



FASCÍCULO PROTEÇÃO CONTRA DESCARGAS ATMOSFÉRICAS EM SISTEMAS FOTOVOLTAICOS

Por Ronaldo Kascher*

Capítulo IV Proteção de sistemas fotovoltaicos contra descargas atmosféricas

RECOMENDAÇÕES PARA PROTEÇÃO DE
INSTALAÇÕES COM PAINÉIS ALOCADOS NO SOLO

36



Apresentamos a quarta publicação que tem por objetivo avaliar as consequências das descargas atmosféricas no funcionamento dos sistemas fotovoltaicos e apresentar os métodos possíveis e recomendados para prover suas proteções.

O objetivo deste capítulo é complementar as recomendações para a efetiva proteção das instalações fotovoltaicas com painéis alocados no solo, ou seja, das denominadas “fazendas solares” contra descargas atmosféricas diretas e próximas (fontes S1 e S2 – ABNT NBR 5419).

Nos três capítulos anteriores foram apresentadas as consequências dos raios diretos em equipamentos de usinas fotovoltaicas, a base normativa para balizamento das soluções de proteção, um método simplificado para se estimar a quantidade de eventos de surtos devidos às descargas diretas nos equipamentos expostos em usinas fotovoltaicas, os cuidados no projeto de sistemas de captação de descargas que possibilitem a alocação dos equipamentos protegidos na ZPR OB (NBR 5419), as estimativas dos ganhos que podem ser obtidos com investimentos em proteção e cuidados com a proteção em sistemas com painéis alocados no topo das estruturas.

O foco do presente capítulo é a análise das boas práticas de proteção aplicáveis às usinas no solo, avaliando os recursos disponíveis para aumento do período estimado entre queimas produzidas pelos raios diretos e próximos.

O fato de estas usinas fotovoltaicas ocuparem grandes extensões de terreno com lances de condutores elétricos CC e CA e de controle de grandes comprimentos cruzando o pátio de painéis diferencia bastante a contribuição de infraestruturas adequadas no bom desempenho destas instalações frente aos raios diretos e próximos, se as compararmos com as usinas de menor porte instaladas nos topos das estruturas.

Considerações gerais quanto ao aterramento

O sistema de aterramento das usinas tipo fazendas solares se presta a várias funções, sendo a principal a garantia da segurança humana incluindo profissionais alocados na instalação e dos usuários da energia gerada quanto a potenciais perigos que podem acarretar risco para as pessoas. Outra importante função do aterramento é garantir conexão à terra das partes metálicas da instalação convenientes para escoar correntes, incluindo surtos atmosféricos e eventualmente correntes de falta, contribuindo também para o bom desempenho e continuidade operacional da usina.

A IEC 61643-32- Selection and application principles – SPDs connected to photovoltaic installations e a IEC 63227- Lightning and surge voltage protection for photovoltaic (PV) power supply systems recomendam como arranjo básico do sistema de aterramento condutores enterrados em valas ao longo do perímetro da área de painéis, complementados por condutores enterrados em malha com distância entre condutores paralelos de 20m, conforme ilustrado na Figura 1.

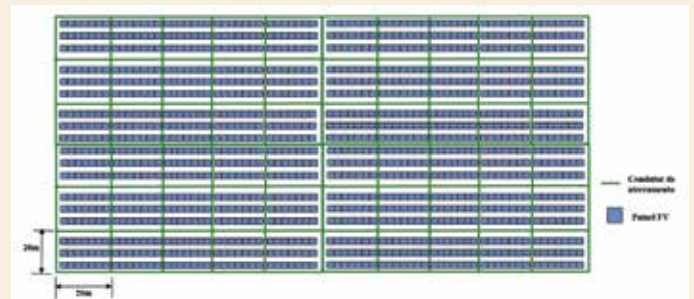


Figura 1 – Arranjo típico do sistema de aterramento de usinas fotovoltaicas no solo.

O nível de corrente de curto-circuito no pátio CC da usina é muito baixo, devido à característica da “V x I” dos painéis. Isto elimina a necessidade do uso de tramas de malhas com pequenas dimensões, como as usadas e subestações convencionais em 60 HZ que possuem altos níveis de corrente de curto-circuito para o controle dos potenciais perigosos. Os condutores CC ligam vários painéis em serie perfazendo as “strings” que fornecem energia elétrica aos inversores em tensões tipicamente entre 500 Vcc e 1kVcc, nas configurações mais comuns.

A este aterramento são conectadas todas as partes metálicas passivas do pátio de painéis como, por exemplo, os suportes metálicos que sustentam os painéis, as massas dos armários de distribuição CC, os bastidores de equipamentos de supervisão e controle da usina, os mastros captadores de descargas atmosféricas, caso o projeto de proteção faça opção por alocar os equipamentos de pátio em ZPR OB, os DPS CC e de redes de comunicação, enfim, todos os equipamentos previstos para serem aterrados. Não devem ser instalados outros aterramentos isolados deste aterramento principal a bem da equalização de potenciais, inclusive, os aterramentos das eventuais subestações de elevação (380 V/13,8 kV ou 34,5 kV, tipicamente).

Resistência elétrica e impedância de impulso do sistema de aterramento

A resistência elétrica do sistema de aterramento é o parâmetro mais frequentemente usado para qualificá-lo. Este parâmetro corresponde ao quociente da tensão de elevação do aterramento avaliado em relação a um ponto no solo suficientemente distante, pela corrente a ele injetada, conforme Figura 2.

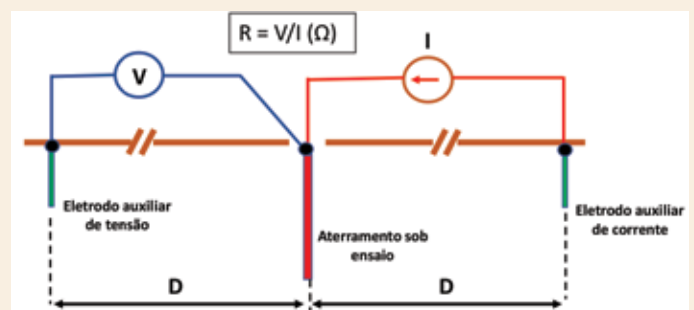


Figura 2 – Conceito de resistência elétrica do aterramento.



FASCÍCULO PROTEÇÃO CONTRA DESCARGAS ATMOSFÉRICAS EM SISTEMAS FOTOVOLTAICOS

Quanto maior for o sistema de aterramento, com a utilização de grandes comprimentos de condutores enterrados, maior será a área de contato eletrodo / solo e menor fica a resistência do aterramento.

A corrente elétrica corrente contínua ou alternada à frequência industrial (60 Hz e harmônicos) injetada multiplicada pela resistência do aterramento fornece a tensão de malha, ou seja, a tensão elétrica "V", que se desenvolverá no aterramento, em relação a um ponto remoto. Isto ocorre porque nestes casos lida-se com sinais com "comprimentos de onda" muito maiores que a maior dimensão física do aterramento, tornando-se o sistema de aterramento "eletricamente curto" e assim permitindo a análise com parâmetros elétricos primários concentrados (resistência, condutância, capacitância e indutância).

Quando o aterramento é excitado por correntes transitórias, que é o caso da descarga atmosférica, os comprimentos de frente de onda das correntes podem se tornar pequenos se comparados com as dimensões do aterramento e, nestes casos, os eletrodos enterrados passam a se comportar como linhas de transmissão com alta "condutância / metro", propiciando a propagação de correntes e tensões de surtos ao longo de seus comprimentos. Quando isto ocorre, a corrente injetada "enxerga" a "impedância de impulso" do aterramento, que, nos casos clássicos de fazendas solares, devido às extensões dos eletrodos enterrados, tem valores maiores que os das resistências elétricas calculadas.

A impedância de surto do aterramento é um parâmetro de difícil avaliação e depende não só da geometria do aterramento e de características do solo, mas também do tempo de frente de onda do surto de corrente injetado.

Uma visão prática da diferença entre a resistência elétrica e a impedância de impulsos de aterramentos extensos é fornecida pelo modelo de Gupta e Thapar" [*Impulse Impedance og Grounding Grids – IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-99, 6 Nov/Dec 1980*].

Este modelo aplica o conceito de raio efetivo do aterramento que pode ser visto como o raio de um círculo que, centrado no ponto de injeção da corrente de surto, limita a parte da malha que efetivamente contribuirá para a transferência para o solo da corrente transitória, conforme Figura 3. Além do limite definido por este círculo, o surto já teria sido atenuado. O raio efetivo depende do tempo de frente de onda do surto, da resistividade elétrica do solo, do tamanho da trama formada pelos condutores enterrados e da localização do ponto de injeção da corrente de surto no aterramento. Assim, aterramentos muito extensos e de baixa resistência elétrica podem apresentar impedâncias de impulso muito maiores que suas resistências. A impedância de impulso passa então a ser o parâmetro determinante para os cálculos dos potenciais de malha e de distribuição de correntes em caso da injeção de surtos no aterramento.

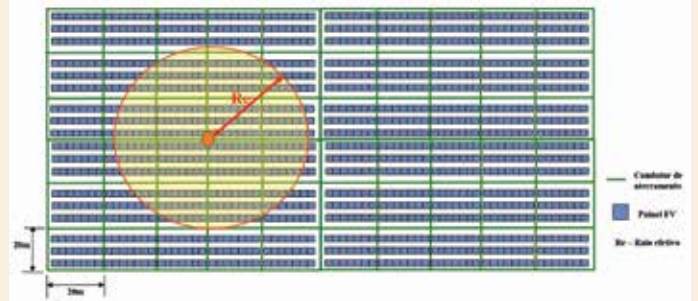


Figura 3 – Conceito de raio efetivo do aterramento.

Aplicando-se esta avaliação a sistemas de aterramentos tipo quadrados, com tramas de 20 m em solos com resistividades elétricas de 1 kΩ.m e 3 kΩ.m, obtemos os resultados apresentados nos gráficos da Figura 4.

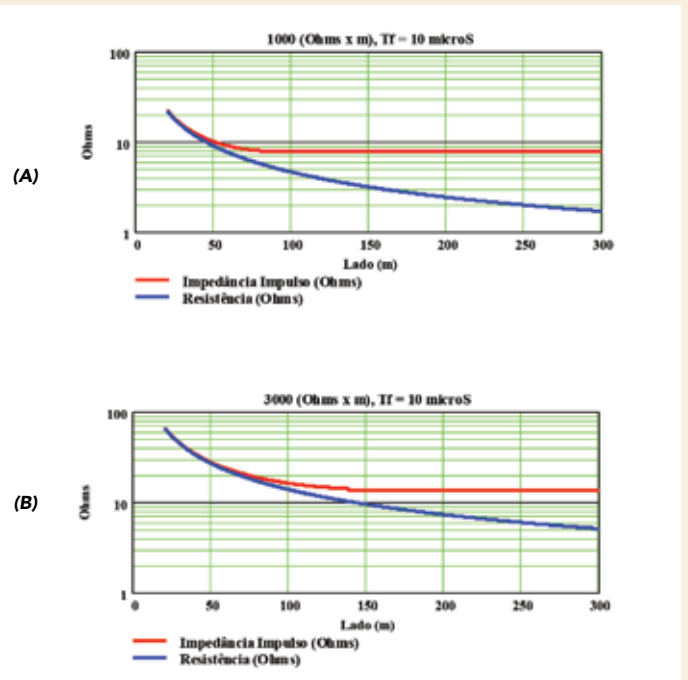


Figura 4 – Impedância de impulso e resistência elétrica de malha de aterramento típica de fazenda fotovoltaica considerando "T_f = 10 μs", (A) "ρ = 1kΩ.m" e (B) "ρ = 3kΩ.m".

Nestas condições, em solos com resistividade de 1 kΩ.m, a impedância de impulso e sua resistência elétrica seriam 7,8 Ω e 5,7 Ω, respectivamente, quando o lado da malha fosse de 80 m. Aumentando-se o lado da malha além de 80 m, a impedância de impulso permaneceria com o valor de 7,8 Ω e sua resistência elétrica diminuiria, atingindo 1,7 Ω quando seu lado fosse de 300m.

Para o caso de solos com resistividade de 3 kΩ.m, a estabilização do valor da impedância de impulso ocorreria no valor de 13,4 Ω e sua resistência seria de 10 Ω em malha com lado de 143 m.

Conclui-se que, diferentemente do que ocorre em excitações a

frequências industriais (60 Hz e harmônicos), o benefício da redução da impedância de impulso de um sistema de aterramento tipicamente utilizado em fazendas solares, como resultado do aumento da quantidade de eletrodos enterrados, tem um limite. A partir de certa dimensão do aterramento, o acréscimo de eletrodos enterrados não contribuirá para a redução da impedância do aterramento da usina fotovoltaica.

Influência da resistência elétrica do aterramento no desempenho de fazendas solares frente às descargas

No caso de usinas solares no solo, ocupando grandes áreas e dotadas de mastros captadores de descargas atmosféricas que aloquem os painéis e demais equipamentos de pátio em ZPR OB, o benefício da diminuição da resistência ou da impedância do aterramento é o aumento da parcela da corrente do raio que é absorvida pela malha, diminuindo as correntes conduzidas pelos DPS e infraestrutura utilizada com função de blindagem, conforme ilustrado na Figura 5.

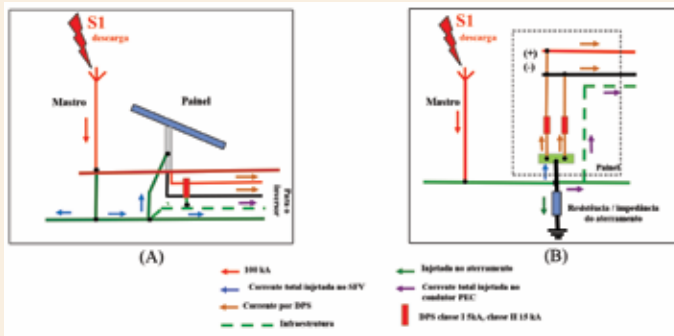


Figura 5 – (A) Painel em ZPR OB com descarga incidindo em mastro captor de descarga. (B) Circuito equivalente mostrando a distribuição da corrente do raio.

Observa-se que a diminuição da impedância do sistema de aterramento faz com que as correntes de surtos que passam através dos DPS e demais infraestruturas de pátio sejam reduzidas. Isto acarreta maior vida útil dos DPS e redução dos surtos acoplados nos condutores CC e de controle que utilizam a infraestrutura com fator de blindagem.

A Figura 6 apresenta um diagrama simplificado da divisão da corrente da descarga entre o aterramento, a infraestrutura e os condutores CC.

Neste exemplo, a corrente da descarga (I) é dividida entre o aterramento (I_a), a infraestrutura metálica que conecta as estruturas de painéis adjacentes (I_i), e os condutores CC, considerando os DPS acionados (I_{c+} e I_{c-}). Atribuindo os valores " $I = 100$ kA", " $Z_a = 10 \Omega$ ", " $Z_i = 30 \Omega$ " e " $Z_c = 140 \Omega$ ", uma corrente de 4,8 kA seria conduzida pelos DPS acionados. Caso a impedância de surto do aterramento fosse " $Z_a = 20 \Omega$ ", as correntes nos DPS seriam aumentadas, atingindo 7,3 kA.

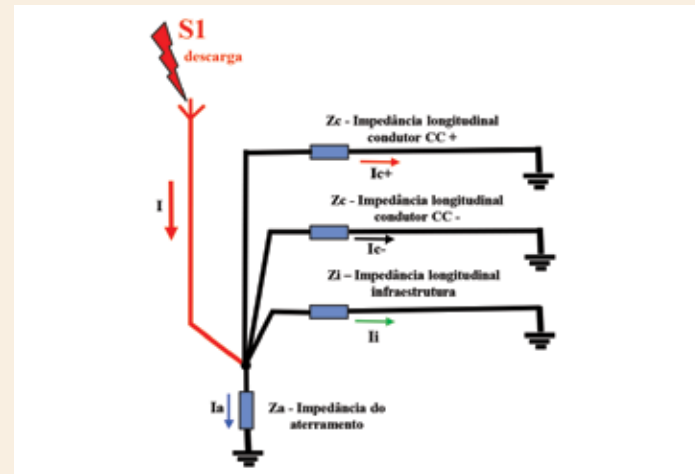


Figura 6 – Diagrama simplificado da divisão da corrente de descarga atmosférica direta incidindo em mastro de captação.

Termostatos para Painéis KTO 111 & KTS 111



- Conexão rápida sem ferramenta
- Conexão segura com terminal Push In
- Entradas de ar ampliadas para melhor ventilação
- Ajuste fácil de temperatura de chaveamento
- Para uso em até 5.000 metros de altitude

MAIS INFORMAÇÕES





FASCÍCULO PROTEÇÃO CONTRA DESCARGAS ATMOSFÉRICAS EM SISTEMAS FOTOVOLTAICOS

Conclui-se que a redução da impedância do aterramento da usina fotovoltaica reduz as correntes transitórias que fluem nos DPS acionados e na infraestrutura, quando da ocorrência de descargas atmosféricas diretas. Nota-se que a impedância de impulsos de aterramentos extensos tem valor superior à de sua resistência elétrica.

O acréscimo das dimensões do aterramento visando a diminuição de sua impedância tem limitação, conforme já explicitado neste artigo.

Influência do tipo de infraestrutura de acondicionamento dos cabos no desempenho de fazendas solares frente às descargas atmosféricas

Conforme desenvolvido no capítulo 3, o parâmetro importante para a avaliação do fator de blindagem provido pela infraestrutura é a sua impedância de transferência. Tendo a infraestrutura continuidade elétrica longitudinal garantida e conectada ao aterramento dos equipamentos interligados, a tensão de surto que se desenvolve nos equipamentos é igual ao produto da corrente induzida pela "impedância de transferência" ou ao produto da derivada no tempo da corrente de surto pelas "indutâncias mútuas" da infraestrutura que são estimadas, em seus arranjos mais comuns, na norma IEC 61000-5-2

A Figura 7, já apresentada no capítulo 3 desta série, apresenta as indutâncias mútuas de algumas configurações típicas de infraestrutura.

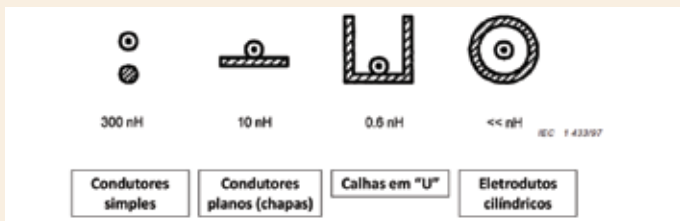


Figura 7 - Efeito da configuração do condutor de terra paralelo (PEC- Parallel Earth Conductor) na impedância de transferência de infraestrutura. Fonte: IEC 61000-5-2

Uma corrente de surto de 1 kA / μs trafegando em 10 m de infraestrutura que condiciona os cabos de energia CC e de monitoração da usina desenvolveria uma tensão de surto acoplada à rede protegida de 3 kVp [1] considerando o condutor simples e de 6 Vp [2] considerando a calha em "U", conforme [1].

$$V = 300 \cdot 10^{-9} \cdot 10 \cdot \frac{10^3}{10^{-6}} = 3kV \quad [1]$$

$$V = 0,6 \cdot 10^{-9} \cdot 10 \cdot \frac{10^3}{10^{-6}} = 6V \quad [2]$$

Quando se faz a instalação dos cabos CC e de controle em dutos enterrados dielétricos, tais como os PEADS, situação muito comum

em fazendas solares, nenhum fator de blindagem eletromagnética é acrescentado à instalação.

A instalação de condutores PEC (Parallel Earth Conductor - IEC61000-5-2) de cobre nu ou aço galvanizado ao longo dos bancos de dutos elétricos e de controle das usinas pode reduzir os transitórios acoplados por descargas atmosféricas.

Pode-se, com este recurso, obter fatores de blindagens que dependerão da geometria de disposição física destes condutores em relação aos condutores a serem protegidos.

A forma mais simples e econômica para conferir fator de blindagem aos condutores encaminhados em dutos dielétricos enterrados é a instalação de um condutor PEC ao longo do arranjo de dutos. Este condutor deve ser multiconectado aos condutores de aterramento que cruzarem a sua rota e interligados às massas das estruturas onde se originam e terminam.

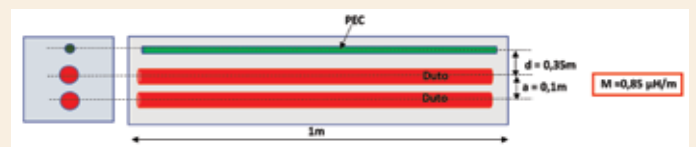


Figura 8 – Arranjo de condutor PEC simples usado para conferir blindagem eletromagnética aos condutores em banco de dutos dielétrico Indutância mútua por metro.

Esta situação é apresentada na Figura 8, que mostra uma instalação com condutor PEC simples e banco de dois dutos PEAD. O arranjo apresenta uma indutância mútua entre condutor PEC e cabos instalados nos dutos dielétricos de aproximadamente 0,85 μΩ/m. Uma corrente de surto de 1 kA / μs trafegando em 10 m de infraestrutura que condiciona os cabos desenvolveria uma tensão de surto acoplada à rede protegida de 850 Vp conforme [3].

$$V = 0,85 \cdot 10^{-6} \cdot 10 \cdot \frac{10^3}{10^{-6}} = 850V \quad [3]$$

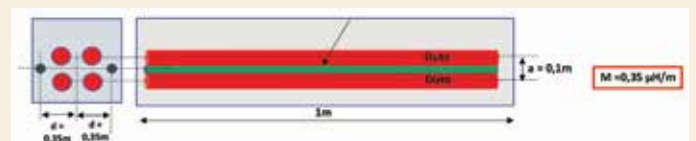


Figura 9 – Arranjo de dois condutores PEC laterais usados para conferir blindagem eletromagnética aos condutores em banco de dutos dielétrico. Indutância mútua por metro.

Instalando-se dois condutores PEC laterais conforme a Figura 9, a indutância mútua diminuiria para 0,35 μΩ/m. A mesma corrente de 1 kA circulando em 10 m de infraestrutura desenvolveria uma tensão de surto de 3,5 kV de pico, conforme [4].

$$V = 0,35 \cdot 10^{-6} \cdot 10 \cdot \frac{10^3}{10^{-6}} = 3500V \quad [4]$$

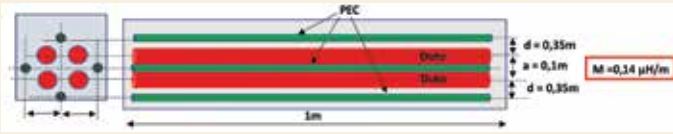


Figura 10 – Arranjo de quatro condutores PEC laterais usados para conferir blindagem eletromagnética aos condutores em banco de dutos dielétrico. Indutância mútua por metro.

Instalando-se agora quatro condutores PEC laterais conforme mostra a Figura 10, a indutância mútua diminuiria para $0,14 \mu\Omega/m$ e a corrente de $1 \text{ kA} / \mu\text{s}$ circulando em 10 m de infraestrutura desenvolveria uma tensão de surto de 1,4 kV de pico, conforme [4].

$$V = 0,14 \cdot 10^{-6} \cdot 10 \cdot \frac{10^3}{10^{-6}} = 1400 \text{ V} \quad [5]$$

Conclusão

Este artigo complementa as recomendações básicas para a efetiva proteção das instalações fotovoltaicas com painéis alocados no solo, ou seja, das denominadas “fazendas solares” contra descargas atmosféricas diretas e próximas.

Foi apresentado o arranjo típico do sistema de aterramento sugerido pela norma IEC 61643-32.

Evidenciou-se o conceito do parâmetro “impedância de impulso” como sendo a característica realmente importante dos sistemas de aterramento típicos das fazendas solares nas excitações por raios. A impedância de impulso depende da geometria do aterramento, da resistividade elétrica do solo, do tempo de frente de onda do impulso

de corrente de raio infetado, da dimensão da trama entre condutores da malha e também do local da injeção do surto no sistema de aterramento. Nos aterramentos de grandes dimensões típicos de fazendas solares que apresentam, por conseguinte, baixos valores de resistências elétricas, as impedâncias de impulso apresentadas às correntes de raios são muito maiores que os valores das resistências elétricas.

No caso de as descargas atmosféricas atingirem as usinas fotovoltaicas protegidas contra raios diretos, quanto menor for a impedância de impulso do aterramento, menos correntes de surto serão conduzidas pelos DPS instalados e pelas infraestruturas com função de blindagem, dando mais confiabilidade e suportabilidade à instalação frente às descargas atmosféricas.

Finalmente foram apresentadas algumas sugestões de infraestrutura metálica que agregam fatores de blindagem frente aos surtos atmosféricos, enfatizando possíveis soluções quando se utilizam dutos dielétricos para acondicionamento dos grandes lances de condutores necessários nas fazendas solares.

**Ronaldo Kascher é engenheiro eletrônico e de telecomunicação, mestre e doutor em engenharia elétrica. É diretor e responsável técnico na Kascher Engenharia e Comércio Ltda. desde 1982. É professor dos Departamentos de Engenharia Elétrica, Engenharia Eletrônica e Engenharia Aeronáutica da PUC-MG. Membro da comissão da ABNT CE-03:64.10, que revisa a ABNT NBR 5419. É consultor e responsável técnico por diversos projetos na área de Sistemas de Proteção contra Descargas Atmosféricas (SPDA), compatibilidade eletromagnética e proteção contra transitórios de instalações elétricas de controle e automação de telecomunicação e eletrônicas.*