

IX Ensaios em pára-raios

Os pára-raios ao serem instalados nos sistemas elétricos, estarão submetidos durante a sua vida útil a condições climáticas e a fenômenos transitórios adversos ao seu princípio de funcionamento, quando em condição de regime permanente.

Os ensaios realizados nos pára-raios têm por objetivo principal simular em laboratório os fenômenos que possam vir a ocorrer nos sistemas, bem como verificar se o projeto do pára-raios satisfaz às condições mínimas exigidas de modo a garantir uma proteção adequada aos equipamentos e sistemas, dentro dos limites da classe dos pára-raios.

IX.1 Classificação dos ensaios

De acordo com as normas técnicas, ensaios em pára-raios são classificados em ensaios de tipo, ensaios de rotina e ensaios de recebimento.

IX.1.1 Ensaios de tipo:

Consiste em um 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.

IX.1.2 Ensaios 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.

IX.1.3 Ensaios 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 garantidos pelo fabricante.

IX.2 Normas técnicas aplicáveis a ensaios em pára-raios

Os ensaios de tipo, rotina e recebimento em pára-raios com e sem centelhadores, são prescritos pelas normas técnicas. Entre as diversas normas existentes, as mais utilizadas no Brasil são:

- **Para pára-raios com centelhadores:**

- IEC 99-1/1991 Surge Arresters - Part 1: "Non-linear resistor type gapped surge arresters for a.c. systems".
- ANSI C62.1/1984 "IEEE Standard for surge arresters for AC power circuits".
- NBR 5287/88 "Pára-raios de resistor não-linear a Carboneto de Silício (SiC) para circuitos de potência de corrente alternada" - Especificação.
- NBR 5309/91 "Pára-raios de resistor não-linear a Carboneto de Silício (SiC) para circuitos de potência de corrente alternada" - Método de ensaio.

- **Para pára-raios sem centelhadores:**

- IEC 60099-4/2001 Surge Arresters - Part 4: "Metal-Oxide surge arresters without gaps for a.c. systems".
- ANSI C62.11/1999 "IEEE Standard for Metal-Oxide surge arresters for AC power circuits".

Existem ainda os projetos de norma, aplicados a pára-raios de ZnO com e sem centelhadores. Os projetos de norma referentes a pára-raios sem centelhadores estão em fase de revisão pela CE-37:7.

- Projeto 3:037.07-001 "Pára-raios de resistor não-linear a óxidos metálicos sem centelhadores, para circuitos de potência de corrente alternada" - Especificação.
- Projeto 3:037.07-002 "Pára-raios de resistor não-linear a óxidos metálicos sem centelhadores, para circuitos de potência de corrente alternada" - Método de ensaio.
- Projeto 3:037.11-001 - "Pára-raios de resistor não-linear a óxido metálico, com centelhadores série, para circuitos de potência de corrente alternada" - Especificação.
- Projeto 3:037.11-002 - Março/91 "Pára-raios de resistor não-linear a óxido metálico, com centelhadores série, para circuitos de potência de corrente alternada" - Método de ensaio.

Em geral, as normas aplicadas a um determinado tipo de pára-raios prescrevem basicamente os mesmos tipos de ensaios, diferindo, em alguns casos, no procedimento para a realização dos ensaios.

Além das normas técnicas e projetos de normas, existem as Especificações Técnicas próprias de algumas empresas concessionárias, como por exemplo A E.T. 02.111 DT/ED 0420f da CEMIG – “Pára-raios com Resistor não-linear de Óxido Metálico para Sistemas de Distribuição”. Estas E.T.’s tendem a incluir ensaios e características que representem comportamentos no campo inerentes ao sistema considerado.

A seguir será apresentada a listagem de ensaios realizados em pára-raios com e sem centelhadores, segundo as normas IEC e NBR e projetos de norma da NBR:

IX.2.1 Ensaios aplicados a pára-raios com centelhadores

- **Ensaios de tipo:**

1. Ensaios de tensão disruptiva de frequência fundamental seco e chuva (1,2);
2. Ensaios de tensão disruptiva de impulso atmosférico:
 - Ensaio de tensão disruptiva de impulso atmosférico normalizado (1,2);
 - Ensaio de tensão disruptiva de impulso atmosférico com alta probabilidade de ruptura (1,2) (A);
 - Ensaio de tensão disruptiva na frente do impulso (1,2);
 - Levantamento da curva "Tensão disruptiva de impulso atmosférico x tempo" (1,2);
3. Ensaios de tensão disruptiva de impulso de manobra a seco e sob chuva, quando aplicáveis (1);
4. Ensaio de tensão residual:
 - Ensaio de tensão residual para impulso atmosférico (1,2);
 - Ensaio de tensão residual para impulso de manobra (1);
5. Ensaios de corrente suportável de impulso:
 - Ensaio de corrente de impulso elevada (1,2);
 - Ensaio de corrente de impulso retangular de longa duração, para pára-raios 5 kA e 10 kA serviço leve (1,2);
 - Ensaio de descarga de linhas de transmissão, aplicável a pára-raios 10 kA serviço pesado e pára-raios de 15 kA e 20 kA (1);
6. Ensaio de ciclo de operação a corrente de descarga nominal (1,2);
7. Ensaios de alívio de sobrepressão interno, quando aplicável;
 - Ensaios de alívio de sobrepressão com corrente elevada;
 - Ensaios de alívio de sobrepressão com corrente reduzida;
8. Ensaios de tensão de radiointerferência e de ionização interna (1,2) (A,B);
9. Ensaios de tensão suportável no invólucro sem a parte interna ativa (1,2) (A);
10. Ensaios do desligador automático, quando aplicável (1,2);
11. Ensaio de poluição artificial (1);
12. Ensaio de estanqueidade (1,2) (A);
13. Ensaio de corrente de fuga, quando aplicável (1,2) (A) (B)

- **Ensaaios de rotina:**

1. Ensaio de tensão disruptiva de frequência fundamental a seco (1,2);
2. Ensaio de corrente de fuga, quando aplicável, na tensão fase-terra do sistema (1,2);
3. Ensaio de estanqueidade (1,2);
4. Ensaio de estanqueidade (2) (A)
5. Ensaio de rotina nos resistores não-lineares (2)

- **Ensaaios de recebimento:**

1. Verificação visual e dimensional (1,2); (A)
2. Ensaio de tensão disruptiva de frequência fundamental a seco (1,2);
3. Ensaio de tensão disruptiva de impulso atmosférico, sob forma de onda normalizada (1,2);
4. Ensaio de tensão residual (1,2)
5. Ensaio de medição da corrente de fuga, quando aplicável (1,2);
6. Ensaio de estanqueidade (1,2);
7. Zincagem (1,2) (A)

(1) - ensaios aplicados a pára-raios de SiC.

(2) - ensaios aplicados a pára-raios de ZnO com centelhadores.

(A) - ensaios para pára-raios de SiC prescritos somente pelas normas NBR.

(B) - ensaios para pára-raios de ZnO com centelhadores, prescritos somente pelo projeto de norma da NBR.

IX.2.2 Ensaaios aplicados a pára-raios sem centelhadores

- **Ensaaios de tipo:**

1. Ensaaios de tensão suportável no invólucro sem a parte interna ativa;
2. Ensaio de tensão residual
 - Ensaio de tensão residual para impulso de corrente íngreme;
 - Ensaio de tensão residual para impulso atmosférico;
 - Ensaio de tensão residual 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, para os pára-raios 10 kA classes 1 a 3 e 20 kA classes 4 e 5.;
4. Ensaio de ciclo de operação;
 - Ensaio de ciclo de operação para impulso de corrente elevada;
 - Ensaio de ciclo de operação sob impulso de manobra;
5. Levantamento da característica "tensão de frequência fundamental x tempo";
6. Ensaios de alívio de sobrepressão interno, quando aplicável, em pára-raios com invólucro de porcelana ou em pára-raios com invólucro polimérico cujo projeto apresente espaçamentos internos de ar;

7. Ensaios de corrente de falta, quando aplicável, em pára-raios com invólucro polimérico que não apresentem dispositivos de alívio de sobrepressão;
8. Ensaios de tensão de radiointerferência e de ionização interna (1,2) (A);
9. Ensaios do desligador automático, quando aplicável;
10. Ensaio de poluição artificial (A) (B);
11. Ensaio de estanqueidade;
12. Ensaio de medição das descargas parciais (C);
13. Ensaio de distribuição de corrente, em pára-raios com mais de uma coluna;

- **Ensaios 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 (C);
4. Ensaio de distribuição de corrente, em pára-raios com mais de uma coluna (C);
5. Ensaio de estanqueidade

- **Ensaios 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 (C);
4. Medição da componente resistiva da corrente de fuga a MCOV (D)
5. Zincagem (D)

- **Ensaios especiais:**

1. Ensaio de estabilidade térmica;
 2. Ensaios de descargas múltiplas
- (A) - ensaios prescritos somente pela norma ANSI.
 (B) - ensaio sob consideração na IEC.
 (C) - ensaio prescrito somente pela norma IEC.
 (D) - ensaio prescrito em algumas Especificações Técnicas de concessionárias.

IX.3 Verificação das características de proteção e de operação

Os ensaios de tipo aplicáveis aos pára-raios com e sem centelhadores podem ser divididos em ensaios de verificação das características de proteção e de verificação das características de operação.

IX.3.1 Ensaios de verificação das características de proteção:

Estes ensaios têm por objetivo estabelecer as características de proteção dos pára-raios, cobrindo os ensaios de tensões disruptivas de frequência fundamental e de impulso (no caso de pára-raios com centelhadores), e as tensões provenientes de impulsos de corrente.

Uma vez que a relação entre essas características e o nível de isolamento dos equipamentos a serem protegidos indica o grau de proteção oferecido pelo pára-raios, esses ensaios tornam-se extremamente importantes para que sejam estabelecidos os critérios gerais de proteção.

A seguir, serão apresentadas, de forma sintetizada, a filosofia e os objetivos de cada um destes ensaios, com ênfase para o ensaio de tensão residual. Os procedimentos dos ensaios são descritos nas normas aplicáveis.

- **Ensaios de tensão disruptiva**

Conforme descrito anteriormente, 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 disrupção do mesmo. Os ensaios de tensão disruptiva são aplicados somente a pára-raios constituídos por centelhadores série (SiC e ZnO com centelhadores), estando relacionados com a frequência fundamental, impulso atmosférico e impulso de manobra.

- **Ensaio de tensão disruptiva de frequência fundamental:**

Este ensaio, realizado a seco e sob chuva, tem por objetivo verificar se o pára-raios quando em serviço, sob sua tensão nominal, não apresentará disrupção devido as flutuações de tensão da rede bem como as sobretensões sustentadas.

Em pára-raios de classe distribuição e pára-raios de 10 kA serviço leve, o menor valor de tensão disruptiva de frequência fundamental não deverá ser inferior a 1,5 vezes a tensão nominal dos pára-raios. Em pára-raios de 10 kA serviço pesado e acima de 10 kA, não existe um valor mínimo padronizado para a tensão disruptiva de frequência fundamental, sendo utilizado geralmente, por acordo entre fabricante e comprador, valores acima de 1,3 a 1,35 vezes a tensão nominal do pára-raios ensaiado.

Este ensaio também é realizado antes e após a alguns ensaios de tipo (ensaios de característica operativa), de modo a verificar, por comparação dos resultados, se houve alteração no comportamento dos centelhadores.

- **Ensaio de tensão disruptiva de impulso atmosférico:**

Este ensaio tem por objetivo verificar o comportamento dos centelhadores série dos pára-raios, quando os mesmos forem submetidos a impulsos atmosféricos, sendo dividido em três ensaios distintos (*):

Ensaio de tensão disruptiva de impulso atmosférico na frente do impulso:

Neste ensaio é verificado o comportamento dos centelhadores série, quanto a disrupção, para impulsos de tensão com tempos de frente inferiores a $1,2 \mu\text{s}$, simulando uma disrupção dos centelhadores provocada por descargas atmosféricas próximas ao pára-raios. Neste ensaio, os centelhadores, de acordo com a classificação e tensão nominal dos pára-raios, devem ser capazes de atuar para um determinado impulso de tensão com taxa de crescimento da tensão abaixo de valores limites, definidos em norma.

Ensaio de tensão disruptiva de impulso atmosférico normalizado:

Este ensaio tem por objetivo verificar se ocorre a disrupção dos centelhadores série de um pára-raios quando da ocorrência de um impulso de tensão com forma normalizada ($1,2/50\mu\text{s}$) e amplitude definida em norma. O valor de crista da tensão de impulso, obtido deste ensaio, é definido por tensão disruptiva de impulso atmosférico normalizado do pára-raios.

Ensaio de determinação da característica "tensão disruptiva de impulso atmosférico x tempo":

Esta curva é levantada com a finalidade de determinar os valores máximos de impulsos de tensão com diversas inclinações e o tempo de disrupção, para os quais os pára-raios cortarão a estes impulsos.

Esta curva é utilizada para a determinação das características de proteção dos pára-raios constituídos por centelhadores série.

- (*) A norma NBR 5287, presecrve o ensaio de tensão disruptiva de impulso atmosférico com alta probabilidade de disrupção.

- **Ensaio de determinação da característica "tensão disruptiva de impulso de manobra x tempo":**

Este ensaio, aplicado somente a pára-raios com correntes de descarga nominal de 10 kA e acima, para tensões nominais acima de 100 kV, tem por finalidade demonstrar o comportamento dos centelhadores série quando o pára-raios for submetido a sobretensões de manobra que ocorrem na faixa de 30 a $1000 \mu\text{s}$. Esta curva, em complemento a curva obtida para sobretensões

atmosféricas, é utilizada para a determinação das características de proteção dos pára-raios classe estação, constituídos por centelhadores série.

- **Ensaio de tensão residual**

Este ensaio quando realizado como ensaio de tipo, tem por objetivo determinar a queda de tensão produzida nos elementos não-lineares que constituem o pára-raios, quando da passagem de correntes de descarga com forma de onda e amplitude especificadas. O ensaio de tipo de tensão residual é realizado em três amostras de pára-raios completos ou seções destes, com tensão nominal compreendida entre 3 a 12 kV.

Quando realizado na seção do pára-raios, a tensão residual do pára-raios completo é geralmente definida como o resultado do produto do valor medido sobre a amostra ensaiada pela relação entre a tensão nominal do pára-raios completo e a tensão nominal da seção. A metodologia acima é válida no caso da montagem dos pára-raios com elementos de mesma tensão nominal.

Apesar de apresentar o mesmo objetivo, a filosofia deste ensaio difere um pouco de acordo com o tipo de pára-raios ensaiado:

Em pára-raios constituídos por centelhadores série, o nível de proteção para impulso atmosférico dos pára-raios é geralmente obtido dos ensaios de tensão disruptiva de impulso atmosférico normalizado ou na frente do impulso, enquanto que o nível de proteção para impulso de manobra, quando aplicável, é obtido a partir da determinação da curva "tensão disruptiva de impulso de manobra x tempo". Para estes tipos de pára-raios é realizado o ensaio de tensão residual para impulso atmosférico, cujo objetivo é levantar a característica "tensão residual x corrente de descarga" do pára-raios.

Já no caso dos pára-raios de ZnO sem centelhadores, este ensaio determina o **nível de proteção dos pára-raios para impulsos atmosférico e de manobra, quando aplicável**. Neste caso, este ensaio é dividido em três etapas, cada etapa representando uma determinada situação a que este tipo de pára-raios pode ser submetido nos sistemas: ensaio de tensão residual para impulso de corrente íngreme; tensão residual para impulso atmosférico; e tensão residual para impulso de manobra, quando aplicável.

- **Ensaio de tensão residual em pára-raios com centelhadores:**

A IEC 99-1/91 estabelece que cada uma das três amostras de ensaio devem ser submetidas a aplicação de impulsos de corrente com forma normalizada (8/20µs) e amplitudes correspondentes a meia, uma e duas vezes a corrente de descarga nominal do pára-raios ou seção do pára-raios ensaiado. Os valores máximos de tensão residual, obtidos para cada amplitude de corrente, são utilizados na plotagem da curva "tensão residual x corrente de descarga". A NBR 5287/88,

aplicada a pára-raios de SiC e o projeto de norma 3:037.11-002/90, aplicado a pára-raios de ZnO com centelhadores, estabelecem, além das amplitudes de corrente especificadas na IEC 99-1, uma quarta amplitude de corrente, correspondente a 0,25 vezes a corrente de descarga nominal do pára-raios.

- **Ensaio de tensão residual em pára-raios sem centelhadores:**

Conforme descrito anteriormente, este ensaio é dividido em três etapas:

- **Ensaio de tensão residual para impulso de corrente íngreme**

Este ensaio tem por finalidade verificar o comportamento dos pára-raios de ZnO sem centelhadores quando da ocorrência de uma descarga atmosférica bem próxima ao pára-raios. Neste ensaio, cada uma das três amostras ensaiadas devem ser submetidas a um impulso de corrente com tempo de frente de 1 μ s e tempo de meia onda inferior a 20 μ s e valor de crista igual a corrente de descarga nominal da amostra ensaiada. O maior valor de crista de tensão obtido do ensaio é definido como tensão residual para impulso de corrente íngreme.

- **Ensaio de tensão residual para impulso atmosférico**

Neste ensaio, cada uma das três amostras devem ser submetidas a aplicação de impulsos de corrente com forma normalizada (8/20 μ s) e amplitudes correspondentes a meia, uma e duas vezes a corrente de descarga nominal do pára-raios ou seção do pára-raios ensaiado. Os valores máximos de tensão residual, obtidos para cada amplitude de corrente, são utilizados na plotagem da curva "tensão residual x corrente de descarga", sendo o maior valor obtido para a corrente de descarga nominal, definido como tensão residual para impulso atmosférico do pára-raios. O projeto de norma 3:037.07-002, aplicado a pára-raios de ZnO sem centelhadores, estabelece, além das amplitudes de corrente especificadas na IEC 60099-4, uma quarta amplitude de corrente correspondente a 0,25 vezes a corrente de descarga nominal do pára-raios.

O maior valor de crista entre os valores de tensão residual para impulso de corrente íngreme dividido por 1,15 e tensão residual para impulso atmosférico, obtidos dos ensaio acima, é definido como o nível de proteção do pára-raios para impulso atmosférico.

Quando realizado como ensaio de recebimento, é verificada a tensão residual do pára-raios no ponto correspondente a corrente de descarga nominal, devendo o valor da tensão residual ser inferior ao máximo valor estabelecido em norma, para a classe de tensão e tipo de pára-raios considerado.

Este ensaio também é realizado antes e após a alguns ensaios de tipo, de modo a se verificar, por comparação dos resultados, se houve variação no comportamento dos elementos não-lineares durante estes ensaios.

- **Ensaio de tensão residual para impulso de manobra**

De acordo com a IEC 60099-4/98, este ensaio é aplicado a pára-raios com correntes de descarga nominal de 10 e 20 kA. Neste ensaio, cada uma das três amostras devem ser submetidas a impulsos de corrente com um tempo de frente compreendido entre 30 a 100 μ s e amplitudes definidas em norma, de acordo com a classe de descarga de linhas de transmissão do pára-raios. O maior valor de crista de tensão, para os valores de corrente definidos em norma, é definido como nível de proteção para impulso de manobra do pára-raios.

IX.3.2 Ensaios de verificação das características de operação

Os ensaios de tipo de verificação das características de operação tem por finalidade verificar em laboratório as características de operação de um dado projeto de pára-raios. Dentre os diversos ensaios incluídos nesta classificação, será abordado o ensaio de ciclo de operação, visto ser este ensaio o mais representativo para se avaliar o desempenho dos pára-raios.

• **Ensaio de ciclo de operação**

Este ensaio tem por objetivo representar em laboratório as condições de serviço aos quais os pára-raios são submetidos quando instalados nos sistemas elétricos. O procedimento para realização do ensaio de ciclo de operação difere de acordo com o tipo de pára-raios ensaiado:

- **Ensaio de ciclo de operação em pára-raios com centelhadores**

Este ensaio tem por finalidade principal verificar a capacidade das amostras de ensaio retornarem a sua condição de regime permanente, após a ocorrência de impulsos de corrente, seguidos da aplicação de tensão alternada de frequência fundamental, sem que haja variações significativas nos seus componentes internos. Este ensaio, prescrito nas normas IEC, ANSI e NBR, é realizado em três amostras de pára-raios completos ou seções representativas destes pára-raios, com tensões nominais compreendidas entre 3 a 12 kV.

Quando da realização do ensaio em seções do pára-raios considerado, cuidados especiais devem ser tomados com relação a montagem das seções. Uma seção é considerada representativa do pára-raios completo se apresentar características de interrupção de frequência fundamental e corrente subsequente similares ao pára-raios completo.

O procedimento deste ensaio, de acordo com as normas acima citadas, consiste na aplicação de vinte impulsos de corrente de forma 8/20 μ s e amplitude equivalente a corrente de descarga nominal sobre as amostras de ensaio, enquanto as mesmas se mantêm energizadas à tensão nominal.

Segundo procedimentos das normas IEC e NBR, mais utilizadas no Brasil, os vinte impulsos de corrente são divididos em quatro grupos de cinco impulsos, com intervalo entre grupos de 25 a 30 minutos, tempo considerado suficiente para as amostras de ensaio retornarem a temperatura ambiente. O intervalo entre as aplicações deve ser de 50 a 60 segundos. Todas as aplicações de impulso devem ocorrer na faixa de 30 a 90 graus elétricos após o zero da tensão de frequência fundamental, devendo a polaridade do impulso de corrente ser a mesma da tensão de frequência fundamental.

A norma ANSI C62.1/84, define o procedimento de ensaio baseado na aplicação, sobre cada amostra de ensaio, de vinte quatro aplicações consecutivas de impulso, com intervalo entre as aplicações de um minuto. Segundo este procedimento, os impulsos de corrente ocorrem na faixa de 0 a 360 graus elétricos da tensão de frequência fundamental, em intervalos de 15 graus elétricos, mantendo-se a mesma polaridade da corrente de descarga durante as vinte e quatro aplicações.

Para todas as normas utilizadas, as amostras de ensaio são consideradas aprovadas se forem capazes de interromper a corrente subsequente que flui através do pára-raios posteriormente à passagem da corrente de descarga, bem como não apresentar variações significativas nos ensaios de tensão disruptiva de frequência fundamental e tensão residual, realizados antes e após ao ensaio de ciclo de operação e alterações nos seus componentes internos.

- Ensaio de ciclo de operação em pára-raios sem centelhadores

No caso dos pára-raios sem centelhadores, o objetivo principal deste ensaio é verificar a capacidade das amostras ensaiadas de manterem a estabilidade térmica após a aplicação de um determinado tipo de impulso, seguido da aplicação de tensão alternada de frequência fundamental. Este ensaio é realizado em três amostras de pára-raios completos ou seções representativas destes pára-raios, com tensões nominais compreendidas entre 3 a 12 kV. Para este tipo de pára-raios, uma seção é considerada representativa de um determinado pára-raios, se apresentar as mesmas características elétricas e térmicas do pára-raios completo.

Pelo fato da grande maioria dos pára-raios atualmente adquiridos pelas empresas concessionárias de energia elétrica ser do tipo ZnO sem centelhadores, este ensaio se torna bastante importante, não só como ensaio de tipo, mas também como ensaio de homologação do projeto considerado pelas empresas concessionárias. Algumas empresas concessionárias de energia requerem a realização do ensaio de ciclo de operação, para fins de homologação do projeto.

O ensaio de ciclo de operação pode ser dividido em três etapas:

- Ensaio de envelhecimento acelerado dos elementos de ZnO;
 - Ensaio de verificação da equivalência térmica entre o pára-raios completo e a seção do pára-raios ensaiado, caso o ensaio seja realizado em uma seção;
 - Ensaio de ciclo de operação propriamente dito.
- **Ensaio de envelhecimento acelerado dos elementos de ZnO**

A primeira etapa do ensaio de ciclo de operação em um pára-raios de ZnO sem centelhadores, consiste no ensaio de envelhecimento acelerado dos elementos de ZnO usados na montagem dos pára-raios. Este ensaio, cuja finalidade é determinar os valores corrigidos de tensão nominal e da máxima tensão contínua de operação do pára-raios a serem aplicados aos pára-raios ou seções destes durante o ensaio de ciclo de operação, consiste no em verificar as características de envelhecimento dos elementos de ZnO por um período de tempo de 1000 horas, a uma temperatura de 115°C.

Durante o ensaio os elementos de ZnO ou pára-raios de ZnO devem ser submetidos a um valor de tensão de ensaio correspondente a máxima tensão contínua de operação dos mesmos corrigida em função do comprimento do pára-raios a ser ensaiado, ou do maior pára-raios que atenda ao projeto considerado.

A tensão de ensaio é definida por:

$$U_{ens} = U_{MCOV} \cdot (1 + 0,05.L)$$

U_{ens} Valor eficaz de tensão de ensaio a ser aplicada continuamente sobre as amostras de ensaio durante o período de tempo de 1000 horas.

U_{MCOV} Máxima tensão contínua de operação do pára-raios.

L Comprimento do pára-raios em metros.

A correção de tensão acima, tem por finalidade representar os efeitos de uma distribuição não uniforme de tensão ao longo do pára-raios, que provoca uma maior solicitação elétrica sobre os elementos posicionados mais próximos ao terminal de linha do pára-raios. De acordo com a equação acima, para cada metro de comprimento do pára-raios, a tensão de ensaio deve ser aumentada em 5%.

Baseado na teoria de Arrhenius, existe um processo de envelhecimento acelerado dos materiais dielétricos sólidos com a temperatura, podendo ser estimado um fator de aceleração AF_T definido por:

$$AF_T = 2,5^{(\Delta T/10)}$$

ΔT É a diferença de temperatura entre a temperatura de ensaio (°C), referida a uma dada temperatura ambiente.

A Tabela IX.1 indica o tempo de vida prospectivo em função da temperatura ambiente de trabalho, dado por um ensaio de envelhecimento com duração de 1000 h a temperatura de 115° C.

Tabela IX.1 – Tempo prospectivo máximo de vida

| Faixa de temperatura ambiente (°C) | Tempo mínimo de vida demonstrado (anos) |
|---------------------------------------|--|
| 40 | 110 |
| 65 | 11 |
| 95 | 0,7 |

De acordo com a expressão acima, este ensaio representa a operação do pára-raios submetido a uma temperatura média de operação de 40°C, por 110 anos.

O procedimento de ensaio consiste nas medições de potência dissipada através dos elementos de ZnO (perdas Watts), de uma a duas horas após a aplicação da tensão e após as 1000 horas de ensaio.

A relação K, obtida entre os valores de potência medidos no início e ao término do ensaio, é definida como o fator de correção a ser aplicado aos valores de tensão nominal e da máxima tensão contínua de operação durante o ensaio.

Para $K \leq 1$, são aplicados nos elementos de ZnO, durante o ensaio de ciclo de operação, os seus valores nominais.

A IEC vem revisando o procedimento de ensaio de envelhecimento acelerado. De acordo com o novo procedimento as três amostras sob ensaio devem ser submetidas a uma tensão de ensaio correspondente a sua MCOV multiplicada por um fato KT, que deve levar em consideração os efeitos de distribuição não-uniforme de tensão ao longo dos pára-raios. Este fator deve ser determinado a partir de medições de distribuição de tensão ou por simulação computacional.

Em pára-raios com comprimento L menor do que 1 metro, a tensão de ensaio deve ser corrigida por:

$$U_{ct} = U_c (1 + 0,15 L)$$

As amostras sob ensaio devem ter as suas perdas medidas, inicialmente, dentro de um intervalo de uma a duas horas após a aplicação da tensão (P_{1ct}). Posteriormente, as amostras sob ensaio devem ser medidas pelo menos uma vez

a cada 100 horas após a primeira medição. Por fim as perdas são medidas ao final das 1000 horas de ensaio (- 0 + 100 horas), fornecendo o valor P_{2ct} . O menor valor das perdas entre aqueles medidos a cada 100 horas após a primeira medição, será considerado como o valor P_{3ct} . A Tabela IX.2, resume os procedimentos de ensaio em função dos resultados obtidos:

| Perdas medidas | Amostras e tensões para o ensaio de ciclo |
|--|--|
| $P_{2ct} \leq 1,1. P_{3ct}$ e $P_{2ct} \leq P_{1ct}$ | novas amostras a U_n e U_{MCOV} |
| $P_{2ct} \leq 1,1. P_{3ct}$ e $P_{2ct} > P_{1ct}$ | novas amostras a U_n e U_{MCOV} corrigidos |
| $P_{2ct} > 1,1. P_{3ct}$ e $P_{2ct} < P_{1ct}$ | amostras envelhecidas a U_n e U_{MCOV} |
| $P_{2ct} > 1,1. P_{3ct}$ e $P_{2ct} \geq P_{1ct}$ | amostras envelhecidas a U_n e U_{MCOV} ou novas amostras a U_n e U_{MCOV} corrigidos, conforme acordo fabricante e comprador |

- Ensaio de verificação da equivalência térmica entre o pára-raios completo e a seção do pára-raios:

Este ensaio deve ser realizado anteriormente ao início do ensaio de ciclo de operação de forma a verificar, através do levantamento das curvas “temperatura de resfriamento x tempo”, a equivalência térmica entre a seção a ser ensaiada e o pára-raios completo.

No caso da disponibilidade dos resultados do ensaio de ciclo de operação para um pára-raios de tensão nominal U_n , este pára-raios poderá vir a ser uma seção equivalente de outros pára-raios de mesmo projeto, porém com diferentes tensões nominais, desde que a(s) curva(s) “temperatura de resfriamento x tempo” deste(s) pára-raios esteja(m) abaixo da curva do pára-raios já ensaiado. Neste caso, torna-se necessário fazer o levantamento da curva do pára-raios que se deseja ensaiar.

O procedimento de ensaio consiste na energização das amostras com uma tensão alternada de frequência fundamental com amplitude superior a tensão de referência das mesmas, até que a temperatura interna do conjunto ensaiado atinja a 120 °C. A temperatura das amostras de ensaio podem ser medidas por meio de termopares instalados ao longo das mesmas. Uma vez atingida a temperatura e verificada a sua estabilização as amostras ensaiadas devem ser desenergizadas, sendo levantada, para cada amostra, a curva “temperatura de resfriamento x tempo”. A seção a se ensaiada é considerada representativa do pára-raios completo se, durante todo o período de resfriamento a sua curva for igual ou superior a curva obtida para o pára-raios completo.

A título de exemplificação, a Figura IX.1 apresenta as curvas “temperatura de resfriamento x tempo” obtidas para um determinado tipo de pára-raios completo e a sua seção representativa. Observando-se as curvas apresentadas, pode ser verificada a equivalência térmica entre o pára-raios e a sua seção equivalente.

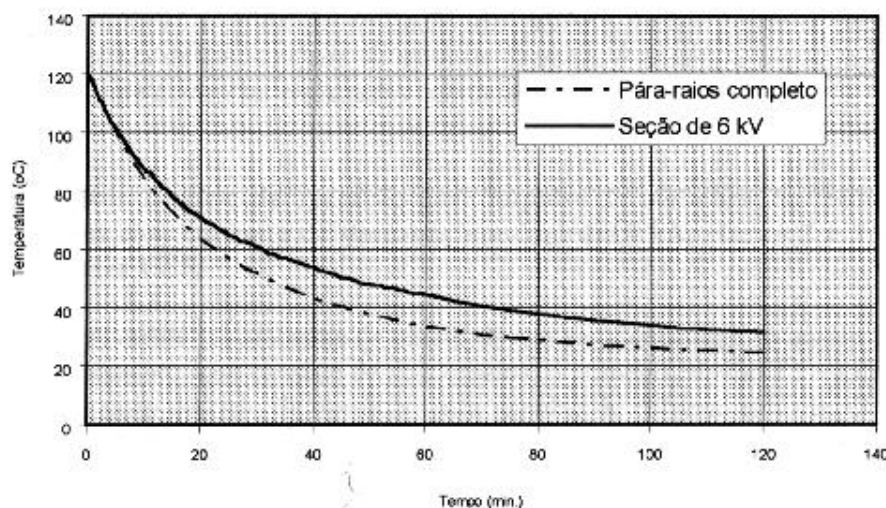


Figura IX.1 – Equivalência térmica entre o pára-raios completo e a sua seção

Quando do ensaio para o levantamento dos pontos para o traçado das curvas características é importante que as temperaturas ambientes sejam mantidas dentro de valores bem próximos.

- Ensaio de ciclo de operação com estabilidade térmica

De acordo com a classificação dos pára-raios, a IEC 60099-4/98 estabelece dois diferentes ensaios de ciclo de operação:

- **Ensaio de ciclo de operação para impulso de corrente elevada, aplicado a pára-raios com correntes de descarga nominal de 1,5 kA; 2,5 kA; 5 kA e 10 kA classe 1 de descarga de linhas de transmissão.**

Este ensaio tem por finalidade verificar o comportamento das amostras sob ensaio quando as mesmas são solicitadas por impulsos de alta corrente e curta duração. Inicialmente, as amostras de ensaio devem ser submetidas ao ensaio de condicionamento, o qual de forma similar ao ensaio de ciclo de operação aplicado aos pára-raios com centelhadores, consiste na aplicação de vinte impulsos de corrente com forma de impulso 8/20 μ s e amplitude equivalente a corrente de descarga nominal da seção ensaiada. Os vinte impulsos são divididos em quatro grupos de cinco impulsos. O intervalo entre impulsos de um mesmo grupo deve ser de 50 a 60 segundos, e entre grupos de impulso de 2 5 a 30 minutos.

Posteriormente as amostras são submetidas a aplicação de um impulso de corrente elevada, com forma de onda 4/10 μ s e amplitude definida em norma.

Após aos ensaios de condicionamento, os pára-raios ou seções representativas de pára-raios são aquecidas em estufa à temperatura de $60 \pm 3^{\circ}\text{C}$. Uma vez atingida a temperatura de ensaio e verificada a sua estabilização, cada amostra deve ser submetida a uma aplicação de um impulso de corrente elevada, com forma de onda 4/10 μ s e amplitude definida em norma, de acordo com a corrente de descarga nominal da seção.

De forma a se comprovar a estabilidade térmica das amostras ensaiadas, em seguida a segunda aplicação de impulso de corrente elevada e após um intervalo de tempo não superior a 100 ms, é aplicada sobre a amostra a sua tensão nominal corrigida da seção por 10 segundos, representativa de uma sobretensão temporária, seguida da aplicação da máxima tensão contínua de operação corrigida por 30 minutos.

De modo a se comprovar a estabilidade térmica da amostra sob ensaio, ou seja, a sua capacidade de dissipar a energia proveniente do impulso de corrente elevada, a tensão aplicada e a corrente de fuga, temperatura das amostras ou perdas Watts (pelo menos uma destes três parâmetros) devem ser registradas continuamente.

A verificação da estabilidade térmica de uma amostra submetida ao ensaio de ciclo de operação para impulso de corrente elevada é apresentada na Figura IX.2. O parâmetro registrado, neste caso, foi a temperatura da seção em função do tempo de ensaio. Da Figura, pode-se observar a redução da temperatura ao longo do tempo, evidenciando a estabilidade térmica da amostra.

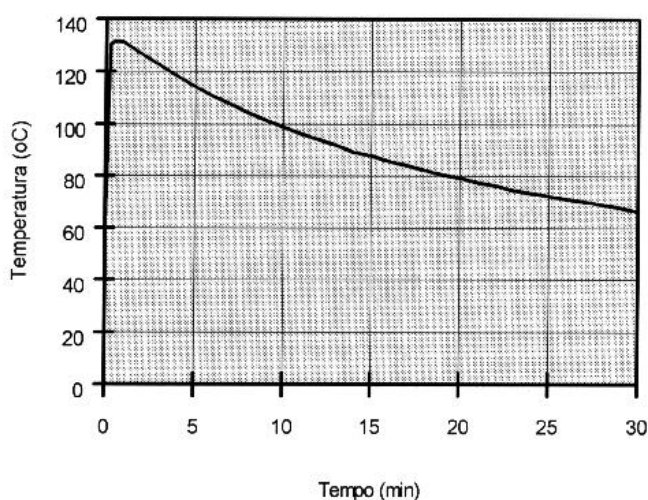


Figura IX.2 – Verificação da estabilidade térmica da amostra

As Figuras IX.3 e IX.4 ilustram a verificação da estabilidade térmica de um tipo de pára-raios, através do monitoramento da sua corrente de fuga durante a MCOV.

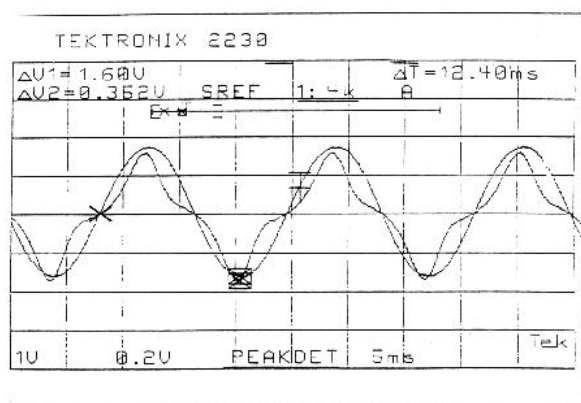


Figura IX.3 – Medição da corrente de fuga 2 min. após aplicação da MCOV

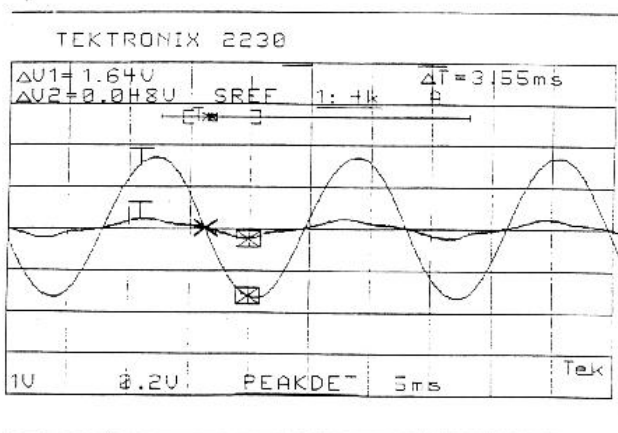


Figura IX.4 – Medição da corrente de fuga 30 min. após aplicação da MCOV

Observando-se as amplitudes das correntes de fuga que fluem pelos pára-raios para tempos de 2 minutos e 30 minutos após a aplicação da MCOV é possível constatar a estabilidade térmica do pára-raios ensaiado.

Posteriormente ao ensaio de ciclo de operação, deve ser realizada a medição da tensão residual a corrente de descarga nominal. O valor obtido deve ser comparado com o valor medido antes do início do ensaio, não devendo haver uma variação superior a 5% entre os valores medidos.

Por último, faz-se a inspeção visual, não devendo ser observados sinais de perfuração ou trincas dos elementos de ZnO, bem como evidências de descargas externas pela superfície lateral dos elementos.

- **Ensaio de ciclo de operação para impulso de manobra, aplicado a pára-raios com corrente de descarga nominal 10 kA, classes 2 e 3 e 20 kA, classes 4 e 5.**

Inicialmente, as amostras de ensaio devem ser submetidas ao ensaio de condicionamento, que consiste de dois ensaios: o primeiro, consiste de 20 aplicações de impulsos com forma de onda 8/20 μ s, similar ao ensaio descrito no item anterior. o segundo, consiste na aplicação de dois impulsos de corrente elevada, com forma de onda 4/10 μ s e amplitude de 100 kA.

Após aos ensaios de condicionamento, os pára-raios ou as seções representativas do pára-raios completo são aquecidas em estufa à temperatura de $60 \pm 3^\circ\text{C}$. Uma vez atingida a temperatura de ensaio e verificada a sua estabilização, cada amostra deve ser submetida a dois impulsos de descarga de linhas de transmissão, sob condições especificadas em norma. O intervalo entre as aplicações de impulso devem ser de 50 a 60 segundos.

De forma a se comprovar a estabilidade térmica das amostras ensaiadas, imediatamente após a segunda aplicação de descarga de linhas de transmissão e em um intervalo de tempo não superior a 100 ms, a amostra é submetida a aplicação da tensão nominal corrigida, se necessário, por 10 segundos, representando uma sobretensão temporária, seguida da aplicação da máxima tensão contínua de operação corrigida por 30 minutos.

Tal como no ensaio anterior, de modo a se comprovar a estabilidade térmica da amostra sob ensaio, ou seja, a sua capacidade de dissipar a energia proveniente dos impulsos de descarga de linha, a tensão aplicada e a corrente de fuga, temperatura das amostras ou perdas watts (pelo menos uma destes três parâmetros) devem ser registradas continuamente.

Posteriormente ao ensaio de ciclo de operação, deve ser realizada a medição da tensão residual a corrente de descarga nominal. O valor obtido deve ser comparado com o valor medido antes do início do ensaio, não devendo haver uma variação superior a 5% entre os valores medidos.

Por último, faz-se a inspeção visual, não devendo ser observados sinais de perfuração ou trincas dos elementos de ZnO, bem como evidências de descargas externas pela superfície lateral dos elementos.

- **Ensaio de corrente suportável de longa duração**

Os ensaios de corrente suportável de longa duração, definidos como corrente de impulso retangular (para pára-raios de 2,5 kA e 5 kA) e descarga de linhas de transmissão (pára-raios 10 kA, classes 1 a 3 e 20 kA, classes 4 e 5), verificam a capacidade dos pára-raios de ZnO ou seções destes absorverem energias proveniente de manobras de linhas.

IX.4 Ensaios específicos aplicáveis a pára-raios poliméricos

Com o crescimento dos pára-raios com invólucro polimérico três ensaios têm se mostrado muito importantes para a avaliação do desempenho desses pára-raios.

- Ensaio de corrente de falta, o qual verifica a integridade mecânica dos pára-raios no caso de uma eventual falha do pára-raios, seguida pela passagem da corrente de curto-circuito do sistema;
- O ensaio de penetração de umidade, onde são simuladas condições que propiciam a entrada de umidade pelo interior dos pára-raios.
- Ensaio de envelhecimento acelerado do invólucro isolante, o qual verifica o desempenho do material polimérico utilizado no invólucro do pára-raios, quando submetido a diferentes condições ambientais.

A Figura IX.5 exemplifica o procedimento utilizado para o ensaio de 5000 horas, contemplado na última versão da IEC 60099-4 / 2001.

| <i>Tempo (horas)</i> | 2 | 4 | 6 | 8 | 10 | 12 | 14 | 16 | 18 | 20 | 22 | 24 |
|---------------------------------------|---|---|---|---|----|----|----|----|----|----|----|----|
| Tensão de ensaio ($U_m / \sqrt{3}$) | | | | | | | | | | | | |
| Chuva desmineralizada | | | | | | | | | | | | |
| Aquecimento (50° C) | | | | | | | | | | | | |
| Humidade relativa (95%) | | | | | | | | | | | | |
| Névoa salina (7 kg/m ³) | | | | | | | | | | | | |
| Radiação solar (UV) | | | | | | | | | | | | |

Figura IX.5 - Ciclo diário do ensaio de envelhecimento acelerado

IX.5 Referências bibliográficas

- /1/ IEC 60099-4/2001 Surge Arresters - Part 4: "Metal-Oxide surge arresters without gaps for a.c. systems".
- /2/ IEC 99-1/1991 Surge Arresters - Part 1: "Non-linear resistor type gapped surge arresters for a.c. systems".
- /3/ ANSI C62.11/1999 "IEEE Standard for Metal-Oxide surge arresters for AC power circuits".
- /4/ ANSI C62.1/1984 "IEEE Standard for surge arresters for AC power circuits".
- /5/ NBR 5287/88 "Pára-raios de resistor não-linear a Carboneto de Silício (SiC) para circuitos de potência de corrente alternada" - Especificação.
- /6/ NBR 5309/91 "Pára-raios de resistor não-linear a Carboneto de Silício (SiC) para circuitos de potência de corrente alternada" - Método de ensaio.

- /7 Projeto 3:037.11-001 - "Pára-raios de resistor não-linear a óxido metálico, com centelhadores série, para circuitos de potência de corrente alternada" - Especificação.
- /8/ Projeto 3:037.11-002 - Março/91 "Pára-raios de resistor não-linear a óxido metálico, com centelhadores série, para circuitos de potência de corrente alternada" - Método de ensaio.
- /9/ A E.T. 02.111 DT/ED 0420f da CEMIG – “Pára-raios com Resistor não-linear de Óxido Metálico para Sistemas de Distribuição”.