

## **II Evolução dos dispositivos de proteção contra sobretensões**

A função básica dos dispositivos de proteção contra sobretensões é a de reduzir as amplitudes das sobretensões de frentes lenta e rápida nos terminais dos equipamentos ou dos sistemas protegidos a níveis preestabelecidos e operacionalmente aceitáveis, de modo que após a ocorrência destas solicitações a isolamento dos equipamentos ou dos sistemas protegidos não fique comprometida.

Dentre os dispositivos existentes para este fim, os pára-raios têm se mostrado geralmente como os mais eficazes e efetivos, tanto sob os pontos de vista técnico e econômico.

Os pára-raios quando corretamente selecionados e aplicados possibilitam uma redução nos custos dos demais equipamentos, uma vez que a isolamento dos equipamentos constitui uma parcela significativa no custo final de um equipamento, especialmente àqueles aplicados em sistemas de alta e extra alta tensões.

É possível definir um pára-raios ideal como sendo um dispositivo de proteção contra sobretensões que apresente as seguintes características:

- Apresentar uma impedância infinita entre os seus terminais nas condições de regime permanente do sistema, ou seja, comportar-se como um circuito aberto até a ocorrência de uma sobretensão no sistema;
- Ter a capacidade instantânea de entrar em condução quando da ocorrência de uma sobretensão com valor prospectivo próximo ao da tensão nominal do sistema, mantendo esse nível de tensão de início de condução durante toda a ocorrência da sobretensão;
- Parar de conduzir, ou seja, retornar a condição de circuito aberto assim que a tensão do sistema retornar ao seu estado inicial.

Tal operação não deveria causar nenhum distúrbio ou degradação ao sistema ou ao próprio dispositivo de proteção.

No entanto, os pára-raios atualmente disponíveis não têm capacidade de atender plenamente a nenhum dos requisitos do pára-raios ideal, apresentado acima.

Atualmente a tecnologia mais aprimorada e próxima de um pára-raios ideal é representada pelo pára-raios de Óxido de Zinco (ZnO) sem centelhadores, os quais representam o estado da arte de uma longa seqüência de desenvolvimentos e aperfeiçoamentos sucessivos que teve início nos centelhadores a ar, ainda hoje utilizados em algumas aplicações específicas.

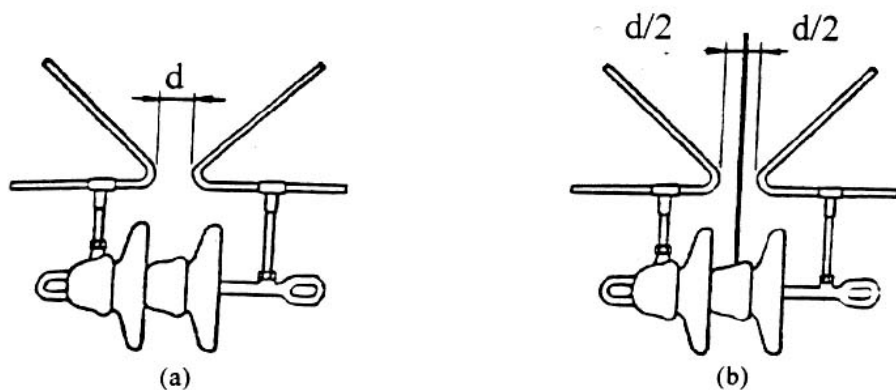
## II.1 Centelhadores com dielétrico de ar

O primeiro dispositivo utilizado como pára-raios foi um simples centelhador, denominado de centelhador tipo “chifre”, instalado entre a fase e o terra nas terminações de linha e equipamentos importantes, e que utilizava como meio dielétrico o próprio ar.

Esse dispositivo, entretanto, apresenta alguns pontos negativos à sua utilização, sendo as suas principais desvantagens:

- A forte influência das suas características disruptivas com as condições atmosféricas;
- A incapacidade de extinguir na maioria das aplicações o arco elétrico de baixa impedância formado quando da sua disrupção, ocasionando a passagem da corrente de curto-circuito do sistema, corrente essa que será mantida até que a proteção contra sobrecorrentes atue e a falta seja eliminada pelo sistema de proteção;
- Durante a operação do centelhador, há um corte brusco da tensão disruptiva (elevado efeito  $dv/dt$ ), que ocasiona uma solicitação muito severa na isolação entre espiras dos enrolamentos de transformadores e reatores;
- A elevada corrente de arco produz uma rápida erosão dos eletrodos dos centelhadores, ocasionando uma variação progressiva nos seus níveis de proteção.

Detalhes construtivos dos centelhadores com dielétrico de ar, aplicados em redes de distribuição, são apresentados na Figura II.1.

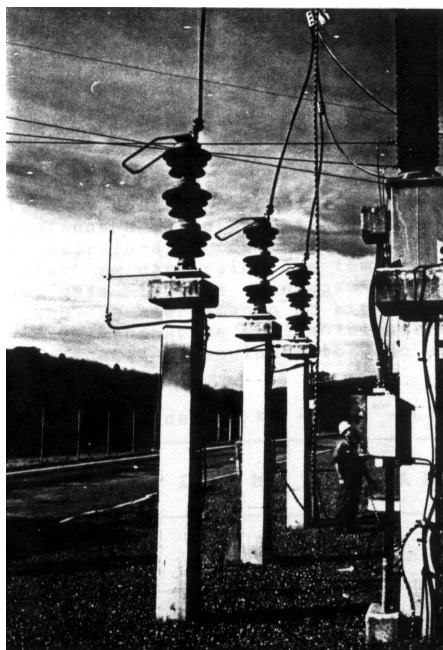


**Figura II.1 – Detalhes construtivos dos centelhadores tipo “chifre”**

Outro fator crítico para os primeiros projetos de centelhadores, apresentado na Figura II.1 (a) é a disrupção acidental provocada pela “queda” de pássaros, provocando um curto-circuito no sistema seguido pelo seu desligamento.

Mais tarde, foi desenvolvido um novo projeto de centelhador onde uma haste metálica foi instalada no ponto central do centelhador, Figura II.1 (b). A distância ( $d/2$ ) entre a haste central e a extremidade do centelhador deve ser dimensionada de maneira a garantir a suportabilidade dielétrica a frequência fundamental. Desta forma, a “queda” acidental de pássaros não provoca a disrupção do centelhador evitando, desta forma, a ocorrência de curto-circuitos acidentais. Devido a sua simplicidade e ao baixo custo, este tipo de centelhador ainda hoje é utilizado em aplicações menos críticas, tais como em redes rurais longas.

Centelhadores com dielétrico de ar também têm sido utilizados em algumas empresas concessionárias de energia elétrica na entrada de subestações com tensões nominais até 138 kV. Nesta aplicação, a distância entre os centelhadores deve ser ajustada para operar somente em situações transitórias quando o disjuntor da subestação estiver em condição aberta. Detalhes de montagem de um centelhador aplicado na entrada de uma subestação de 138 kV são apresentados na Figura II.2.



**Figura II.2 - Detalhes de montagem de um centelhador para aplicação na entrada de subestações**

## **II.2 Pára-raios tipo expulsão**

Devido aos problemas encontrados com o uso de centelhadores a ar surgiram, por volta de 1920, os primeiros pára-raios do tipo expulsão. Estes eram constituídos basicamente por dois centelhadores montados em um tubo isolante e conectados em série. Uma vez que os dois centelhadores possuíam diferentes espaçamentos e eram constituídos por diferentes materiais dielétricos, não existia uma

distribuição uniforme de tensão entre esses e o início da disrupção era sempre determinado pelo centelhador montado na parte superior do pára-raios. Com a disrupção do centelhador superior, toda a tensão passava a ser aplicada sobre o centelhador inferior, que iniciava o processo de formação do arco no seu dielétrico, constituído por um material fibroso com a propriedade básica de gerar gases que provocavam a deionização do arco, provocando a interrupção da corrente de frequência fundamental de forma natural quando da passagem da corrente pelo zero.

O princípio de funcionamento do pára-raios de expulsão é o mesmo atualmente adotado para os elos fusíveis de expulsão e chaves corta-circuito. A sua principal desvantagem era a vida útil pequena, limitada a durabilidade do material utilizado para a deionização do arco elétrico.

### **II.3 Pára-raios de Carbetto de Silício (SiC)**

Os pára-raios do tipo expulsão tiveram uma vida muito curta, sendo substituídos pelos pára-raios tipo “válvula”, os quais foram desenvolvidos em paralelo com os pára-raios tipo expulsão e acabaram por substituí-los totalmente. Estes pára-raios eram formados basicamente por centelhadores montados em série com resistores não-lineares (denominados nas normas ANSI como elementos válvula). Vários tipos de materiais foram originariamente empregados para a confecção dos resistores não-lineares, tais como Hidróxido de Alumínio, Óxido de Ferro e Sulfeto de Chumbo.

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

Neste tipo de pára-raios os centelhadores apresentam duas funções: (a) "isolar" o pára-raios do sistema sob condições de regime permanente, uma vez que sem a presença dos centelhadores os elementos de SiC apresentam, sob condições normais de operação, uma elevada amplitude de corrente de frequência fundamental, provocando perdas apreciáveis e um aquecimento excessivo nos resistores não-lineares de SiC, que ocasionaria a sua falha em poucos ciclos; (b) auxiliar na extinção da corrente subsequente que flui através dos elementos não-lineares, quando da proximidade do zero ou da sua passagem pelo zero, dependendo do projeto construtivo do centelhador.

Projetos mais modernos, aplicados a pára-raios classe distribuição utilizavam centelhadores parcialmente ativos, formados por resistores equalizadores, utilizados para minimizar o efeito de distribuição não uniforme de tensão ao longo dos centelhadores, especialmente em condições de ambientes poluídos. Projetos de centelhadores mais complexos foram aplicados a pára-raios classe estação.

Apesar das melhorias sucessivas, a presença dos centelhadores na montagem dos pára-raios tornou-se indesejável, principalmente devido aos fatores apresentados abaixo:

- A montagem dos centelhadores se dá, via de regra, de forma “artesanal” propiciando erros de montagem, detectados somente quando da inspeção através de ensaios de rotina;
- Dispersões significativas nos valores das tensões disruptivas de frequência fundamental e impulsivas;
- A disrupção dos centelhadores representa um transitório na tensão, transitório esse que ao atingir os enrolamentos dos equipamentos protegidos pode causar uma solicitação entre espiras muito severa;
- A dispersão dos centelhadores dificulta a aplicação de pára-raios em paralelo, fundamental na proteção de grandes bancos de capacitores série, de estações HVDC e alguns sistemas de Extra Alta Tensão, onde elevados níveis de absorção de energia são requeridos pelos pára-raios.

A impossibilidade de se obter melhorias tecnológicas substanciais nas propriedades não-lineares dos resistores a base de Carbetto de Silício, visando a redução ou eliminação das correntes subsequentes, limitou a evolução tecnológica desse tipo de varistor.

Apesar das limitações tecnológicas, ainda existe uma quantidade significativa de pára-raios de SiC instalados nos sistemas elétricos, tanto nas redes de distribuição quanto nas subestações. Ainda é possível se constatar em algumas empresas concessionárias a opção pela aquisição de pára-raios de SiC.

## **II.4 Pára-raios de Óxido de Zinco (ZnO) sem centelhadores**

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

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

Esses elementos não-lineares a base de ZnO começaram a ser produzidos em escala industrial a partir de 1968, sendo inicialmente destinados a proteção de circuitos eletrônicos, caracterizados por baixos valores de tensão e de energia. A partir desse desenvolvimento, diversas empresas sob a licença da Matsushita, iniciaram estudos visando o desenvolvimento de resistores não-lineares de alta capacidade de absorção de energia que pudessem ser utilizados em sistemas elétricos de potência.

Os primeiros pára-raios de ZnO desenvolvidos para sistemas de potência foram lançados no mercado no final de década de 70 pela Meidensha Electric Manufacturing Company Ltda. Na década de 80 diversas empresas japonesas, européias e americanas, desenvolveram e produziram para-raios de ZnO para aplicação em redes de distribuição, subestações e linhas de transmissão.

Os pára-raios de ZnO são constituídos basicamente por um conjunto de resistores não-lineares à base de ZnO. DA ausência dos centelhadores (elementos indispensáveis na montagem dos pára-raios de SiC) neste tipo de pára-raios deve-se a elevada não-linearidade na característica "tensão versus corrente" dos elementos de ZnO, associadas a sua estabilidade térmica e a sua elevada capacidade de absorção de energia para sobretensões temporárias e transitórias. A não utilização dos centelhadores torna os projetos de pára-raios de ZnO mais simplificados, além de oferecer muitas vantagens em suas características de proteção e de operação.

No entanto, pelo fato de não possuírem centelhadores os pára-raios de ZnO além de estarem permanentemente submetidos a tensão fase-terra de operação dos sistemas e a condições climáticas algumas vezes bastante adversas, podem ser eventualmente solicitados por sobretensões temporárias ou transitórias que impõe aos pára-raios uma quantidade de energia que deve ser dissipada para o meio externo, afim de garantir a estabilidade térmica do pára-raios. Portanto, cuidados devem ser tomados quando da seleção do tipo e das características dos pára-raios, em função das reais necessidades dos sistemas.

Pára-raios de Óxido de Zinco (ZnO) sem centelhadores vêm sendo largamente utilizados na proteção dos sistemas elétricos. Em alguns países, como por exemplo o Japão, praticamente a totalidade dos pára-raios instalados em seu sistema elétrico são a base de ZnO sem centelhadores. No Brasil, empresas concessionárias de energia e grandes consumidores industriais vêm adquirindo pára-raios de ZnO, seja na substituição aos pára-raios convencionais de SiC ou em novos projetos.

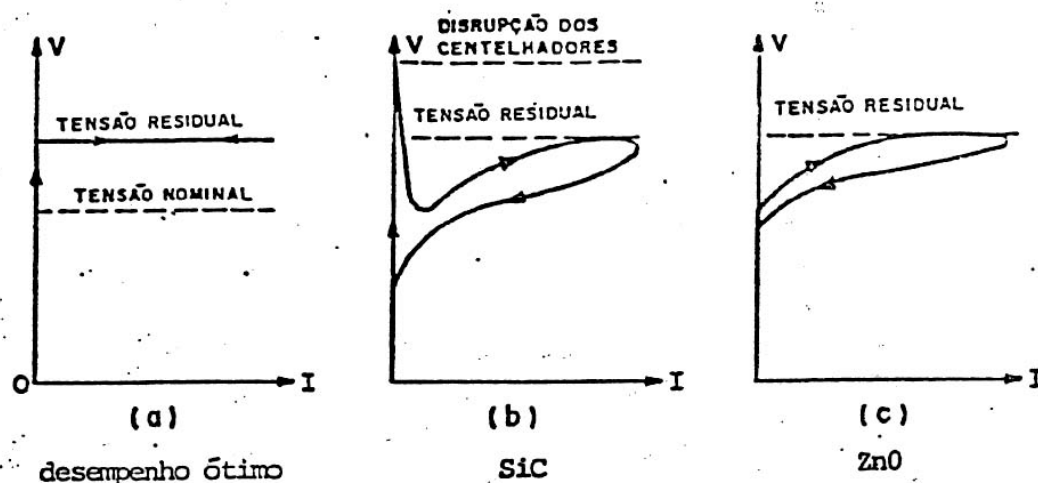
## **II.5 Pára-raios de Óxido de Zinco com centelhadores**

Um outro tipo construtivo de pára-raios utilizado principalmente na aplicação em redes de distribuição é o de Óxido de Zinco com centelhadores.

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

Entre as vantagens desse tipo de pára-raios em relação aos pára-raios de SiC, pode-se citar a maior não-linearidade na característica "tensão x corrente" dos elementos não-lineares de ZnO, que reduz a amplitude da corrente subsequente a valores muito baixos; e menores valores de tensão residual.

As características "tensão x corrente" transitórias dos pára-raios de "desempenho ótimo" (pára-raios ideal), e dos pára-raios de Carbetto de Silício (SiC) e Óxido de Zinco (ZnO) são apresentadas nas Figuras II.3a, II.3b e II.3c.



**Figura II.3 – Características “V x I” transitórias dos pára-raios**

## II.6 Pára-raios de Óxido de Zinco (ZnO) com invólucro polimérico

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

Diversos estudos realizados apontam a penetração de umidade devido a perda de estanqueidade do invólucro de porcelana como sendo a principal causa de falha verificada nos pára-raios ao longo do tempo. A perda de estanqueidade 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, facilitando a penetração de umidade; trincas ou fissuras que se formam ao longo do tempo na porcelana ou na cimentação entre a porcelana e as flanges terminais, no caso de pára-raios classe estação; por variações bruscas de temperatura; descolamento da cimentação, entre outras causas.

Além da penetração de umidade, outros fenômenos podem provocar a degradação dos elementos não-lineares e dos centelhadores (no caso dos pára-raios de SiC ou ZnO com centelhadores) ao longo do tempo, alterando as

características de operação dos pára-raios. Estas alterações podem conduzir o pára-raios a sua degradação total, com a conseqüente passagem da corrente de curto circuito do sistema.

Neste 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 falta do sistema acarreta a formação de gases de alta pressão que tendem a provocar a fragmentação do invólucro ou até mesmo a explosão do pára-raios, caso este não possua um dispositivo de alívio de alta pressão.

Os dois grandes problemas verificados nos pára-raios ao longo do tempo: perda de estanqueidade e fragmentação com ou sem explosão do invólucro, vêm sendo bastante minimizados pela utilização de pára-raios com invólucro polimérico, que começaram a ser produzidos em escala industrial em meados da década de 80.

A experiência de campo tem demonstrado que os pára-raios poliméricos, em especial os projetos sem espaçamentos internos de ar entre as partes ativas e a parte interna do invólucro, são bem menos propensos a perda de estanqueidade por penetração de umidade do que os pára-raios com invólucros de porcelana, reduzindo a causa mais comum de falha nos pára-raios.

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.

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

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

A contaminação tem se mostrado um fenômeno bastante crítico para a degradação dos pára-raios de SiC e de ZnO com invólucros de porcelana, especialmente em projetos de pára-raios aplicados a subestações. Depósitos de contaminantes nas superfícies dos invólucros dos pára-raios associados com a umidade, podem causar uma elevação da corrente de fuga pelo invólucro, provocando uma distribuição de tensão não uniforme ao longo dos pára-raios.

Esse efeito pode causar um aquecimento excessivo nos elementos de ZnO (pára-raios de ZnO) e alterações significativas nas características disruptivas dos centelhadores (pára-raios de SiC).



Além disso, a contaminação do invólucro de porcelana gera o fenômeno de ionização interna, que pode acarretar na degradação dos elementos de ZnO (pára-raios de ZnO) e na degradação dos elementos de SiC e alteração das características disruptivas dos pára-raios (pára-raios de SiC).

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 se dá pela maior distância de escoamento dos projetos de pára-raios poliméricos comparados aos de porcelana de mesmo comprimento, associada a capacidade de hidrofobicidade apresentada por materiais poliméricos, especialmente os polímeros a base de silicone.

Maiores detalhes sobre os efeitos da contaminação em pára-raios para aplicação em subestações são apresentadas no Capítulo IV.

- 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, o que permite a montagem de pára-raios com invólucros de menor comprimento, facilitando a montagem. Em pára-raios classe estação 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 de 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, armazenamento, manuseio e instalação, proporcionando uma redução significativa de custos. Tais facilidades são mais significativas a medida que se aumenta os níveis de tensão.
- Não necessitam, geralmente, de dispositivos de alívio de sobrepressão (pára-raios sem espaçamentos internos de ar para aplicação em subestações), tornando os projetos dos pára-raios mais simples e baratos;
- 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 absorção de energia.

Pelo fato de apresentarem menor peso, maior facilidade e flexibilidade de montagem e pela não fragmentação ou explosão do invólucro com desprendimento dos elementos de ZnO, esse tipo de pára-raios tem sido instalado mais próximo aos equipamentos a serem protegidos, melhorando de modo considerável as características de proteção desses equipamentos quando da ocorrência de sobretensões atmosféricas de frente rápida, através da redução das tensões impulsivas nos seus terminais devido ao menor comprimento dos cabos de conexão (pára-raios aplicados em redes de distribuição) e a menor distância em relação aos pára-raios (pára-raios de subestações).

Em alguns casos tem sido prática a instalação dos pára-raios diretamente na carcaça dos transformadores. Para redes de distribuição, este procedimento reduz de forma considerável a tensão nos terminais dos equipamentos protegidos pelos pára-raios, através da redução das tensões impulsivas devido ao menor comprimento dos cabos de conexão entre o pára-raios e o equipamento por ele protegido.

Devido as vantagens técnicas e econômicas apresentadas em projetos de pára-raios com invólucros poliméricos, quando comparado aos projetos de pára-raios de porcelana, a utilização desse tipo de pára-raios vem crescendo de uma maneira bastante acentuada em subestações. Existe atualmente uma grande quantidade de pára-raios com invólucro polimérico instalados em redes de distribuição e em subestações com tensões nominais até 500 kV.

No Brasil, as empresas concessionárias de energia elétrica e grandes consumidores industriais vêm utilizando este tipo de pára-raios desde o início da década de 90. Desde então o processo de aquisição de pára-raios poliméricos vem crescendo ano a ano.

No caso da aplicação em sistemas de extra alta tensões, 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 hidrofobicidade, envelhecimento por exposição de raios ultra - violeta e trilhamento elétrico.