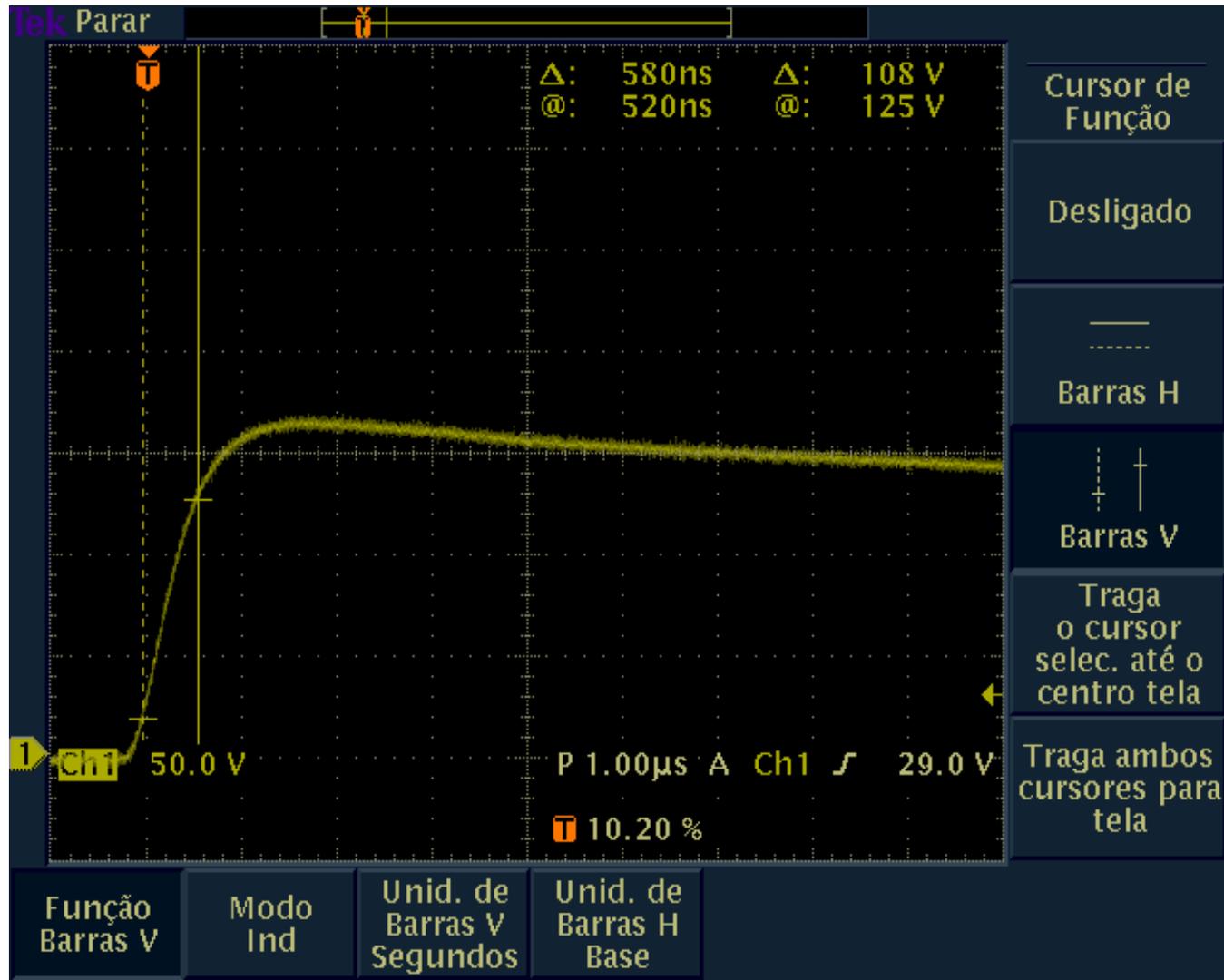
$$T_c = \pm 20\%$$

Valor de crista: $\pm 3\%$

ENSAIOS DE TENSÃO E DE CORRENTES DE IMPULSO

Gerador de impulsos de tensão

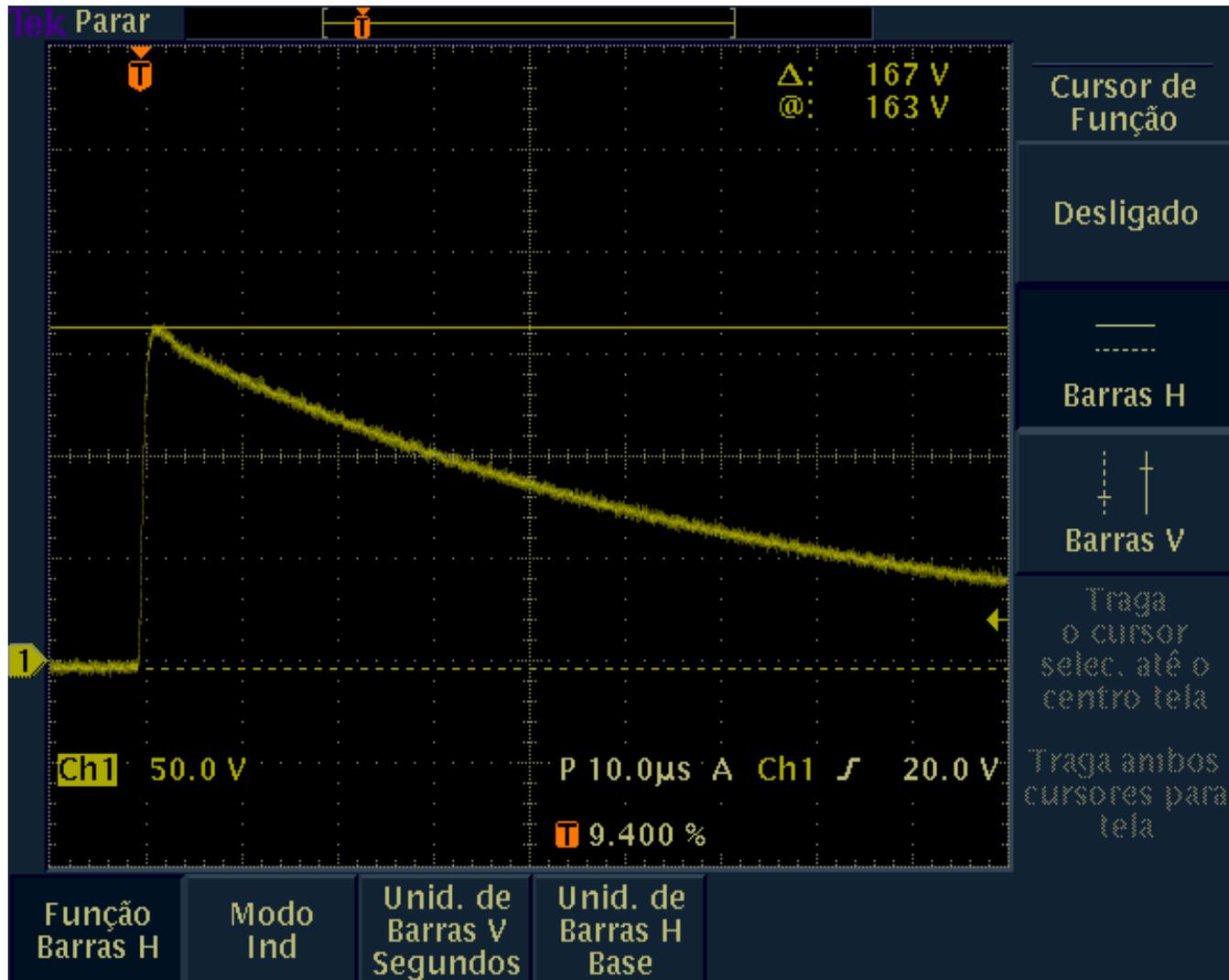
Forma de impulso normalizada



ENSAIOS DE TENSÃO E DE CORRENTES DE IMPULSO

Gerador de impulsos de tensão

Forma de impulso normalizada



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:**

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

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