

V Pára-raios para aplicação em Subestações

Atualmente quase todos os pára-raios adquiridos pelas empresas concessionárias de energia elétrica e grandes consumidores industriais para novos projetos de subestações, ampliações de subestações existentes ou para a substituição dos pára-raios convencionais de SiC, são do tipo Óxido de Zinco (ZnO) sem centelhadores.

Apesar do aumento crescente do número de pára-raios de ZnO, em alguns países, como por exemplo o Brasil, a grande maioria dos pára-raios atualmente instalados nas subestações ainda são do tipo Carbetto de Silício (SiC), apesar das suas limitações tecnológicas, quando comparados aos pára-raios de ZnO sem centelhadores. Estudos realizados junto às empresas de energia elétrica e grandes indústrias apontaram que aproximadamente 64% dos pára-raios instalados nas subestações brasileiras são de Carbetto de Silício (SiC), com tempos de instalação e de operação médios superiores a 20 anos. Condições similares têm sido verificadas em outros países. No Brasil algumas empresas de energia elétrica vêm adotando a utilização de centelhadores com dielétrico de ar na entrada das subestações com tensões nominais até 138 kV.

Este cenário indica a necessidade de substituição de um grande número de pára-raios ao longo dos próximos 5 anos, de modo a se manter a confiabilidade necessária dos sistemas elétricos. Os novos cenários do setor elétrico, associado a necessidade de grandes investimentos para a modernização do parque de pára-raios faz com que as empresas concessionárias de energia e grandes consumidores industriais cada vez mais avaliem a melhor relação entre benefício e custo para a aquisição de novos equipamentos.

Tais condições podem ser obtidas a partir de critérios bem definidos para a especificação dos pára-raios. Neste enfoque, torna-se essencial o conhecimento e o entendimento das características construtivas dos pára-raios, bem como os critérios para a definição de seus parâmetros.

Desta forma, conhecer os tipos de pára-raios atualmente existentes, seus aspectos construtivos, bem como os critérios para uma seleção e aplicação adequadas dos pára-raios tem se tornado fundamental. No presente capítulo, são abordados os aspectos referentes a aplicação dos pára-raios em subestações, com ênfase nos pára-raios de Óxido de Zinco (ZnO) sem centelhadores, por serem esses os pára-raios atualmente mais solicitados pelos usuários.

V.1 Aspectos construtivos:

Existem atualmente duas filosofias de pára-raios de ZnO com relação ao tipo de invólucro: pára-raios com invólucros de porcelana e polimérico. Para ambas as filosofias, existem diferentes concepções de projeto de montagem, que são geralmente apresentados pelos fabricantes em seus catálogos técnicos.

V.1.1 Pára-raios de ZnO com invólucro de porcelana

Os primeiros pára-raios de ZnO com invólucros de porcelana desenvolvidos para sistemas de potência foram apresentados ao mercado no final de década de 70. Na década de 80 diversas empresas japonesas, européias e americanas, desenvolveram e produziram pára-raios de ZnO para aplicação em subestações.

A Figura V.1 apresenta os detalhes construtivos de um pára-raios com invólucro de porcelana constituído por uma seção.

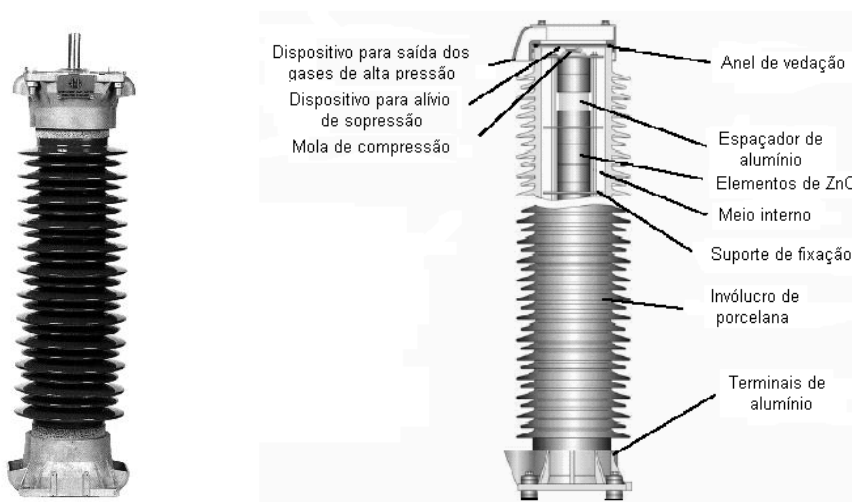


Figura V.1 – Detalhes de montagem de um pára-raios de porcelana

De um modo geral, o processo de montagem dos pára-raios de porcelana deve ser tal que os elementos de ZnO se mantenham localizados preferencialmente de forma concêntrica dentro do invólucro de porcelana, com uma geometria definida para minimizar os efeitos de distribuição não uniforme de campo elétrico e de ionização interna, mesmo sob condições severas de poluição externa.

Mecanismos de alívio de sobrepressão devem ser incorporados dentro das flanges terminais, de modo a evitar a fragmentação ou a explosão violenta dos pára-raios, em caso de uma eventual falha seguida da passagem da corrente de curto-circuito do sistema.

Os perfis das saias da porcelana devem garantir uma distância de escoamento adequada às condições ambientais e características elétricas do invólucro compatíveis com as características de proteção dos pára-raios. Geralmente os pára-raios com invólucros de porcelana classe estação apresentam distâncias de escoamento de 20 mm / kV.

V.1.2 Pára-raios de ZnO com invólucro polimérico

Uma evolução tecnológica bastante significativa para os pára-raios de ZnO sem centelhadores surgiu em meados da década de 80, com o desenvolvimento de materiais poliméricos para aplicação em pára-raios de alta tensão.

Apesar das diferenças construtivas entre os diferentes fabricantes, existem atualmente duas concepções de projeto: de pára-raios poliméricos com e sem espaçamentos internos de ar.

- **Pára-raios com espaços internos de ar**

Os projetos são equivalentes aos projetos de pára-raios com invólucro de porcelana. O invólucro polimérico é moldado e posteriormente o conjunto de blocos de ZnO é inserido dentro do invólucro. De modo a garantir uma boa sustentação mecânica para o pára-raios, o invólucro é composto de um tudo de fibra de vidro de alta resistência mecânica sobre o qual o polímero é injetado. Este tipo de projeto apresenta um espaçamento interno de ar entre a parte interna do polímero e os blocos de ZnO, sendo necessária a utilização de dispositivos de alívio de sobrepressão. A Figura V.2, ilustra os detalhes construtivos de um pára-raios com invólucro polimérico apresentando espaços internos de ar.

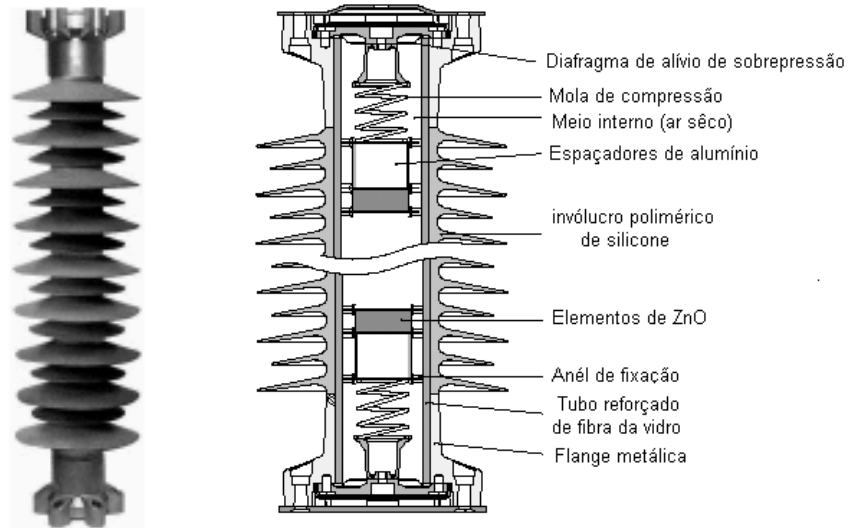
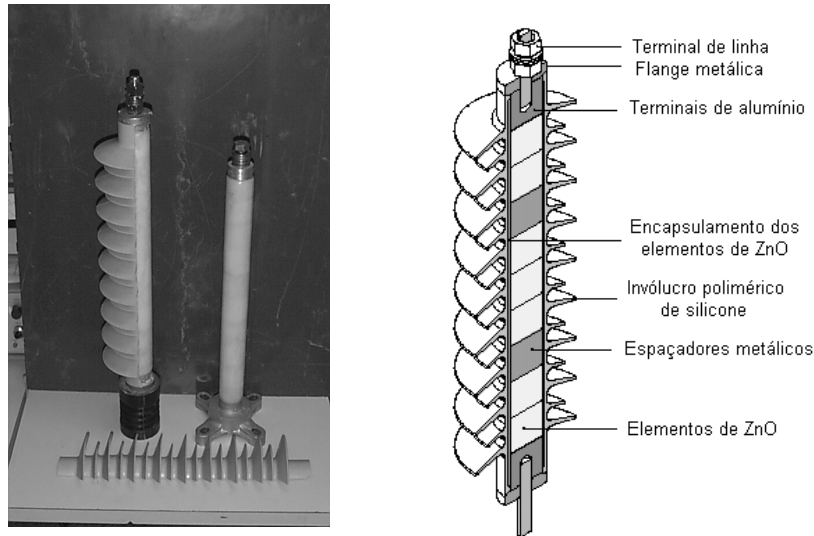


Figura V.2 – Pára-raios poliméricos com espaços internos de ar

- **Pára-raios sem espaços internos de ar**

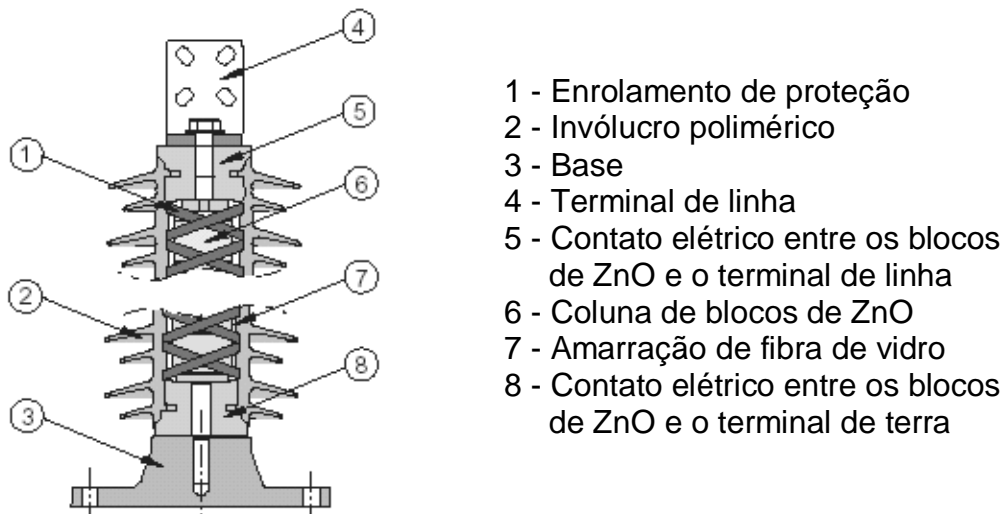
Na maioria dos projetos sem espaços internos de ar, os elementos de ZnO são envoltos em um tubo de fibra de vidro impregnado em resina epoxi. O invólucro

polimérico é geralmente aplicado sobre o tubo pelo processo de injeção da borracha ou de moldagem. Detalhes construtivos de um projeto de pára-raios sem espaços internos de ar utilizando as características construtivas informadas acima são apresentados na Figura V.3.



**Figura V.3 – Pára-raios poliméricos sem espaços internos de ar
Polímero injetado sobre um tubo de fibra de vidro**

Existem projetos onde os elementos de ZnO são fixados por sustentações mecânicas, sendo o polímero injetado diretamente sobre o conjunto. Detalhes deste projeto são apresentados na Figura V.4.



**Figura V.4 – Pára-raios poliméricos sem espaços internos de ar
Polímero injetado sobre e estrutura**

Os projetos de pára-raios sem espaços internos de ar entre os elementos de ZnO e o invólucro não requerem dispositivos de alívio de sobrepressão e têm normalmente se mostrado mais confiáveis em relação a possibilidade de penetração de umidade.

Outra vantagem deste tipo de projeto está relacionada ao peso do pára-raios, comparado a um pára-raios apresentando espaços internos de ar de mesmas características elétricas.

A principal vantagem do projeto de pára-raios com espaços internos de ar está relacionada a sua maior suportabilidade mecânica em relação aos projetos sem espaçamentos internos de ar, sendo este tipo de projeto mais recomendado para aplicações que exigem esforços mecânicos não atendidos pelo outro projeto.

Os pára-raios poliméricos podem ser eletricamente compostos por uma única seção ou ser do tipo multi-seções, montados em uma única coluna de elementos de ZnO ou ser do tipo multi-colunas, formados por colunas de elementos de ZnO dispostas em paralelo.

Alguns fabricantes vêm optando pela montagem de pára-raios multi-colunas para aplicação em sistemas que requerem uma maior capacidade de absorção de energia. Neste caso, os pára-raios com arranjo série paralelo são compostos por dois ou mais conjuntos de elementos de ZnO em paralelo, os quais podem estar dentro de um mesmo invólucro ou em invólucros separados. Para ambas as construções, cuidados especiais devem ser tomados nos procedimentos de fabricação e de montagem desse tipo de pára-raios, de modo a se prever uma repartição de corrente a mais uniforme possível através dos conjuntos em paralelo.

Desta forma, é fundamental que seja verificada a dispersão entre as colunas em todas as unidades de pára-raios série-paralelo. Esta verificação pode ser realizada através do ensaio de repartição de corrente, que consiste em determinar a relação entre a corrente total aplicada nos pára-raios e a maior corrente obtida em uma das colunas. Para garantir uma boa capacidade de absorção de energia desses pára-raios, quando solicitados por sobretensões de manobras ou por descargas atmosféricas, este ensaio deve ser realizado considerando-se a aplicação de impulsos de corrente com as formas de onda 8/20 μ s e 30/60 μ s. Em todos os pára-raios os valores obtidos para o coeficiente de repartição de corrente devem estar dentro da faixa declarada pelos fabricantes.

De uma maneira em geral, pára-raios com construção série-paralelo apresentam, para uma mesma classe de descarga de linhas de transmissão, uma capacidade de absorção de energia igual ou superior aos pára-raios de uma única coluna.

A Figura V.5, apresenta detalhes de montagem de pára-raios com tensão nominal de 120 kV, compostos por duas e três colunas.

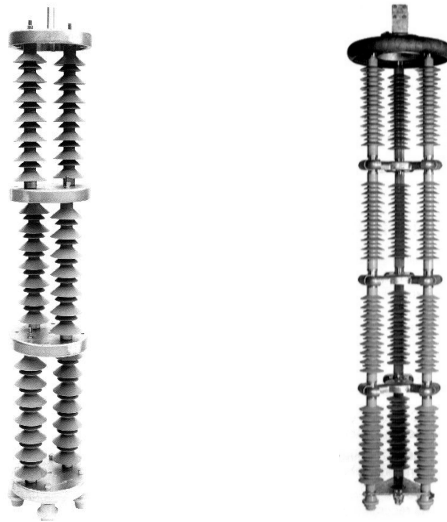


Figura V.5 - Arranjos de montagem de pára-raios com duas ou mais colunas

Independente do tipo construtivo considerado, têm sido verificado nos últimos anos que os dois maiores problemas verificados nos pára-raios com invólucro de porcelana ao longo do tempo: perda de estanqueidade e fragmentação do invólucro com ou sem explosão, vêm sendo minimizados pela utilização de pára-raios com invólucro polimérico.

A experiência de campo tem demonstrado que os pára-raios poliméricos, em especial àqueles apresentando projetos sem espaçamentos internos de ar, são bem menos propensos a perda de estanqueidade do que os pára-raios com invólucro de porcelana, reduzindo a causa mais comum de falha nos pára-raios.

Outro aspecto importante dos projetos construtivos de pára-raios poliméricos está associado ao efeito em caso de falha do pára-raios, o qual depende do projeto mecânico construtivo do pára-raios.

Em caso de falha interna nos pára-raios com invólucro de porcelana, existe a possibilidade de explosão ou fragmentação do invólucro, com riscos de danos aos equipamentos adjacentes ou mesmo às pessoas próximas ao evento. O mesmo fenômeno pode ser verificado em pára-raios poliméricos com espaçamento interno de ar, apesar dos riscos aparentemente serem menores.

Para esses tipos de pára-raios, os projetos do dispositivo de alívio de sobrepressão e da estrutura mecânica da porcelana ou do tubo de fibra de vidro (em pára-raios poliméricos) têm uma importância fundamental no desempenho mecânico dos pára-raios em caso de uma eventual falha.

Projetos de pára-raios poliméricos sem espaçamento interno de ar são menos susceptíveis a fragmentação do invólucro e ao desprendimento de seus componentes internos. Neste caso, os projetos de pára-raios devem ser mecanicamente dimensionados de forma que os elementos internos permaneçam intactos após a passagem de uma corrente de curto-circuito máxima pré estabelecida, sem a necessidade de utilização do mecanismo de alívio de sobrepressão usado nos pára-raios de com espaçamentos internos de ar. O projeto mecânico do pára-raios deve, portanto, resistir à passagem da corrente de curto-circuito do sistema, sem que ocorra o desprendimento dos elementos.

É importante ressaltar que uma eventual falha do pára-raios não acarreta somente na perda do equipamento, podendo causar também distúrbios severos no sistema, bem como a danificação de outros equipamentos adjacentes (como por exemplo, buchas de transformadores), em caso de fragmentação ou explosão do invólucro isolante ou desprendimento dos elementos de ZnO.

Devido ao menor peso, maior facilidade e flexibilidade de montagem e pela não fragmentação ou explosão do invólucro com desprendimento dos elementos de ZnO, pára-raios com projetos sem espaçamentos internos de ar têm sido instalados mais próximos aos equipamentos a serem protegidos, melhorando de modo considerável as características de proteção desses equipamentos quando da ocorrência de sobretensões atmosféricas, através da redução das tensões impulsivas nos seus terminais devido ao efeito distância. Em alguns casos, tem sido prática, a instalação dos pára-raios diretamente na carcaça dos transformadores.

Em adição, os pára-raios com invólucro polimérico apresentam vantagens em relação aos pára-raios de porcelana, tornando a sua utilização mais atrativa:

- Melhor desempenho sob contaminação, bem como uma melhor distribuição de tensão ao longo do pára-raios;

O efeito da contaminação externa do invólucro, crítico em pára-raios com invólucros de porcelana, é bastante atenuado quando da utilização de invólucros poliméricos. Isto ocorre devido a maior distância de escoamento dos projetos de pára-raios poliméricos comparados aos de porcelana de mesmo comprimento, associada a elevada capacidade de hidrofobicidade apresentada em materiais poliméricos, especialmente os polímeros a base de silicone.

Tem sido verificado na prática, que o bom desempenho de invólucros poliméricos em ambientes altamente contaminados e sujeitos a elevada umidade e elevada exposição de raios ultra-violeta, está diretamente relacionado com o tipo e a qualidade do polímero utilizado. Melhores desempenhos em regiões mais críticas têm sido obtidos com a utilização de materiais apresentando silicone como polímero base os quais, em geral, apresentam uma maior capacidade de hidrofobicidade e melhor comportamento sob ação ultravioleta, comparados a outros tipos de polímeros.

Por esta razão, a aplicação de pára-raios poliméricos tem sido amplamente considerada em ambientes altamente contaminados e agressivos. Pára-raios poliméricos a base de silicone com uma ou mais seções e uma ou mais colunas têm apresentado desempenhos altamente satisfatórios em regiões críticas, independente de suas características construtivas.

No entanto, para aplicações em sistemas de extra alta tensão, ou em regiões de elevado nível de contaminação, cuidados devem ser tomados com relação as características do material polimérico empregado na fabricação do invólucro, em especial com relação às características de envelhecimento por exposição ultravioleta, trilhamento elétrico e de hidrofobicidade.

- Redução das perdas de energia provenientes da menor corrente de fuga nos invólucros poliméricos, comparado aos de porcelana;
- A maior distância de escoamento do invólucro polimérico, para um mesmo comprimento, permite a montagem de pára-raios com invólucros de menor comprimento, facilitando a montagem. Em pára-raios aplicados em subestações, esta redução pode ser de até 40% ou mais;
- Menor peso em relação aos pára-raios com invólucro de porcelana (tipicamente menos do que 50% do peso no caso de pára-raios sem espaçamentos internos de ar para aplicação em subestações), acarretando em menores esforços mecânicos sobre as estruturas e permitindo uma maior versatilidade na montagem dos arranjos.
- Maior facilidade de transporte, manuseio, armazenamento e instalação, proporcionando uma redução significativa de custos.
- Não necessitam, geralmente, de dispositivos de alívio de sobrepressão (pára-raios sem espaçamentos internos de ar), tornando o projeto do pára-raios mais simples e menos custoso;
- Não apresentam problemas de trincas ou lascas nas saias, ocasionadas por transporte, mau manuseio durante a instalação ou mesmo vandalismo, e que podem vir a comprometer a estanqueidade do pára-raios ao longo do tempo;
- Possuem uma melhor capacidade de dissipação de calor, aumentando as suas propriedades térmicas e melhorando a sua capacidade de dissipação de calor.

Devido as vantagens técnicas e econômicas apresentadas pelos pára-raios com invólucros poliméricos, quando comparados aos projetos de pára-raios de porcelana, a utilização desse tipo de pára-raios em subestações vem crescendo de uma maneira bastante acentuada. Existe atualmente uma grande quantidade

de pára-raios com invólucro polimérico instalados em sistemas com tensões nominais até 500 kV. No Brasil, empresas concessionárias de energia e grandes consumidores industriais vêm instalando desde o início da década de 90 pára-raios poliméricos em sistemas com tensões nominais até 230 kV. Aplicações em sistemas de 500 kV foram realizadas nos últimos anos.

Geralmente os pára-raios instalados em subestações são providos de contadores de descarga e de miliamperímetros inseridos no próprio contador. Neste caso, sub-bases isolantes são utilizadas para isolar o terminal inferior do pára-raios do ponto de terra.

V.2 Desempenho dos pára-raios instalados em subestações:

Considerando que os pára-raios aplicados em subestações apresentem bons projetos elétrico e mecânico dos sistemas de vedação, bem como sejam adequadamente selecionados e instalados, estima-se que a sua vida útil seja em torno de 20 a 25 anos.

No entanto, na prática, tem sido constatado ao longo dos últimos anos algumas alterações significativas no seu desempenho que resultam, em muitas das vezes, na operação inadequada ou até mesmo na falha dos pára-raios com menos de dez anos de operação comprometendo, desta forma, a confiabilidade do pára-raios e a continuidade no fornecimento de energia elétrica.

Durante a sua vida útil, os pára-raios são submetidos diferentes solicitações elétricas e ambientais:

- Tensão normal de operação;
- Sobretensões temporárias;
- Descargas de longa duração ou de alta intensidade e curta duração;
- Contaminação externa do invólucro, quando instalados em ambientes poluídos.
- Variações climáticas, exposição a raios ultra-violeta, umidades elevadas, etc.

Essas solicitações, impostas aos pára-raios individualmente ou em conjunto, podem afetar e alterar de forma significativa a característica “tensão x corrente” dos elementos de ZnO através do aumento da componente resistiva da corrente e das perdas em condições de regime permanente, e da redução da capacidade de absorção de energia dos pára-raios. Em pára-raios de SiC, além de alterar a característica “tensão x corrente” dos elementos de SiC, essas solicitações afetam e alteram as características disruptivas dos centelhadores.

- Tensão normal de operação:

No caso de pára-raios de ZnO sem centelhadores a tensão de serviço pode provocar, ao longo do tempo, o envelhecimento dos blocos de ZnO.

Cuidados devem ser tomados com relação aos efeitos de uma distribuição não uniforme de tensão ao longo dos invólucros dos pára-raios aplicados em Alta e Extra Alta Tensões, especialmente em regiões com elevados índices de contaminação. Esse efeito pode solicitar mais os blocos de ZnO localizados próximos ao terminal de linha, fazendo com que esses apresentem entre seus terminais níveis de tensão superiores a sua MCOV.

- Sobretensões temporárias:

Sobretensões temporárias (TOV) de longa duração ocorrem nos sistemas elétricos. Estas sobretensões têm se mostrado responsáveis por muitas das falhas verificadas em pára-raios instalados em subestações, em especial os pára-raios de ZnO. A razão para as falhas dos pára-raios tem sido as severas solicitações de energia impostas por essas sobretensões, as quais provocam perfurações, trincas e/ou envelhecimento acelerado em todos ou alguns elementos não-lineares.

- Descargas de longa duração ou de alta intensidade e curta duração:

Chaveamentos de grandes bancos de capacitores ou de linhas longas em vazio, podem solicitar severamente os pára-raios acarretando, via de regra, na perfuração, trincas ou descargas externas em todos ou alguns dos elementos não-lineares que compõem os pára-raios.

Impulsos de alta intensidade e de curta duração, característicos de sobretensões atmosféricas, podem causar alteração da característica "V x I" dos elementos não-lineares, descargas externas ou perfuração em todos ou alguns elementos.

- Contaminação externa do invólucro:

A contaminação externa do invólucro tem se mostrado como um fator bastante crítico para a degradação dos pára-raios aplicados em subestações, e pode afetar de forma significativa o desempenho dos pára-raios com invólucros de porcelana, levando-os a degradação e ao envelhecimento.

Depósitos de materiais contaminantes nas superfícies dos invólucros dos pára-raios, associada a umidade externa, podem causar uma elevação da corrente de fuga pelo invólucro, provocando uma distribuição de tensão não uniforme interna ao longo do pára-raios. Este efeito pode causar a disrupção dos centelhadores, no caso de pára-raios de SiC. Em pára-raios de ZnO, esse efeito pode causar um aquecimento excessivo em alguns dos elementos de ZnO que compõem o pára-raios, provocando a degradação desses elementos com aumento da componente resistiva da corrente de fuga e das perdas, e a conseqüente redução na capacidade de absorção de energia dos pára-raios.

O efeito da contaminação externa do invólucro torna-se mais crítico em pára-raios constituídos por mais de uma seção onde a corrente de fuga externa pelo invólucro da seção superior pode ser transferida para a parte interna da seção inferior devido a transferência galvânica através das flanges metálicas, aumentando consideravelmente a componente resistiva da corrente e as perdas através dos elementos de ZnO.

Além disso, a contaminação do invólucro gera o fenômeno de ionização interna no interior dos pára-raios. Investigações de campo e laboratoriais têm mostrado que qualquer variação de tensão ao longo da porcelana, resultante de chuva, fumaça ou poluição, é capaz de gerar descargas internas que produzem alterações irreversíveis na composição interna do gás, através de reações químicas no gás de enchimento, queima de oxigênio e criação de componentes químicos.

Em pára-raios de SiC, o efeito acima altera ao longo do tempo as características disruptivas dos centelhadores e a característica “tensão x corrente” dos elementos não-lineares de SiC, acarretando na falha do pára-raios.

No caso de pára-raios de ZnO, a ausência de oxigênio e a criação de novos gases químicos gerados pelas descargas parciais são responsáveis pelo envelhecimento acelerado de todos ou alguns dos elementos de ZnO que constituem o pára-raios, podendo levar a falha do pára-raios ao longo dos anos.

O efeito da contaminação externa pode ser bastante crítico em pára-raios com invólucros de porcelana, sendo substancialmente atenuado quando da aplicação de pára-raios com invólucros poliméricos, especialmente em projetos que não apresentem espaçamentos internos de ar no interior do pára-raios.

O efeito da contaminação pode ser minimizado com o aumento da distância de escoamento do invólucro. Pára-raios com invólucro de porcelana são geralmente fabricados para uma distância de escoamento de 20 mm / kV fase-fase, que corresponde ao nível de contaminação II de acordo com a norma IEC 60.815. O aumento da distância de escoamento reduz a corrente de fuga para um determinado nível de contaminação, diminuindo os efeitos da distribuição de tensão não-uniforme e da ionização interna.

Os fenômenos de degradação e de envelhecimento dos pára-raios podem ser acelerados pela penetração de umidade no interior dos pára-raios devido a perda de estanqueidade do invólucro. Tal efeito tem sido bastante crítico em pára-raios com invólucro de porcelana, principalmente em projetos de pára-raios mais antigos.

Estudos realizados por empresas concessionárias de energia elétrica e instituições de pesquisa têm identificado as principais causas que afetam o desempenho dos pára-raios. Tal como verificado em pára-raios para aplicação em redes de distribuição, todos os estudos realizados apontam a penetração de

umidade por perda de estanqueidade do invólucro como sendo a principal causa de falha dos pára-raios para subestações, sendo esta causa responsável por aproximadamente 70 a 90 % de todas as falhas verificadas neste tipo de pára-raios.

No caso de pára-raios aplicados a subestações, a penetração de umidade pode se dar por vários motivos: danificação das gaxetas de vedação durante o processo de fechamento dos pára-raios, envelhecimento das gaxetas ao longo do tempo com perda de suas propriedades, trincas ou fissuras que se formam ao longo do tempo na porcelana ou na cimentação entre a porcelana e flange, por variações bruscas de temperatura, descolamento da cimentação, entre outras causas.

Problemas de vandalismo também têm sido observados em algumas regiões, facilitando o ingresso de umidade no interior dos pára-raios com invólucro de porcelana.

Em pára-raios com centelhadores, a presença de umidade altera as características disruptivas dos centelhadores e a característica “tensão x corrente” dos elementos não-lineares, dificultando a capacidade de interrupção da corrente subsequente e reduzindo a capacidade de absorção de energia dos pára-raios.

A presença de umidade no interior dos pára-raios de ZnO altera a significativamente a característica “tensão versus corrente” dos elementos de ZnO em toda a sua faixa de operação, com um aumento da componente resistiva da corrente e das perdas na tensão de operação do pára-raios; redução da capacidade de absorção de energia e de seus níveis de proteção, fato que pode levar o pára-raios a falha por instabilidade térmica e comprometer a isolação dos equipamentos protegidos, respectivamente.

O aumento da corrente de fuga resistiva que flui pelo pára-raios, para uma dada solicitação de tensão, e a redução na capacidade de absorção de energia pode levar os pára-raios à uma instabilidade térmica quando de uma solicitação temporária ou transitória, acarretando na sua falha, que é seguida pela passagem da corrente de curto-circuito fase-terra do sistema. Nesse caso, devido as características construtivas dos pára-raios de porcelana (espaçamento interno de ar entre a parte ativa do pára-raios e a parte interna do invólucro), a passagem da corrente de curto-circuito gera a formação de gases de alta pressão que tendem a provocar a fragmentação do invólucro ou até mesmo a sua explosão, caso esse não possua dispositivos de alívio de sobrepressão.

Outro ponto que deve ser considerado é a possibilidade de religamentos da subestação. Havendo uma falha do pára-raios, esse representa um curto-circuito para o sistema, provocando a atuação da proteção. Quando do religamento, existe uma probabilidade de explosão do pára-raios devido a passagem da corrente de curto-circuito, uma vez que o mecanismo de alívio de sobrepressão geralmente não terá função para essa segunda operação.

V.3 Critérios para a seleção e aplicação dos pára-raios para subestações

O dimensionamento adequado dos pára-raios em relação às características dos sistemas para os quais esses são aplicados, propicia uma proteção adequada aos equipamentos protegidos além de uma otimização na relação entre benefício e custo para aquisição dos pára-raios.

De uma maneira genérica, os seguintes passos devem ser seguidos para uma seleção e aplicação adequadas dos pára-raios em subestações:

- Seleção das características de operação e de proteção dos pára-raios, em função das características dos sistemas;
- Seleção ou determinação da suportabilidade da isolação;
- Avaliação da coordenação do isolamento.

Cada um dos aspectos acima requer estudos específicos.

São apresentados a seguir os procedimentos básicos para a seleção e aplicação dos pára-raios de Óxido de Zinco (ZnO) sem centelhadores.

V.3.1 Seleção do pára-raios adequado e determinação das suas características de proteção

A seleção de um pára-raios envolve basicamente as seguintes considerações:

- Determinação da tensão nominal e da máxima tensão contínua de operação, em função da máxima tensão de operação do sistema e das possíveis sobretensões temporárias que podem vir a ocorrer e suas respectivas durações, no ponto de aplicação dos pára-raios;
- Determinação da corrente de descarga nominal;
- Determinação da capacidade de absorção dos pára-raios, em função das energias a serem absorvidas por esses, quando da ocorrência de sobretensões atmosféricas e de manobras;
- Características de proteção para sobretensões atmosféricas e de manobra;
- Requerimentos de alívio de sobrepressão ou de corrente suportável de falta;
- Condições de serviço (ambientais).

As considerações referentes ao nível de proteção e capacidade de absorção de energia determinam a classe do pára-raios a ser escolhido.

(1) Seleção da tensão nominal dos pára-raios:

Os procedimentos para a seleção da tensão nominal dos pára-raios são os mesmos apresentados na Seção III.5 – Capítulo III.

Em pára-raios aplicados a sistemas a alta e extra alta tensões, além da análise das sobretensões temporárias devido a faltas no sistema, as demais causas de sobretensões temporárias devem ser analisadas.

Tem sido verificado que a maioria das empresas concessionárias de energia elétrica e grandes consumidores industriais definem, em suas especificações técnicas, a tensão nominal dos pára-raios de ZnO sem centelhadores seguindo os mesmos critérios anteriormente utilizados para a seleção dos pára-raios com centelhadores. Esse critério garante ao usuário que, em caso de ocorrência de uma sobretensão temporária no sistema, não irá ocorrer a ruptura dos pára-raios com centelhadores evitando, desta forma, a absorção pelo pára-raios de uma energia que esse não possuía condições de dissipar e que fatalmente resultaria em sua falha.

No entanto, no caso de pára-raios de ZnO, fato que pode em alguns casos acarretar na escolha de pára-raios com tensões nominais maiores do que o necessário.

Exemplo 1 - Seleção da tensão nominal de um pára-raios para aplicação em subestações, considerando um sistema com as seguintes características:

- Tensão nominal U_n : 138 kV_{ef}
- Máxima tensão operativa do sistema $U_{max.}$: 145 kV_{ef}
- Máxima sobretensão temporária 125 kV
- Duração considerada para a falta: 1 segundo.

• Pára-raios com centelhadores:

$$V_n \geq TOV_{SIST.} \Rightarrow V_n \geq 125 \text{ kV} \Rightarrow V_n = 132 \text{ kV}$$

Neste caso, o pára-raios deverá apresentar uma tensão nominal de 132 kV.

• Pára-raios sem centelhadores:

$$MCOV_{PR} \geq U_{Max. SIST.} \Rightarrow MCOV_{PR} \geq 145 / \sqrt{3} \Rightarrow MCOV_{PR} \geq 84 \text{ kV}_{ef}$$

Será considerada uma margem de segurança de 5% para compensar possíveis efeitos de distribuição não uniforme de tensão ao longo do pára-raios, e que

poderia provocar a sua degradação. Desta forma a MCOV do pára-raios deve ser superior a 88 kV.

A princípio será escolhido um pára-raios com tensão nominal de 120 kV, o qual apresenta uma MCOV de 96 kV.

Logo, qualquer valor de tensão com valor eficaz superior a 96 kV, será considerado uma sobretensão para o pára-raios. Portanto:

$$TOV_{PR} / (MCOV) \geq TOV_{SIST.} / (MCOV_{PR}) \geq 125 / 96 \Rightarrow TOV_{PR} / (MCOV) \geq 1,30$$

ou,

$$TOV_{PR} / V_n \geq TOV_{SIST.} / V_n \geq 125 / 120 \Rightarrow TOV_{PR} / V_n \geq 1,04$$

O próximo passo consiste em verificar se as características de suportabilidade do pára-raios para sobretensões temporárias atendem a sobretensão verificada no sistema. Uma curva típica apresentando a característica “tensão de freqüência fundamental versus tempo” para um pára-raios classe estação é apresentada na Figura V.6.

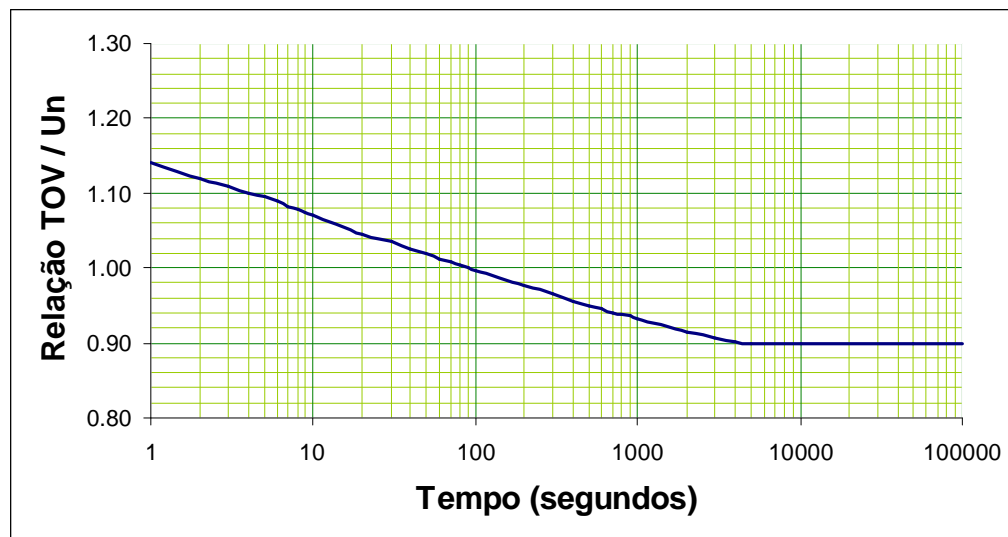


Figura V.6 –Característica “tensão de freqüência fundamental x tempo”

Para uma sobretensão equivalente a 1,04 pu ($TOV_{sistema} / V_n$ PR's) verifica-se na curva “tensão de freqüência fundamental x tempo” do pára-raios uma duração máxima permitida para a sobretensão temporária de aproximadamente 20 segundos.

Logo, o pára-raios com tensão nominal de 120 kV atende ao sistema sob estudo.

(2) Definição da corrente de descarga nominal dos pára-raios:

Informações sobre a definição da corrente de descarga de um pára-raios foram apresentadas na seção III.5 – Capítulo III.

No caso de subestações conectadas a linhas blindadas a amplitude da corrente de descarga do pára-raios pode ser estimada por:

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

I_{MAX} Corrente de descarga que flui pelo pára-raios, em ampères.

I_C Corrente de coordenação do pára-raios

U_{CFO} Tensão disruptiva crítica de polaridade negativa da linha, em volts

V_r Tensão residual do pára-raios para impulso atmosférico (para o valor estimado da corrente de coordenação), em volts.

Z_0 Impedância de surto monofásica da linha, em ohms.

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

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

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

A Tabela V.1 apresenta, de modo conservativo, o percentual da corrente de descarga total que descarrega através do pára-raios no caso de uma linha blindada.

Tabela V.1 – Percentual das correntes descarregadas pelos pára-raios

Extensão da blindagem da linha a partir da subestação	Percentual da corrente de descarga atmosférica descarregada através do pára-raios
0,8 km	50
1,6 km	35
2,4 km	25

Linhas sem qualquer blindagem são geralmente limitadas a linhas com tensões nominais mais baixas (69 kV e abaixo), e/ou linhas localizadas em áreas de baixa densidade de descargas atmosféricas para a terra.

A probabilidade dos pára-raios instalados em subestações de baixa tensão estarem sujeitos a altas correntes e taxas de crescimento pode ser elevada em áreas de alta densidade de descarga atmosférica para a terra. Nestes casos, a corrente de coordenação não deve ser inferior a 20.000 A.

Para linhas localizadas em áreas de baixa densidade de descarga atmosférica para terra, as correntes de coordenação podem ser similares àquelas para linhas completamente blindadas em áreas de alta densidade de descargas para terra.

A experiência prática tem demonstrado que pára-raios com corrente de descarga nominal de 10 kA têm sido freqüentemente utilizados pelas empresas concessionárias de energia em sistemas com tensão operativa até 362 kV. Acima desse nível de tensão, tem-se utilizado somente pára-raios de 20 kA.

No caso de sobretensões de manobra, a corrente conduzida por um pára-raios é uma função complexa das características do pára-raios e do sistema. A impedância efetiva vista pelo pára-raios durante um surto de manobra pode variar desde algumas centenas de ohms para uma linha aérea, até dezenas de ohms para pára-raios conectados próximos a cabos isolados e grandes bancos de capacitores. Nestes dois casos, a corrente do pára-raios e a energia resultante variam significativamente para uma dada amplitude e duração de surto de manobra.

No caso de pára-raios de ZnO conectados a linhas aéreas, as correntes de coordenação para sobretensões de manobra recomendadas estão apresentadas na Tabela V.2.

Tabela V.2 - Correntes de coordenação para sobretensões de manobra

Máxima tensão do sistema (kV _{ef})	PR Classe Estação (A _{Crista})	PR Classe Intermediária (A _{Crista})
3 - 150	500	500
151-325	1000	---
326-900	2000	---

(3) Determinação da capacidade de absorção de energia dos pára-raios

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

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

Para uma especificação adequada dos pára-raios, ou em casos de sistemas mais críticos, estudos específicos envolvendo simulações computacionais devem ser realizados, de modo a se obter as máximas energias a serem absorvidas pelos pára-raios. A partir desses estudos, é definida a capacidade mínima de absorção de energia dos pára-raios, que deve ser maior do que as energias máximas obtidas nos estudos. No caso de pára-raios aplicados a sistemas de Extra Alta Tensões deve-se avaliar principalmente as energias absorvidas devido aos surtos de manobra.

Um fator importante que deve ser considerado quando do estudo da absorção de energia devido a manobras de bancos de capacitores, é a relação entre a capacidade de absorção de energia e a corrente de descarga que flui pelo pára-raios, pois a partir de uma dada corrente de descarga (definida pelos fabricantes) há uma redução na capacidade de absorção de energia dos pára-raios.

Em muitas das vezes, a realização de estudos computacionais mais específicos não é de fácil implementação. Neste caso, conhecidos os níveis de proteção dos pára-raios, as energias absorvidas por esses podem ser estimadas pelas equações apresentadas na Seção III.5 – Capítulo III. Utilizando-se as equações propostas e conhecendo-se a tensão nominal do pára-raios, é possível estimar, de uma forma conservativa, as energias absorvidas pelos pára-raios em kJ/kV da tensão nominal. No entanto, deve-se ressaltar que as informações obtidas são para fins orientativos.

Na Tabela V.3 são apresentados os valores sugeridos pela referência /1/ para serem aplicados na equação descrita no item 4.2 – Seção III.5 – Capítulo III, quando da realização de estudos para energização e religamentos de linha.

Tabela V.3 – Valores utilizados para estudos de energização e religamentos de linha /1/

Tensão máxima operativa do sistema (kV)	Impedância de surto da linha (Ω)	Sobretensão prospectiva sem o pára-raios U_L (kV)
$U_m < 145$	450	3,0
$145 \leq U_m \leq 345$	400	3,0
$362 \leq U_m \leq 525$	350	2,6
$U_m = 765$	300	2,2

Pára-raios instalados na entrada das subestações podem ser submetidos a maiores níveis de energia quando do aumento da isolação das linhas.

De um modo geral, as empresas concessionárias de energia vêm adotando no Brasil pára-raios classe 2 ou 3 de descarga de linhas de transmissão (DLT) para sistemas com máxima tensão operativa até 145 kV; pára-raios classe 3 para sistemas de 145 kV a 242 kV; pára-raios classes 3 ou 4 para sistemas de 362 kV e pára-raios classe 5 para sistemas com tensões operativas acima de 460 kV.

Tem sido observado que, em muitas das aplicações, os níveis de energia requeridos pelos usuários encontram-se acima dos níveis realmente necessários para uma dada condição de sistema, havendo a necessidade de se reavaliar os critérios atualmente utilizados.

Por outro lado, a maioria dos usuários vêm definindo em suas especificações técnicas a classe de descarga de linhas de transmissão requerida pela norma IEC 60.099-4. Tal critério pode levar a erros consideráveis em relação e energia requerida, devido a existência, para uma mesma classe de descarga de linhas, de uma faixa considerável de energias para os diferentes fabricantes.

Por exemplo para a classe 2, segundo a IEC, existe uma faixa de variação na capacidade de absorção de energia para os pára-raios de 2,9 a 4,5 kJ / kV nominal. Da mesma forma, para a classe 3 a faixa está entre 4,2 a 8,0 kJ / kV nominal.

De forma a se obter os valores de energia desejáveis, as especificações técnicas devem conter a capacidade mínima de absorção de energia requerida para os sistemas, associada ou não à classe de descarga de linhas de transmissão.

De uma forma geral, a experiência de campo tem demonstrado que pára-raios com capacidade de absorção de energia mínima de 3,5 kJ / kV nominal são adequados para a maioria dos sistemas com tensões nominais até 138 kV, mesmo considerando a presença de bancos de capacitores. Para sistemas com tensões nominais de 230 kV, pára-raios com uma capacidade de absorção de energia mínima de 7,0 kJ / kV nominal atendem à maioria dos sistemas.

Cabe ressaltar, no entanto, que as informações acima são orientativas e com base em experiências de campo. Energias menores podem ser adequadas para alguns sistemas. Da mesma forma, maiores energias podem ser necessárias para sistemas mais críticos.

A seguir são apresentados os resultados de um estudo realizado para estimar as energias absorvidas pelos pára-raios para sobretensões atmosféricas e de manobra em um sistema de 145 kV. Os resultados apresentados foram obtidos a partir das equações apresentadas na Seção III.5 – Capítulo III, para as faixas máximas para os valores de tensão residual sugeridos pela norma técnica IEC 60.099-4. Foram consideradas as seguintes condições para o sistema:

- Tensão disruptiva crítica da linha, polaridade negativa: 760 kV
- Impedância transitória da linha de transmissão: 450 Ω
- Número de linhas conectadas: N = 1
- Tempo total de duração da descarga atmosférica: 300 μ s
- Sobretensão esperada para a energização da linha: 3,2 pu = 379 kV
- Comprimento da linha de transmissão: 300 kms
- Características do pára-raios utilizado no estudo:
 - Tensão nominal: 120 kV
 - Máxima tensão contínua de operação: 96 kV
 - Corrente de descarga nominal: 10 kA
 - Capacidade de absorção de energia: 4,5 kJ/kV - $I_A \leq 950$ A
 - Tensão residual para impulso íngreme: 339 kV – 10 kA
 - Tensão residual para impulso atmosférico: 312 kV – 10 kA
 - Tensão residual para impulso de manobra: 239 kV – 0,5 kA

Uma síntese dos resultados obtidos está apresentada nas Tabelas V.4 a V.6.

Tabela V.4 – Resultados do estudo para sobretensões atmosféricas

Tensão nominal (kV)	Tensão residual (kV)	Relação Un / Ures	Energia (kJ)	Energia (kJ / kV)
120	276 ⁽¹⁾	2,30	142,3	1,19
	312	2,60	148,5	1,24
	396 ⁽²⁾	3,30	156,1	1,30

(1) Valor mínimo de tensão residual dentro da faixa de valores máximos sugeridos pela IEC 60.099-4;

(2) Valor máximo de tensão residual dentro da faixa de valores máximos sugeridos pela IEC 60.099-4.

Tabela V.5 – Resultados do estudo para sobretensões devido a energização e religamento de linhas de transmissão

Tensão Nominal (kV)	Tensão residual (kV)	Relação Un / Ures	Energia (kJ)	Energia (kJ / kV)
120	240,0 ⁽¹⁾	2,00	148,1	1,23
	239,0	1,99	148,6	1,24
	312,0 ⁽²⁾	2,60	92,7	0,77

(1) Valor mínimo de tensão residual dentro da faixa de valores máximos sugeridos pela IEC 60.099-4;

(2) Valor máximo de tensão residual dentro da faixa de valores máximos sugeridos pela IEC 60.099-4.

Tabela V.6 – Resultados do estudo para sobretensões devido a manobras de bancos de capacitores

Corrente de curto (kAef)	Potência do Banco (MVA _r)	Energia Absorvida (kJ)	Corrente pelo PR's (kA)	kJ/kV corrigida
15	10,0	0,56	1,49	3,91
	15,0	0,85	1,83	3,58
	20,0	1,13	2,11	3,30
20	10,0	0,56	2,11	3,30
	15,0	0,85	2,59	2,83
	20,0	1,13	2,99	2,43
30	10,0	0,56	2,59	2,83
	15,0	0,85	3,17	2,25
	20,0	1,13	3,66	1,77

Dos resultados apresentados nas tabelas pode-se verificar que:

- No caso da incidência de descargas atmosféricas (Tabela V.4) verifica-se um aumento da energia absorvida pelos pára-raios com o aumento da tensão residual.
- Descargas atmosféricas incidindo ao longo de uma linha de transmissão em um ponto distante da subestação conectada a linha, não são significativas para a definição da capacidade de absorção de energia dos pára-raios instalados nas subestações.
- Para manobras devido ao religamento ou energização da linha (Tabela V.5) verifica-se a redução da energia absorvida pelos pára-raios com o aumento da tensão residual. Portanto, pára-raios de menor tensão nominal geralmente absorvem uma maior quantidade de energia.
- Considerando-se a possibilidade de rejeição de carga durante a primeira operação de energização da linha de transmissão, com uma segunda energização ocorrendo em um pequeno intervalo de tempo devido ao religamento automático, a energia total absorvida pelo pára-raios durante as operações de manobra pode ser considerada como a soma das energias absorvidas durante cada operação: neste caso, 297,2 kJ, correspondente a uma energia total de 2,48 kJ / kV nominal do pára-raios. Mesmo sendo bastante conservativo ao se considerar a energia absorvida pelo pára-raios devido a sobretensão temporária proveniente da rejeição de carga como sendo equivalente a energia absorvida durante a energização da linha, tem-se uma energia total de 445,8 kJ, equivalente a 3,72 kJ / kV da tensão nominal do pára-raios.
- Para manobras de banco de capacitores (Tabela V.6) a corrente que circula pelos pára-raios quando da manobra dos bancos aumenta com o aumento da

corrente de curto-circuito do sistema e com o aumento da potência do banco de capacitores. O valor de corrente obtido é fundamental para a verificação da capacidade de absorção de energia e deve ser comparado com o valor máximo declarado pelo fabricante, para a condição de máxima capacidade de absorção de energia. A relação entre a corrente obtida e a corrente máxima declarada pelo fabricante deve ser considerada para a obtenção da capacidade de absorção de energia corrigida em função do aumento da corrente (Ver Figura III.9, Capítulo III – Seção III.5).

(4) Requerimentos de suportabilidade a correntes de falta:

Havendo a falha do pára-raios circulará por esse uma corrente de falta, correspondente a corrente de curto-circuito do sistema.

De modo a evitar riscos às pessoas e aos demais equipamentos instalados nas suas proximidades, os pára-raios devem ser projetados para suportar mecanicamente os efeitos das correntes de curto-circuito. No caso de pára-raios com invólucro de porcelana ou poliméricos que apresentem o dispositivo de alívio de sobrepressão esse dispositivo deve atuar, de modo a evitar a fragmentação ou explosão do invólucro. No caso de pára-raios poliméricos sem espaçamentos internos de ar, esses devem suportar mecanicamente os esforços da corrente de curto-circuito sem liberação ou desprendimento de sua parte ativa.

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

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

I_{FALTA} Corrente de curto-circuito do sistema no ponto de instalação do PR's, (kA_{ef})
 P_{CC} Potência de curto-circuito do sistema no ponto de instalação do PR's (MVA)
 V_n Tensão nominal do sistema (kV).

Desta forma, os pára-raios devem ser dimensionados em função da máxima corrente de curto-circuito do sistema, no ponto de instalação do pára-raios.

Pára-raios com correntes suportáveis de 25 kA e 40 kA têm sido mais freqüentemente utilizados por empresas concessionárias de energia elétrica no Brasil. Em alguns casos, correntes de 63 kA são requeridas.

Geralmente tem sido constatado na prática, valores especificados geralmente muito acima dos níveis de curto-circuito dos sistemas onde os equipamentos estão instalados. Tal situação eleva os custos dos pára-raios, sendo mais crítica quando da utilização de pára-raios de porcelana, visto que em muitas das vezes, a

operação correta do projeto do dispositivo de alívio de sobrepressão está diretamente relacionada com a corrente de curto-circuito que poderá fluir através do pára-raios.

(5) Condições de serviço (ambientais)

Quando da especificação de um pára-raios para aplicação em subestações, deve-se levar em consideração as condições ambientais.

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

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

Pára-raios com invólucros de porcelana apresentam, geralmente, uma distância de escoamento da ordem de 20 mm / $kV_{\text{fase-fase}}$. Pára-raios com invólucros poliméricos apresentam valores de distância de escoamento normalmente superiores a 25 mm / $kV_{\text{fase-fase}}$.

(6) Características de proteção dos pára-raios para sobretensões transitórias de frente rápida e de frente lenta:

As características de proteção dos pára-raios dependem do tipo de pára-raios utilizado e devem ser definidas em função dos níveis de suportabilidade dos equipamentos a serem protegidos; do grau de importância dos equipamentos e das linhas onde os pára-raios serão aplicados; e do tipo de instalação do pára-raios em relação ao equipamento a ser protegido.

As características de proteção dos pára-raios para surtos atmosféricos e de manobra são apresentados pelos fabricantes em seus catálogos técnicos. No entanto, na ausência de tais informações, podem ser utilizados os valores apresentados nas Tabelas III.1 a III.3 – Seção III.3.2, dependendo do tipo de pára-raios considerado.

A tensão residual dos pára-raios aumenta com o aumento da amplitude da corrente de descarga e apresenta uma pequena dependência com a temperatura. Um aspecto importante que deve ser destacado, é a sua dependência com a frequência, ou seja, para uma mesma amplitude de corrente a tensão residual aumenta com a diminuição do tempo de frente do surto (aumento da frequência).

A Figura V.7 apresenta a curva de um fabricante considerando a tensão residual para impulsos com frente íngreme, atmosférico e de manobra, para pára-raios com tensões nominais de 54 a 360 kV.

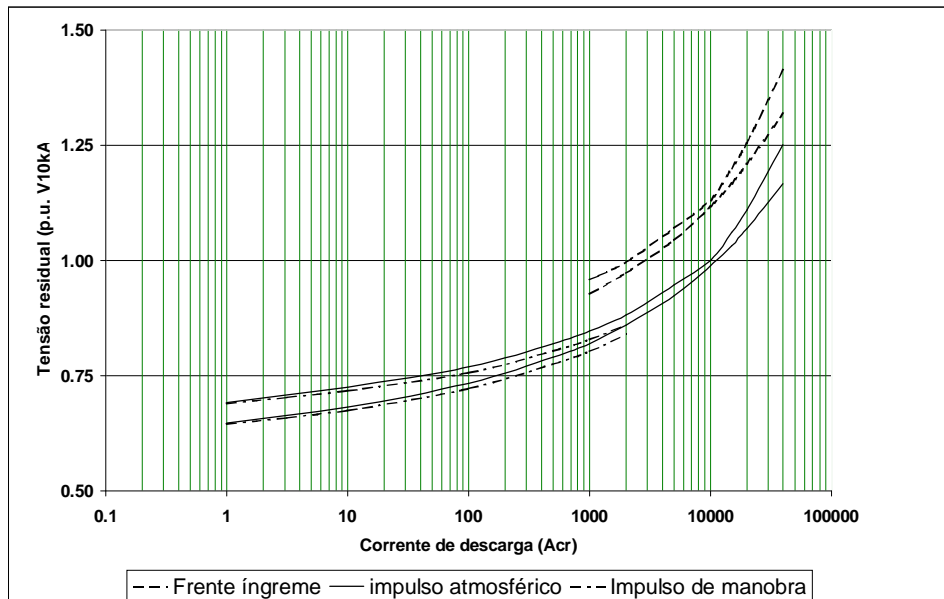


Figura V.7 – Curva da tensão residual versus corrente de descarga

O efeito da dependência da tensão residual com a freqüência, onde para uma mesma amplitude de corrente de descarga a tensão residual aumenta com a redução do tempo de frente do impulso é apresentado na Figura V.8.

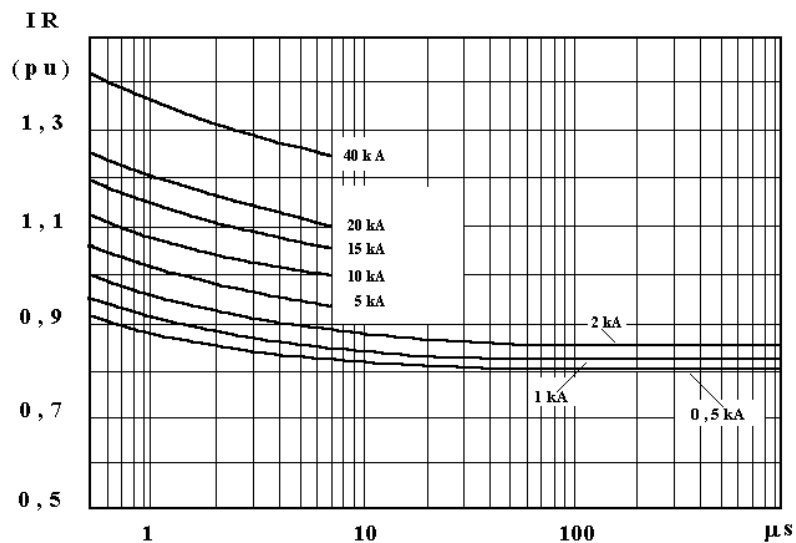


Figura V.8 - Variação da tensão residual em função do tempo de frente da corrente de impulso

V.3.2 Seleção ou determinação da suportabilidade da isolação;

Procedimentos para a determinação da suportabilidade da isolação são apresentados no Capítulo I.

V.3.3 Avaliação da coordenação do isolamento

A efetiva proteção dos equipamentos dentro de uma subestação é alcançada através do correto posicionamento dos dispositivos de proteção. Geralmente se utilizam pára-raios e as subestações são protegidas por cabos de blindagem para evitar a incidência de descargas atmosféricas diretas sobre os barramentos e os equipamentos da subestação.

Os pára-raios geralmente são utilizados na entrada da subestação e próximos aos equipamentos principais. A necessidade de pára-raios próximos aos equipamentos principais está associada a eventual elevação da sobretensão em relação a tensão no terminal do pára-raios, em virtude das características de propagação do surto no interior da subestação (frente de onda de poucos μ s e velocidade de propagação próxima a da luz no vácuo). As reflexões nos diversos pontos de descontinuidade dos barramentos (conexões com outros barramentos, terminações e conexões com equipamentos) e as distâncias entre os pára-raios e os equipamentos podem fazer com que a tensão alcance níveis perigosos em alguns pontos da subestação.

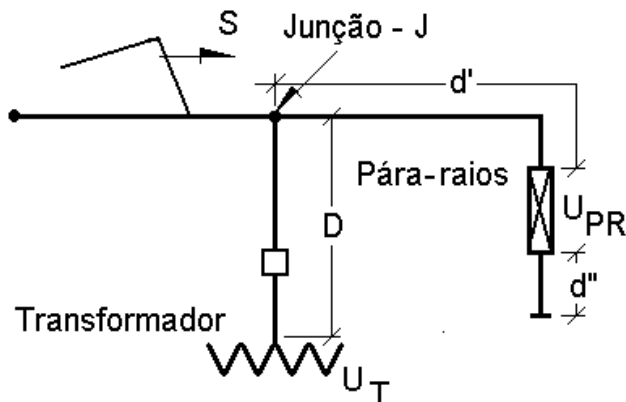
Este fato deve ser evitado localizando-se os pára-raios em locais apropriados, inclusive aumentando a sua quantidade, caso necessário.

Nesta seção, será apresentado o efeito da distância de separação entre o pára-raios e o equipamento protegido, conforme mostrado na Figura V.9.

Os níveis de proteção dos pára-raios acrescidos da tensão a ser adicionada devido aos efeitos dos cabos de conexão e da distância de separação entre o pára-raios e o equipamento protegido, estabelecem as tensões impulsivas nos terminais dos equipamentos protegidos.

Existem diferentes metodologias para a determinação dessas tensões:

- (1) Método simplificado;
- (2) Método sugerido pelo Guia de Aplicação de pára-raios;
- (3) Através de simulação computacional, utilizando-se programas digitais.



- D Distância de separação entre a "Junção J" e o terminal do transformador (m);
- J Ponto comum entre as conexões do equipamento protegido, do pára-raios e a linha sob surto;
- S Taxa de crescimento do surto equivalente incidente na "Junção J" (kV/μs)
- U_T Tensão nos terminais do equipamento protegido (kV)
- U_{PR} Tensão residual do pára-raios (kV)

Figura V.9 – Representação esquemática da distância entre o pára-raios e o equipamento a ser protegido.

De acordo com o método simplificado, a tensão nos terminais do equipamento protegido pode ser estimada por:

$$U_T = U_{PR} + 2 \cdot S \cdot \frac{D}{v}$$

- U_T Tensão nos terminais do equipamento protegido (kV)
- U_{PR} Tensão residual do pára-raios (kV)
- S Taxa de crescimento do surto de tensão (kV / μs)
- D Distância entre o pára-raios e o equipamento a ser protegido (m)
- v velocidade de propagação da onda de tensão (v = 300 m/μs)

É aconselhável adicionar à tensão residual do pára-raios o efeito dos cabos de conexão. Neste caso, pode-se considerar a seguinte equação:

$$U_T = U^*_{PR} + 2 \cdot S \cdot D/V$$

U^*_{PR} Tensão residual do pára-raios (kV) acrescida do efeito das conexões

$$U^*_{PR} = U_{RES} + L \cdot (di/dt) \cdot m$$

L Indutância dos cabos de conexão – valor típico de 1,3 μ H / m
 di/dt Taxa de crescimento da corrente (kA / μ s) $\approx 2 \cdot S / Z_0$
 m Comprimento total dos cabos de conexão (metros)

Para a determinação da taxa de crescimento da tensão em linhas providas com cabos pára-raios, pode-se considerar a ocorrência de uma descarga de retorno “**backflashover**” nas últimas estruturas antes da chegada a subestação. Neste caso, a taxa de crescimento é obtida pela equação abaixo:

$$S = \frac{U_{50(-)} + 3 \cdot \delta}{t}$$

S Taxa de crescimento da tensão incidindo na subestação (kV/ μ s);
 $U_{50(-)}$ Tensão crítica de descarga para a cadeia de isoladores, para a polaridade negativa (kV);
 δ Desvio padrão, considerado como sendo igual a 3% da tensão crítica de descarga;
 t Tempo considerado no estudo (μ s).

O procedimento adotado pelo Guia de Aplicação de pára-raios foi desenvolvido pela Comissão CE 37-4 do COBEI , a partir do Guia de Aplicação de Pára-raios da ANSI referência ANSI C62.22 – Apêndice C. Os procedimentos para utilização desse método, bem como exemplos de aplicação encontram-se no Anexo desse Capítulo. Maiores informações poderão ser obtidas junto a CE 37-4 do COBEI. Este estudo será inserido no Guia de Aplicação de Pára-raios que deverá entrar em votação ainda este ano.

A análise do comportamento das tensões impulsivas nos terminais dos equipamentos através da **utilização de programas digitais** permite, via de regra, uma maior precisão nas informações obtidas. No entanto, cuidados devem ser tomados quando da modelagem do sistema a ser avaliado, de modo a se obter os resultados desejados.

Maiores informações quanto a aplicação do programa ATP e a modelagem do sistema para se avaliar as tensões impulsivas nos terminais dos equipamentos das subestações, podem ser obtidas no Capítulo X – Injeção de Surtos em Subestações e no Capítulo XII – Modelagem de Pára-raios de ZnO em Estudos de Sobretensões da referência /2/.

De acordo com a referência, a simulação dos componentes envolvidos em estudos de propagação de surtos em subestações inclui os seguintes modelos:

- Modelo do surto a ser injetado;
- Modelo da linha de transmissão;
- Modelo dos barramentos;
- Modelos dos equipamentos da subestação.

Nos estudos de injeção de surtos em subestações, atenção especial deve ser dada a modelagem do pára-raios, cujas as características devem ser corrigidas para as frentes de onda mais rápidas, com base nas informações apresentadas na Figura V.8 e que permitem a correção da característica da tensão x corrente dos impulsos de corrente 8 / 20 μ s para frentes de onda mais rápidas. Uma outra possibilidade consiste na utilização do modelo de ZnO para surtos rápidos desenvolvido pelo IEEE Working Group 3.4.11 /3/

Exemplo 2 – Considere um sistema de 145 kV, cujo transformador e o pára-raios estejam eletricamente conectados, apresentando as seguintes características:

- Tensão suportável nominal para impulso atmosférico do trafo: 550 kV
- Tensão suportável de impulso cortado na frente para o trafo: 633 kV
- Taxa de crescimento do surto de tensão: 1028 kV/ μ s
- Impedância transitória na entrada da subestação: 450 ohms
- Impedância transitória do barramento onde está sendo analisado o efeito da distância: 350 ohms
- Comprimento dos cabos de conexão do pára-raios: 6 metros
- Características do pára-raios:
 - Tensão nominal: 120 kV
 - Tensão residual para impulso de corrente íngreme 10 kA: 339 kV
 - Tensão residual para impulso atmosférico – 10 kA: 312 kV
 - Tensão residual para surto de manobra – 0,5 kA: 239 kV

De forma a avaliar os métodos apresentados, bem como o efeito da tensão residual dos pára-raios e o seu posicionamento na coordenação do isolamento do sistema, foi realizado um estudo considerando-se os métodos descritos, bem como a simulação computacional utilizando-se o programa ATP Draw.

Para os dois primeiros métodos utilizados, foi considerada a tensão residual para impulso de corrente íngreme do pára-raios (339 kV) acrescida do efeito dos cabos de conexão ($L \cdot di/dt$). A taxa de crescimento considerada para a corrente é de 4,6 kA / μ s.

A simulação computacional foi realizada considerando-se uma fonte de tensão tipo rampa com forma de onda 1 / 50 μ s e amplitude de 2056 kV, correspondente a duas vezes o valor do surto de tensão desejado. A fonte de tensão foi conectada em série com uma impedância de surto monofásica de 450 Ω , correspondente a impedância de surto do barramento da subestação. Esse modelo garante a injeção de uma tensão com amplitude de 1028 kV incidindo na subestação.

De forma a considerar a dependência da tensão residual com a frequência, a curva “tensão residual x corrente de descarga do pára-raios” foi obtida a partir do modelo de ZnO para surtos rápidos proposto pelo “IEEE Surge Protective Devices Committee Working Group”, baseado nos valores de tensão residual para impulsos atmosférico (10 kA) e de manobra (0,5 kA), e considerando-se as características e dimensões físicas dos pára-raios. Os erros entre os valores medidos e simulados com o modelo ficaram na faixa de $\pm 2\%$. O transformador foi representado no estudo por uma capacitância de 3.000 pF.

A variação da tensão nos terminais do transformador devido a distância de separação entre o pára-raios e o transformador é apresentado na Figura V.10.

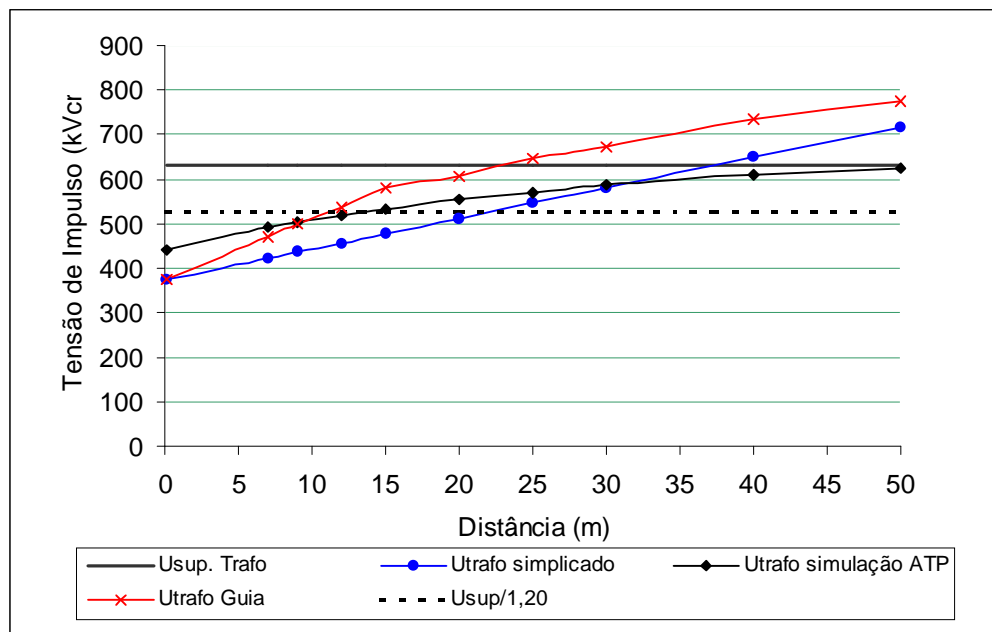


Figura V.10 - Variação da tensão nos terminais do transformador devido a distância entre o pára-raios e o transformador

Da Figura acima é possível verificar que no caso da incidência de uma onda de tensão com uma taxa de crescimento de 1.028 kV/ μ s, resultante de uma descarga disruptiva nas últimas torres antes da chegada à subestação, **o pára-raios considerado** oferecerá uma proteção adequada ao transformador ou outro equipamento protegido pelo pára-raios, para distâncias de separação em relação

ao equipamento considerado de aproximadamente 12 metros, considerando-se o comprimento dos cabos de conexão de 6 m. Estudos adicionais considerando o comprimento dos cabos de conexão de 3 m, mostrou uma proteção adequada dos pára-raios aos equipamentos protegidos para distâncias de separação em torno de 20 metros.

Considerando-se a distância entre o pára-raios e o transformador de 12 metros e o comprimento dos cabos de conexão entre os terminais do pára-raios e o barramento de AT / base aterrada da subestação de 6 metros, tem-se as seguintes relações de proteção para sobretensões de frente rápida e lenta (distância total de conexão da ordem 18 m):

- **Determinação da Margem de Proteção 1 (ondas rápidas):**

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

$TSIACF = 1,15 \cdot TSNIA \rightarrow TSIACF = 1,15 \cdot 550 \rightarrow TSIACF = 633 \text{ kV}$
 $NPFO + \Delta V = 519 \text{ kV}$ – Valor obtido durante a simulação computacional.

$$MP_1 = \frac{TSIACF}{NPFO + \Delta V} \qquad MP_1 = \frac{633}{519} \qquad MP_1 = 1,22 = 22\%$$

- **Determinação da Margem de Proteção 3 (impulsos de manobra):**

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

$TSNIM = 0,83 \cdot TSNIA \rightarrow TSNIM = 457 \text{ kV}$
 $NPIM = 239 \text{ kV}$

$$MP_3 = \frac{TSNIM}{NPIM} \qquad MP_3 = \frac{457}{239} \qquad MP_3 = 1,91 = 91\%$$

Dos resultados obtidos na simulação pode-se constatar a importância das características de proteção dos pára-raios e do seu posicionamento em relação ao(s) equipamento(s) protegido(s). Maiores valores de tensão residual dos pára-raios, bem como maiores distâncias dos pára-raios em relação aos equipamentos protegidos reduzem as margens de proteção.

A simulação considerou uma situação de tensão incidente na subestação bastante crítica, como por exemplo, a ocorrência de “*backflashover*” nas cadeias de isoladores situadas nas últimas torres próximas a subestação. Esta situação provoca surtos de tensão com taxas de crescimento bastante íngremes. Para surtos incidentes na subestação com menores taxas de crescimento, a proteção oferecida pelo pára-raios será ainda maior.

A Tabela V.7 apresenta uma síntese das tensões resultantes obtidas no terminal do transformador em função da distância entre o pára-raios e o transformador (ou outro equipamento qualquer a ser protegido), e as respectivas margens de proteção obtidas:

Tabela V.7 - Síntese dos resultados obtidos na simulação

Distância (m)	TSNIACF (kV)	Tensão resultante nos terminais (kV)	Margem de segurança (%)
0,1 ¹	632,5	441,2	43,4 %
7,0	632,5	491,8	28,6 %
9,0	632,5	503,1	25,7 %
12,0	632,5	518,6	22,0 %
15,0	632,5	532,5	19,0 %
20,0	632,5	553,5	14,3 %
35,0	632,5	570,6	10,9 %
30,0	632,5	586,5	7,8 %
40,0	632,5	609,7	3,7 %
50,0	632,5	624,5	1,1 %

¹ Considera-se a instalação do pára-raios junto a bucha do transformador, eliminando o efeito da distância de separação. Neste caso, foi considerado somente o efeito dos cabos de conexão de 6 metros.

Da tabela verifica-se que o pára-raios avaliado oferece uma proteção adequada aos equipamentos protegidos para distâncias de separação até aproximadamente 12 metros (considerando os cabos de conexão com comprimento de 6 metros).

O estudo apresentado considera a instalação do pára-raios próximo a um transformador. No caso da instalação de outro pára-raios na entrada de linha, esta proteção será garantida para maiores distâncias, conforme pode ser verificado na Tabela V.8, que apresenta os resultados obtidos para as tensões resultantes no ponto de instalação do pára-raios e nos terminais do transformador estando o pára-raios a uma distância de 20 metros, com outro pára-raios do mesmo tipo instalado na entrada da subestação:

Tabela V.8 – Tensões nos terminais dos transformadores

Distância entre PR's e trafo (m)	PR's na entrada da Subestação	Tensão PR's mais conexão (kV)	Tensão no Transformador (kV)
20	NÃO	391,4	553,5
20	SIM	358,0	492,0

Considerando-se o pára-raios na entrada da subestação, tensão nos terminais do transformador para uma distância entre o pára-raios de proteção do transformador e o transformador de 20 metros, é reduzida de 553,5 kV para 492,0 kV, aumentando a margem de proteção de 14,3% para 28,6%.

V.4 Referências bibliográficas

- /1/ ABB, "Selection Guide for ABB HV Surge Arresters", Technical Information Publ. SESWG/A 2300 E, Edition 2, 1991.
- /2/ Pereira, M. P. & Amon Filho, J., "ATP Alternative Transient Program", Curso básico sobre a utilização do ATP, Novembro 1996.
- /3/ Velasco, J. A. M., "Computer Analysis of Electric Power systems Transients – Selected Readings", IEEE, 1997, pp 287-294.
- /4/ Ohio Brass, "Application Guide – DynaVar Metal-Oxide Surge Arresters", Ohio Brass Technical Bulletin EU1091-HR, 1990.
- /5/ CE 37-4, "Guia de Aplicação de Pára-raios" - Draft

Método sugerido pelo Guia de Aplicação de Pára-raios – Texto original desenvolvido e proposto pela Comissão CE 37-4 do COBEI / ABNT.

ANEXO D

Cálculo das Distâncias de Separação de Pára-Raios a Óxido Metálico sem Centelhadores

D₁. Objetivo

O objetivo deste anexo é prover um método relativamente simples para o cálculo das máximas distâncias de separação permissíveis entre os pára-raios a óxido metálico sem centelhadores e os equipamentos a serem protegidos.

D₂. Introdução

A localização mais eficaz de um pára-raios é junto aos terminais do equipamento a ser protegido. Por várias razões, os pára-raios tem que ser instalados, algumas vezes, a uma distância do equipamento a ser protegido, ou em outras vezes um conjunto de pára-raios pode ser utilizado para proteger mais de um equipamento.

Ao se instalar pára-raios distantes do equipamento a ser protegido a margem de proteção oferecida é reduzida. Dependendo de uma série de fatores, o transitório de tensão no equipamento a ser protegido pode atingir níveis superiores a duas vezes o nível de proteção do pára-raios. Uma análise deve ser feita para determinar o quanto distante um pára-raios pode ser instalado do equipamento e ainda prover uma proteção adequada.

D₃. Método de Estudo

Esse anexo detalha um procedimento simplificado para o cálculo das distâncias de separação aceitáveis para configurações operativas de subestações que resultam em arranjo em barra simples. Sua aplicabilidade é demonstrada através de dois exemplos:

- (1) Uma subestação constituída de uma única linha aérea terminada em um único transformador.
- (2) Uma subestação com várias linhas e dois transformadores.

Um processo de redução é utilizado no segundo exemplo, de modo a transformar uma configuração complexa em configuração equivalente a uma subestação de uma única linha e um único transformador, que pode ser analisada como mostrado no primeiro exemplo.

O procedimento de coordenação de isolamento proposto utiliza a curva mostrada na *Figura D8*, gerada a partir de estudos utilizando *Programas de Transitórios Eletromagnéticos*, em específico, o *Eletromagnetic Transients Program – EMTP*. A *Equação D1* representa a curva mostrada na *Figura D8*.

Todos os estudos por computador, para definição desta equação e correspondente figura foram realizados em subestações com uma única linha e transformador, com tensões de sistema variando de 69 kV até 765 kV. É conveniente ressaltar que a curva na *Figura D8* é uma curva média utilizando os resultados provenientes de estudos. Para a sua definição foi incluído o efeito da tensão de frequência fundamental. Esta curva é considerada como válida para distâncias de separação não superiores a 100 m. Valores de capacitância de surto do transformador entre 1000 pF e 5000 pF não afetam materialmente os efeitos da separação.

Estudos utilizando ferramentas analíticas tais como o *EMTP - ATP* são recomendados para subestações com arranjos mais complexos. Não é a intenção deste anexo prover a orientação na seleção de casos para estudo ou na interpretação de resultados obtidos a partir da utilização do *Programa EMTP - ATP* ou qualquer outra ferramenta analítica.

D4. Definição dos Símbolos

Os símbolos usados para cálculo da distância de separação em pára-raios são definidos como a seguir:

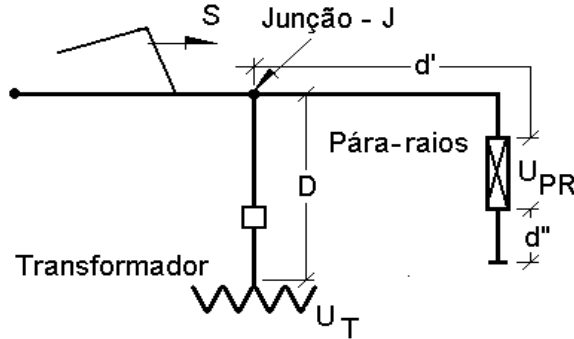


Fig. D1 – Definição de Símbolos

- TSNIA - Tensão suportável nominal de impulso atmosférico do transformador (kV)
- c - Velocidade de propagação do surto em condutores aéreos ($m/\mu s$)
- TSNIAC - Tensão suportável nominal de impulso atmosférico cortado na frente do transformador (kV)
 $TSNIAC = 1,15 \times TSNIA$
- d' - Comprimento do condutor entre a "Junção - J" e o "Terminal do pára-raios" (m)
- d'' - Comprimento do condutor entre o "Terminal de aterramento do pára-raios e o ponto de terra" (m)
- d - Comprimento total das conexões do pára-raios - $d'+d''$ (m)
- D - Distância máxima de separação entre a "Junção J" e o "Terminal do transformador" (m)
- di/dt - Taxa de crescimento do surto de corrente incidente ($kA/\mu s$)
 $di/dt = 2(S)/Z$
- J - Ponto comum entre as conexões do transformador, do pára-raios e a linha sob surto
- L - Indutância dos cabos de conexão do pára-raios (μH) ($1,3 \mu H/m$)
- N - Número de linhas efetivamente conectadas a subestação, incluindo a linha sob surto
- S' - Taxa de crescimento do surto incidente na linha de transmissão ($kV/\mu s$)
 (Adotar $11kV/\mu s$ por kV de MCOV até um máximo de $2000 kV/\mu s$)
- S - Taxa de crescimento do surto equivalente incidente na "Junção J" ($kV/\mu s$)
- NPROTFO - Nível de proteção do pára-raios para impulsos de frente íngreme a $1,0\mu s$ (kV)
- Na ausência de dados de fabricantes é possível utilizar o valor mostrado na Tabela 3.**
- UPR - Tensão através do pára-raios, incluindo a queda de tensão nos condutores de conexão (kV)
- UT - Máxima solicitação de tensão suportável pelo transformador (kV)
- $UT = TSNIAC/1,15$ - Para impulsos com tempo de frente inferior a $3\mu s$
- $UT = TSNIA/1,15$ - Para impulsos com tempo de frente superior a $3\mu s$

Nota:- Estas definições assumem uma margem de proteção de 15%.

Z - Impedância de surto das linhas de transmissão conectadas a subestação (Ω) (Ver Tabela 1)

D5. Exemplo 1 - Subestação com uma única Linha Transformador

O Exemplo 1 refere-se à Figura D1. Os parâmetros utilizados neste exemplo, relativos a um sistema em 145 kV, protegido por pára-raios com MCOV de 98 kV, estão apresentados a seguir:

$$\begin{aligned}TSNIA &= 550 \text{ kV} \\MCOV &= 98 \text{ kV} \\c &= 300 \text{ m}/\mu\text{s} \\D &= d'+d'' = 7,6 \text{ m} \\S' &= 11 \times MCOV \text{ Nominal} = 11 \times 98 = 1078 \text{ kV}/\mu\text{s} \\S &= S' \text{ (Uma única linha incidente)} \\NPROTFO &= 269 \text{ kV Para: MCOV} = 98 \text{ kV e Tempo de Frente} = 1,0 \mu\text{s}. \\&\text{Tempo de crista da tensão: } (269/1078) = 0,25 \mu\text{s} < 3 \mu\text{s} \\&\text{Logo: } U_T = TSNIA/1.15 \\Z &= 450 \Omega\end{aligned}$$

A partir destes dados procede-se aos seguintes cálculos:

$$\begin{aligned}TSNIAC &= 1.15 \times TSNIA = 1.15 \times 550 = 632.5 \text{ kV} \\di/dt &= 2.S/Z = 2.(1078)/450 = 4,79 \text{ kA}/\mu\text{s} \\L &= (d'+d'') 1.3 \mu\text{H}/\text{m} = 7.6 \times 1.3 = 10 \mu\text{H} \\U_{PR} &= U_R + L.(di/dt) = 269 + 10.(4,79) = 317 \text{ kV} \\U_T &= TSNIA/1.15 = 632.5/1.15 = 550 \text{ kV} \\U_T/U_{PR} &= 550/317 = 1.73\end{aligned}$$

O valor da abscissa correspondente a $U_T/U_{PR} = 1.73$ na Figura D8 é $D(S)/(C \times U_{PR}) = 0.25$

Resolvendo para: $D = 0.25 (c \times U_{PR}) / (S) = 0.25.(300 \times 317)/1078 = 22.1 \text{ m}$.

Esta é a distância máxima aceitável entre o pára-raios e o transformador.

D5.1 Distâncias de Separação Aceitáveis Calculadas.

Para tensões de sistema de 72.5 kV até 800 kV, foram calculadas distâncias de separação aceitáveis usando o procedimento acima, baseando-se nas seguintes considerações:

- Valores típicos de TSNIA.
- Pára-raios classe estação.
- MCOV nominais mínimas.
- Valores máximos para níveis de proteção para frente de impulso de 0,5 μs , conforme Tabela 3.

Deste modo, as distâncias de separação aceitável são dadas na Tabela 9, conforme Item 6.2.7 deste Guia.

NOTA:

Conforme mostrado no exemplo, para valores de frente de impulso superiores a 0,5 μs , por exemplo 1,0 μs , as distâncias de separação são superiores às mostradas na Tabela 9.

D6. Subestação com Várias Linhas e Dois Transformadores.

A Figura D2 mostra uma subestação com três linhas, dois transformadores e um conjunto de pára-raios. Para determinar a proteção contra surtos, adequada a ambos os transformadores com um único conjunto de pára-raios, a máxima distância de separação entre pára-raios e transformadores deve ser calculada considerando-se o surto incidente sobre cada uma das linhas.

Para usar o método deste anexo, a subestação multi-linhas com dois transformadores da Figura D2 deve ser reduzida a uma subestação de uma única linha e transformador similar à mostrada na Figura D1. O seguinte

procedimento detalha o método de redução. O procedimento deve ser repetido para cada transformador, enquanto se considera o surto incidente sobre cada linha separadamente. Hipóteses considerando desconexões de uma ou mais linhas devem ser investigadas a fim de se identificar os casos mais severos.

D6.1 Procedimento Passo a Passo para o Processo para a Redução da Subestação.

1º Passo:

Remover o transformador não considerado e identificar a linha sob surto.

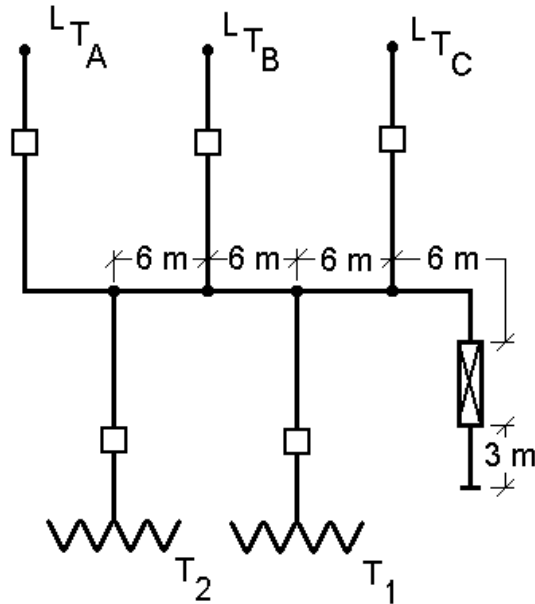


Fig. D2 – Um Exemplo de Subestação Multi-linha com dois Transformadores.

2º Passo:

- Identificar a "Junção J", ou seja, o ponto comum entre a conexão do transformador, a conexão do pára-raios e a linha sob surto.
- Identificar a "Conexão do pára-raios - d'", ou seja, a conexão entre a "Junção J" e o terminal do pára-raios que também pode incluir trechos do barramento.
- Identificar a "Distância de Separação - D", ou seja, a conexão entre a "Junção J" e o terminal do transformador que pode incluir trechos do barramento.

3º Passo:

Remover todas as linhas conectadas à "Conexão do pára-raios - d' "

4º Passo:

Determinar a "Taxa de Crescimento Equivalente da Tensão Incidente na "Junção J" - S"

$$S = \frac{3S'}{N + 2}$$

onde:

N - Equivale ao número total de linhas (incluindo a linha sob surto) remanescente após a aplicação do 3º Passo.

Deste modo, a subestação multi-linha com dois transformadores foi reduzida. Logo a *Distância de Separação Máxima Permissível - D*, pode ser calculada utilizando-se do procedimento mostrado no *Item D5 - Exemplo - 1*.

D6.2 Exemplo 2 – Subestação Multi-linha com dois Transformadores.

As *Figuras D2 - D7* são aplicadas para o desenvolvimento deste exemplo. Os parâmetros utilizados são relativos a um sistema de 145 kV, conforme apresentados a seguir:

TSNIA	= 550 kV
MCOV	= 98 kV
c	= 300 m/μs
d''	= 3 m
S'	= 11 x MCOV Nominal = 11 x 98 = 1078 kV/μs
NPROTFO	= 269 kV Para: MCOV = 98 kV e Tempo de Frente = 1,0 μs.
	Tempo de crista da tensão: (269/1078) = 0,25 μs < 3 μs
	Logo: $U_T = TSNIAC/1,15$
Z	= 450 Ω

D6.2.1 Redução da Subestação da Figura D2 - para um Surto Incidente na Linha A

1º Passo:

Remover o transformador não considerado - no caso o *Transformador T₂* - e identificar a linha sob surto, ou seja, a *Linha A*, conforme mostra a *Figura D3*.

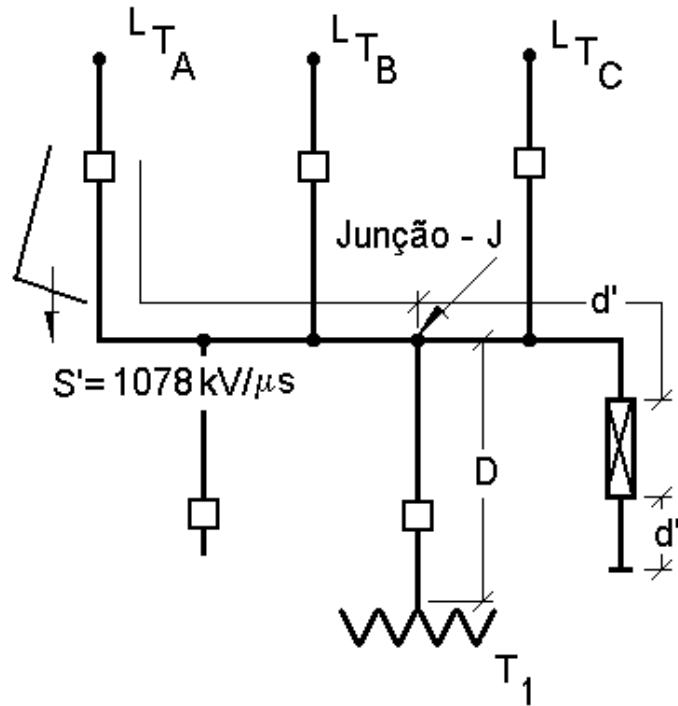


Fig. D3 – Subestação Multi-linhas com Dois Transformadores com Surto Incidente à Linha A. O Transformador T₂ não Considerado foi Removido.

2º Passo:

- a)- Identificar a "Junção J", ou seja, o ponto comum entre a conexão do transformador, a conexão do pára-raios e a linha sob surto. Na *Figura D3* o ponto onde as linhas se encontram.
- b)- Identificar a "Conexão do pára-raios - d'", ou seja, a conexão entre a "Junção J" e o terminal do pára-raios que também pode incluir trechos do barramento. Neste exemplo, para condição analisada, $d' = 12\text{ m}$
- c)- Identificar a "Distância de Separação - D", ou seja, a conexão entre a "Junção J" e o terminal do transformador que pode incluir trechos do barramento.

3º Passo:

Remover todas as linhas conectadas à "Conexão do pára-raios - d' ". Neste caso a *Linha C* o que resulta em número equivalente de linhas $N = 2$, conforme *Figura D4*.

4º Passo:

Determinar a "Taxa de Crescimento Equivalente da Tensão Incidente na "Junção J" - S

$$S = \frac{3S'}{N+2} = \frac{3 \times 1078}{2+2} = 809 \text{ kV}/\mu\text{s}$$

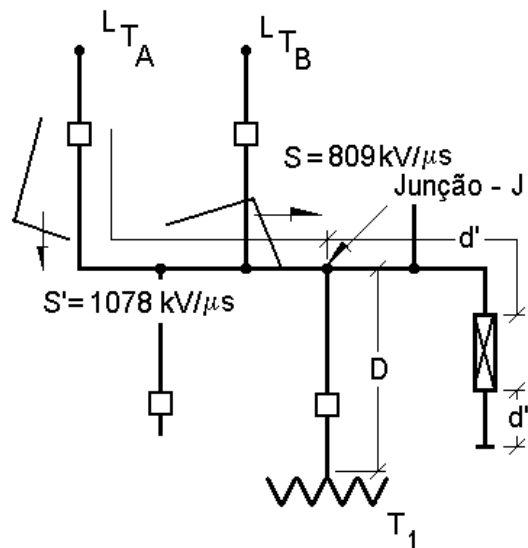


Fig. D4 – Subestação Multi-Linhas Dois Transformadores com Surto Incidente à Linha A, com Todas as Linhas Conectadas ao Condutor "d" Removidas.

Deste modo, a subestação multi-linhas é reduzida a uma subestação com uma única linha e transformador conforme mostra a *Figura D5*.

A partir dos dados originais e da subestação reduzida procede-se aos seguintes cálculos:

$$\begin{aligned} TSN_{IAC} &= 1.15 \times TNS_{IA} = 1.15 \times 550 = 632.5 \text{ kV} \\ di/dt &= 2 \cdot S/Z = 2 \cdot (809)/450 = 3.59 \text{ kA}/\mu\text{s} \\ L &= (d'+d'') \cdot 1.3 \mu\text{H}/\text{m} = 15 \times 1.3 = 20 \mu\text{H} \\ U_{PR} &= U_R + L \cdot (di/dt) = 269 + 20 \cdot (3.59) = 341 \text{ kV} \\ U_T &= TSN_{IAC}/1.15 = 632.5/1.15 = 550 \text{ kV} \\ U_T/U_{PR} &= 550/341 = 1.61 \end{aligned}$$

O valor da abscissa correspondente a $U_T/U_{PR} = 1.61$ na *Figura D8* é $D(S)/(C \times U_{PR}) = 0.17$

Resolvendo para: $D = 0.17 \cdot (c \times U_{PR}) / (S) = 0.17 \times (300 \times 341) / 809 = 21.5 \text{ m}$.

Esta é a máxima distância aceitável entre a "Junção J" - Ponto da Barra - e o Transformador T_1 estando a Linha A sob surto.

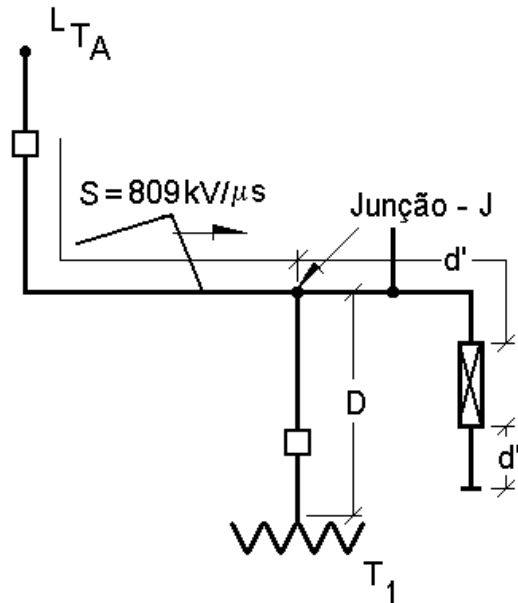


Fig. D5 – Subestação Multi-linhas Dois Transformadores com Surto Incidente à Linha A, Simplificada para uma Subestação com uma Única Linha e Transformador

1º Passo:

Remover o transformador não considerado - no caso o Transformador T_2 - e identificar a linha sob surto, ou seja, a Linha C, conforme mostra a Figura D6.

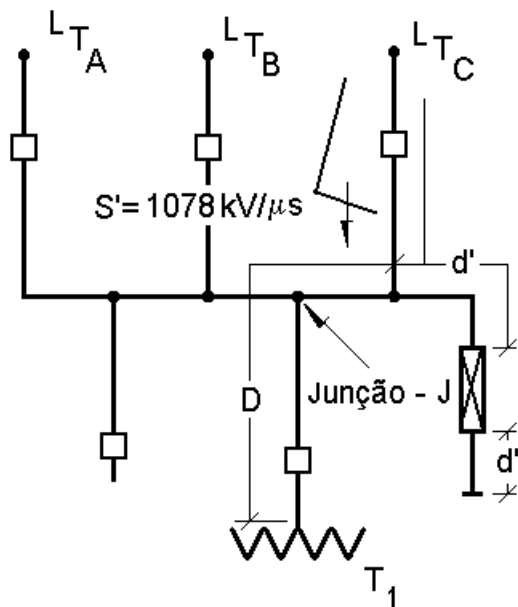


Fig. D6 – Subestação Multi-linhas com Dois Transformadores estando a Linha C sob surto. O Transformador T_2 não Considerado foi Removido.

2º Passo:

- a)- Identificar a "Junção J", ou seja, o ponto comum entre a conexão do transformador, a conexão do pára-raios e a linha sob surto. Na *Figura D6* o ponto onde as linhas se encontram.
- b)- Identificar a "Conexão do pára-raios - d' ", ou seja, a conexão entre a "Junção J" e o terminal do pára-raios que também pode incluir trechos do barramento.
- c)- Identificar a "Distância de Separação - D", ou seja, a conexão entre a "Junção J" e o terminal do transformador que pode e inclui, neste caso, trechos do barramento.

Neste exemplo, para condição analisada, $d' = 6 m$

3º Passo:

Remover todas as linhas conectadas à "Conexão do pára-raios - d' ". Neste caso, nenhuma linha pode ser removida o que resulta em número de linhas equivalente $N= 3$.

4º Passo:

Determinar a "Taxa de Crescimento Equivalente da Tensão Incidente na "Junção J" - S"

$$S = \frac{3S'}{N+2} = \frac{3 \times 1078}{3+2} = 647 \text{ kV}/\mu\text{s}$$

Deste modo, a subestação multi-linhas é reduzida à uma subestação com uma única linha e transformador conforme mostra a *Figura D7*.

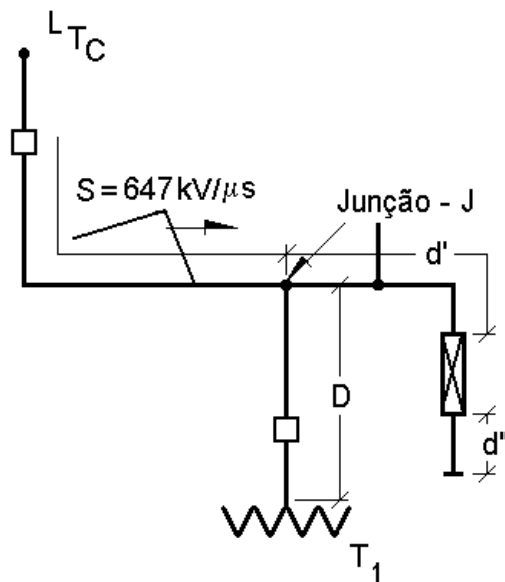


Fig. D7 – Subestação Multi-linhas Dois Transformadores com Surto Incidente à Linha C, Simplificada para uma Subestação com uma Única Linha e Transformador

A partir dos dados originais e da subestação reduzida, procede-se aos seguintes cálculos:

$$\begin{aligned} TSNIAC &= 1.15 \times BIL = 1,10 \times 550 = 632.5 \text{ kV} \\ di/dt &= 2 \cdot S/Z = 2 \cdot (647)/450 = 2,88 \text{ kA}/\mu\text{s} \\ L &= (d'+d'') \cdot 1.3 \mu\text{H}/\text{m} = 9 \times 1.3 = 12 \mu\text{H} \\ U_{PR} &= U_R + L \cdot (di/dt) = 269 + 12 \cdot (2,88) = 304 \text{ kV} \\ U_T &= TSNIAC/1.15 = 6032.5/1.15 = 550 \text{ kV} \\ U_T/U_{PR} &= 550/304 = 1,81 \end{aligned}$$

O valor da abscissa correspondente a $U_T/U_{PR} = 1.81$ na *Figura D8* é $D(S)/(C \times U_{PR}) = 0.28$

Resolvendo para: $D = 0.28 \cdot (c \times U_{PR}) / (S) = 0.28 \times (300 \times 304) / 647 = 39.5 \text{ m}$.

Esta é a máxima distância aceitável entre a "Junção J" - Ponto da Barra - e o Transformador T_1 estando a Linha C sob surto.

Ao se comparar este exemplo com o anterior é necessário observar que a distância agora calculada incorpora um trecho de 6 metros de barramento – Verificar posição da "Junção J" nas Figuras D.4 e D.7. Logo, em relação ao ponto de conexão do transformador a distância efetiva a ser considerada é de 33.5 metros. Isto implica que um surto incidindo na Linha A é mais severo que um surto incidindo na Linha C pois, neste caso o transformador sob estudo - T_1 necessita estar instalado a uma distância inferior.

O procedimento completo implica em repetir a análise acima para a Linha B e para o Transformador T_2 .

D7. Modelo Matemático para a Curva da Figura D8

A Equação D1 pode ser utilizada para calcular a Máxima Distância de Separação Aceitável (D), pois representa um bom modelo para a curva apresentada na Figura D8.

$$D \leq \left| \frac{0,385(C \cdot V_{sa})}{S} \right| \times \left[\frac{0,957 \cdot BIL - V_{sa}}{2,92 \cdot V_{sa} - 0,957 \cdot BIL} \right] \quad (D1)$$

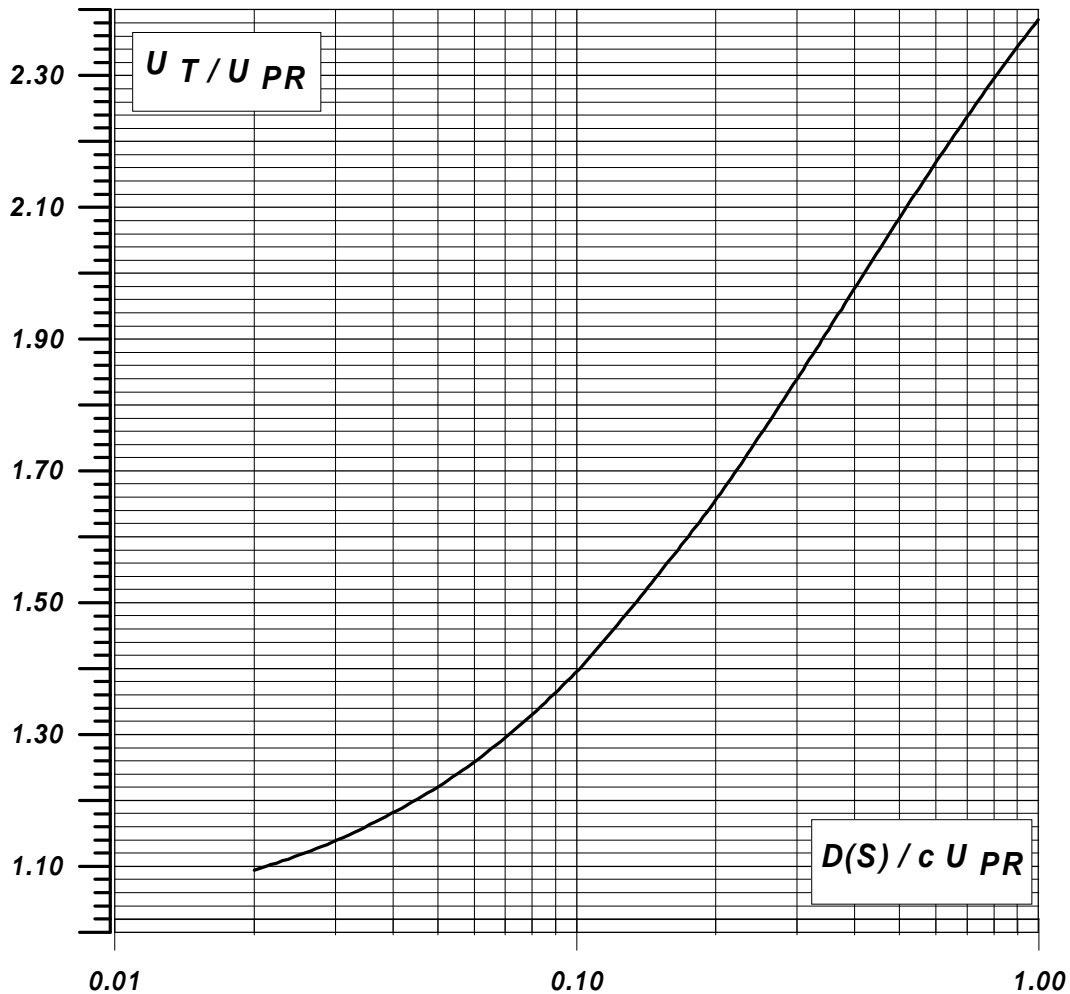


Fig D8 - Curva para Determinação Gráfica da Máxima Distância de Separação