

# ANÁLISE DE RISCO DE INCÊNDIO EM GERADORES FOTOVOLTAICOS EM EDIFICAÇÕES ATRAVÉS DA ÁRVORE DE FALHAS

Luis Phellipe Guimarães Cruz – luiscruz@id.uff.br

Bruno Teles Chaves

Ricardo Barbosa da Silva Junior

Gilberto Figueiredo

Universidade Federal Fluminense, Escola de Engenharia

**Resumo.** Este estudo se concentra na análise de riscos de incêndio em geradores fotovoltaicos em edificações, com ênfase na utilização da técnica da Árvore de Falhas. A pesquisa aborda a necessidade de avaliar os riscos associados à crescente adoção da energia solar fotovoltaica, destacando os potenciais fatores de risco, como sobrecargas elétricas, curtos-circuitos, falhas de isolamento e outros eventos indesejados. A metodologia envolve a coleta de dados, a identificação de eventos indesejados e a construção da Árvore de Falhas, permitindo a representação visual das relações de causa e efeito. Foram identificadas medidas de mitigação, incluindo projeto adequado, monitoramento, manutenção e proteção contra sobrecargas e curtos-circuitos. Este estudo destaca a importância da segurança em sistemas fotovoltaicos, contribuindo para a promoção da energia solar como uma fonte de eletricidade segura, confiável e sustentável. A análise de riscos desempenha um papel fundamental nesse processo, garantindo que os sistemas fotovoltaicos atendam aos altos padrões de segurança.

**Palavras-chave:** Incêndio em Geradores Fotovoltaicos; Análise de Risco; Árvore de Falhas

## 1. INTRODUÇÃO

A partir de 2010, o crescimento histórico da capacidade global de energia fotovoltaica excedeu as projeções da Agência Internacional de Energia Solar e estima-se que alcance mais de um terawatt até 2023 (Haegel et al., 2017; Schmela, 2019). A energia gerada por um sistema fotovoltaico é em forma de corrente contínua c.c. que pode ser transformada em corrente alternada c.a. através do uso de um inversor. Os sistemas fotovoltaicos compreendem módulos fotovoltaicos, juntamente com um inversor e outros componentes de suporte, tanto elétricos quanto mecânicos. A eletricidade produzida por meio desses sistemas fotovoltaicos tornou-se de grande relevância nos últimos anos, abrindo perspectivas para o crescimento sustentável da geração de eletricidade em escala global (Falvo e Capparella, 2015).

O aumento expressivo na instalação de sistemas geradores fotovoltaicos traz consigo desafios significativos, dentre os quais a questão do gerenciamento de riscos de incêndio emerge como um tema de crucial importância. A Agência Internacional de Energia (IEA) destaca que o aumento substancial na capacidade instalada de geração solar fotovoltaica trouxe consigo uma preocupação crescente com os riscos associados a incêndios, com ênfase na necessidade de medidas proativas para mitigar esses riscos (IEA, 2021).

Em um estudo recente, Wu et al. (2020) apresentaram uma revisão sobre técnicas de prevenção de incêndios fotovoltaicos na qual concluíram que o diagnóstico de falhas e a configuração de módulos fotovoltaicos são fundamentais para a prevenção de incêndios em sistemas fotovoltaicos de grande escala. Para compreender o risco relacionado com o incêndio dos sistemas fotovoltaicos montados em edificações, os relatórios de Coonick et al. (2018) e Sepanski et al. (2018) são os mais relevantes, pois ambos contêm dados sobre a ocorrência, consequência e causas de incêndios relacionados com energia fotovoltaica. Nas suas conclusões, ambos os relatórios apresentam uma série de recomendações baseadas na experiência adquirida no exame dos acontecimentos históricos. No entanto, nenhum dos relatórios inclui uma análise geral das causas subjacentes aos incêndios, nem uma visão quantitativa das consequências.

Na Alemanha no período de 1995 a 2012, Laukamp et al (2013), informam que ocorreram 400 eventos de incêndio em módulos fotovoltaicos (FV) reportados e mais 180 não reportados que depois foram provados que a causa do incêndio era devido aos geradores FV. Na maioria dos casos somente os módulos e os sistemas foram destruídos, porém em 75 ocasiões as edificações foram danificadas sendo que 10 delas foram completamente destruídas.

No Brasil, membros do Comitê de Estudo CE - 024 da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) estão desenvolvendo normas que indicam medidas de prevenção e proteção contra incêndio para sistemas fotovoltaicos em edificações. Concomitantemente, o Corpo de Bombeiros do Estado de Goiás, publicou a Norma Técnica 44/2023 Portaria nº 544/2023 que estabelece diretrizes e medidas de segurança essenciais relacionadas a sistema fotovoltaicos. Com esta publicação da norma, Goiás se junta aos estados de Minas Gerais e Mato Grosso, que já possuem regulamentação quanto a segurança em sistemas fotovoltaicos de acordo com os padrões estabelecidos pelo Corpo de Bombeiros. No entanto, o Brasil carece de requisitos de prevenção e combate a incêndio em edificações residenciais e comerciais. Apesar da quantidade limitada de investigação, bem como de dados quantitativos e qualitativos, que descrevem as consequências

relacionadas com o incêndio causadas pela introdução de sistemas fotovoltaicos no ambiente construído, a potencial violação das estratégias fundamentais de segurança contra incêndios deverá levantar um alerta.

## 2. METODOLOGIA

Este estudo se concentra na identificação e definição dos eventos indesejados que podem causar incêndio em geradores fotovoltaicos em áreas construídas. Para este fim, será utilizada a árvore de falhas, que é uma ferramenta eficaz e prospectiva para analisar a segurança e confiabilidade de um sistema (Hu, 2016; Kang, 2019). O método tem o potencial de identificar relações de falhas no sistema, destacar padrões de falhas antes que surjam, comparar vários projetos para priorização de segurança, ajudar as autoridades a avaliar os perigos gerais e tomar decisões para evitar falhas críticas (Moraru, 2013). Este estudo será um ponto de partida para um estudo mais abrangente do risco de incêndio fotovoltaico no futuro.

A aplicação da árvore de falhas permite a simulação sistemática de um evento indesejado em suas causas e fatores contribuintes. Nessa abordagem, eventos indesejados, como incêndios em sistemas geradores fotovoltaicos (SGF), são visualizados como falhas principais. A partir dessas falhas principais, uma árvore de falhas é construída de forma hierárquica, incluindo as causas primárias e secundárias que podem levar a essas falhas. Essa representação gráfica oferece uma visão estruturada dos riscos associados à SGF, identificando as relações de causa e efeito entre as falhas e suas origens. A avaliação quantitativa e qualitativa da probabilidade de ocorrência das falhas. A utilização da árvore de falhas nesse contexto fornece uma abordagem científica e sistemática para identificar, analisar e gerenciar os riscos de incêndio em SGF, contribuindo para a segurança, confiabilidade e sustentabilidade dessas instalações.

As análises qualitativas da árvore de falhas foram realizadas com incêndios em geradores fotovoltaicos como evento principal. Este trabalho foi dividido em 3 etapas - Fig. 1. Na primeira etapa, foi realizada uma revisão aprofundada da literatura, com ênfase em publicações relacionadas a artigos sobre a investigação de incêndios fotovoltaicos e dados de relatórios nacionais. Na etapa 2, foram realizadas entrevistas semiestruturadas com especialistas membros de grupos de estudo de sistemas fotovoltaicos, empresas instaladoras e profissionais de combate a incêndio. As entrevistas foram organizadas por meio de 2 tópicos relacionados aos fatores de riscos de incêndio em sistemas geradores fotovoltaicos e as estratégias de mitigação destes riscos, conforme Tab.2. Na terceira etapa, utilizou-se a abordagem qualitativa da árvore de falhas para reconhecer os prováveis fatores da ocorrência do evento principal, identificando os eventos intermediários e básicos. Todos os eventos foram conectados ao evento principal por meio de portas lógicas.



Figura 1- Etapas da pesquisa.

Tabela 1 – Tópicos da entrevista semiestruturada

Tópicos	Descrição
1	Fatores de riscos de incêndio em sistemas geradores fotovoltaicos
2	Estratégias de mitigação destes riscos

## 3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

### a. Análise da árvore de falhas

A pesquisa iniciou com o evento indesejado definido, Incêndio em geradores fotovoltaicos. A partir das entrevistas semiestruturadas com especialistas da área, foram identificadas e listadas as principais falhas que podem levar ao evento indesejado. Em seguida, identificou-se as causas primárias e secundárias relacionadas as falhas conforme mostra a Tab. 2 e criou-se uma árvore de falhas (Fig. 2) sistemática a fim de estruturar os dados coletados.

Tabela 2 - Identificação e definição dos eventos indesejados

<b>Evento</b>	<b>Falhas</b>	<b>Causas Primárias</b>	<b>Causas Secundárias</b>
Ignição no módulo fotovoltaico	X1 Ausência de detectores das falhas		
	X2 Arco / Superaquecimento	X3 Danos ao módulo	A5 Danos por distorção dos módulos A6 Danos causados por montagens A7 Expansão ou contração térmica A8 Distorção das estruturas
Ignição causada pelo isolador	X1 Ausência de detectores das falhas		
	X2 Arco / Superaquecimento	B1 Umidade B2 Apertos inadequados dos parafusos B3 Erros de instalação B4 Defeitos de fabricação B5 Componentes danificados	
Ignição causada pelo inversor	X1 Ausência de detectores das falhas		
	X2 Arco / Superaquecimento	C1 Umidade C2 Danos nos cabos C3 Erro de instalação C4 Falta de ventilação C5 Defeitos de fabricação	
Ignição causada pelo fusível	X1 Ausência de detectores das falhas		
	X2 Arco / Superaquecimento	D1 Entrada de água D2 Apertos inadequados dos parafusos D3 Danos aos componentes D4 Erro de instalação	
Ignição causada por cabo	X1 Ausência de detectores das falhas		
	X2 Arco / Superaquecimento	E1 Rompimento de cabos E2 Efeitos de intemperismo E3 Danos causados por animais E4 Erros de instalação	
Ignição causada pelo conector	X1 Ausência de detectores das falhas		
	X2 Arco / Superaquecimento	F1 Entrada de umidade F2 Apertos inadequados dos parafusos F3 Contatos crimpados incorretamente F4 Dano físico F5 Erro de instalação F6 Plugues e tomadas incompatíveis F7 Juntas mal soldadas	
Fonte de ignição não identificada ou não relacionada			

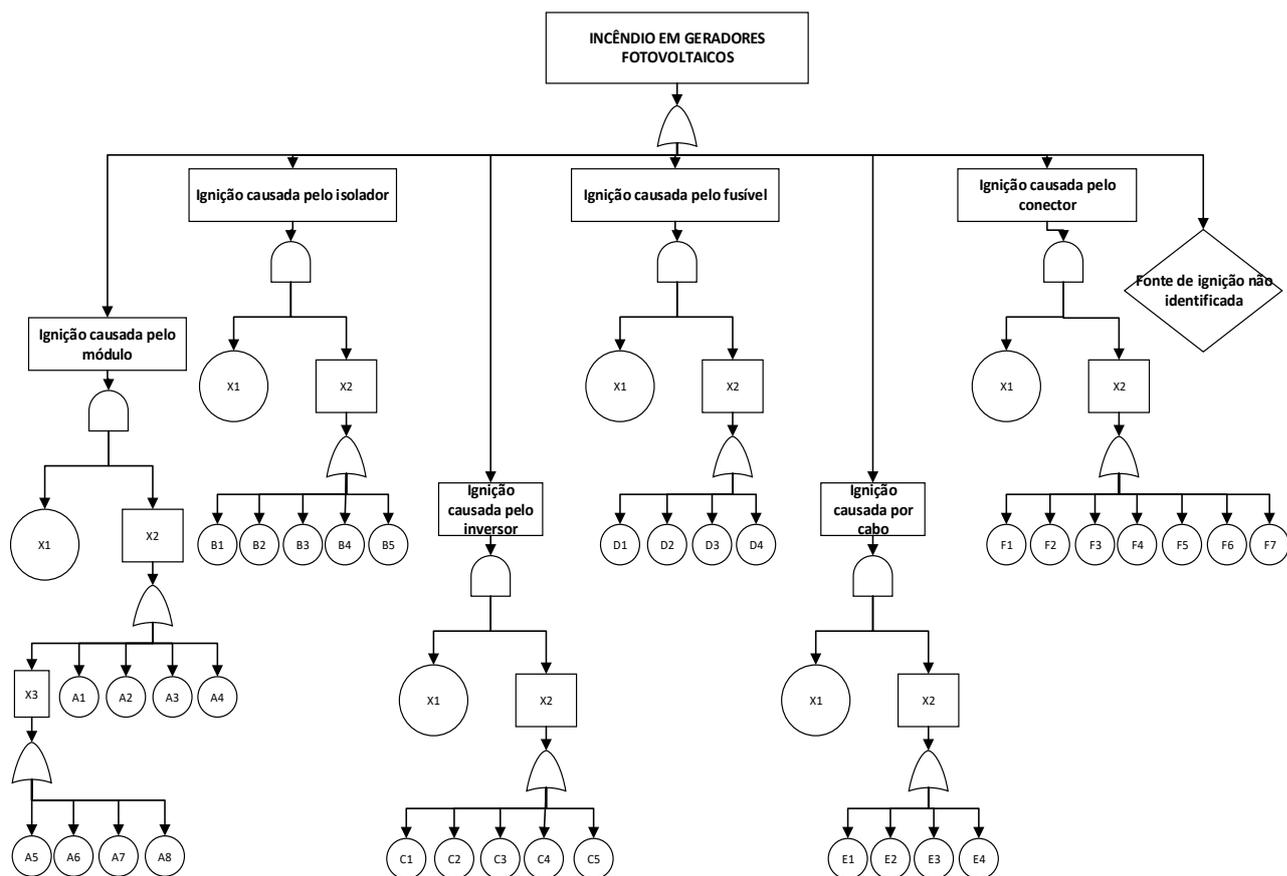


Figura 2 - Árvore de falhas.

### b. Ignição causada pelo módulo fotovoltaico

Os módulos fotovoltaicos consistem na montagem de células fotovoltaicas envoltas por uma camada antirreflexo de vidro e uma cobertura traseira de plástico. Uma estrutura de alumínio é comumente utilizada para proteger bordas de vidro e fornecer resistência mecânica, fixando-os à estrutura de montagem. Componentes adicionais incluem interconexões, terminais e diodos Brooks *et al.* (2010). De acordo com os especialistas, incêndios nos módulos fotovoltaicos podem ser desencadeados por arcos elétricos ou superaquecimento, muitas vezes devido a falhas na detecção e mitigação de falhas. As causas subjacentes para esses arcos ou superaquecimento em módulos incluem danos físicos, corrosão, falha de diodos de bypass, erros de instalação e defeitos de fabricação. Em certos casos em que módulos fotovoltaicos são suspeitos de serem causa de incêndios, é possível encontrar acusações de arcos elétricos nos restos de um ou mais módulos. Conforme demonstrado pelo estudo de Spanski *et al.* (2018), os módulos desempenham um papel proeminente na ocorrência de incêndios em sistemas fotovoltaicos. Os especialistas afirmam que alguns módulos disponíveis no mercado apresentam danos de fabricação ou falhas decorrentes de danos causados por embalagens convencionais e práticas de transporte deficientes. Em alguns incidentes, a análise do projeto do sistema fotovoltaico revelou falhas que resultaram na instalação inadequada dos módulos, gerando arcos elétricos devido ao rompimento da estrutura. A caixa de junção do módulo é um ponto quente no início de incêndios nos módulos, devido à falta de garantia de qualidade durante a fabricação, resultando em defeitos do produto. (Laukamp *et al.*, 2013)

### c. Ignição causada pelo Isolador

De acordo com especialistas, o interruptor de corrente contínua é colocado para interromper ou fornecer energia dos módulos solares para o inversor, quando necessário. Isso evita que o inversor seja alimentado com c.c. e, conseqüentemente, não forneça c.a. à propriedade. A chave de corrente alternada c.a. é geralmente instalada no circuito entre o inversor e o painel de distribuição de propriedade. Semelhante ao interruptor de c.c., seu objetivo é proteger contra incêndios e garantir a segurança, desligando circuitos dentro da propriedade. Para Coonick *et al.* (2018), tanto nos interruptores de c.a. quanto nos de c.c., incêndios podem ser desencadeados por arcos elétricos ou superaquecimento, muitas vezes devido a falhas na detecção e mitigação de falhas. As causas subjacentes para esses arcos ou superaquecimento nos interruptores incluem entrada de umidade, terminais de parafusos soltos, erros de instalação, defeitos de projeto e fabricação interna, bem como danos físicos aos componentes.

### d. Ignição causada pelo inversor

O inversor é uma parte complexa de um sistema fotovoltaico que gerencia e converte ativamente a corrente contínua c.c. dos módulos fotovoltaicos em corrente alternada. A maioria dos incidentes de incêndio relacionados à energia fotovoltaica não são iniciados pelas falhas no inversor. Uma das razões é porque os inversores estão bem equipados com sensores e excelentes recursos de segurança que ajudam prevenir falhas catastróficas. De acordo com o estudo de Coonick et al. (2018), nove dos 64 incêndios foram iniciados pelos defeitos do inversor. Um estudo conduzido por Chiamonte (2016) descobriu que 21% dos incêndios fotovoltaicos foram originados de inversores. O incêndio no inversor ocorre quando há arco voltaico, falha na detecção e interrupção de falhas de dispositivos. As causas básicas para o arco e o aquecimento no inversor são danos nos cabos, entrada de umidade, interruptores defeituosos, defeitos de fabricação e erro de instalação. Instalação desprotegida de inversores ao ar livre com o estresse causado pela temperatura e condensação também pode causar incêndio nesses componentes.

**e. Ignição causada pelo fusível**

A caixa de junção em um sistema fotovoltaico reúne a saída de várias séries fotovoltaicas. Cada cabo de *string* se conecta a um terminal de fiação e as saídas dos fusíveis são combinadas em um único condutor que conecta a caixa ao inversor, conforme mencionado por Smalley (2015). Um arco elétrico e superaquecimento, devido a falha ou falta de detecção de falhas podem desencadear um incêndio em um componente, conforme destacado por Zhao et al. (2011). Uma conexão deficiente na caixa de combinação c.c. pode resultar em um arco elétrico e ignição, causada por práticas de instalações elétricas e conexões prejudicadas devido à entrada de água. Outro fator significativo para conexões internas são os terminais de parafuso frouxos neste componente. Laukamp et al. (2013) revelaram que a caixa de junção no lado c.c. do sistema fotovoltaico é uma causa proeminente do incêndio, uma vez que os terminais de parafuso na caixa de combinação c.c. são um ponto fraco e podem resultar em conexões que podem causar ruínas incêndios.

**f. Ignição causada por cabo**

Coonick et al. (2018) informam que pesquisas realizadas no Reino Unido e na Alemanha revelaram que uma parcela significativa dos incêndios associados a sistemas fotovoltaicos é desencadeada por falhas elétricas nos cabos. Os cabos elétricos desempenham um papel essencial em toda a configuração do sistema fotovoltaico, pois são responsáveis por conectar diversos componentes. Como resultado, eles são suscetíveis a danos decorrentes de condições climáticas adversas, esforços físicos acidentais, erros de projeto e até mesmo danos causados por animais, o que torna um dos principais pontos de vulnerabilidade. Todos esses fatores podem levar à formação de arcos elétricos e superaquecimento em cabos que, se não forem identificados e interrompidos por dispositivos de detecção de falhas, podem resultar em incêndios no sistema. Spanski *et al.* (2018), também observaram que cabos subdimensionados podem gerar tensão excessiva nos cabos e danificar os conectores devido ao estresse mecânico, enquanto mordidas de animais podem prejudicar o isolamento, tornando-o suscetível a arcos e curtos-circuitos. Além disso, Alam et al. (2015) discutiram as implicações do isolamento danificado dos cabos, destacando que além dos danos causados por roedores e impactos físicos, a corrosão, a infiltração de água e o envelhecimento também representam riscos potenciais de ignição. Strobl e Meckler (2010) também enfatizaram a importância das consequências do intemperismo prolongadas nesse contexto.

**g. Ignição causada pelo conector**

De acordo com os especialistas, os conectores e terminais são considerados uma causa frequente de falhas no sistema fotovoltaico. Combinados com os cabos, eles são usados para conectar componentes, bem como para conectar módulos fotovoltaicos em série para aumentar a tensão ou em paralelo para aumentar a corrente. Sepanski et al. (2018) concluíram que existem várias razões que apontam os conectores como uma fonte de arco voltaico e de ignição de incêndio, sendo elas a crimpagem incorreta, terminais de parafuso soltos, plugue e tomada incompatíveis, erros de instalação, juntas de solda inadequadas, conectores não totalmente inseridos e montagem do plugue. Além disso, Sepanski et al. (2018) revelaram que a conexão cruzada entre conectores de diferentes fabricantes é uma fonte potencial de ignição e o fato de múltiplas marcas poderem ser interligadas não garante uma conexão elétrica ideal com a mesma vida útil das conexões entre dois plugues projetados um para o outro. Nesses casos, a resistência de contato aumenta com o tempo, o que leva ao superaquecimento do contato e finalmente se converte em arco. Além destas razões, Coonick et al. (2018) apontam que se o contato for exposto à umidade, pode causar corrosão que pode levar ao aquecimento resistivo que pode ser um precursor do arco voltaico.

**h. Fonte de ignição não identificada ou não relacionada**

Diferentemente dos incidentes anteriores, o evento sétimo é classificado como um evento não plenamente desenvolvido, indicando que ele pode ser aprimorado e subdividido ainda mais. O último grande evento inclui duas origens de incêndio: (a) uma ignição de origem desconhecida no sistema fotovoltaico e (b) uma fonte de ignição não associada ao sistema fotovoltaico. Nas análises baseadas em dados estatísticos de incêndios e investigações, ocorreram casos em que o incêndio não pôde ser atribuído a um componente específico devido a restrições de acesso por parte dos bombeiros ou investigadores, motivadas por questões de segurança, ou devido à dificuldade de determinar a origem exata da ignição dentro do sistema fotovoltaico. Além disso, é importante observar que nem todos os incêndios relacionados à energia fotovoltaica são resultados direto de uma ignição no sistema fotovoltaico. Assim como em outros incêndios em edifícios, a origem do incêndio pode ser externa, como um incêndio no interior do próprio edifício. Embora o sistema fotovoltaico não inicie o incêndio, a presença de módulos fotovoltaicos como objetos físicos pode influenciar a dinâmica

do fogo, facilitando a propagação das chamas. O último evento principal na análise da árvore de falhas é o único em que a probabilidade de incêndio não pode ser reduzida por fatores relacionados ao sistema fotovoltaico.

**i. Estratégia de mitigação**

No contexto da análise de riscos de incêndio em geradores fotovoltaicos residenciais e comerciais, a implementação de estratégias de mitigação desempenha um papel crucial na promoção da segurança e sustentabilidade desses sistemas. A análise dos riscos revelou fatores potenciais que podem levar a incêndios e as estratégias de mitigação são essenciais para reduzir esses riscos e garantir a confiabilidade dos sistemas fotovoltaicos. Uma das estratégias de mitigação mais eficazes é a adoção de medidas preventivas durante o projeto, instalação e operação dos sistemas. Isso inclui a escolha de componentes de alta qualidade, dimensionamento de segurança, isolamento adequado e a garantia de que as instalações elétricas atendam às normas técnicas. Além disso, a manutenção regular, incluindo a limpeza de módulos, inspeção de conexões e testes de desempenho, é uma estratégia fundamental para evitar riscos decorrentes de mal funcionamento.

A implementação de sistemas de monitoramento também é uma estratégia de mitigação importante. Sensores de temperatura, corrente e tensão podem identificar anomalias rapidamente, permitindo a tomada de medidas corretivas antes que um problema se agrave e leve a um incêndio. A proteção contra sobrecargas elétricas e curtos-circuitos é outra estratégia de mitigação crítica. A instalação de dispositivos de proteção, como interruptores e fusíveis, ajuda a interromper o fluxo de corrente em situações de sobrecarga e curto-circuito, diminuindo o risco de incêndio. Além disso, o isolamento adequado e a segregação de circuitos podem minimizar a propagação de falhas. A conscientização e o treinamento também são estratégias essenciais. Operadores e proprietários de sistemas fotovoltaicos devem ser educados sobre os riscos e saber como identificar sinais de problemas potenciais. Isso contribui para uma resposta mais rápida em situações de risco.

#### **4. CONCLUSÃO**

A análise de riscos de incêndio em geradores fotovoltaicos residenciais e comerciais utilizando a técnica da Árvore de Falhas demonstrou ser uma ferramenta crucial na busca por sistemas seguros e sustentáveis. Ao longo deste estudo, explorou-se em profundidade os fatores de risco associados aos sistemas fotovoltaicos, identificou-se potenciais cenários de falha e desenvolveu-se estratégias de mitigação próximas. Os resultados desta pesquisa destacam a importância de considerar a segurança desde a fase de projeto e instalação até a manutenção contínua dos sistemas fotovoltaicos. A identificação de riscos, a avaliação e a implementação de medidas de mitigação não apenas protegem as instalações e os investimentos dos proprietários, mas também protegem para a segurança das comunidades e do meio ambiente.

De acordo com as causas primárias e secundárias que podem levar ao incêndio, foi observado que grande parte se deve a instalação inadequada, falta de manutenção e a qualidade dos geradores. Para assegurar um desempenho ótimo do sistema fotovoltaico e mitigar quaisquer potenciais riscos de incêndio, impera a necessidade de uma instalação e manutenção meticulosas, juntamente com a exigência de que os módulos fotovoltaicos sejam de alta qualidade. O estrito cumprimento das regulamentações vigentes reveste-se de importância crucial, visto que tal conformidade atua como salvaguarda contra equívocos indesejados e salvaguarda a segurança e eficiência do sistema.

A energia solar fotovoltaica desempenha um papel significativo na transição para fontes de energia mais limpas e renováveis. No entanto, para garantir que essa transição seja segura e eficaz, é imperativo que a análise de riscos seja uma parte integrante do processo. A utilização da Árvore de Falhas como uma ferramenta de análise de risco oferece *insights* importantes e permite uma compreensão mais profunda dos cenários potenciais de incêndio. Ao promover a conscientização sobre os riscos e a implementação de medidas preventivas, esta pesquisa contribui para um setor de energia solar mais seguro e confiável no Brasil.

#### **Agradecimentos**

O estudo contou com o suporte da Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado do Rio de Janeiro (FAPERJ), no âmbito do programa de Auxílio Básico à Pesquisa (APQ1). Os autores agradecem à FAPERJ e à UFF pelo apoio concedido ao longo da realização desta pesquisa.

#### **REFERÊNCIAS**

- Alam, M. K., Khan, F., Johnson, J., & Flicker, J. (2015). A Comprehensive Review of Catastrophic Faults in PV Arrays: Types, Detection, and Mitigation Techniques. *IEEE Journal of Photovoltaics*, 5(3), 982-997. doi:10.1109/JPHOTOV.2015.2397599
- Brooks, B., Bunting, S., Cercos, F., Enea, D., Hostetter, J., Kateley, S., Kitchel, W., Tyler, B., Paiss, M., Sakamoto, V., & French, M. (2010). Fire Operations for Photovoltaic Emergencies. Retrieved from [https://www.ncdoi.com/OSFM/RPD/PT/Documents/Coursework/PhotovoltaicEmergencies/Fire%20Ops%20W\\_PVs.pdf](https://www.ncdoi.com/OSFM/RPD/PT/Documents/Coursework/PhotovoltaicEmergencies/Fire%20Ops%20W_PVs.pdf)
- Chiaromonte, A., Smith, A. D., & Hood, Z. J. (2016). Fire Safety of Solar Photovoltaic Systems in Australia. Worcester Polytechnic Institute. Retrieved from <https://web.wpi.edu/Pubs/E-project/Available/E-project050116->

222843/unrestricted/FireRisksOfSolarPV\_ATA\_D16\_Final.pdf?\_ga=2.92370264.419960244.1585651955-1828871872.1585651955

- Coonick, C., Pester, S., Acott, J., Burroughs, M., Clarke, C., Sinclair, C., Weeks, C., Longfield, A., Crowder, D., Cotterell, M., Flanagan, M., Galvin, J., Holland, C., Mansi, P., Parsons, J., Shipp, M., & Smith, S. (2018). Fire and Solar PV Systems – Investigations and Evidence (P100874-1004 Issue 2.9). Retrieved from [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](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)
- Falvo, M. C., & Capparella, S. (2015). Safety issues in PV systems: Design choices for a secure fault detection and for preventing fire risk. *Case Studies in Fire Safety*, 3, 1-16. doi:10.1016/j.csfs.2014.11.002
- Haegel, N. M., Margolis, R., Buonassisi, T., Feldman, D., Froitzheim, A., Garabedian, R., Green, M., Glunz, S., Henning, H.-M., Holder, B., Kaizuka, I., Kroposki, B., Matsubara, K., Niki, S., Sakurai, K., Schindler, R. A., Tumas, W., Weber, E. R., Wilson, G., Woodhouse, M., & Kurtz, S. (2017). Terawatt-scale photovoltaics: Trajectories and challenges. *Science*, 356(6334), 141. doi:10.1126/science.aal1288
- Hu, Y. (2016). Research on the application of fault tree analysis for building fire safety of hotels. *Procedia Engineering*, 135, 524-530.
- IEA – International Energy Agency. Biofuels for transport – an international perspective, 2021. Disponível em: <http://www.iea.org/textbase/nppdf/free/2021/biofuels2021.pdf>. Acesso em 23 out. 2023.
- Kang, J., Sun, L., & Soares, C. G. (2019). Fault Tree Analysis of floating offshore wind turbines. *Renewable Energy*, 133, 1455-1467.
- Laukamp, H., Bopp, G., Grab, R., Wittwer, C., Häberlin, H., Heeckeren, B. v., Phillip, S., Reil, F., Schmidt, H., Sepanski, A., Thiem, H., & Vaassen, W. (2013). PV Fire Hazard - Analysis and Assessment of Fire Incidents. Paper presented at the 28th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition, Paris.
- Moraru, R. I., & Băbuț, G. B. (2013). The use of fault tree in industrial risk analysis: A case study. Paper presented at the Proc. 1st Int. Conf. on Industrial and Manufacturing Technologies (Vouliagmeni).
- Sepanski, A., Reil, F., Vaßen, W., Janknecht, E., Hupach, U., Bogdanski, N., Heeckeren, B. v., Schmidt, H., Bopp, G., Laukamp, H., Grab, R., Philipp, S., Thiem, H., Huber, J., Haselhuhn, R., Häberlin, H., Krutzke, A., Neu, B., Richter, A., Bansemer, B., & Halfmann, M. (2018). Assessing Fire Risks in Photovoltaic Systems and Developing Safety Concepts for Risk Minimization. Retrieved from Cologne, Germany: [https://www.energy.gov/sites/prod/files/2018/10/f56/PV%20Fire%20Safety%20Fire%20Guideline\\_Translation\\_V04%2020180614\\_FINAL.pdf](https://www.energy.gov/sites/prod/files/2018/10/f56/PV%20Fire%20Safety%20Fire%20Guideline_Translation_V04%2020180614_FINAL.pdf)
- Smalley, J. (2015). What is a combiner box? Access date : 4th May 2020. Retrieved from <https://www.solarpowerworldonline.com/2015/06/what-is-a-combiner-box/>
- Schmela, M. (2019). Global Market Outlook for Solar Power 2019–2023. SolarPower Europe (SPE, formerly known as EPIA) Press Release ([www.solarpowereurope.org](http://www.solarpowereurope.org)).
- Strobl, C., & Meckler, P. (2010). Arc faults in photovoltaic systems. Paper presented at the 2010 Proceedings of the 56th IEEE Holm Conference on Electrical Contacts.
- Wu, Z., Hu, Y., Wen, J., Zhou, F., & Ye, X. (2020). A Review for Solar Panel Fire Accident Prevention in LargeScale PV Applications. *IEEE Access*, 8, 132466-132480. doi:10.1109/ACCESS.2020.3010212
- Zhao, Y., Lehman, B., de Palma, J.-F., Mosesian, J., & Lyons, R. (2011). Challenges to overcurrent protection devices under line-line faults in solar photovoltaic arrays. Paper presented at the 2011 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition.

## FIRE RISK ANALYSIS IN PHOTOVOLTAIC GENERATORS IN BUILDINGS USING FAULT TREE ANALYSIS

**Abstract.** *This study focuses on the analysis of fire risks in photovoltaic generators in buildings, with an emphasis on the use of the Fault Tree technique. The research addresses the need to assess the risks associated with the growing adoption of photovoltaic solar energy, highlighting potential risk factors such as electrical overloads, short circuits, insulation failures and other unwanted events. The methodology involves collecting data, identifying unwanted events and building a Fault Tree, allowing the visual representation of cause and effect relationships. Mitigation measures have been identified, including appropriate design, monitoring, maintenance and protection against overloads and short circuits. This study highlights the importance of safety in photovoltaic systems, contributing to the promotion of solar energy as a safe, reliable and sustainable source of electricity. Risk analysis plays a key role in this process, ensuring that photovoltaic systems meet high safety standards.*

**Keywords:** *Fire in Photovoltaic Generators; Risk analysis; Fault Tree*