

Incêndios em sistemas fotovoltaicos: abordagem sobre os modos de falha e recomendações para realização de perícia

M.Q. Moreira^{a,b*}, J.A.S. Sá^{a,c,d}, C.S. Fernandes^a

^a Programa de Pós-graduação em Ciências Forenses (PPGCF), Universidade Federal do Sul e Sudeste do Pará (UNIFESSPA), Marabá (PA), Brasil

^b Polícia Científica do Tocantins, Araguaína (TO), Brasil

^c Universidade do Estado do Pará (UEPA), Belém (PA), Brasil

^d Polícia Científica do Pará, Belém (PA), Brasil

*Endereço de e-mail para correspondência: eng.murilloqueiroz@outlook.com, Tel.: +55-63-99988-0058.

Recebido em 23/09/2023; Revisado em 11/09/2023; Aceito em 12/11/2023

Resumo

A geração de energia elétrica através de fontes renováveis tem sido uma das principais formas de incremento da capacidade de produção de energia ao redor do mundo. Dentre as fontes renováveis de energia disponíveis, a energia solar fotovoltaica tem desempenhado um papel de destaque nesse processo. No Brasil, a implantação de sistemas de geração fotovoltaica de energia elétrica, nos moldes de micro e minigeração distribuída, seguindo a tendência mundial, cresceu consideravelmente a partir de 2012 após a regulamentação realizada pela agência reguladora de energia elétrica do país. Tal aumento proporciona uma maior diversificação das fontes de energia elétrica nacional, trazendo muitos benefícios para a matriz energética pátria e para aqueles que investem nesta solução. Entretanto, esta tendência crescente tem sido observada também nos incidentes relacionados a incêndios nestes sistemas. Este cenário aponta para o crescimento da demanda de perícias realizadas neste tipo de ocorrência, situação que exigirá do perito de local um conhecimento técnico mais apurado para realizar o levantamento técnico pericial para identificar os vestígios relacionados ao sinistro e analisar os dados coligidos no levantamento. Este trabalho objetiva elencar os modos de falha em sistemas fotovoltaicos conectados à rede (SFVCR) que podem ensejar o surgimento de um foco de incêndio ou contribuir para o surgimento deste. Adicionalmente, a partir dos modos de falha mapeados, serão recomendados procedimentos específicos a serem realizados em locais de incêndios envolvendo tais sistemas, a fim de se verificar a existência de vestígios que indiquem que o sinistro teve origem nestes.

Palavras-Chave: sistemas fotovoltaicos; modos de falha, incêndio, perícia.

Abstract

The electrical energy generation by renewable sources has been one of the most significant means of energy production expansion worldwide. Among the available renewable sources, solar photovoltaic (PV) energy has taken an important role in this process. In Brazil, the implementation of photovoltaic energy generation systems, considering micro and mini generation, like global tendencies, grew considerably since 2012 after the regulation established by the national energy regulatory agency. Such increasing implementations means a bigger diversification of the energy sources of the country, which leads to enlargement of the national power generation and to benefits for those who invest in these solutions. However, an increasing number of fire incidents related to PV systems has been observed as well. This scenario leads to the augmentation of fire investigations related to PV systems, which it will demand a more refined knowledge of the criminal expert (or fire investigator) regarding the local inspection, the collection of data and evidence and its analysis. Therefore, this work aims to provide a bibliographic survey about failure modes in grid connected PV systems that may cause fire or could be related to it. Additionally, from these identified failure modes, it will be recommended some specific procedures to be performed in PV related fire sites to look for evidence that points the origin of the incident towards to the PV system.

Keywords: photovoltaic systems; failure modes, fire, fire investigation.

1. INTRODUÇÃO

A partir da publicação da Resolução Normativa 482/2012, da ANEEL, já substituída atualmente pela Resolução Normativa 1000/2021, o consumidor brasileiro de energia elétrica obteve respaldo, no âmbito legal, para implantar projetos de geração distribuída, no ponto de consumo ou em local diverso deste [1]. Com isto, abriu-se a possibilidade de se investir em plantas de microgeração e minigeração, com foco nas energias renováveis, sendo as principais fontes a energia eólica e a energia solar fotovoltaica. Desde então, houve um crescimento vertiginoso de implantação de projetos de micro e minigeração de sistemas solares fotovoltaicos conectados à rede (SFVCR).

Até o final do ano 2012 havia 7 MW de potência instalada de plantas solares no Brasil e até agosto do ano 2022 já são 18.654 MW instalados, dos quais 12.727 MW são de projetos de geração distribuída, de modo que os projetos residenciais e comerciais contribuem com 78,6% dos sistemas em operação [2].

Tal expansão acarretou novas situações de risco e que demandam atenção especial das perícias relacionadas a engenharia forense: os incêndios envolvendo geradores fotovoltaicos de energia. Após a expansão de tais sistemas, casos recentes de incêndios, de todas as proporções, têm sido noticiados em diversos veículos de imprensa do território nacional.

Como exemplo, cita-se o caso de um incêndio ocorrido em 09 de novembro de 2021, numa loja de roupas na cidade de Rio Claro (SP). Neste evento, lojistas perceberam que havia fumaça saindo da região do telhado do estabelecimento comercial afetado, especificamente da região dos módulos fotovoltaicos instalados naquele local. O Corpo de Bombeiros daquela localidade foi acionado e efetuou o controle da situação [3].

A perícia de incêndios é uma área muito particular da perícia criminalística no ramo da engenharia, a qual traduz-se na conduta técnica do profissional em descobrir o local onde fogo se iniciou e o agente ígneo patrocinador do sinistro [4]. Em muitos casos, tais tarefas podem se tornar um grande desafio, uma vez que muitos fatores dificultam o trabalho pericial: as chamas, a fumaça, e o trabalho de combate a incêndio podem alterar e/ou destruir os vestígios de interesse técnico para o estudo do sinistro.

Dessa forma, ao proceder à realização de uma perícia de incêndio, o perito deve se ater ao método científico preconizado em manuais nacionais e internacionais (os quais serão abordados em seção posterior deste artigo), a fim de prover a robustez necessária à investigação do fato.

Atualmente os profissionais que tratam da realização de perícias envolvendo incêndios de diversas naturezas, como incêndios veiculares ou em sistemas elétricos convencionais, dentre outros, contam com literaturas

robustas as quais servem de arcabouço técnico para subsidiar o trabalho pericial, situação que não se verifica para os incidentes relacionados a SFVCR.

Isso ocorre porque os sistemas de geração fotovoltaica de energia elétrica são sistemas com características muito peculiares, podendo existir diversos fatores que podem desencadear um incêndio, de modo que sua proporção poderá ser determinada, dentre outros fatores, pelo tamanho do sistema, pelas condições ambientais onde os componentes do gerador estão instalados e pela falha que originou a fonte ígnea patrocinadora do sinistro.

O presente trabalho visa abordar os modos de falha que podem ocasionar o surgimento de um foco de incêndio num SFVCR, propondo uma tabela orientativa e, adicionalmente, recomendar procedimentos a serem adotados pelo perito de local de incêndio. De forma que o perito possa realizar o levantamento de informações na cena do fato para proceder a análises posteriores e a verificação, quando possível, se o SFVCR foi uma vítima ou o causador do sinistro, uma vez que a extensão dos danos, os trabalhos de combate a incêndio e outros fatores podem acarretar a perda de importantes vestígios do sinistro, prejudicando sua análise.

2. PANORAMA SOBRE SFVCR

Para entender como um SFVCR pode ocasionar um incêndio, faz-se necessário, primeiramente, abordar a constituição básica desses sistemas.

2.1. Princípios de Sistemas Solares Fotovoltaicos

Os sistemas fotovoltaicos de geração de energia elétrica têm como base o módulo (ou painel ou placa) solar fotovoltaico, que tem como princípio de funcionamento o efeito fotovoltaico para conversão de energia luminosa em energia elétrica.

Os painéis são constituídos de agrupamentos de células fotovoltaicas, conectadas entre si em arranjos em série e em paralelo para se obter as características elétricas desejadas de saída. Os módulos, por sua vez, também podem ser associados entre si, em série ou em paralelo, para produzir a quantidade de energia elétrica desejada. Um agrupamento de módulos é denominado de arranjo ou *array*; o conjunto de módulos conectados em série é denominado de *string*. Os módulos, quando expostos à radiação luminosa, produzem energia em corrente contínua (CC), enquanto a rede elétrica da concessionária de energia fornece energia em corrente alternada (CA) [5].

2.2 Tipos de Sistemas Solares Fotovoltaicos - classificação quanto ao tipo de conexão à rede elétrica

Existem dois tipos principais de sistema de geração fotovoltaica de energia elétrica: os sistemas autônomos (também chamados de sistemas isolados ou *off grid*) e os sistemas conectados à rede (sistemas *on grid*) [5].

Os sistemas isolados são empregados em locais onde não possui rede elétrica para atendimento das cargas, sendo necessário componentes para realizar o armazenamento da energia elétrica gerada. De modo geral, os sistemas isolados são formados por placas solares, controlador de carga, uma bateria ou um conjunto destas (que formam um banco), e, de acordo com a necessidade, um inversor de tensão contínua para tensão alternada [5].

Os sistemas conectados à rede dispensam a necessidade de uso de baterias, pois a energia gerada poderá ser aproveitada por completo, seja pelas cargas da edificação ou para envio à rede da concessionária. Sendo assim, a composição básica de um SFVCR é dada pelas placas solares, inversor *grid-tie* (diretamente conectado à rede elétrica alimentada pela concessionária), e proteções [6]. Para a consecução dos objetivos deste trabalho, serão estudadas somente as características desses sistemas (embora algumas das características da parte CC também se apliquem aos sistemas CA).

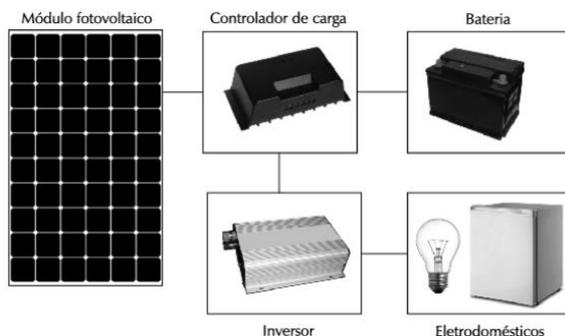


Figura 1. Configuração básica de um sistema off grid típico [5].

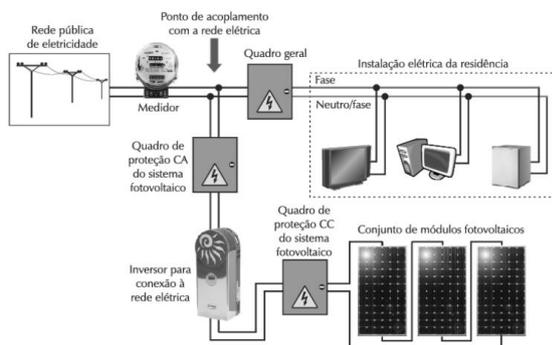


Figura 2. Configuração básica de um sistema on grid típico [5].

Atualmente existem sistemas híbridos, ou seja, que possuem características de sistema isolado e de sistema conectado à rede. Sua principal aplicação são as instalações conectadas à rede elétrica onde existem cargas prioritárias que necessitam de um recurso de *backup*, isto

é, depende da necessidade técnica e viabilidade econômica para a correta implantação [7].

2.3 Caracterização Básica de um SFVCR

O SFVCR, como mencionado anteriormente, é composto basicamente pelas placas fotovoltaicas e o inversor. Adiciona-se, para pormenorizar a composição do sistema, as proteções de corrente contínua (CC), as proteções de corrente alternada (CA), e a cablagem de interconexão dos sistemas CC e CA ao inversor.

2.3.1. Módulos (Painéis) Fotovoltaicos

Os módulos fotovoltaicos são construídos a partir de associação de células fotovoltaicas, as quais são fabricadas por material semicondutor (o silício – Si – têm sido muito utilizado), tratado com substâncias para que este adquira as características elétricas desejadas (num processo chamado de “dopagem”) para a geração de energia a partir da luz. As células são ligadas entre si por meio tiras metálicas, sendo esse conjunto coberto por, na sua parte anterior, por um material encapsulante aplicado diretamente sobre as células e tiras metálicas (um polímero transparente e isolante), e por um vidro temperado e antirreflexivo; a cobertura posterior é realizada por meio de outro material isolante opaco; as tiras metálicas são soldadas na caixa de conexão, localizada na parte posterior do módulo; todo esse conjunto é sustentado pela moldura metálica (geralmente de alumínio anodizado), que o estrutura mecanicamente. Da caixa de conexão, saem os condutores dos polos positivo e negativo, os quais possuem em suas terminações, conectores tipo MC4, que serão abordados em tópico posterior [6].

Os módulos são conectados entre si, em paralelo e/ou série, conforme dimensionamento realizado pelo projetista do sistema, a fim de que seja entregue ao inversor as características elétricas (tensão e corrente CC) para a realização da conversão de energia.

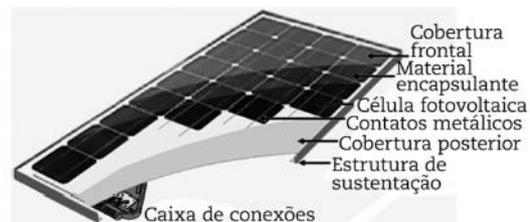


Figura 3. Vista explodida de módulo FV [6].

2.3.2. Inversores On Grid (Grid Tie)

Para realizar a conexão de um sistema solar fotovoltaico à rede elétrica, é requerido que o sinal elétrico de saída deve ter características apropriadas de

tensão, frequência e sincronismo de fase para a correta sincronização do sistema à rede. Tal tarefa é executada pelo inversor, que é um equipamento projetado à base de componentes eletrônicos de potência para converter a energia CC em CA [8].

No projeto de implantação de um SFCVR, devem ser observadas as características elétricas deste equipamento, tais como: tensão de entrada CC, quantidade de *strings* (entradas de corrente contínua, proveniente das associações dos módulos, conforme projeto), corrente máxima de saída (CA), tensão de rede (CA), temperatura do ambiente de trabalho, características de conexão à rede (monofásico/bifásico ou trifásico) etc.

2.3.3. Caixa de Conexões/Proteção CC (*String box*)

Os conjuntos de associações em série e paralelo dos módulos fotovoltaicos podem ser ligados entre si através de caixas de conexões, as quais são comumente denominadas *string box*. Estas podem ser montadas a partir de componentes avulsos, que podem ser adquiridos separadamente, ou pode ser uma caixa pré-fabricada [5].

Os componentes geralmente encontrados nessas caixas são: fusíveis (próprios para instalações fotovoltaicas), dispositivos de proteção contra surtos elétricos (DPS), chave de seccionamento CC (própria para abertura de circuitos de corrente contínua, não devendo ser utilizadas chaves aplicadas em sistemas convencionais) e barra de aterramento.

2.3.4. Caixa de Proteção CA

Este item contempla os dispositivos de seccionamento e proteção do circuito de corrente alternada do inversor, os quais são, comumente: disjuntor, dispositivo de proteção contra surto (DPS), barramento de equipotencialização. Tratam-se de dispositivos utilizados nas instalações elétricas convencionais, e devem ser dimensionados conforme normas técnicas aplicáveis a estas instalações [5].

2.3.5. Condutores Elétricos

Os condutores elétricos aplicados no lado de corrente contínua dos sistemas fotovoltaicos diferem daqueles aplicados aos sistemas convencionais. Referência [6] explica que os cabos e fiação utilizados devem suportar as intempéries, pois serão submetidos à intensa radiação solar, calor, frio, chuva e outros fenômenos naturais.

Os cabos do lado CC geralmente operam em tensões mais elevadas do que aquelas encontradas nas instalações convencionais e estão expostos às mais severas condições climáticas, e, por isso, devem ter características especiais (tensão de isolamento maior, resistência a radiação ultravioleta, temperatura de trabalho elevada etc.). Para os

condutores do lado CA podem ser aplicados cabos elétricos convencionais, conforme as normas técnicas utilizadas para as instalações elétricas tradicionais [5].

2.3.6. Conectores MC4

Os conectores MC4, foram desenvolvidos pela Staubli (anteriormente sob o nome de *Multi-Contact*) em 1996. Estes são terminais bipartidos tipo “macho” e “fêmea” que são largamente utilizados em aplicações de corrente contínua no segmento solar fotovoltaico. São empregados nas conexões entre módulos, caixas de proteção CC e inversor (lado CC) [9].

2.3.7. Outros Acessórios

A instalação dos módulos se dá por meio de uma estrutura de fixação desenvolvida especialmente para a aplicação fotovoltaica. Tratam-se de materiais metálicos resistentes à corrosão, geralmente alumínio anodizado, aço inox, ferro galvanizado etc. [10].

Tais elementos são:

- trilhos ou perfis (acomodação dos módulos);
- estruturas específicas de fixação à superfície base (podendo ser solo, telhado, laje, estacionamento – também chamados de *carport*);
- grampos terminador e intermediário;
- clips, grampos e jumpers de aterramento.

2.4 Normas Técnicas Nacionais sobre SFVCR

Para que os SFVCRs sejam comercializados, instalados e entrem em operação, é necessário que sejam observados os requisitos técnicos previstos em normas da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) e das concessionárias de energia. Dentre as normas relacionadas à implantação destes sistemas, destacam-se as seguintes:

- ABNT NBR 16149 - Sistemas fotovoltaicos (FV) – Características da interface de conexão com a rede de distribuição;
- ABNT NBR 16150 – Sistemas fotovoltaicos (FV) – Características da interface de conexão com a rede de distribuição – Procedimentos de ensaio da conformidade;
- ABNT NBR 16690 – Instalações elétricas de arranjos fotovoltaicos – Requisitos de projeto;
- ABNT NBR 16274 – Sistemas fotovoltaicos conectados à rede – Requisitos mínimos para documentação, ensaios de comissionamento, inspeção e avaliação de desempenho;
- ABNT NBR IEC 61643-31 – Dispositivos de proteção contra surtos de baixa tensão – Parte 32: DPS conectado no lado corrente contínua das instalações fotovoltaicas – Requisitos e métodos

de ensaio para os dispositivos de proteção contra surtos para instalações fotovoltaicas;

- ABNT NBR IEC 61643-32 – Dispositivos de proteção contra surtos de baixa tensão – Parte 32: DPS conectado no lado corrente contínua das instalações fotovoltaicas – Princípios de seleção e aplicação;
- ABNT NBR IEC 62116 – Procedimento de ensaio de anti-ilhamento para inversores de sistemas fotovoltaicos conectados à rede elétrica;
- ABNT NBR 16612 – Cabos de potência para sistemas fotovoltaicos, não halogenados, isolados, com cobertura – Requisitos de desempenho;
- ABNT NBR 5410 – Instalações elétricas de baixa tensão;
- ABNT NBR 5419 – Proteção contra descargas atmosféricas (quando aplicável);
- ABNT NBR 14039 – Instalações elétrica de média tensão, de 1,0 kV a 36,2 kV (para sistemas conectados em nível de média tensão)
- Normas Técnicas de Concessionárias.

Para os sistemas instalados em ambientes residenciais e comerciais, realçam-se as normas ABNT NBR 16690, ABNT NBR 5410 e ABNT NBR 5419, pois estas tratam especificamente dos requisitos técnicos mínimos de desempenho e segurança das instalações elétricas, os quais mitigam e/ou eliminam os riscos de incêndio. Tais normas devem ser observadas desde a fase de concepção e projeto do SFVCR até a instalação, operação e manutenção.

Salienta-se também a aplicação das prescrições da norma ABNT NBR 16274, que se refere exclusivamente à etapa de comissionamento do sistema e relaciona quais testes devem ser realizados para certificar que todos os componentes do gerador apresentam funcionamento adequado e que as instalações atendem as prescrições normativas das demais normas citadas anteriormente.

A inobservância das prescrições técnicas das referidas normas pode prejudicar a integridade não só do sistema, mas de pessoas (risco de choque elétrico) e de toda a edificação (risco de incêndio).

3. SFVCR E INCÊNDIOS

Após o aumento expressivo de instalação de geradores fotovoltaicos, sinistros envolvendo tais sistemas começaram a surgir no país, situações como a exposta por [11], na qual um hotel, situado no Rio Branco – Acre, teve um princípio de incêndio envolvendo componentes do sistema fotovoltaico conectado à rede.

Em outro fato narrado por [12], um incêndio de proporções consideráveis atingiu uma fábrica de calçados na cidade de Patos de Minas – Minas Gerais. De acordo

com o relato, as chamas foram percebidas por volta das 12 horas do dia 15 de fevereiro de 2022, e se alastraram para uma grande área do empreendimento, sob a suspeita de que o foco inicial tenha sido uma falha nos painéis fotovoltaicos.

Tais fatos são semelhantes àqueles ocorridos em outros países que iniciaram a expansão da utilização dos geradores fotovoltaicos conectados à rede anteriormente ao Brasil. Referência [13] avaliou 400 incidentes envolvendo incêndios em sistemas fotovoltaicos na Alemanha, entre 1995 e 2012. De acordo com este trabalho, 180 sinistros foram provocados diretamente por geradores fotovoltaicos. À época do estudo, aquele país contava com aproximadamente 1,3 milhão de sistemas instalados, totalizando 30 GWp (gigawatt-pico) de potência instalada, e, considerando a quantidade de incidentes que provocaram danos a edificações por ano e a quantidade de sistemas instalados, o risco anual estimado de sinistros dessa natureza foi de $30 \cdot 10^{-6}$.

O Departamento de Negócios, Energia e Estratégia Industrial (anteriormente Departamento de Energia e Mudanças Climáticas) do Reino Unido conduziu uma pesquisa, conduziu uma pesquisa em parceria com o *Building Research Establishment* (BRE), naquele país, entre os anos de 2015 e 2018, e avaliou 80 incêndios envolvendo sistemas de geração fotovoltaica de energia elétrica, dos quais 58 foram causados pelas instalações fotovoltaicas. Conforme o relatório, apesar do número de incidentes ser muito pequeno se comparado com a quantidade de sistemas instalados no país até o momento de elaboração do documento, aproximadamente 1 milhão de instalações, quando estes incidentes ocorrem consequências graves são geradas, impactando famílias, negócios e prédios públicos [14].

Referência [15], em seu estudo sobre avaliação de riscos em empreendimentos fotovoltaicos na Itália, comenta que somente em 2012 foram registrados 600 incêndios envolvendo sistemas solares fotovoltaicos; em 2013 foram mais de 500 incidentes e, em 2014, o número foi superior 400, mostrando uma tendência de decréscimo ao longo dos anos. Entretanto, o autor assevera que um segundo pico (como o de 2012) pode ocorrer em decorrência do envelhecimento dos sistemas já instalados (aumento da tendência de falha).

Um relatório publicado pela Instituto Politécnico de Worcester reportou a ocorrência de 400 incidentes envolvendo arranjos fotovoltaicos e equipamentos relacionados a estes sistemas, entre os anos de 2009 e 2015, na região da Oceania (Austrália e Nova Zelândia), de modo que o pico de registro desses eventos se deu no ano de 2014, com mais de 140 casos [16].

Outro levantamento realizado nos Estados Unidos da América encontrou 128 incêndios ocorridos em edificações que contavam com equipamentos de sistema solar fotovoltaico, entre os anos de 2009 e 2018,

entretanto, não havia informações suficientes no estudo realizado que demonstravam se os sinistros tinham relação direta com o sistema de geração de energia [17].

Além do risco de iniciar um incêndio em si, a instalação de um sistema fotovoltaico numa edificação existente pode aumentar o risco total da estrutura para esse tipo de sinistro, uma vez que sua aplicação pode interferir em sistemas de ventilação de fumaça, obstruir o resfriamento e a extinção de focos de fogo de coberturas combustíveis, e propiciar a propagação de chamas entre ambientes interno e externo, devido à possibilidade de passagem de cabeamento em vários compartimentos da estrutura [18].

Num estudo sobre a dinâmica do fogo envolvendo painéis fotovoltaicos instalados em telhados [19], avaliaram o comportamento do fluxo de calor numa superfície inclinada, considerando a presença e ausência de painéis fotovoltaicos. Tal estudo revelou que a instalação dos painéis contribui significativamente para o risco global de incêndio da edificação, uma vez que o sistema pode se comportar tanto como a fonte ignitora como um item que altera substancialmente a dinâmica do fogo na edificação.

3.1. Principais Causas de Incêndios em SFVCR

Referência [15] aponta como causas raízes fatores como o gerenciamento incorreto do sombreamento, a exposição dos componentes do sistema a condições à margem dos padrões, componentes de baixa qualidade, o esmagamento/pensamento de cabos durante a instalação, avaliação incipiente do comportamento típico de correntes CC e descasamento de células FV.

Em um estudo [13], os autores encontraram que o risco de incêndio mais proeminente num SFVCR se dá no lado CC, sendo seguido pelo inversor e posteriormente pelo lado CA. Dos casos analisados, os autores identificaram que em 37% dos casos a causa do incidente se deu por instalação defeituosa, 35% por componentes/produtos defeituosos, 18% por falha no projeto (sendo estes três componentes anteriores classificados como falhas internas) e o restante se deu por influência externa. Outra constatação interessante é que as conexões entre componentes, especialmente as existentes no campo, são sensíveis quando se trata de risco de incêndio. Neste trabalho percebeu-se que muitos componentes utilizam conexões a parafuso, que necessitam de aperto adequado para resultar em contato elétrico satisfatório entre as partes do sistema. Neste estudo, os autores estratificaram os componentes que

deram causa aos incidentes avaliados conforme imagem abaixo.

No trabalho conduzido por [14], dos casos avaliados, 35% não tiveram causa raiz determinada, 28% não foram causados diretamente pelo sistema fotovoltaico, 26% ocorreram devido a instalações precárias e 8% por falha de projeto. No caso inglês, identificaram-se como principais componentes iniciadores dos incidentes os seccionadores CC e os conectores CC.

Verifica-se que as situações que podem ocasionar incêndios em SFVCR podem ocorrer em quaisquer das etapas da vida útil de um SFVCR, ou seja: fabricação dos componentes, manuseio e transporte destes, projeto, instalação, operação e manutenção. Citam-se ainda as circunstâncias naturais e do ambiente que podem propiciar condições para o surgimento de uma falha severa relacionada ao surgimento de uma fonte ígnea, como descargas atmosféricas, a ação da fauna, a deposição de neve, poeira e areia sobre os módulos e demais componentes, o ingresso de água em componentes (que pode provocar a oxidação de contatos metálicos, levando ao conseqüente aumento da resistência de contato), dentre outros.

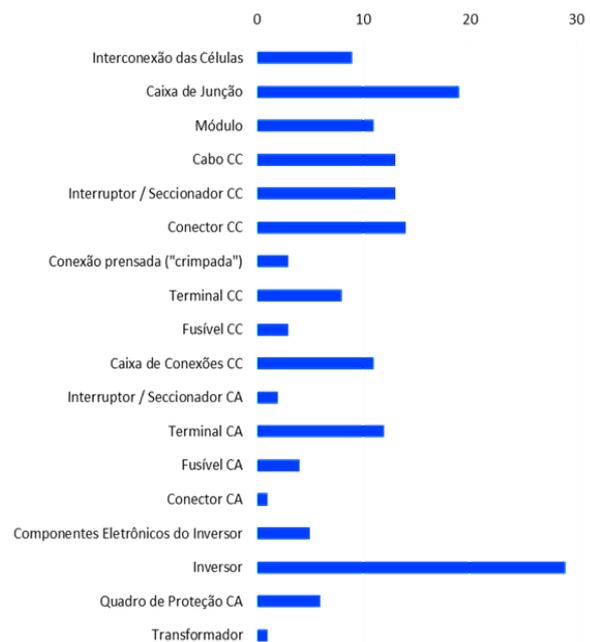


Figura 4. Adaptado de [13].

Para facilitar a visualização dos possíveis defeitos e as relações destes com as etapas de implantação de um SFVCR, foi elaborada a Tabela 1 abaixo, que resume tais situações e suas possíveis conseqüências relacionadas à incêndios.

Tabela 1. Situações propiciadoras de incêndio em SFVCR.

Item	Fase	Situação	Possíveis Consequências
1	Fabricação	Defeitos de Fabricação nos Diversos Componentes do SFVCR	Ponto quente (<i>Hot spot</i>), Aumento da resistência de contato (sobreaquecimento), falha em dispositivos de seccionamento, proteção, provocando sobreaquecimento e facilitando a ocorrência de arco elétrico
2	Projeto	Subdimensionamento de Cabos Elétricos	Aquecimento dos Condutores (Efeito Joule), podendo ocasionar sobreaquecimento, degradação da isolamento e arco elétrico
3	Projeto	Especificação incorreta de cabos (nível de isolamento, proteção contra radiação UV etc.)	Degradação da isolamento e arco elétrico
4	Projeto	Sobredimensionamento das Proteções CC	Não atuação em situações de defeito
5	Projeto	Sobredimensionamento das Proteções CA	Não atuação em situações de defeito
6	Projeto	Desbalanceamento de Arranjos	Circulação de corrente reversa perigosa, que pode causar aquecimento e iniciar combustão dos módulos FV
7	Projeto	Local com Sombreamento em parte dos módulos FV	Os painéis que ficam sombreados passam da condição de gerador para carga, dissipando parte da geração em forma de calor, provocando o aquecimento e podendo iniciar combustão dos módulos FV
8	Projeto	Estrutura não suporta peso do sistema / Estrutura inapropriada (para sistemas instalados em telhados)	Colapso estrutural com rompimento de circuitos CC, podendo provocar faltas que podem ocasionar o surgimento de fonte ígnea
9	Instalação	Danos aos componentes durante transporte, armazenamento e manuseio	Ponto quente (<i>Hot spot</i>), Aumento da resistência de contato (sobreaquecimento), falha em dispositivos de seccionamento, proteção, provocando sobreaquecimento e facilitando a ocorrência de arco elétrico
10	Instalação	Cabos em locais cortantes (quinas, rebarbas, etc)	Comprometimento da isolamento, podendo provocar arcos elétricos
11	Instalação	Prensagem dos conectores mal feita / Conectores mal conectados / Conector com utilização inapropriada	Aumento da Resistência de Contato, provocando o aquecimento do componente e favorecendo a ocorrência de arco elétrico
12	Instalação	Utilização de Conectores MC4 de fabricantes diferentes	Diferenças nos padrões de encaixe dos conectores, nos tipos de materiais aplicados, pode aumentar a resistência de contato, a degradação elétrica da parte metálica do conector, aumentando o risco de gerar pontos de aquecimento e favorecer a ocorrência de arco elétrico
13	Instalação	Tracionamento Incorreto dos cabos	Provoca tração nos conectores terminais, podendo prejudicar o contato elétrico, resultando no aumento da resistência de contato, provocando o aquecimento do componente e favorecendo a ocorrência de arco elétrico
14	Instalação	Desrespeito às distâncias de instalação de inversores String	Aquecimento dos inversores e demais componentes acessórios adjacentes.
15	Instalação	Instalação do inversor em local inapropriado	Local com pouca ventilação propicia o aumento da temperatura do inversor; Fixação dos inversores e proteções em locais com combustibilidade considerável (madeira e derivados)
16	Instalação	Aplicação de materiais não aplicáveis (Ex: cabos de alumínio com conectores incorretos)	Aumento da resistência de contato, descumprimento de normas técnicas e normas de segurança
17	Comissionamento	Continuidade em sistemas de aterramento	Centelhamento perigoso em caso de descargas atmosféricas ou falta em alguma região do sistema
18	Comissionamento / Operação e Manutenção	Tensões de Operação, Inversão de Polaridade nas Ligações CC	Ponto de atenção às manobras quando o GFV estiver em operação
19	Comissionamento	Componente defeituoso	Aumento da resistência de contato, gerando um ponto de aquecimento (conectores MC4) Aumento da temperatura dos painéis por células danificadas; Aumento da temperatura do inversor por mau funcionamento de componentes
20	Operação e Manutenção	Não operacionalização do sistema de monitoramento	Indireta: sistema não fornece alarmes e avisos
21	Operação e Manutenção	Não realização de inspeção visual e termográfica	Não acompanhamento da degradação de componentes do sistema e de possíveis pontos quentes em componentes
22	Operação e Manutenção	Não realização da limpeza dos módulos	Sombreamento parcial no sistema, podendo provocar aquecimento dos módulos
23	Operação e Manutenção	Degradação de componentes do SFVCR devido à exposição à intempéries (chuva, descargas atmosféricas, umidade, raios UV, variações acentuadas de temperatura ao longo do dia), condições ambientais (neve, poeira, ventanias, etc), pela ação de animais (roedores, insetos, pássaros) e pela realização de trabalhos de construção	Curto-circuito, arco elétrico (série e paralelo), aumento da resistência de contato entre componentes, sobreaquecimento

3.2. Mecanismos de Ignição em SFVCR

Dentre os principais fenômenos elétricos que podem desencadear as condições necessárias para originar um incêndio, destacam-se: sobrecarga, curto-circuito, arco elétrico, descargas atmosféricas, e mau contato (resistência de contato que gera aquecimento) [20].

A sobrecarga se dá quando um condutor elétrico, por alguma razão, transporta uma corrente elétrica muito maior do que a sua capacidade nominal. Dependendo da magnitude dessa corrente de sobrecarga e do tempo em que ela circula pelo condutor, é possível que o condutor seja aquecido até a temperatura do seu ponto de fusão, fazendo com que o condutor derreta, podendo haver a formação de um arco elétrico na ruptura do condutor [21].

O arco elétrico é o fluxo de energia elétrica entre dois pontos através do ar ionizado. Normalmente o ar é um meio não condutor, entretanto, uma diferença de potencial (ddp) entre dois condutores próximos pode causar a quebra das moléculas de ar no entorno destes, formando um meio denominado plasma o qual pode conduzir a corrente elétrica. A temperatura de um arco elétrico depende de vários fatores, entretanto, em aplicações fotovoltaicas pode atingir temperatura suficiente para derreter o vidro, cobre alumínio, e iniciar a combustão de materiais adjacentes. Este fenômeno não é visto como um risco relevante nos sistemas tradicionais de CA, uma vez que já existem muitas práticas, normas, componentes específicos e mão de obra experiente para essa modalidade de energia elétrica; outro ponto é que o arco elétrico em CA tende a se auto extinguir com facilidade, uma vez que as ondas de tensão atingem o valor nulo várias vezes num segundo. Para o caso da CC, a tensão permanece em níveis elevados durante a ocorrência de um arco, fazendo com que ele se mantenha ao longo do tempo. Portanto, qualquer vestígio que aponte a ocorrência de um arco elétrico indica que, possivelmente, ou ainda, provavelmente, isto foi a causa do sinistro [14].

O sobreaquecimento também pode ser um iniciador de incêndio, pois estes podem provocar o aquecimento de superfícies e materiais adjacentes ou da própria cobertura isolante dos condutores, comprometendo a isolação e favorecendo a ocorrência de arco elétrico [13,14].

Quando um circuito possui conexões precárias como parafusos com folga nos terminais elétricos, o aumento da resistência de contato ocasiona o aumento de temperatura daquela região (sobreaquecimento), promovendo a formação de uma interface de contato oxidada. Esta terá uma resistência elétrica muito maior que a resistência do metal, o que provocará um aquecimento a ponto de a conexão ficar incandescente [21].

Um estudo abrangente que analisou uma árvore de falha de incêndios ocorridos em telhados que continham sistemas fotovoltaicos elenca três possíveis mecanismos para desencadear o sinistro nessas estruturas: sobreaquecimento/arco elétrico, dano no módulo FV e

falha/falta de mecanismo de detecção e interrupção de dispositivos defeituosos [22].

Para compreender como os componentes de SFVCR podem ocasionar tais sinistros, faz-se necessário compreender quais os modos de falha podem patrocinar a origem do agente ígneo. Modo de falha pode ser definido como “a forma do defeito, a maneira na qual o defeito se apresenta, maneira com que o item falha ou deixa de apresentar o resultado desejado ou esperado” [23].

Após mapear os modos de falha específicos que podem propiciar o surgimento de um incêndio em dado componente e/ou subsistema de um SFVCR, a fim de que, quando da ocorrência do sinistro, seja possível identificar elementos que sejam associados a falha ocorrida e a caracterizem, foi elaborada a Tabela 2, que condensa os principais modos de falha relatados na literatura.

Com base nas situações propiciadoras e nos modos de falha avaliados, é possível realizar o apontamento de ações para mitigar e/ou eliminar o risco de incêndio em instalações fotovoltaicas. Referência [24] elenca alguns itens a serem observados quando da implantação de um gerador fotovoltaico, os quais estão relacionadas na Tabela 3.

3.3. Investigação de Incêndios e SFVCR

Como exposto anteriormente, a investigação de incêndios é uma tarefa complexa e que requer a aplicação de uma metodologia específica, preconizada na literatura especializada, a fim de que se obtenha a robustez da prova material necessária à investigação do fato. Atualmente, um dos principais documentos que norteia procedimentos de investigação pericial de incêndios é a norma norte americana NFPA 921 – *Guide for Fire and Explosion Investigations*, emitida pela *National Fire Protection Association*.

O procedimento consolidado neste guia serviu de base para a elaboração de importantes documentos nacionais, como o Manual de Perícia em Incêndios e Explosões do Corpo de Bombeiros Militar do Distrito Federal (CBMDF), composto por dois volumes, sendo o primeiro relativo a conhecimentos gerais, e o segundo, a conhecimentos específicos; e o Manual Operacional de Bombeiros: Perícia de Incêndio, do Corpo de Bombeiros Militar de Goiás.

Ambos os documentos nacionais utilizam a abordagem de investigação de incêndio estabelecida na citada norma estadunidense, a qual, em resumo, está sendo mostrada na Figura 5.

Todos os documentos citados trazem inúmeras informações a respeito da investigação de incêndios, contemplando conhecimentos sobre a ciência do fogo, o comportamento de materiais de construção civil em situação de incêndio, os padrões de queima (marcas de combustão), os incêndios intencionais, e, dentre outros conteúdos, os incêndios relacionados a eletricidade.

Tabela 2. Modos de Falha Relacionados à Incêndios em SFVCR.

Componente	Modo de Falha	Etapas de Ocorrência da Falha	Categoria	Severidade da Falha
Módulo	Fissuras/Rachaduras nas Células Fotovoltaicas	Fabricação, Manuseio, Transporte, Instalação e Operação	Físico	Pode contribuir para o surgimento de uma fonte ígnea
Módulo	Marcas de Queimadura (múltiplas causas: fissuras, rachaduras, contato precário dos condutores de interligação das células fotovoltaicas etc.)	Fabricação, Manuseio, Transporte, Instalação e Operação	Físico / Elétrico	Diretamente relacionado ao surgimento de uma fonte ígnea
Módulo	Soldas metálicas defeituosas	Fabricação, Manuseio, Transporte, Instalação e Operação	Físico	Pode contribuir para o surgimento de uma fonte ígnea
Módulo	Rompimento dos Condutores Internos / Barramentos das Células	Fabricação, Manuseio, Transporte, Instalação e Operação	Físico	Pode contribuir para o surgimento de uma fonte ígnea
Módulo	Falha do Diodo de by-pass	Fabricação e Operação	Elétrica	Pode contribuir para o surgimento de uma fonte ígnea
Módulo	Fluxo de corrente reversa	Projeto, Instalação e Operação	Elétrica	Diretamente relacionado ao surgimento de uma fonte ígnea
Módulo	Rompimento/Quebra do Vidro Temperado do Módulo	Fabricação, Manuseio, Instalação e Operação	Físico	Diretamente relacionado ao surgimento de uma fonte ígnea
Módulo	Defeito / Descolamento da Caixa de Conexões (<i>Junction box</i>)	Fabricação, Manuseio, Instalação e Operação	Físico	Pode contribuir para o surgimento de uma fonte ígnea
Módulo	Falha nas interconexões da caixa de conexões (soldas de má qualidade, contato precário entre os componentes etc.)	Fabricação e Operação	Físico	Diretamente relacionado ao surgimento de uma fonte ígnea
Módulo	Padrões de ponto quente (<i>Hot spots</i>) – por sombreamento, degradação induzida por potencial etc.	Fabricação, Manuseio, Instalação e Operação	Físico	Diretamente relacionado ao surgimento de uma fonte ígnea
Cablagem de CC	Descasamento / Incompatibilidade (<i>mismatch</i>) de conectores CC (diferentes fabricantes)	Fabricação, Instalação e Operação	Físico / Elétrico	Diretamente relacionado ao surgimento de uma fonte ígnea
Cablagem de CC	Defeitos em Cabos e Conectores (Isolação degradada/comprometida, Conector quebrado/danificado, mal prensado etc.)	Fabricação, Instalação e Operação	Físico / Elétrico / Ambiental	Diretamente relacionado ao surgimento de uma fonte ígnea
Caixa de Conexão / Proteção CC	Dano térmico em caixa de conexão/proteção CC (marcas de queima: sobreaquecimento, arco elétrico etc.)	Fabricação, Instalação e Operação	Físico / Elétrico	Diretamente relacionado ao surgimento de uma fonte ígnea
Inversor	Instalação incorreta (instalação em local inadequado, sem ventilação)	Instalação	Físico	Pode contribuir para o surgimento de uma fonte ígnea
Inversor	Falha de Componentes Internos	Fabricação e Operação	Físico / Elétrico	Diretamente relacionado ao surgimento de uma fonte ígnea
Cablagem de CA	Defeitos em Cabos e Conectores (Isolação degradada/comprometida, Conector quebrado/danificado, mal prensado etc.)	Fabricação, Instalação e Operação	Físico / Elétrico	Diretamente relacionado ao surgimento de uma fonte ígnea
Caixa de Proteção CA	Dano térmico em caixa de proteção CA (marcas de queima: sobreaquecimento, arco elétrico etc.)	Fabricação, Instalação e Operação	Físico / Elétrico	Diretamente relacionado ao surgimento de uma fonte ígnea
Estrutura de Montagem do SFVCR	Estrutura inadequada / defeituosa (falha estrutural, aperto excessivo nos módulos e demais componentes etc.)	Fabricação e Instalação	Físico	Pode contribuir para o surgimento de uma fonte ígnea

Tabela 3. Ações de prevenção contra incêndios em SFVCR [24].

Item	Ações de Prevenção
Projeto	Diminuir o número de conexões elétricas
	Dimensionamento dos condutores respeitando suas normas específicas
	Projeto de proteções do sistema (sobrecorrente, sobretensão, etc.)
	Respeito aos limites de tensão, corrente e temperatura dos componentes
	Capacitação técnica
	Aplicação das normas NBR 5410, NBR 16690, NBR 5419 e demais onde aplicável
Instalação	Capacitação técnica dos instaladores
	Aplicação de torque correto nas conexões
	Comissionamento do sistema
	Rotina de manutenção e inspeção (através de interface online do inversor, por exemplo)
	Proteção mecânica de cabos quando aplicável
	Uso de ferramenta correta para terminação dos conectores (alicate crimpador, por exemplo)
Componentes	Uso de presilhas e abraçadeiras que durem o tempo de serviço do sistema ou o tempo entre manutenções de troca
	Casamento de conectores tipo MC4
	Uso de terminais corretos
	Uso de cabo solar (NBR 16612) nos trechos obrigatórios
	Escolha de componentes com respeito às normas nacionais e internacionais
Escolha de componentes com fácil comunicação com o fabricante (em caso de garantia ou dúvida técnica)	

As informações sobre os incêndios relacionados à eletricidade contidas nesses documentos são aplicáveis para o caso de incêndios em SFVCR, entretanto, existem características específicas dos SFVCR que devem ser observadas quando da investigação de um incêndio nestes sistemas e que não são contempladas nos documentos anteriormente citados.

Dessa forma, os procedimentos recomendados neste trabalho visam complementar os procedimentos de investigação de incêndios já existentes, de modo a contribuir nas etapas “Coletar dados” e “Analisar dados” do fluxograma indicado na Figura 5, para que o perito consiga: coletar as informações no local do fato quando da realização da perícia; elaborar e testar as hipóteses relacionadas a sinistros que envolvam SFVCR.



Figura 5. Adaptado de [21].

3.4. Recomendações de procedimentos para exame em locais de incêndio que envolvam SFVCR

A generalização para procedimentos de locais de incêndio é algo de difícil implementação quando se trata de eventos relacionados a fenômenos elétricos, de modo que, ao final dos exames, quando descartadas outras possíveis fontes de agente ígneo, deve-se proceder à busca de elementos elétricos [20].

Quando se trata de SFVCR, além das demais verificações relacionadas na literatura especializada, sugere-se a realização das seguintes etapas:

- Solicitar o projeto do SFVCR aprovado na concessionária e/ou *as built* para se ter uma noção da composição do sistema (características elétricas das placas, das cablagens, das proteções CA e CC, dos inversores, balanceamento dos arranjos fotovoltaicos etc.) e das grandezas elétricas estimadas do sistema;

- Verificar em que período do dia se deu o fato, pois durante o dia os painéis fotovoltaicos estão recebendo a luz solar, e, em condições normais, há tensão e circulação de corrente CC no sistema, propiciando ocorrências no lado CC do sistema; entretanto, caso o sinistro tenha ocorrido durante a noite, em condições normais, não há tensão e nem circulação de corrente CC no sistema;
- Verificar, quando possível, os módulos fotovoltaicos a fim de se averiguar a existência de marcas de combustão/carbonização, arcos elétricos, trincas no vidro dos painéis, danos que indiquem a ocorrência de descargas atmosféricas etc., e qual foi a extensão dos danos nessa região do sistema (se foi somente uma parte dos módulos – pode ser um indicativo de corrente reversa - ou se grande quantidade foi afetada);
- Avaliar se a cobertura/telhado onde está o sistema possui material combustível como telhas sanduíche (material isolante é composto de poliestireno, poliuretano ou poliisocianurato, que são materiais inflamáveis) ou outro que pode ter contribuído para o desencadeamento das chamas;
- Se a cobertura/telha for metálica, verificar a existência de vestígios de arco elétrico (“buracos” ou semelhantes) que possam ter sido provocados por componentes do SFVCR;
- Avaliar, quando possível, as conexões entre os módulos fotovoltaicos a fim de se verificar a aplicação correta dos conectores (conectores MC4) e a existência de vestígios de arco elétrico;
- Avaliar, quando possível, a fiação dos arranjos fotovoltaicos a fim de se verificar a integridade, a especificação dos cabos (cabo próprio para sistema solar, com proteção UV, reforçado mecanicamente etc.), o caminhamento da fiação (se existe restrição em algum ponto ou passagem por superfícies afiadas – comprometimento da isolamento), as conexões entre eles, quando houver (deve ser feita com conectores MC4), e a existência de vestígios de curto-circuito;
- Avaliar, quando possível, as conexões no lado CC para se verificar a utilização de conectores MC4 de fabricantes diferentes e vestígios de arco elétrico;
- Avaliar o aspecto da(s) *string box(es)* e/ou suas partes remanescentes para se verificar se a cablagem que chega das placas possui bitola compatível com a corrente e tensão estimadas dos arranjos do sistema, a existência de marcas de combustão, de componentes derretidos e/ou fundidos e pérolas de fusão;
- Avaliar se o local de instalação do(s) inversor(es) possui ventilação necessária para realizar as trocas de calor e se tal fato teve alguma relação com o sinistro (causa, contribuição ou não afetou);

- Avaliar se as distâncias mínimas de instalação do(s) inversor(es), a fim de propiciar a sua capacidade de resfriamento, foram respeitadas, e se este item possui alguma relação com o sinistro (causa, contribuição ou não afetou);
- Verificar localmente no(s) inversor(es) (quando possível), pelos botões de navegação e display(s) do(s) equipamentos (quando existentes) a existência de alguma mensagem de falha e/ou erro (geralmente é dada em código, que deve ser consultado no manual do inversor);
- Avaliar a extensão dos danos no(s) inversor(es) e se existem vestígios de que o foco inicial tenha sido este(s) equipamento;
- Avaliar se o aspecto do quadro de proteção CA e/ou suas partes remanescentes para se verificar se a cablagem que sai do(s) inversor(es) possui bitola compatível com a corrente e tensão estimadas de saída do(s) inversor(es), a existência de marcas de combustão, de componentes derretidos e/ou fundidos e pérolas de fusão;
- Verificar se a cablagem de saída do(s) inversor(es) é de alumínio e avaliar se está de acordo com as normas de instalações elétricas de baixa tensão vigentes e se foram utilizados (quando possível avaliar) conectores adequados para realizar as conexões (conectores bimetálicos na interface cobre/alumínio por exemplo);
- Verificar como se dá a conexão do(s) circuito(s) CA de saída do(s) inversor(es) ao sistema elétrico da edificação (se a cablagem de saída é conectada diretamente na cablagem de entrada de serviço da edificação ou se é conectada a um quadro geral de baixa tensão da edificação - QGBT – como se fosse um circuito específico desse quadro);
- Verificar se o ramal de ligação e de entrada da edificação são compatíveis com a possível carga da edificação e com o sistema de geração fotovoltaica instalado na edificação;
- Verificar a existência de elementos combustíveis e vestígios disto nas proximidades da região de instalação dos componentes do SFVCR;
- Verificar qual o esquema de aterramento utilizado no SFVCR e inspecionar os componentes remanescentes deste a fim de se buscar vestígios de ocorrências de faltas à terra;
- Coletar as informações de acesso ao sistema de monitoramento (quando ativo) do SFVCR a fim de se verificar as informações dos parâmetros elétricos do SFVCR do dia do sinistro e de dias anteriores para comparações posteriores de condições de operação e a existência de alarmes e/ou avisos de falha (quando existente no sistema de monitoramento);

- Coletar as imagens do circuito de monitoramento interno de câmeras (quando disponível/existente) para se corroborar (ou não), quando possível, o local de surgimento do foco do fogo e estudar com mais precisão o desenvolvimento das chamas.

4. CONCLUSÕES

As ocorrências de incêndio em sistemas fotovoltaicos conectados à rede, apesar de não serem frequentes, quando ocorrem, causam transtornos, prejuízo ao patrimônio e à vida, tanto dos proprietários quanto de terceiros.

Dadas as características peculiares de um SFVCR em relação às redes elétricas convencionais, conclui-se que as tabelas elaboradas acima podem auxiliar o trabalho pericial em local de incêndios que envolvam tais sistemas por meio do conhecimento das falhas e situações que podem desencadear um sinistro dessa natureza.

Ressalta-se também a importância do perito/investigador de incêndio adquirir conhecimentos específicos sobre as principais normas técnicas que balizam as etapas de concepção, instalação, comissionamento e operação de um SFVCR, uma vez que o profissional deverá checar, quando possível e aplicável, a obediência da instalação periciada às prescrições normativas, e deverá estabelecer a relação disso (nexo causal) com o sinistro em análise.

Além disso, os procedimentos operacionais sugeridos podem auxiliar na investigação do sinistro, contribuindo na busca de vestígios de fenômenos elétricos relacionados ao SFVCR e na elaboração de hipóteses a serem consideradas e/ou descartadas quando da análise do fato. Assevera-se que o perito de local deve avaliar as condições de realização dos procedimentos propostos, uma vez que devem ser consideradas as características de segurança do local, a disponibilidade de equipamentos e recursos para a sua execução e a pertinência da aplicação das recomendações propostas ao caso concreto.

Por fim, o estabelecimento assertivo da causa raiz de tais ocorrências, quando possível, além de amparar tecnicamente a lide judicial e a possível responsabilização civil e/ou criminal de tais eventos, pode fomentar a implementação de mudanças em projetos de equipamentos e sistemas, e incentivar a atualização de normas de segurança e desempenho de instalações de SFVCR.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Aneel. Geração Distribuída: Saiba mais sobre micro e minigeração distribuída. *Aneel*. Retirado em 02/10/2022, de <https://www.gov.br/aneel/pt-br/assuntos/geracao-distribuida>.

- [2] Absolar. Panorama da solar fotovoltaica no Brasil e no mundo. *Absolar*. Retirado em 03/10/2022, de: <https://www.absolar.org.br/mercado/infografico/>.
- [3] M. Badra. Incêndio em sistema FV reforça importância de empresas capacitadas. *Canal Solar*. Retirado em 01/11/2023, de: <https://canalsolar.com.br/incendio-em-sistema-fv-no-interior-de-sp-reforca-importancia-de-empresas-capacitadas/>.
- [4] R.F. Aragão. *Incêndios e Explosivos: Uma Introdução à Engenharia Forense*. Millenium, Brasil, 2010.
- [5] M.G. Villalva. *Energia solar fotovoltaica: conceitos e aplicações*, Érica, Brasil, 2012.
- [6] R. Zilles, et al. *Sistemas fotovoltaicos conectados à rede elétrica*. Oficina de Textos, Brasil, 2012.
- [7] M.G. Villalva. Como funciona a seleção de cargas nos sistemas FV híbridos?. *Canal Solar*. Retirado em 02/08/2023, de <https://canalsolar.com.br/como-funciona-a-selecao-de-cargas-nos-sistemas-fv-hibridos/>.
- [8] K. Zeb, et al. A comprehensive review on inverter topologies and control strategies for grid connected photovoltaic system. *R. S. Energy Reviews* **94**, 1120-1141, 2018.
- [9] Alternergy. Solar DC Connectors Mismatch - A Safety Risk. *Alternergy*. Retirado em 04/08/2023, de [https://www.alternergy.co.uk/blog/post/solar-dc-connectors-mismatch-a-safety-risk#:~:text=MC4%20was%20invented%20by%20St%C3%A4ubli,connectors%2C%20appeared%20in%20the%20market](https://www.alternergy.co.uk/blog/post/solar-dc-connectors-mismatch-a-safety-risk#:~:text=MC4%20was%20invented%20by%20St%C3%A4ubli,connectors%2C%20appeared%20in%20the%20market.).
- [10] PLP. Catálogo de Produtos Solar. *PLP*. Retirado em 04/08/2023, de <https://plp.com.br/wp-content/uploads/2019/12/catlogo-solar-2019.pdf>.
- [11] H. Hein. Curto-circuito em sistema FV causa princípio de incêndio em hotel. *Canal Solar*. Retirado em 05/08/2023, de <https://canalsolar.com.br/curto-circuito-em-sistema-fv-causa-principio-de-incendio-em-hotel/>.
- [12] M. Badra. Sistema FV é atingido por incêndio em fábrica de Minas Gerais. *Canal Solar*. Retirado em 05/08/2023, de <https://canalsolar.com.br/sistema-fv-atingido-por-incendio-em-fabrica-de-minas-gerais/>.
- [13] H. Laukamp, et al. PV Fire Hazard – Analysis and assessment of fire incidents. Proceedings of 28 EU PVSEC. 4304-4312, 2013.
- [14] BRE National Solar Centre. Fire and Solar PV Systems – Investigations and Evidence - Report Number: P100874-1004 Issue 2.9. *BRE National Solar Centre*. Retirado em 01/10/2022, de https://assets.publishing.service.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/786882/Fires_and_solar_PV_systems-Investigations_Evidence_Issue_2.9.pdf
- [15] L. Fiorentini, et al. Fire Risk Assessment of Photovoltaic Plants. A case study moving from two large fires: from accident investigation and forensic engineering to fire risk assessment for reconstruction and permitting purposes. *Chemical Engineering Transactions* **48**, 427-432, 2016.
- [16] Worcester Polytechnic Institute. Fire Safety of Solar Photovoltaic Systems in Australia. *Worcester Polytechnic Institute*. Retirado em 06/08/2023, de https://web.wpi.edu/Pubs/E-project/Available/E-project-050116-222843/unrestricted/FireRisksOfSolarPV_ATA_D16_Final.pdf?_ga=2.92370264.419960244.1585651955-1828871872.1585651955.
- [17] B. Meachan; M. Mcnamee. Fire Safety Challenges of ‘Green’ Buildings and Attributes – Final Report. *Fire Protection Research Foundation*. Retirado em 06/08/2023.
- [18] Dubai Electricity & Water Authority – DEWA. PV on Buildings and Fire Safety: Recommendation For DRRG Solar PV Systems. Dubai Electricity & Water Authority – DEWA. Retirado em 06/08/2023, de https://www.dewa.gov.ae/images/smartistitatives/PV_on_Buildings.pdf.
- [19] J.S. Kristensen, B. Merci, G. Jomaas. Fire-induced re-radiation underneath photovoltaic arrays on flat roofs. *Fire and Materials* **42**, 316-323, 2018.
- [20] C. Cordioli. Incêndio com Origem em Fenômeno Elétrico. In: R. F. Aragão. *Incêndios e Explosivos: Uma Introdução à Engenharia Forense*. Millenium, Brasil, 2010.
- [21] National Fire Protection Association - *NFPA 921: Guide for Fire and Explosion Investigations*. Quincy, United States of America, 2021.
- [22] N.A.F.M.N. Ong, et al. Fault tree analysis of fires on rooftops with photovoltaic systems. *Journal of Building Engineering* **46**, 1103752, 2022.
- [23] E.Y. Sakurada. As técnicas de Análise dos Modos de Falha e seus Efeitos e Análise da Árvore de Falhas no desenvolvimento e na Avaliação de Produtos. *Dissertação de Mestrado*. Mestrado em Engenharia Mecânica. Universidade Federal de Santa Catarina, 2001.
- [24] M. Badra. Saiba os reais riscos de incêndios em sistemas fotovoltaicos. *Canal Solar*. Retirado em 01/11/2023, de: <https://canalsolar.com.br/saiba-os-reais-riscos-de-incendios-em-sistemas-fotovoltaicos/>.