

Uso da inteligência artificial na segurança contra incêndio em sistema solar fotovoltaico

Use of artificial intelligence in fire safety in solar photovoltaic systems

Uso de inteligencia artificial en seguridad contra incendios en sistemas solares fotovoltaicos

Recebido: 09/12/2023 | Revisado: 19/12/2023 | Aceitado: 22/12/2023 | Publicado: 26/12/2023

Merivaldo de Freitas Brito

ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-9885-3783>
Universidade Estadual do Ceará, Brasil
E-mail: merivaldo@mbritto.com.br

Lutero Carmo de Lima

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7313-729X>
Universidade Estadual do Ceará, Brasil
E-mail: luterodelima@gmail.com

Natasha Esteves Batista

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9172-5098>
Universidade Federal do Ceará, Brasil
E-mail: estevesnatasha@gmail.com

Resumo

A energia solar fotovoltaica, especialmente na modalidade de Geração Distribuída (GD), desempenha um papel essencial na matriz energética global, incluindo o cenário brasileiro. Este artigo tem como objetivo analisar a aplicação da Inteligência Artificial (IA) na segurança contra incêndios em sistemas solares fotovoltaicos, com foco no aprimoramento e otimização dos processos de prevenção, detecção e resposta aos incidentes relacionados a incêndios. Portanto, torna-se essencial implementar medidas abrangentes, detecção de arco especialmente inteligente e desligamento rápido de tecnologias, a fim de melhorar a segurança e a gestão das plantas FV, seja em instalações residenciais, comerciais e industriais ou mesmo nas fazendas solares. Como metodologia adota uma abordagem descritiva e estudo de caso, de caráter qualitativo, bem como fontes bibliográficas em livros, artigos e periódicos online, busca-se compreender e temática da aplicação da IA na segurança de sistemas solares fotovoltaicos, bem como a análise de casos específicos que exemplifiquem a eficácia da IA na prevenção e resposta a incidentes de incêndio em instalações solares. Dentre os resultados, buscam-se demonstrar as contribuições da IA de forma significativa para maximizar a segurança e a confiabilidade aos usuários de sistemas solares FV, protegendo vidas e propriedades. Conclui-se que a aplicação da IA nesse contexto contribui não apenas para a proteção dos usuários e suas propriedades, mas também para a sustentabilidade e confiabilidade contínuas da geração de energia solar FV. Sendo assim, a sua utilização deve ser incentivada e regulamentada de acordo com as normas de segurança em vigor.

Palavras-chave: Inteligência artificial; Sistema solar; Fotovoltaico; Segurança; Incêndio.

Abstract

Photovoltaic solar energy, especially in the form of Distributed Generation (DG), plays an essential role in the global energy matrix, including the Brazilian scenario. This article aims to analyze the application of Artificial Intelligence (AI) in fire safety in photovoltaic solar systems, focusing on improving and optimizing prevention, detection and response processes to fire-related incidents. Therefore, it becomes essential to implement comprehensive measures, especially intelligent arc detection and rapid shutdown technologies, in order to improve the safety and management of PV plants, whether in residential, commercial and industrial installations or even in solar farms. As a methodology, it adopts a descriptive approach and case study, of a qualitative nature, as well as bibliographical sources in books, articles and online journals, seeking to understand the application of AI in the safety of photovoltaic solar systems, as well as case analysis. specifications that exemplify the effectiveness of AI in preventing and responding to fire incidents in solar installations. Among the results, we seek to demonstrate the contributions of AI in a significant way to maximize safety and reliability for users of solar PV systems, protecting lives and properties. It is concluded that the application of AI in this context contributes not only to the protection of users and their properties, but also to the ongoing sustainability and reliability of solar PV power generation. Therefore, its use must be encouraged and regulated in accordance with current safety standards.

Keywords: Artificial intelligence; Solar system; Photovoltaic; Security; Fire.

Resumen

La energía solar fotovoltaica, especialmente en la forma de Generación Distribuida (GD), juega un papel esencial en la matriz energética global, incluido el escenario brasileño. Este artículo tiene como objetivo analizar la aplicación de la

Inteligencia Artificial (IA) en la seguridad contra incendios en sistemas solares fotovoltaicos, centrándose en mejorar y optimizar los procesos de prevención, detección y respuesta ante incidentes relacionados con incendios. Por ello, se hace imprescindible implementar medidas integrales, especialmente tecnologías inteligentes de detección de arco y apagado rápido, para mejorar la seguridad y gestión de las plantas fotovoltaicas, ya sea en instalaciones residenciales, comerciales e industriales o incluso en parques solares. Como metodología, adopta un enfoque descriptivo y estudio de casos, de carácter cualitativo, así como fuentes bibliográficas en libros, artículos y revistas en línea, buscando comprender la aplicación de la IA en la seguridad de los sistemas solares fotovoltaicos, así como análisis de casos. análisis especificaciones que ejemplifican la eficacia de la IA en la prevención y respuesta a incidentes de incendio en instalaciones solares. Entre los resultados, buscamos demostrar las contribuciones de la IA de manera significativa para maximizar la seguridad y confiabilidad de los usuarios de sistemas solares fotovoltaicos, protegiendo vidas y propiedades. Se concluye que la aplicación de la IA en este contexto contribuye no sólo a la protección de los usuarios y sus propiedades, sino también a la sostenibilidad y confiabilidad continua de la generación de energía solar fotovoltaica. Por ello, se debe fomentar y regular su uso de acuerdo con las normas de seguridad vigentes.

Palabras clave: Inteligencia artificial; Sistema solar; Fotovoltaica; Seguridad; Fuego.

1. Introdução

O uso de inteligência artificial na segurança em Sistema Fotovoltaico (FV) - *Arc Fault Circuit Interrupter* (AFCI). Este trabalho explora como a inteligência artificial pode ser aplicada para melhorar a segurança e proteção da vida de usuários do sistema solar FV.

A matriz elétrica brasileira, totalizando 221.992 MW, é destacada pela Associação Brasileira de Energia Solar Fotovoltaica (ABSOLAR), revelando a significativa contribuição da energia solar. Com 35.739 MW, ou 16,1% do total, a energia solar fotovoltaica ocupa o segundo lugar, superada apenas pela energia hídrica, que representa 109.909 MW (49,5%). Essa ascensão da energia solar é testemunha do crescente papel das fontes renováveis na diversificação e sustentabilidade do setor elétrico nacional. A hídrica, embora predominante, cede espaço para alternativas mais limpas e inovadoras. O avanço da energia solar fortalece a resiliência do sistema, reduzindo emissões de gases de efeito estufa e promovendo a transição para uma matriz mais sustentável. Esse cenário reflete o compromisso do Brasil em promover fontes de energia limpa e reforça a importância contínua do investimento em tecnologias renováveis para enfrentar desafios ambientais e garantir um futuro energético mais verde.

O Brasil após a publicação da Resolução 482/2012, que deu direito ao consumidor final, de gerar sua própria energia através de uma fonte limpa e sustentável, observou gradativamente o crescimento de forma exponencial da fonte FV dentro da modalidade GD, nesse momento, ainda não se colocava a segurança dos usuários e instaladores de sistemas FV e propriedades como uma prioridade, até mesmo as normas internacionais, pouco se falava em demandas de falhas. O cenário mundial foi ganhando proporções com a geração de energia através da fonte FV, energia limpa e sustentável, também ficou rentável ao bolso do consumidor final, e com as instalações começaram também as falhas, principalmente falhas elétricas, seja por má instalação ou falha de produtos que ocasionassem incêndios. De acordo com os padrões estabelecidos pela UL1699b. Esse termo se refere às normas de segurança elétrica e dispositivos usados em sistemas FV. A proteção de circuito contra arcos em corrente contínua (DC) fotovoltaica é usada para prevenir riscos de incêndio devido a arcos elétricos em sistemas PV, e a UL *Subject* 1699B é uma norma específica que define requisitos e procedimentos de teste para dispositivos de proteção contra arcos DC em sistemas FV, garantindo que eles possam detectar e interromper eficazmente arcos elétricos em tais sistemas. Esses padrões e dispositivos são essenciais para garantir a segurança de sistemas PV e a prevenção de incêndios elétricos. O cumprimento da UL *Subject* 1699B e o uso de dispositivos de proteção contra arcos DC são fundamentais no projeto e instalação de sistemas FV para atender a requisitos de segurança e regulamentações. É importante verificar com as autoridades relevantes e seguir os códigos e normas elétricas locais ao trabalhar com sistemas PV para garantir o cumprimento e a segurança (Zgonena & Dini, 2011).

A aplicação da UL1699B em sistema solar FV, onde aborda-se a importância da conformidade com normas de segurança, como a UL1699B, em sistemas solares FV. Será discutido como essa norma contribui para garantir a segurança elétrica e prevenir riscos em sistemas FV.

Nesse caso, estaremos analisando uma falha ocorrida no sistema solar FV comercial instalado na propriedade do telhado do estabelecimento comercial, localizada na cidade de Santo Antônio de Leverger MT, analisando atuação de sistema de proteção AFCI (*Arc Fault Circuit Interrupter*). O referido sistema, avaliado em torno de R\$135.000,00, atualizados ao preço de serviços e equipamentos “*Turn-Key*”, é composto por 64 módulos de painéis solares, abrange uma área total de 162,99 m² e possui capacidade instalada de 24,9 kWp. Está instalado com inversor de 20 kW.

Desta forma, um aspecto crucial é o desenvolvimento de um modelo preditivo de previsão de geração de energia solar. Através da análise de dados meteorológicos, padrões de insolação e outros fatores ambientais, a inteligência artificial pode criar modelos precisos que preveem a quantidade de energia que um sistema FV pode gerar em determinado momento. Isso é fundamental para planejar o fornecimento de energia de forma eficiente e confiável durante o longo período de operação do PV.

A Inteligência Artificial é utilizada na segurança e também nas demandas de gestão e manutenção de PV (O&M) para uma melhor eficiência. Sendo assim, considera-se que o inversor realiza, ao transformar corrente contínua em corrente alternada, gerando dados e alarmes de sobre, tensão, corrente, potência, frequências entre outras informações e supervisórios que garantam que empresa instaladora possa de forma eficaz, uma melhor análise diária do desempenho de um sistema solar instalado. Com o objetivo de agregar tecnologias a alguns inversores como padrão internacional, vem estabelecendo também a questão do uso da Inteligência Artificial para assegurar vidas e propriedades de usuários e instaladores de sistema solar FV (Canal Solar, 2020).

O emprego da inteligência artificial visa proporcionar uma camada avançada de proteção, garantindo maior segurança em instalações residenciais, comerciais, industriais e rurais, tanto em Geração Distribuída (GD) quanto em Geração Centralizada (GC).

Este artigo tem como objetivo analisar a aplicação da Inteligência Artificial (IA) na segurança contra incêndios em sistemas solares fotovoltaicos, com foco no aprimoramento e otimização dos processos de prevenção, detecção e resposta aos incidentes relacionados a incêndios.

2. Metodologia

Como metodologia utiliza-se a pesquisa bibliográfica mediante a consulta a livros, artigos e periódicos online, abrangendo temas como energia solar FV, transição energética, políticas energéticas, regulamentação do setor, incentivos fiscais e financeiros, inovação tecnológica, entre outros relevantes. As fontes de referência incluíram não apenas publicações acadêmicas, mas também relatórios técnicos, documentos normativos e publicações de órgãos governamentais. A interpretação dos resultados se deu mediante uma análise aprofundada dos dados, relacionando-os diretamente com os objetivos específicos delineados na pesquisa (Gil, 2017).

Foi implementada a metodologia de estudo de caso, conforme delineado por Yin (2015, p.58), que define o estudo de caso como “uma investigação de um fenômeno contemporâneo dentro de seu contexto da vida real, especialmente quando os limites entre o fenômeno e o contexto não estão claramente definidos”. Em relação à natureza da metodologia, o estudo de caso proposto é predominantemente qualitativo, buscando uma compreensão aprofundada e contextualizada dos inversores de string com tecnologia AFCI. A abordagem qualitativa permite uma análise detalhada das características, desempenho e impacto dessa tecnologia em situações práticas.

Os métodos qualitativos envolvem abordagens de pesquisa centradas na interpretação e compreensão aprofundada do fenômeno em estudo, dando destaque à subjetividade do pesquisador. Nesse tipo de método, o pesquisador assume um papel ativo na coleta e análise de dados, incorporando suas próprias perspectivas e opiniões. Um estudo de caso é uma análise detalhada de um caso específico que destaca características particulares, proporcionando uma compreensão aprofundada da situação. Sob a abordagem de Estudos de Caso, englobam-se diversas investigações, formando uma ampla variedade de contextos e cenários.

Esses estudos oferecem insights valiosos sobre fenômenos específicos, permitindo uma análise minuciosa das circunstâncias e fatores que contribuem para a singularidade do caso em questão (Pereira et al., 2018).

O presente artigo aborda um estudo de caso que destaca a segurança dos inversores de string, mesmo na ausência de otimizadores de potência ou microinversores, quando equipados com a tecnologia AFCI em conformidade com a norma UL1699B. A implementação dessa tecnologia é crucial para assegurar a rápida e automática desconexão do sistema em caso de falha de arco elétrico, visando proteger tanto a vida dos usuários quanto suas propriedades.

O estudo foi conduzido na Planta Solar Fotovoltaica de 24,9 kWp localizada na cidade de Santo Antônio de Leverger (MT). Para realizar a pesquisa, foi necessário acesso aos projetos e sistemas elétricos dessa instalação comercial. Os resultados obtidos fornecem insights valiosos sobre a eficácia dos inversores de string quando combinados com a tecnologia AFCI, reforçando a confiança na segurança desses sistemas fotovoltaicos.

O escopo da análise incluiu não apenas as publicações sobre dados do setor de energia solar fotovoltaica, mas também as disposições legais, resoluções, diretrizes, incentivos e requisitos específicos estabelecidos pela legislação vigente, notadamente pelas normas técnicas que abrangem. A análise do desempenho do sistema de segurança contra arco elétrico do lado de corrente contínua em sistemas solares fotovoltaicos (FV), conforme estabelecido pela norma UL16699B, revela avanços significativos no âmbito da segurança. O fabricante de inversores testado integrou Inteligência Artificial (IA) com hardware implantado, uma inovação crucial que impede a propagação de chamas, proporcionando um nível mais elevado de segurança nas instalações residenciais, comerciais, industriais e rurais tanto em Geração Distribuída (GD) quanto em Geração Centralizada (GC).

Sendo assim, busca-se avaliar a importância da presença de IA no hardware do sistema de segurança é uma abordagem proativa e eficaz, pois capacita o sistema a identificar e responder rapidamente a situações de arco elétrico. A capacidade de evitar a propagação de chamas representa uma camada adicional de proteção, reduzindo consideravelmente os riscos de incêndios em ambientes diversificados. Além disso, foram considerados estudos e relatórios provenientes de instituições governamentais e não governamentais que se debruçam sobre o setor em questão. A coleta de dados relevante visou assegurar uma análise embasada em fontes confiáveis e atualizadas, com o propósito de obter informações precisas sobre a energia solar fotovoltaica, a legislação vigente e as práticas de mercado.

3. Discussão

Os sistemas de energia solar FV, geram eletricidade através da conversão da irradiação do sol, sendo dois tipos básicos de sistemas: os Isolados (*Off-grid*) ou conectados à rede (*On-grid*) da Concessionária.

E recentemente foi implementada a aprovação da Lei 14.300 em 07 de janeiro de 2022, e com ela, a permissão do uso dos inversores híbridos (*on grid* com acoplamento para bateria), de acordo com a Portaria 140 do Inmetro, publicada dia 19 de março de 2021. Diferencial da tecnologia dos inversores híbridos, que o mesmo pode ser utilizado tanto em sistema *off grid* como em sistema *on grid*, ele nos permite, quando houver uma falta de energia da concessionária local ou não tiver irradiação, pode ser obtido através da bateria, energia para alimentar determinada carga, ou de acordo com dimensionamento até mesmo alimentar toda carga. Os Sistemas Isolados podem ser utilizados em locais remotos como casas de campo, iluminação pública, estações de telecomunicações e etc, não existe conexão com concessionária de energia no modo *off grid* (Brasil, 2022).

A partir de 17 de abril de 2012, com a entrada em vigor da Resolução Normativa ANEEL nº 482/2012, os consumidores brasileiros conquistaram o direito de produzir sua própria energia elétrica a partir de fontes renováveis ou cogeração qualificada por meio dos sistemas *On Grid*. Adicionalmente, foi permitido que esses consumidores entregassem o excedente de energia gerada à rede de distribuição local, com o intuito de posteriormente compensar o consumo de energia (ANEEL, 2019).

Essas inovações estão associadas à Microgeração e Minigeração Distribuídas de Energia Elétrica (MMGD), e ao

Sistema de Compensação de Energia Elétrica (SCEE). As diretrizes que normatizam a MMGD foram sujeitas a ajustes pela ANEEL ao longo do tempo, incluindo modificações nos limites de potência instalada e nas modalidades de participação no SCEE. Essas alterações foram implementadas por meio de Resoluções Normativas, a exemplo da nº 687, datada de 24 de novembro de 2015, e da nº 786, de 17 de outubro de 2017, conforme indicado pelo Ministério de Minas e Energia (MME, 2023).

A Resolução Normativa nº 1.059, de 7 de fevereiro de 2023, promoveu ajustes nos regulamentos da ANEEL em conformidade com a Lei nº 14.300, de 7 de janeiro de 2022, bem como com estudos conduzidos desde 2018. Além disso, consolidou as disposições relacionadas à MMGD e ao SCEE nas condições gerais de fornecimento de energia, como estabelecido na Resolução Normativa nº 1.000/2021 (MME, 2023).

Desta forma, as referidas mudanças regulatórias buscaram melhor incentivar a geração descentralizada de energia, impulsionando a utilização de fontes renováveis, a economia financeira para os consumidores, o senso de responsabilidade socioambiental e a promoção da autossustentabilidade energética. Como resultado, os consumidores brasileiros têm mais oportunidades de participar na produção de energia limpa e eficiente.

Os sistemas FV possuem os seguintes componentes básicos:

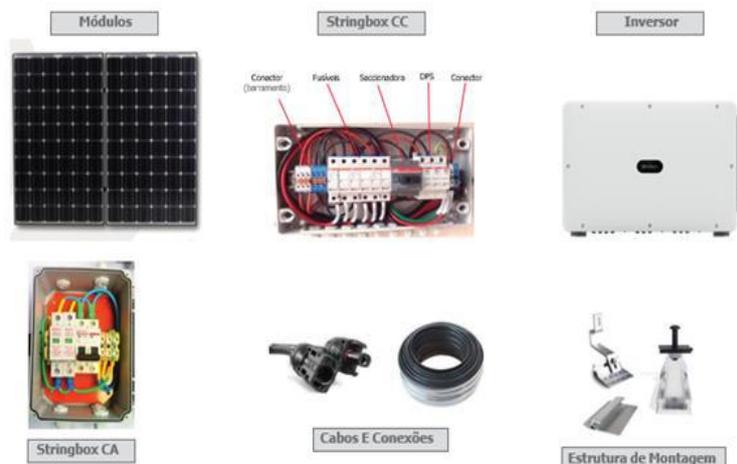
a) Módulos FV: Tem a função de captar irradiação solar e transformar em eletricidade; b) inversores; *on grid*, *off grid* e híbridos: são dispositivos eletrônicos utilizados para conversão de energia elétrica em corrente contínua para energia elétrica em corrente alternada em um sistema solar, que desempenham um papel fundamental na conversão e gerenciamento da energia. Torna-se importante ressaltar o diferencial da tecnologia dos inversores híbridos, eles controlam o carregamento das baterias, assim como também faz automação, entre falta de energia da concessionária, alimentando de forma automática as cargas adicionadas na bateria não deixando ter o fornecimento básico de energia. c) Baterias: as baterias de íons de lítio desempenham um papel central ao proporcionar soluções inovadoras para aprimorar a eficiência energética. Diante desses desafios, somos motivados a abrir caminhos em direção a novas possibilidades, contribuindo para a construção de um futuro mais ecológico e sustentável para todos (Canal Solar, 2023).

A transição da tecnologia de bateria de chumbo-ácido para bateria de lítio representa uma revolução significativa no setor de energia. Agora, com a aprovação da Lei 14.300 e a Portaria 140 do Inmetro, as baterias de lítio ganham uma posição de destaque, servindo como o alicerce para sistemas de armazenamento de energia. Esse desenvolvimento exige uma maior ênfase na segurança dos inversores, uma vez que estes desempenham um papel fundamental na conexão entre a geração de energia e o armazenamento (Canal Solar, 2023).

Os inversores desempenham um papel vital na comunicação eficiente entre a geração de energia, o armazenamento e a rede elétrica. Eles asseguram que a energia seja convertida, armazenada e distribuída de forma eficaz e segura. É nesse contexto que a importância do uso de AFCI (Interruptores de Circuito com Detecção de Arco) se destaca. Os AFCIs são dispositivos de segurança que têm a capacidade de detectar e desligar circuitos em caso de arcos elétricos perigosos, na prevenção de incêndios e garantia da segurança do sistema elétrico. Em grande relevância em sistemas de armazenamento de energia, onde a manipulação segura da eletricidade é crucial (Canal Solar, 2023).

Sendo assim, a transição para baterias de lítio, aliada à regulamentação e ênfase na segurança dos inversores, destaca a evolução contínua do setor de energia para sistemas mais eficientes e seguros, incluindo a geração, armazenamento e distribuição de eletricidade de fontes renováveis. A Figura 1 a seguir ilustra um sistema solar FV de geração de energia:

Figura 1 – Sistema solar FV de geração de energia.



Fonte: Oca Solar (2023).

A Figura 1 apresenta o sistema solar FV de geração de energia, destacando os seguintes componentes:

- a) **Módulos Solares:** São os painéis solares que capturam a luz do sol e a convertem em eletricidade por meio de células FV.
- b) **Stringbox de Corrente Contínua (CC):** Este componente é responsável por reunir as saídas de proteções e operações de circuitos dos módulos solares em um único ponto antes de serem conectados ao inversor.
- c) **Inversor:** O inversor desempenha a função de converter a corrente contínua (CC) gerada pelos módulos solares em corrente alternada (CA), que é utilizada para alimentar aparelhos e equipamentos elétricos nas residências ou empresas.
- d) **Stringbox de Corrente Alternada (CA):** Similar à *stringbox* CC, a *stringbox* CA reúne os cabos de saída com proteções e operações dos circuitos do inversor e os conecta à rede elétrica.
- e) **Cabos e Conexões:** Os cabos elétricos e conexões são essenciais para conectar todos os componentes do sistema, garantindo a transmissão eficiente da eletricidade.
- f) **Estrutura de Montagem:** A estrutura de montagem fornece o suporte físico para os módulos solares e os mantém de maneira segura, geralmente em telhados ou em estruturas no solo.

Este sistema solar FV é uma solução eficaz para gerar eletricidade a partir da luz solar, contribuindo para a utilização de fontes de energia mais limpas e sustentáveis. Cada um desses componentes desempenha um papel importante na coleta, conversão e distribuição da eletricidade gerada pelo sistema. A Figura 2, apresenta-se a bateria de lítio de alta tensão.

Figura 2 - Bateria de lítio de alta tensão.



Fonte: Goodwe (2023).

Na Figura 2 demonstra-se a bateria de alta tensão, construída com tecnologia de íons de lítio. Essas baterias são reconhecidas por sua capacidade de armazenar e fornecer energia eficientemente em aplicações que exigem tensões mais elevadas.

A Figura 3 destaca os componentes essenciais da bateria, como células de lítio, invólucro protetor e terminais de conexão. Essas baterias são amplamente utilizadas em diversas aplicações, como veículos elétricos, sistemas de armazenamento de energia renovável e muitos outros, devido à sua alta densidade de energia e capacidade de fornecer energia de forma confiável em níveis de tensão significativamente elevados (Canal Solar, 2023).

Figura 3 - Bateria de lítio de baixa tensão residencial.



Fonte: Goodwe (2023).

A bateria de lítio de baixa tensão residencial refere-se a um sistema de armazenamento de energia de íons de lítio projetado especificamente para uso em residências. Essas baterias são conhecidas por sua capacidade de armazenar eletricidade gerada por fontes renováveis, como painéis solares, e fornecê-la para uso doméstico quando necessário.

A Figura 4 apresenta o sistema solar FV-híbrido, que pode ser utilizado tanto como Off Grid, ou ainda On Grid, inversor retrofit apenas para armazenamento de energia com ou sem solar instalado.

Figura 4 – Sistema solar FV híbrido.



Fonte: Goodwe (2023).

Na Figura 4, é possível observar o sistema solar FV *on grid*, onde ao incluir um inversor *retrofit*, temos a capacidade de determinar uma devida carga exclusivamente ao armazenamento de energia, este inversor pode ser soluções para sistemas PV, instalados que não tem inversor híbrido, ou independentemente de se ter radiação com sistema solar instalado, pois ele pode ser uma solução apenas para armazenamento, ou seja, ele recarrega as baterias com própria energia da concessionária. Essa flexibilidade torna o sistema altamente adaptável às necessidades e preferências do usuário, permitindo a maximização do aproveitamento de energia limpa e o armazenamento para uso futuro, seja em cenários conectados à rede elétrica convencional ou operando de forma independente.

Na Figura 5, é apresentado um sistema solar FV *on grid* conectado à rede elétrica.

Figura 5 - Sistema solar FV-On Grid.



Fonte: Usina solo – MT (2023).

Verificou-se que esse sistema combina a geração de energia solar FV com a capacidade de estar conectado à rede elétrica convencional, permitindo que a energia seja fornecida à rede ou usada localmente, conforme necessário. Essa flexibilidade é altamente vantajosa, uma vez que permite a maximização do uso de energia solar limpa e, ao mesmo tempo, a possibilidade de obter créditos de energia ou utilizar a rede como fonte de energia suplementar quando a produção solar é insuficiente. A integração de sistemas solares on-grid com a tecnologia BPIV (*Building-Integrated Photovoltaics*) representa uma abordagem inovadora para a geração de energia limpa em edifícios. Nesse contexto, a Figura 6 pode descrever a configuração específica desse sistema.

Figura 6 - Sistema on grid com tecnologia BPIV (fachada de prédio solar).



Fonte: Obra são Paulo 523 painéis na fachada de um prédio com inversor com AFCI para garantir a segurança.

A tecnologia BPIV envolve a incorporação de células solares FV de perfil fino onde estes módulos bem mais leves que os tradicionais, são instalados diretamente nas estruturas dos edifícios, como fachadas, janelas ou telhados. Essa integração harmoniosa permite que os edifícios gerem eletricidade a partir da luz solar em painéis solares funcionais através de suas fachadas. Isso não apenas otimiza o uso do espaço, mas também contribui para a eficiência energética com redução da temperatura interna, e a redução das emissões de carbono.

O termo "*on-grid*" significa que o sistema está conectado à rede elétrica convencional. Isso permite que o excesso de energia gerado pelo sistema BPIV seja exportado para a rede, muitas vezes resultando em créditos de energia ou compensação financeira para os proprietários. Além disso, o sistema *on-grid* garante um fornecimento contínuo de eletricidade, mesmo quando a geração solar é insuficiente. Em conjunto, a tecnologia BPIV e o sistema *on-grid* são uma solução eficaz para enfrentar os desafios da demanda crescente de energia, enquanto se promove a sustentabilidade e a redução dos custos de eletricidade. A Figura 6 em questão provavelmente descreve como esses componentes se unem para formar um sistema de energia solar inovador e eficiente em edifícios (Canal Solar, 2023).

Com setor energético em plena transição, com a imersão de várias tecnologias ingressando no mercado solar fotovoltaico para geração de energia e armazenamento assim como tecnologias BIPV, aumento o nível para os pré-requisito de segurança voltado a proteção contra incêndio. Logicamente todas essas soluções necessitam de equipamentos como inversores String, inversores centrais ou micro inversores, que convertem energia capitada através dos painéis solares em corrente contínua nas características da energia de corrente alternada, que são utilizadas nas residências, comércios e indústrias. Ter cada vez mais tecnologias com uso de IA ou qualquer outro mecanismo que diminua as chances de acontecer um incêndio em uma instalação solar fotovoltaico e primordial, e que iremos relatar nas próximas imagens.

A Figura 7, mostra um incidente de incêndio nas placas solares FV devido a um arco elétrico causado por um cabo de corrente contínua roído por um roedor. Esse incidente teria ocorrido na cidade de Cuiabá (MT), em abril de 2022.

Figura 7 - Incêndio em Placas Solares FV por arco elétrico.



Fonte: Autores (2023).

Conforme foi observado na Figura 7, os incidentes desse tipo são preocupantes, pois representam um risco significativo de incêndio em sistemas solares FV. Roedores podem danificar os cabos elétricos, expondo fios condutores e criando condições propícias para ocorrência de arcos elétricos. Esses arcos elétricos podem gerar calor intenso e chamas, potencialmente levando a incêndios.

Na Figura 8, torna-se possível avaliar que a ausência de um sistema de desligamento na produção de energia das placas solares, provocou a reignição das chamas, exigindo que a equipe operacional tomasse medidas urgentes. A guarnição teve que remover fisicamente as placas solares adjacentes e cortar os fios responsáveis pela condução da energia gerada, a fim de isolar a fonte do incêndio e permitir uma extinção segura. Esta ocorrência aconteceu no município de Porto Murtinho-MS no dia 02/02/23 (CBMMS, 2023).

Figura 8 - Incêndio em sistema de energia solar.



Fonte: Corpo de Bombeiros Militar do Estado de Mato Grosso do Sul – CBMMS (2023).

Verificou-se que esta intervenção foi necessária para evitar a propagação do fogo, uma vez que a continuidade da produção de energia poderia alimentar o incêndio. A ação destacou a importância crítica de protocolos de segurança e sistemas de desligamento eficientes em instalações solares, visando prevenir e controlar incidentes emergenciais.

A Figura 9, apresenta o resultado de um incêndio em placas solares FV por arco elétrico.

Figura 9 - Incêndio em Placas Solares FV por arco elétrico.



Fonte: Liang Ji (2015).

A Figura 10 representa a ocorrência de um arco elétrico em um conduíte de metal devido a problemas na isolamento dos cabos elétricos. Esse tipo de incidente representa um sério risco de segurança elétrica e pode ser altamente perigoso.

Figura 10 - Arco no conduíte de metal devido a isolamento dos cabos.



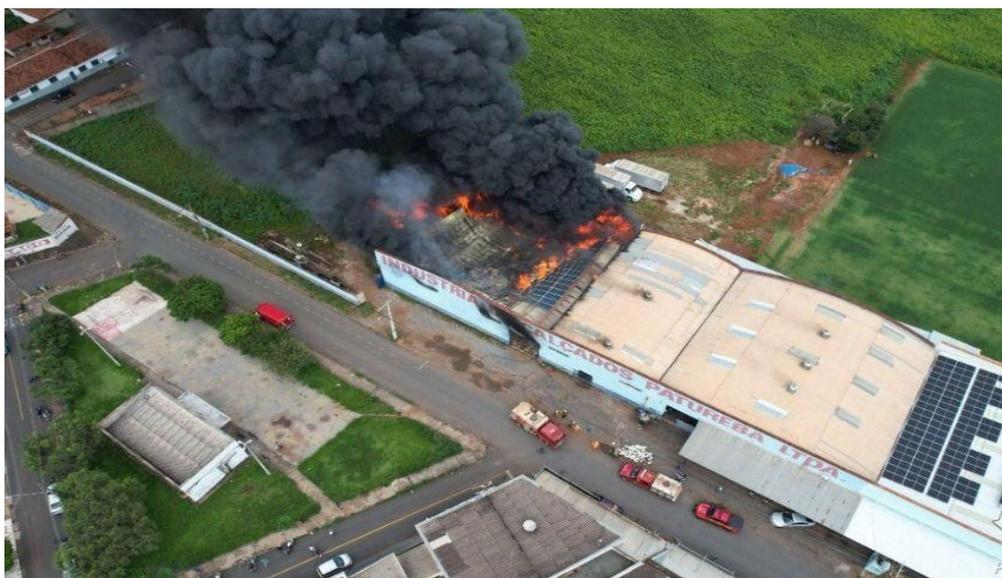
Fonte: Bakesfield/USA (2009).

Os arcos em sistema FV surgem principalmente de duas maneiras: a) conexões inadequadas; b) cabos com isolamento comprometida. E iremos abordar como mercado bem aperfeiçoando os equipamentos para interromper quando arco elétrico surgir e não propagar incêndio. A formação de arcos elétricos representa um risco significativo em sistemas FV, pois pode causar incêndios e danos aos equipamentos. Portanto, a manutenção regular, inspeções de segurança e a contratação de profissionais qualificados para instalação e manutenção são medidas importantes para minimizar esses riscos em sistemas FV.

Para evitar incidentes desse tipo, a manutenção regular e a inspeção de sistemas solares são essenciais. Isso inclui a verificação de danos nos cabos, isolamento adequado e medidas de proteção contra animais, como roedores. Além disso, os sistemas solares devem estar em conformidade com normas de segurança elétrica e ser instalados por profissionais qualificados.

Torna-se possível verificar que dentre as principais causas de um incêndio em painéis fotovoltaicos, a falha de um dos painéis solares, resultando de problemas elétricos internos, falhas em inversores, danos mecânicos ou problemas de conexão, conforme a Figura 11. Este acidente ocorreu em uma loja de calçados na cidade de Patos de Minas (MG).

Figura 11 - Incêndio no sistema FV em fábrica de calçados em Patos de Minas (MG).



Fonte: Canal Solar (2023).

Verifica-se a necessidade de investimentos em capacitação, visando maior aprendizado com as experiências de outros países, especialmente os Estados Unidos, e promover uma cultura de segurança que esteja em constante evolução para lidar com os desafios específicos relacionados a incêndios.

O arco elétrico é um fenômeno em que a corrente elétrica pula de um ponto para outro através do ar, muitas vezes acompanhado por faíscas, calor e até mesmo fogo. No contexto de um conduto de metal, o arco elétrico pode se propagar rapidamente e causar danos significativos à estrutura, além de representar um risco de incêndio.

A falha na isolação dos cabos é a causa subjacente desse incidente. A isolação adequada dos cabos é crucial para prevenir curtos-circuitos, arcos elétricos e outros problemas elétricos. A degradação ou danos na isolação dos cabos podem permitir que a corrente elétrica escape para o ambiente, resultando em arcos perigosos.

Para evitar tais incidentes, é fundamental realizar inspeções regulares em sistemas elétricos, garantir a integridade da isolação dos cabos e implementar medidas de segurança, mediante a instalação de dispositivos de proteção contra arcos elétricos. Sendo assim, a segurança elétrica torna-se fundamental para a prevenção de acidentes, a proteção das vidas e propriedades, bem como manter a integridade de sistemas elétricos.

A proteção contra arco elétrico AFCI (*Arc Fault Circuit Interrupter*) é uma característica de segurança importante nos sistemas solares FV, especialmente em relação a circuitos de corrente contínua (CC). Ela desempenha um papel fundamental na prevenção de incêndios e na segurança geral do sistema.

Torna-se fundamental que os profissionais e instaladores de sistemas solares FV estejam cientes e cumpram as normas técnicas e regulamentações aplicáveis em sua região, garantindo que os sistemas sejam instalados de maneira segura, confiável e em conformidade com os padrões de qualidade estabelecidos. Isso é essencial para a segurança e o desempenho a longo prazo dos sistemas solares FV.

A seguir são abordadas as principais portarias e instruções técnicas que estabelecem critérios básicos contra incêndio em instalação de sistema solar FV, dentre estas: a) Instrução Técnica nº 30/2022 do Corpo de Bombeiros Militar do Estado de Minas Gerais; b) Norma Técnica nº 49/2022 - Corpo de Bombeiros Militar do Estado de Mato Grosso; c) Norma Técnica nº 44/2023 do Corpo de Bombeiros Militar do Estado de Goiás. A Instrução Técnica nº 30/2022 aborda o tema de Instalações e Equipamentos Elétricos, especificamente voltados para Subestações, Painéis Fotovoltaicos e Grupos Geradores de Energia. A

norma fornece diretrizes técnicas e práticas relacionadas a esses elementos, buscando garantir a segurança, eficiência e conformidade nas instalações elétricas (MG, 2022).

O objetivo desta normativa está em definir medidas de segurança contra incêndio para subestações elétricas, instalações contendo painéis fotovoltaicos e grupos geradores de energia, em conformidade com o Regulamento de Segurança Contra Incêndio aplicável às edificações e espaços destinados ao uso coletivo do Estado de Minas Gerais.

Ao abranger subestações, a instrução trata dos procedimentos e requisitos para a adequada implantação e operação desses pontos cruciais na distribuição de energia elétrica. No contexto dos painéis fotovoltaicos, a norma aborda as diretrizes específicas para a instalação e operação de sistemas de geração de energia solar, considerando as características únicas desses equipamentos. Além disso, são abordados os grupos geradores de energia, com foco em aspectos técnicos relevantes para a instalação e funcionamento desses dispositivos (MG, 2022).

A referida Instrução Técnica nº 30/2022-MG, apresenta os seguintes requisitos:

a) instalação e manutenção dos componentes das instalações fotovoltaicas, é imperativo seguir as normas brasileiras de referência, notadamente a NBR 16690 e NBR 5410, ou outras que possam substituí-las. Na ausência dessas, normas internacionais reconhecidas podem ser adotadas.

b) as instalações fotovoltaicas para geração distribuída de energia devem incluir painéis fotovoltaicos, inversores e demais dispositivos necessários, todos em conformidade com os requisitos do INMETRO.

c) equipamentos de proteção contra falhas de arco elétrico e dispositivos de desligamento rápido devem ser instalados. Na falta de regulamentação do INMETRO para esses equipamentos, normas internacionais aceitas ou especificações do fabricante podem ser seguidas.

d) o dimensionamento e execução das precauções relacionadas à instalação dos painéis fotovoltaicos, conforme previsto nas normas de referência, são de responsabilidade exclusiva do Responsável Técnico (RT) e não estão sujeitos à análise ou vistoria pelo Corpo de Bombeiros Militar de Minas Gerais (CBMMG).

e) a solicitação de vistoria deve incluir a apresentação do documento de responsabilidade técnica das instalações fotovoltaicas.

Já em relação a instalação de painéis fotovoltaicos:

a) painéis fotovoltaicos não devem ser instalados sobre telhados ou coberturas inflamáveis: em situações excepcionais, onde o telhado ou cobertura seja feito de material combustível, a aplicação de produtos retardantes ou intumescentes pode ser aceita, desde que respaldada por um laudo do profissional responsável pela aplicação do produto e acompanhada do documento de responsabilidade técnica correspondente.

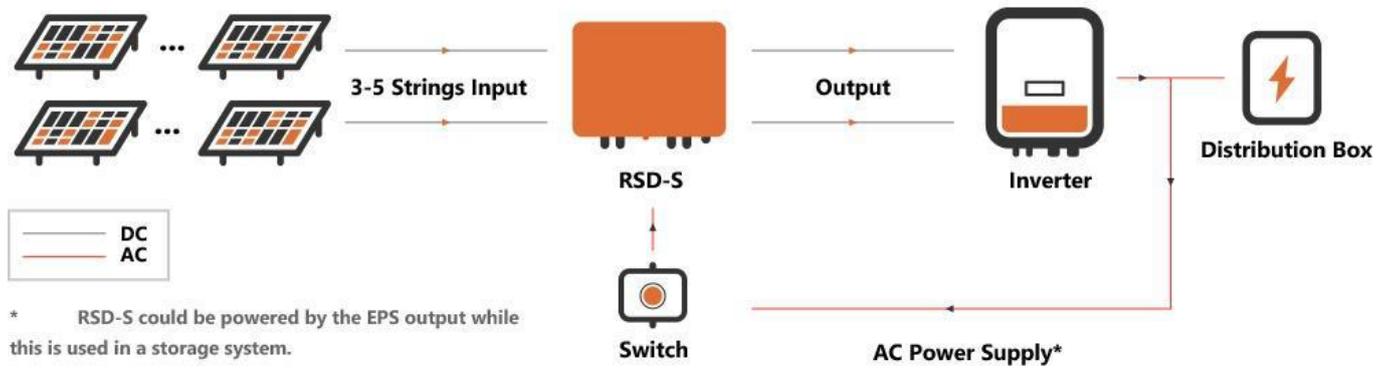
b) em edificações e espaços destinados ao uso coletivo que possuam painéis fotovoltaicos instalados, devem ser observados os seguintes requisitos:

- Deve-se projetar dispositivos de desligamento rápido, os quais devem ser instalados em locais seguros da edificação, proporcionando fácil acesso. O dispositivo deve ser acompanhado por sinalização complementar contendo a mensagem escrita: “DISPOSITIVO DE DESLIGAMENTO RÁPIDO PARA SISTEMA FOTOVOLTAICO”.

O Rapid Shutdown (RSD), ou sistema de desligamento rápido, desempenha um papel crucial na segurança e eficiência de um sistema fotovoltaico. Sua nomenclatura reflete sua principal função: proporcionar um desligamento rápido e eficaz dos módulos fotovoltaicos em situações de falha ou emergência. Este componente é projetado para responder prontamente a eventos adversos, minimizando os riscos associados à geração de eletricidade solar. Em caso de incidentes como incêndios, curtos-circuitos ou outros problemas elétricos, a capacidade de desconectar rapidamente os módulos fotovoltaicos torna-se fundamental para mitigar potenciais perigos (Canal Solar, 2022).

A sinalização deve ser reflexiva, com letras maiúsculas, altura mínima de 10 mm (dez milímetros), na cor branca sobre fundo vermelho (Figura 12).

Figura 12 - Exemplo de dispositivo de desligamento rápido.



Fonte: TSDM (80 V UL) / NEC 2020 / NT 44 (2023).

Verifica-se na Figura 12, a unidade de desligamento rápido RSD para matrizes fotovoltaicas que é um dispositivo essencial para garantir a segurança em situações críticas, como incêndios. Sua implementação atende à norma técnica NT44-2023 do Corpo de Bombeiros de Goiás, especificamente para instalações classificadas como Tipo 1. Os principais destaques dessa unidade são: i) Desligamento automático por proteção térmica: disponibiliza um desligamento automático em resposta a temperaturas excessivas, protegendo a matriz fotovoltaica contra danos térmicos; ii) Múltiplos métodos de desligamento: proporciona diversos métodos de desligamento, permitindo uma resposta flexível a diferentes cenários e requisitos operacionais; iii) Várias opções de tensão: suporta uma variedade de opções de tensão, garantindo adaptação às características específicas da matriz fotovoltaica; iv) Plug and play, fácil instalação: projetado com o conceito "plug and play", o dispositivo facilita a instalação, reduzindo o tempo necessário para integrá-lo ao sistema solar fotovoltaico já existente.

O sistema de desligamento rápido (Rapid Shutdown - RSD) em sistemas fotovoltaicos é responsável por interromper rapidamente a operação dos módulos fotovoltaicos em caso de falhas. Esse conceito foi introduzido pelo National Electrical Code (NEC) nos Estados Unidos, com regulamentações que evoluíram ao longo do tempo. Inicialmente proposto em 2014 pelo NEC 2014 690.12, os regulamentos do desligamento rápido estabeleceram limites para a distância até o painel fotovoltaico, fixando em 3,05 metros. Na revisão de 2017, o NEC intensificou esses requisitos, exigindo que, em até 30 segundos após o acionamento do desligamento rápido, a tensão do sistema fosse reduzida para abaixo de 30 V fora dos limites dos painéis e 80 V no circuito dos módulos. Isso demandou o "desligamento rápido no nível do módulo", garantindo que cada módulo recebesse um comando individual de desligamento.

Na versão mais recente de 2020, o NEC expandiu o termo "desligamento rápido" e propôs "sistemas de controle de perigo fotovoltaicos". Agora, a norma exige um "sistema fotovoltaico de controle de perigo", assegurando que o sistema possa ser controlado em situações críticas. Dentro de 30 segundos após o início do desligamento, a tensão nos limites dos módulos fotovoltaicos deve cair abaixo de 80 V. O surgimento da tecnologia RSD foi motivado pela preocupação em evitar riscos elétricos para bombeiros durante o combate a incêndios em usinas fotovoltaicas. O RSD tornou-se uma tecnologia essencial para garantir condições seguras de resgate após incidentes.

Sendo assim, a implementação do desligamento rápido no nível do módulo varia conforme o tipo de inversor. Microinversores, devido à sua baixa tensão de trabalho, atendem naturalmente aos requisitos. Em inversores convencionais, a adição de uma caixa de desligamento rápido, facilmente disponível no mercado, oferece uma solução simples e de baixo custo.

Em conformidade com a NT44-2023, instalações classificadas como Tipo 1 devem procurar no mercado a melhor solução de desligamento rápido para integrar ao sistema solar fotovoltaico. Essa integração é crucial para assegurar que, em caso de falha, especialmente durante incêndios, o sistema seja desligado rapidamente. Isso permite a atuação eficaz dos bombeiros, brigadistas e outros profissionais treinados em combate a incêndios, que podem realizar os primeiros atendimentos, incluindo o desligamento total do sistema solar fotovoltaico. Essa abordagem proativa é essencial para preservar a segurança pessoal e minimizar os riscos de acidentes elétricos em situações de emergência.

Em situações em que a projeção de medidas de segurança pela Brigada de Incêndio é obrigatória, é fundamental que os brigadistas estejam plenamente informados sobre a localização dos painéis solares, das baterias e do dispositivo de desligamento rápido dos painéis fotovoltaicos. Caso não haja uma Brigada de Incêndio presente, é altamente recomendável que a população tenha conhecimento desses elementos, incluindo a localização precisa dos painéis, baterias e do dispositivo de desligamento rápido. Essa consciência é crucial para garantir a segurança em casos de emergência, facilitando ações rápidas e eficazes para prevenir ou lidar com potenciais incidentes relacionados aos sistemas fotovoltaicos.

c) Em locais de fácil acesso, como portarias, por exemplo, devem ser fornecidas informações para as equipes de resgate, contendo o layout do local com a localização dos painéis fotovoltaicos e de seu dispositivo de desligamento rápido, juntamente com instruções sobre como proceder. Além disso, devem ser fornecidos detalhes de contato do responsável pelo sistema. Além dos locais especificados na NBR 16690, uma sinalização para identificação da existência de um sistema fotovoltaico na edificação deve ser instalada junto à placa M1, conforme ilustrado na Figura 10. A sinalização deve conter a mensagem escrita: “ESTA EDIFICAÇÃO POSSUI INSTALADO SISTEMA FOTOVOLTAICO”. A sinalização ilustrada na Figura 10 deve ter dimensão mínima de 100 mm de largura e 150 mm de altura, na cor preta sobre fundo amarelo. A sinalização com a mensagem escrita deve ser reflexiva, com letras maiúsculas, altura mínima de 10 mm (dez milímetros), na cor branca sobre fundo vermelho. Em todos os locais onde haja risco de choque elétrico, deve ser alocada a sinalização de alerta A5, conforme estabelece a IT 15 (MG, 2022).

d) O Plano de Intervenção, se obrigatório para a edificação ou espaço destinado ao uso coletivo, deve incluir ações a serem tomadas junto aos painéis e seus equipamentos antes do início efetivo do combate ao incêndio.

e) Para os painéis instalados sobre telhados ou coberturas, assim como para inversores e salas de baterias, é permitido o uso dos extintores de incêndio designados para a edificação, desde que sejam adequados para combate ao fogo Classe C. Essa prática deve respeitar as distâncias de caminhamento estipuladas na IT 16.

As áreas de instalação de painéis fotovoltaicos devem ser claramente representadas em planta. No entanto, essas áreas não serão consideradas como áreas construídas para os seguintes fins (MG, 2022): a) Definição da área total do Plano de Segurança Contra Incêndio e Pânico (PSCIP); b) Definição de medidas de segurança; c) Definição do tipo de PSCIP; d) Cálculo de cobrança da Taxa de Serviços de Prevenção (TSP), para fins de análise e vistoria; e) Área a ser informada no Auto de Vistoria do Corpo de Bombeiros (AVCB).

Para as áreas de instalação de baterias, as medidas de segurança previstas para a edificação ou espaço destinado ao uso coletivo devem ser projetadas. O atendimento ao disposto no item 6.10.2 da NBR 13231, ou de sua substituta, deve ser avaliado a critério do Responsável Técnico (RT).

Em relação à Norma Técnica N° 49/2022 do Corpo de Bombeiros Militar do Estado de Mato Grosso, inserida como segurança contra incêndio em sistema solar FV, vem padronizando as instalações comerciais e indústrias do estado de Mato Grosso. Dois itens entre todos abordados na referida norma técnica chama atenção são eles (MT, 2022):

5.4.1.4 Os arranjos/lotes de módulos FV quando do Tipo 3 devem dispor de dispositivo que desliga a corrente e/ou a tensão nos módulos e condutores das *strings*.

5.4.1.5 É vedada a instalação de arranjos FV em:

5.4.1.5.1 Coberturas de locais que armazenem/manipulam ou comercializam líquidos ou gases combustíveis e/ou inflamáveis;

No item 5.4.1.4 quando especifica TIPO 3, seriam telhados comerciais e industriais, onde o sistema solar FV teria que ter um dispositivo que desliga a corrente e ou/ a tensão nos módulos.

Entendemos que para isso temos hoje as duas tecnologias no mercado brasileiro tanto os micro inversores como os otimizadores, consegue realizar essa questão de cortar a tensão a nível de módulo, ou seja, atendendo um dos pré-requisito sugerido pelo item. O outro para cortar a corrente seria o AFCI de acordo com UL1699b, ou seja, é o uso da inteligência artificial para interromper o fluxo da corrente na *string*, para que não haja um arco elétrico e leve a um incêndio. Porém seria mais específico se o bombeiros desse esse entendimento, pois quando coloca dispositivo, não conseguimos entender no mercado, fora as duas opções aqui colocadas, qual seria esses dispositivos a nível de *string* que pudesse ter tanta eficácia. E Nesse ponto ainda destaque que o AFCI, seria o mais eficiente pois o mesmo atua diretamente na corrente, onde e princípio na separa de dois pólos de um arco elétrico, logicamente que os do outros dispositivos como citados micro inversores e otimizadores, conseguimos atuar com uma tensão dentro das normas internacionais que também evitam e minimiza as altas tensões a nível de módulo.

O outro item 5.4.5.1 e sobre instalações principalmente me postos de gasolinas, tivemos vários sistemas solares instalados em postos de gasolina, sem nenhum cuidado com equipamentos que pudesse amenizar, isso serve como um alerta, a norma do bombeiro vem como um apoio de podermos nos orientar das questão de segurança contra incêndio que. Não é de hoje somente nas instalações solares que chama atenção, quase todos inícios de incêndios tem origem falhas elétricas e arcos em corrente alternada.

E por fim, a Norma Técnica 44/2023, que trata da segurança em sistemas FV, foi inserida pelo Corpo de Bombeiros Militar do Estado de Goiás. Esta norma tem como objetivo estabelecer medidas de segurança contra incêndio e pânico em edificações com sistemas de energia solar FV, sendo necessário seguir as diretrizes do Código Estadual de Segurança Contra Incêndio e Pânico (Lei nº 15802, de 11 de setembro de 2006). Desta forma, torna-se necessário a implementação de medidas específicas para mitigar riscos associados aos sistemas FV, considerando aspectos como instalação segura, proteção contra curtos-circuitos, treinamento adequado para intervenções de emergência, e garantia de acesso para bombeiros em caso de necessidade. Essas medidas visam assegurar a segurança tanto das instalações solares quanto das pessoas que ocupam o espaço, alinhando-se às regulamentações locais de prevenção e combate a incêndios (GO, 2023).

Para estabelecer medidas de segurança contra incêndio e pânico em edificações com sistemas de energia solar FV, é necessário seguir as diretrizes do Código Estadual de Segurança Contra Incêndio e Pânico (Lei nº 15802, de 11 de setembro de 2006). Isso implica na implementação de medidas específicas para mitigar riscos associados aos sistemas FV, considerando aspectos como instalação segura, proteção contra curtos-circuitos, treinamento adequado para intervenções de emergência, e garantia de acesso para bombeiros em caso de necessidade. Essas medidas visam assegurar a segurança tanto das instalações solares quanto das pessoas que ocupam o espaço, alinhando-se às regulamentações locais de prevenção e combate a incêndios (GO, 2023).

O painel solar ou FV refere-se a um módulo com potência nominal de 5v ou mais, comumente composto por células de silício, camadas semicondutoras de filmes finos ou híbridas (heterojunção). Pode apresentar moldura ou não, ser monofacial ou bifacial, e pode ser rígido, flexível ou semiflexível. Pode ser independente, aplicado ou integrado a edificações. Já o sistema FV é um conjunto de dispositivos que convertem a energia solar em eletricidade, conectado à rede elétrica da concessionária local (On Grid). E por fim, o sistema FV isolado refere-se a um sistema que não tem conexão com a rede elétrica da concessionária local (Off Grid), armazenando a energia produzida por meio de baterias.

Para os Sistemas Tipo 1, é necessário implementar medidas de proteção elétrica, incluindo um Equipamento de Proteção de Falha de Arco Elétrico (AFPE) e um Interruptor de Proteção de Falha de Aterramento (GFCI). Além disso, é essencial instalar

um Dispositivo de Desligamento Rápido (RSD) próximo aos painéis solares, com requisitos específicos de localização. A chave do RSD deve estar em um local seguro e de fácil acesso, com constante vigilância humana e visibilidade.

Se não houver constante vigilância humana, a chave pode ser instalada a no máximo 3 metros dos inversores String.

A instalação deve permitir a operação sem a necessidade de escadas ou ferramentas. A chave deve ser acompanhada por uma sinalização reflexiva com letras maiúsculas, indicando "CHAVE DE DESLIGAMENTO RÁPIDO DO SISTEMA FOTOVOLTAICO", em uma altura mínima de 10 mm, com letras brancas sobre fundo vermelho, conforme Figura 13.

Figura 13 - Placa de aviso.



Fonte: GO (2023) - Corpo de Bombeiros Militar do Estado do Goiás

A Portaria nº 515, emitida em 10 de novembro de 2023, propõe alterações à Portaria Inmetro nº 140, de 21 de março de 2022, que trata do regulamento técnico da qualidade e requisitos de avaliação da conformidade para equipamentos de geração, bem como ao condicionamento e armazenamento de energia elétrica em sistemas fotovoltaicos (Brasil, 2023). Essa proposta visa ajustar e aprimorar as diretrizes anteriores, com o objetivo de assegurar a qualidade e conformidade dos equipamentos utilizados em sistemas fotovoltaicos (FV) no Brasil.

A fundamentação para essas modificações se baseia nas conclusões da reunião técnica "Riscos e Medidas de Proteção contra Incêndios em Equipamentos e Sistemas FV", realizada pelo Inmetro em 1º de julho de 2022, e na audiência pública "Riscos de Incêndio em Instalações de Geração Fotovoltaica", conduzida pela Comissão de Minas e Energia da Câmara dos Deputados em 6 de julho de 2022. Esses eventos identificaram a necessidade de fortalecer a regulamentação relacionada à proteção contra arcos elétricos em sistemas fotovoltaicos, visando aprimorar a segurança e prevenir potenciais riscos de incêndio.

A demanda por maior rigor regulatório visa atender aos padrões internacionais de segurança e mitigar os riscos de incêndios nesse contexto. Dessa forma, torna-se imperativo introduzir novos requisitos de proteção contra arcos elétricos para inversores, contribuindo para a segurança aprimorada dos sistemas FV. Com isso ficou estipulado o período de 12 meses após a publicação da portaria, para que todos os fabricantes de inversores se enquadrem nos requisitos de segurança contra arco elétricos.

Já em relação às normas técnicas internacionais para dispositivos de proteção contra falha de AFCI em sistemas FV incluem:

- a) **Padrão UL 1699B:** o padrão UL Outline foi emitido pela UL pela primeira vez em 2011 e atualizado posteriormente diversas vezes. A versão mais recente é a UL 1699B-2018. Esse padrão especifica os requisitos de testes e os indicadores de desempenho dos dispositivos de proteção contra falha de arco (AFCI) em sistemas fotovoltaico;
- b) **Padrão IEC 63027:** o padrão internacional desenvolvido pela Comissão Eletrotécnica Internacional (IEC) em 2017, especificando os requisitos de desempenho finais para AFCI em sistemas de geração de energia FV;
- c) **Padrão AS/NZS 5033:** o padrão emitido pela Austrália e Nova Zelândia pela primeira vez em 2019, sob o código AS/NZS 5033 2019, especifica os requisitos funcionais e os métodos de teste para AFCI em sistema FV;

- d) **NEC 2017 Seção 690.11:** a edição 2017 do Código Elétrico Nacional (NEC), introduziu pela primeira vez os requisitos para AFCI em conformidade com o padrão UL 1698B devem ser instalados em circuitos CC de sistemas FV;
- e) **Padrão CSA C22.2 n° 293:** norma de segurança para sistemas FV emitida pela CSA Group of Canadá. Desde a edição de 2019, ela incorporou os requisitos funcionais e as provisões de testes de dispositivos AFCI, requerendo referência ao padrão UL 1699B.

Foi possível observar um aumento progressivo nas especificações relacionadas à instalação de sistemas FV em diversos países europeus. Essa tendência é marcada pela gradual introdução de Dispositivos de Proteção Contra Falha de Arco (AFCIs) nos requisitos normativos. Esse desenvolvimento reflete a crescente conscientização sobre a importância da segurança elétrica em sistemas FV e a busca por padrões internacionais que garantam a eficácia dessas medidas de proteção.

Nesse contexto, a norma internacional IEC 63027 tem desempenhado um papel central. Esta norma, desenvolvida pela Comissão Eletrotécnica Internacional (IEC) em 2017, estabelece requisitos finais de desempenho para AFCIs em sistemas de geração de energia FV. Sua incorporação nas especificações de instalação destaca o reconhecimento global da necessidade de dispositivos eficazes que detectem e respondam a falhas de arco elétrico em sistemas FV.

Os AFCIs desempenham um papel crucial na prevenção de incêndios e na proteção contra riscos elétricos associados a sistemas FV. Sua introdução nas normas de instalação reflete a evolução das práticas de segurança para acompanhar o rápido crescimento e adoção de tecnologias solares. Ao abordar especificamente falhas de arco elétrico, esses dispositivos contribuem para a integridade e confiabilidade dos sistemas, minimizando potenciais riscos para propriedades e vidas humanas.

A tendência de referenciar a norma IEC 63027 nas regulamentações europeias destaca a importância de uma abordagem harmonizada em todo o continente para garantir padrões consistentes e elevados de segurança em instalações FV. Esse movimento não apenas promove a conformidade com práticas internacionalmente reconhecidas, mas também fortalece a confiança na sustentabilidade e segurança dos sistemas FV, impulsionando, assim, o avanço contínuo da energia solar na Europa.

Em resumo, as normas UL 1699B e IEC 63027 emergem como as principais normas internacionais para detecção e proteção contra falha de arco elétrico (AFCI). Ambas demonstram uma consistência notável em termos de definição de funções AFCI, requisitos técnicos, métodos de teste, e outros aspectos relevantes. Essas normas desempenham um papel central, sendo frequentemente referenciadas por regulamentações em países e regiões ao redor do mundo.

A alta coesão entre a UL 1699B e a IEC 63027 é fundamental para promover a interoperabilidade e a internacionalização da tecnologia e produtos AFCI. A consistência nas diretrizes estabelecidas por essas normas facilita a conformidade global, garantindo que os dispositivos AFCI atendam a padrões uniformes de desempenho e segurança. Esse alinhamento contribui significativamente para a aceitação e adoção generalizada da tecnologia AFCI em âmbito internacional, promovendo uma abordagem comum para a prevenção de riscos elétricos em diversos contextos e aplicações.

Atualmente, não existe uma solução global ou uma política regulatória internacional unificada para a regulamentação e estabelecimento de padrões de teste para falhas de arco em corrente contínua (CC) em sistemas FV. Os Estados Unidos lideraram a pesquisa e desenvolvimento de padrões para abordar questões de incêndio em sistemas FV, com a UL (Underwriters Laboratories) emitindo o padrão UL Outline em 2011, posteriormente atualizado para a versão mais recente, UL 1699B-2018. Esta norma especifica requisitos de teste e indicadores de desempenho para Dispositivos de Proteção Contra Falha de Arco (AFCIs) em sistemas FV.

A edição de 2017 do National Electrical Code (NEC) nos Estados Unidos introduziu requisitos pela primeira vez, exigindo a instalação de AFCIs em conformidade com o padrão UL 1699B em circuitos de CC de sistemas FV. Paralelamente, em vários países europeus, as especificações para instalação de sistemas FV vêm gradativamente aumentando, incorporando

requisitos para a implementação de AFCIs com base na norma internacional IEC 63027.

A ênfase crescente na segurança operacional de usinas FV destacou a urgência em resolver desafios relacionados à tecnologia de teste e proteção contra falhas de arco em CC em sistemas FV. Portanto, desenvolver uma solução eficaz de teste de falha de arco em CC tornou-se uma área de pesquisa crucial para avaliar e aprimorar inversores, visando melhorar a confiabilidade e segurança dos sistemas FV. Este campo de pesquisa emergiu como uma questão relevante e premente no setor de energia solar.

Na abordagem da Inteligência Artificial (IA) como prevenção contra incêndio em sistemas FV, quando avaliada a sua complexidade e exposição a diversas condições ambientais, estão suscetíveis a uma variedade de faltas e falhas. Busca-se identificar essas ocorrências é crucial para a manutenção efetiva do sistema. Nesse contexto, o primeiro passo é realizar uma classificação abrangente das possíveis faltas, com foco especial nos módulos solares.

Os módulos fotovoltaicos, conhecidos como placas solares, operam de maneira simples e eficaz: quando expostas à luz, suas células absorvem energia eletromagnética, gerando elétrons livres que, por sua vez, utilizam essa energia para atravessar a célula. Esses elétrons são então conectados em um circuito interno, resultando na geração de uma corrente elétrica (Conrado, 2021). A estrutura de um módulo fotovoltaico é composta por diversos elementos essenciais, cada um desempenhando um papel específico. O vidro de proteção, por exemplo, tem a função de resguardar as células solares contra elementos externos, como vento, chuva e poeira. O encapsulamento desempenha o papel de manter as células seguras e impedir a entrada de umidade.

Outro componente vital é o backsheet, que atua como uma camada de proteção adicional. Ele evita que fatores externos, como chuva e vento, interfiram na corrente elétrica gerada pelas células. Além disso, os conectores elétricos têm a responsabilidade de ligar os módulos ao sistema de energia, permitindo a transferência eficiente da eletricidade gerada pelo painel solar para o restante do sistema (Conrado, 2021).

A aplicação de Inteligência Artificial (IA) para a detecção de falhas em sistemas fotovoltaicos (FV) representa uma abordagem inovadora e eficaz diante da complexidade intrínseca desses sistemas. A natureza não linear da fonte de energia solar acrescenta um nível adicional de desafio operacional, tornando a implementação de estratégias de detecção de falhas uma prioridade. Os sistemas de aproveitamento da energia solar enfrentam complexidades únicas devido à dependência direta das condições climáticas e ambientais na disponibilidade do recurso solar. Essa dependência, por sua vez, influencia diretamente o desempenho e a eficiência dos sistemas FV. Fatores como nuvens, sombreamento e variações na irradiação solar podem impactar significativamente a produção de energia

Desta forma, as técnicas de inteligência artificial têm desempenhado um papel crucial na resolução de desafios complexos associados aos sistemas de aproveitamento de energia solar. Dentre as diversas aplicações destacadas na literatura, encontram-se problemas como a previsão da potência gerada, a previsão da irradiância solar, o aquecimento de água por meio de energia solar, o dimensionamento de sistemas fotovoltaicos, o aprimoramento do Ponto de Máxima Potência (MPPT) e o diagnóstico de falhas em sistemas fotovoltaicos (Kalogirou & Senc, 2012).

O melhoramento do Ponto de Máxima Potência (MPPT) é essencial para maximizar a eficiência na conversão de energia solar em eletricidade, e a inteligência artificial desempenha um papel significativo nesse processo ao otimizar continuamente o MPPT. Adicionalmente, a detecção e diagnóstico de falhas em sistemas fotovoltaicos são facilitados pela capacidade da inteligência artificial de aprender e analisar padrões. Isso possibilita respostas rápidas a potenciais problemas, contribuindo para a confiabilidade e longevidade dos sistemas fotovoltaicos. A abrangência dessas aplicações reflete a crescente importância da inteligência artificial na evolução contínua da eficiência e confiabilidade dos sistemas de aproveitamento de energia solar (Kalogirou & Senc, 2012).

A Inteligência Artificial surge como uma solução adaptativa capaz de lidar com a variabilidade inerente a esses sistemas. Algoritmos de aprendizado de máquina e técnicas avançadas de processamento de dados podem analisar padrões complexos e

comportamentos não lineares, permitindo a identificação precoce de falhas. Ao empregar modelos de IA, é possível criar sistemas de monitoramento inteligentes que se ajustam dinamicamente às condições em constante mudança. Essa capacidade adaptativa é particularmente crucial em ambientes nos quais as condições solares podem variar rapidamente, impactando a produção de energia em curtos períodos.

Portanto, a integração da Inteligência Artificial na detecção de falhas em sistemas fotovoltaicos não apenas aprimora a capacidade de identificar irregularidades, mas também contribui para a otimização contínua do desempenho do sistema. Isso representa um avanço significativo na gestão eficiente de sistemas FV, mitigando riscos e maximizando o aproveitamento sustentável da energia solar.

O funcionamento do sistema de desligamento rápido envolve a ativação de dispositivos específicos que interrompem a geração de energia solar de forma imediata e segura. Esses dispositivos podem variar, mas muitas vezes incluem chaves de desconexão e controladores especializados. A ação rápida desses componentes é essencial para reduzir o risco de choques elétricos, prevenir danos aos equipamentos e garantir a segurança geral do sistema. A implementação do Rapid Shutdown é frequentemente guiada por normas e regulamentações específicas, garantindo que os sistemas fotovoltaicos atendam aos padrões de segurança estabelecidos. A conformidade com essas diretrizes não apenas reforça a segurança, mas também facilita a integração dos sistemas fotovoltaicos às redes elétricas existentes (Canal Solar, 2022).

Como análise do estudo de caso, que trata dos inversores de *string* com tecnologia AFCI. Primeiramente, o estudo terá a finalidade de avaliar o nível de proteção contra arco elétrico em sistema solar FV em corrente contínua, utilizando os parâmetros da UL1699B, diretas e indiretas, a que está exposto o Sistema Solar de Geração Fotovoltaico com 64 módulos de painéis FV instalados no estabelecimento comercial abrangendo área total de 162,99 m² e com uma capacidade instalada de 24,9kWp, considerando-se a existência única de um arco elétrico e tempo de atuação da proteção AFCI em local adjacente a planta solar. Em seguida, analisando-se o diagnóstico da situação de risco real deste sistema, este projeto visará uma solução técnica de proteção efetivamente adequada.

Considera-se ainda a coleta de dados de todos os tipos de transientes elétricos, que a planta solar ficou submetida durante o período dos 12 primeiros meses, com a instalação de um dispositivo eletrônico da marca Solar View, considerando o monitoramento com aplicativo SUN2000, onde poderemos ativar a função PROTEÇÃO AFCI em favor do sistema solar. Os dados sobre todos os tipos de problemas detectados com relação a qualidade e distúrbios de energia nas instalações são armazenados e disponibilizados em memória como históricos de eventos, para resgate posterior, estudos e análise com próprio aplicativo SUN2000, através de Log.

Para a realização deste trabalho foi necessário disponibilidade e acesso aos projetos e aos sistemas elétricos da Planta Solar Fotovoltaica de 24,9kWp do estabelecimento comercial instalada na cidade de Santo Antônio de Leverger MT. Também, foi previsto o fornecimento de um dispositivo eletrônico da marca Solar view e aplicativo SUN2000 já instalado para operação durante os 12 meses de duração deste projeto.

No Quadro 1, apresenta-se um resumo sobre toda a estrutura (materiais) que foi disponibilizada para a realização e conclusão deste projeto do estudo de caso:

Quadro 1 - Estrutura do projeto.

Item	Material	Qtde	Ud	Custo R\$	Observação
1	Planta Solar FV de 24,9 kWp (MT)	1	Ud	N.A.	Existente (MT)
2	Especificações e Dados das características elétricas e eletrônicas da Planta Solar FV de 24,9 kWp	1	Ud	N.A.	Informações de projeto de instalação e do fabricante. OBS: Alternativa de suporte complementar no meio acadêmico e científico.
3	Análise in loco	1	Ud	N.A.	Sistema existente
4	Análises de geração em tempo real do FV	1	Ud	N.A.	Alternativa de levantamento técnico pelo próprio autor
5	Log de registro em tempo real pelo aplicativo SUN2000	1	Ud	N.A.	Alternativa de levantamento técnico pelo próprio autor

Fonte: Autores (2023).

Este artigo explora um estudo de caso que demonstra que os inversores de *string*, mesmo sem otimizadores de potência ou microinversores, podem ser seguros quando equipados com tecnologia AFCI de acordo com a norma UL1699B. Isso garante que, em caso de uma falha de arco elétrico, o sistema seja desligado de maneira rápida e automática, protegendo a vida dos usuários e suas propriedades.

O estudo em questão fornece evidências sólidas de que os inversores de *string*, tradicionalmente considerados menos seguros devido à falta de tecnologias de otimização a nível de módulo, podem ser confiáveis e seguros quando equipados com sistemas AFCI. Essa tecnologia de detecção de arco elétrico é fundamental para identificar e interromper rapidamente qualquer falha potencial, mitigando riscos relacionados à segurança. Ao aderir à norma UL1699B, que estabelece as diretrizes para a detecção e interrupção de arcos elétricos, os inversores de *string* podem oferecer níveis de segurança comparáveis aos de seus equivalentes com otimizadores de potência ou microinversores. Isso tem implicações significativas para a indústria de energia solar, especialmente quando consideramos que a segurança é uma prioridade crucial em instalações FV.

A capacidade de garantir que o sistema seja desligado automaticamente em caso de falhas por arco elétrico não apenas protege a vida dos usuários, mas também resguarda suas propriedades de danos potenciais. Esse estudo de caso destaca que a tecnologia AFCI, combinada com inversores de *string*, pode ser uma opção segura e viável, mesmo na ausência de otimizadores de potência, contribuindo para uma indústria solar mais segura e confiável.

As Figuras 14 e 15 que se seguem proporcionam uma representação visual do sistema em pleno funcionamento, destacando um sistema solar FV com uma capacidade total de 24,9 kWp. Essas imagens capturam a eficiência e a operação do sistema, permitindo uma visão direta de como a energia solar está sendo convertida em eletricidade.

Figura 14 – Sistemas solar FV de 24,9 KWp.



Fonte: Autores (2021), Arquivo de entrega da instalação.

A Figura 14 apresenta o sistema solar em toda a sua magnitude, revelando a instalação completa com seus painéis solares em posição, prontos para capturar a luz do sol. Essa imagem é uma representação vívida da escala da instalação e da infraestrutura envolvida.

Já a Figura 15 oferece uma visão mais próxima e detalhada do sistema solar, demonstrando a foto da instalação do inversor com uma capacidade de 20kW (quilowatts) na instalação. A capacidade de 20 kW indica a potência que o inversor pode converter a partir dos painéis solares FV. Essa representação visual é valiosa para acompanhamento, manutenção e documentação do sistema solar FV, permitindo uma análise detalhada da configuração e conexões do inversor.

Figura 15 – Foto da instalação do Inversor String – 20 kW.



Fonte: Autores (2021).

No contexto da energia solar FV, o inversor é um componente crítico que converte a corrente contínua gerada pelos painéis solares em corrente alternada, tornando-a adequada para uso em residências, empresas e indústrias. Portanto, a captura visual da instalação do inversor de 20 kW é valiosa para acompanhar o desempenho e a funcionalidade do sistema solar. Essas ilustrações visuais são valiosas para compreender o funcionamento do sistema solar FV, demonstrando como a tecnologia converte a energia solar em eletricidade utilizável. Essas imagens proporcionam uma representação tangível da contribuição da energia solar para a geração de eletricidade limpa e renovável.

A ocorrência de uma falha no aplicativo de monitoramento, com a notificação de "Desativação inesperada", é um cenário que pode se revelar desafiador para os usuários. Essa mensagem sugere que o aplicativo enfrentou um erro não previsto, resultando em seu fechamento abrupto. A conectividade à Internet também é um ponto crítico a ser avaliado. Problemas na conexão podem desencadear falhas em aplicativos de monitoramento.

Além disso, é recomendável revisar as configurações do dispositivo onde o aplicativo está instalado e garantir que o sistema operacional esteja atualizado. Por vezes, problemas decorrem de configurações inadequadas. A Figura 16 apresenta a falha no aplicativo de monitoramento, que aponta uma falha de desligamento.

Figura 16 - Falha no aplicativo de monitoramento (acusando falha de desligamento).



Fonte: Sun 2000 (2023).

O alarme emitido pelo sistema de monitoramento do inversor, indicando uma "Falha de desligamento inesperado do inversor", é um alerta que merece atenção. Essa mensagem aponta que ocorreu uma interrupção não programada no funcionamento do inversor. Deve ser verificada a integridade dos componentes do sistema de energia solar FV é outra etapa importante. Isso envolve inspecionar os cabos, conexões e painéis solares em busca de possíveis problemas físicos ou de conexão que possam ter desencadeado a falha. Além disso, é recomendável avaliar as configurações do inversor e garantir que estejam de acordo com as especificações recomendadas. Às vezes, ajustes inadequados podem resultar em desligamentos inesperados. A Figura 17 ilustra um alarme no sistema de monitoramento de inversor, que está indicando uma falha de desligamento inesperado do inversor.

Figura 17 – Alarme no sistema de monitoramento do inversor acusando falha de desligamento inesperado do inversor.

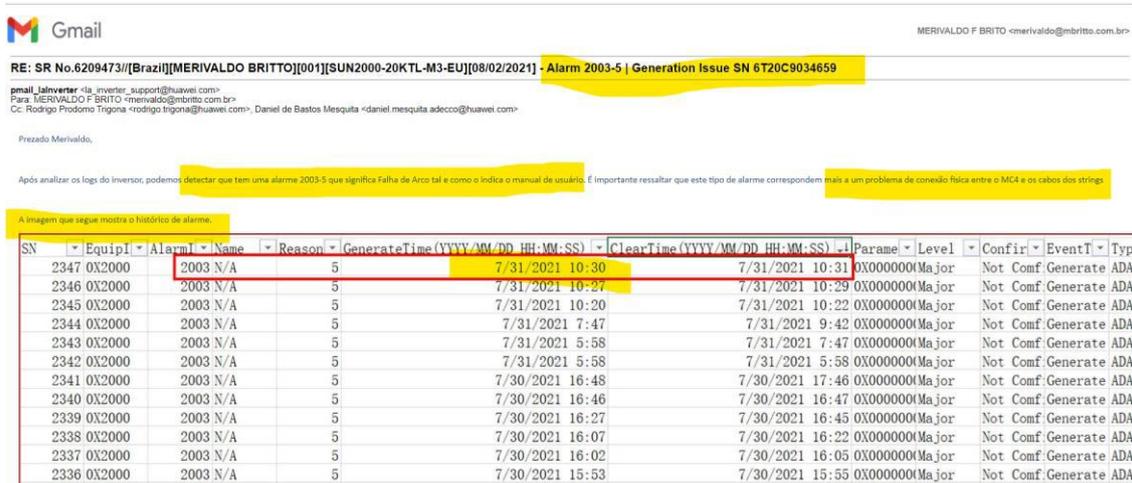


Fonte: Sun 2000 (2023).

Verifica-se que a falha de desligamento inesperado do inversor, requer uma abordagem cuidadosa para determinar a causa subjacente e adotar medidas adequadas para restaurar o funcionamento normal do sistema de energia solar.

O inversor enfrentou uma situação de falha que desencadeou um alarme com o código 2003-5, apontando para a ativação do AFCI (Interruptor de Circuito Anti-Arco Elétrico). Essa circunstância específica gerou um alerta crítico que foi imediatamente comunicado por meio de um e-mail. A Figura 18 apresenta uma falha no inversor, com o erro “alarme 2003-5”.

Figura 18 – Falha no inversor (alarme 2003-5 – AFCI).



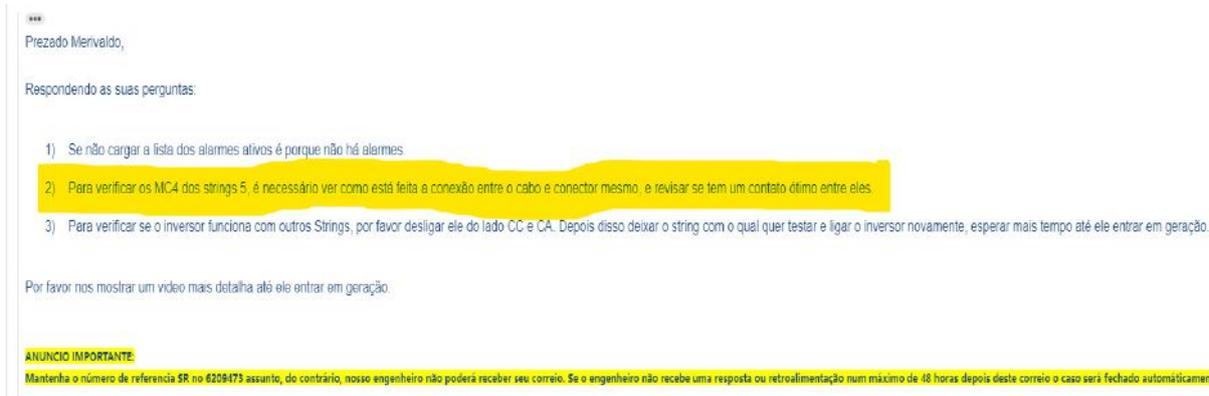
Fonte: Sun 2000 (2023).

Verifica-se que o sistema de monitoramento do inversor detectou a ocorrência do alarme 2003-5 relacionado ao AFCI, uma notificação por e-mail foi gerada e enviada aos responsáveis pela operação do sistema solar. Esse tipo de notificação é fundamental, pois permite uma resposta rápida a problemas potencialmente perigosos, como arcos elétricos.

A mensagem de e-mail fornecia informações cruciais sobre a natureza da falha e o código específico do alarme. Esse nível de detalhe é essencial para entender o que causou o problema e quais medidas corretivas podem ser necessárias. Com base nessa notificação, os operadores do sistema puderam investigar e tomar as providências adequadas para resolver a falha do inversor. A verificação da instalação envolve uma análise abrangente de todos os componentes do sistema solar FV. Isso inclui a inspeção dos painéis solares, cabos, conexões e componentes elétricos relacionados. O objetivo é identificar qualquer anomalia, como conexões soltas, danos físicos ou outros problemas que possam afetar o desempenho do sistema.

Além disso, essa orientação também implica uma revisão das configurações do inversor. Certificar-se de que as configurações estejam de acordo com as especificações recomendadas é fundamental, uma vez que ajustes incorretos podem resultar em problemas de funcionamento. Na Figura 19, verifica-se a orientação para melhor verificar a instalação:

Figura 19 – Orientação para verificar a instalação.



Fonte: Sun 2000 (2023).

Foi possível verificar que após o alarme direcionar a falha que seria no conector MC4 na String 1, houve a necessidade de uma equipe para realizar uma inspeção no local. A investigação revelou que a causa subjacente do problema era, de fato, relacionada a uma falha de instalação. Esse tipo de falha é comumente associado a conexões inadequadas ou defeituosas que podem ocorrer durante o processo de montagem do sistema solar FV.

A identificação da falha no conector MC4 na String 5 foi um passo fundamental na resolução do problema. Uma vez que a equipe de campo identificou a falha de instalação, medidas corretivas puderam ser implementadas imediatamente, conforme apresentado na Figura 20.

Figura 20 - Falha conector MC4 na String 5.



Fonte: Autores (2021).

Essas medidas podem incluir a substituição do conector MC4 defeituoso, a reavaliação das conexões em toda a instalação para garantir que estejam devidamente apertadas e seguras, além de outras ações necessárias para restaurar a funcionalidade do sistema.

Essa situação destaca a importância de uma manutenção regular e de inspeções detalhadas em sistemas de energia solar FV. Problemas de instalação, como conexões soltas ou defeituosas, podem ter impactos significativos na operação do sistema e na segurança. A pronta identificação e correção de falhas de instalação são cruciais para garantir o desempenho adequado e a confiabilidade de sistemas solares. Foi identificado um conector com sintomas de superaquecimento. Essa descoberta é de extrema importância, uma vez que o superaquecimento de conectores em sistemas de energia solar FV pode representar um risco

significativo para início de arco elétrico, com isso a segurança e o desempenho do sistema foi garantido com AFCI, identificando a falha.

O superaquecimento de conectores pode ser causado por diversos fatores, como conexões defeituosas, sobrecarga elétrica ou problemas de dimensionamento inadequado. Independentemente da causa, essa condição pode levar a danos nos conectores, elevando o risco de incêndio e afetando o funcionamento do sistema. A Figura 21, apresenta o conector com início de superaquecimento.

Figura 21 - Conector com início de superaquecimento.



Fonte: Autores (2021).

Diante desse cenário, é crucial que medidas imediatas sejam tomadas para corrigir o problema do conector com superaquecimento. Isso pode envolver a substituição do conector defeituoso, a avaliação das conexões adjacentes em busca de possíveis danos e a implementação de ajustes no dimensionamento do sistema, se necessário.

Desta forma, a identificação do conector com início de superaquecimento destaca a importância da manutenção preventiva em sistemas de energia solar FV. A inspeção regular e a detecção precoce de problemas, como superaquecimento, desempenham um papel fundamental na prevenção de danos mais sérios e na manutenção da segurança e eficiência do sistema. Portanto, essa descoberta deve ser tratada com a devida atenção e ação imediata.

4. Resultados

Com a realização das etapas de revisão de literatura, levantamento de projetos, dados e especificações dos sistemas de geração solar em um estabelecimento comercial, seguida da análise destes projetos realizamos em tempo real a medição in loco com obtenção dos dados através do aplicativo Sun2000: a) Identificamos o Nível de Desempenho (performance) do Sistema de geração e alarmes de falhas do sistema b) Identificamos através do aplicativo com envio do código de falha via e-mail, como demonstrando nas figuras que demonstram alarme de falha (Figuras 13, 15 e 17) de arco elétrico no Sistema de Geração Solar de 24,9kWp, considerando-se as características pelos dados obtidos pelo aplicativo Sun2000.

Foram obtidos todos dados onde o inversor teve uma desligamento inesperado, ou seja, deixando de gerar o fluxo reverso da corrente como demonstrado na Figura 14, onde foi possível observar a existência de tensão, com inversor automaticamente através da IA desligamento o fluxo reverso da corrente, lembrando que para acontecer um arco elétrico temos que ter uma ruptura de dois pólos, ou seja, é o acontecimento que surge devido a uma descarga elétrica entre dois pólos, superior a resistência do ar e mantida pela formação de gases que agem como meio condutor para a corrente elétrica que pode ser originada devido a uma falha humana (técnicos no ato da ligação), ou falha de produtos, que pode levar a um arco elétrico do lado CC e com isso levar a propagar a um incêndio causando prejuízos e danos aos usuários.

Em contraste com a vasta experiência acumulada ao longo de décadas em instalações fotovoltaicas (PV) em climas

mais temperados, começamos a perceber os efeitos das temperaturas operacionais extremas e dos níveis extremos de irradiância solar à medida que a absorção de energia FV em grande escala se expande nas regiões do mundo conhecidas como o "cinturão solar". Um desses efeitos é desencadeado por eventos de irradiância solar extrema, que, até recentemente, eram mais objeto de interesse científico do que um problema potencial que afetasse o desempenho das usinas FV (Nascimento, et al., 2019).

As características de saída não linear dos arranjos FV e as técnicas de rastreamento do ponto de potência máxima (MPPT) apresentam desafios significativos no diagnóstico de falhas. Uma abordagem eficaz para superar esses desafios é o modelo de diagnóstico de falhas baseado na análise de transitórios elétricos no domínio do tempo. No entanto, muitos estudos anteriores que utilizaram processos transitórios exigiam conjuntos de dados extensos e rotulados para treinar seus modelos, e algumas abordagens envolviam a normalização com sensores de condições ambientais ou painéis FV de referência (Xi et al., 2021).

O algoritmo de detecção analisa um perfil de energia simétrico exclusivo gerado por uma falha de arco. Os resultados experimentais comprovam que os harmônicos gerados pela ignição e extinção de uma falha de arco podem ser identificados por meio das medições de tensão na fonte de tensão onde os dispositivos de proteção contra falhas de arco (AFCI) estão instalados (Kim et al., 2022).

Nesse caso, foi observado a Figura 17, devido uma instalação incorreta na conexão do conector MC4, onde o técnico instalador fez uma conexão e enrolou mais de 10 metros de cabos corrente contínua envolta do conector, isso gerou uma bobina no conector, no qual o superaquecimento, levou a quase a ruptura da conexão no que iria levar a uma falha de arco elétrico levando a um posterior incêndio, que colocaria a vida dos usuários e propriedade em risco. Com isso foi avaliado que mediante a aplicação do APCI no hardware do inversor antes que acontecesse a ruptura dos polos, em menos de 300 milissegundo, com uso IA o inversor obteve um desligamento instantâneo não deixando obter essa ruptura no conector MC4, no qual como já tínhamos visto, e onde tem maior índice de falhas de propagação de incêndio em sistema solar FV

As falhas por arco em sistemas FV, especialmente as falhas por arco em série, estão se tornando mais frequentes. Sem a detecção e interrupção oportunas, esses eventos perigosos têm o potencial de desencadear incêndios catastróficos, representando uma ameaça grave à segurança de indivíduos e propriedades (Lu et al., 2022). À medida que a adoção de sistemas FV cresce, a preocupação com as falhas por arco também aumenta. Essas falhas podem ser desencadeadas por uma série de fatores, incluindo problemas de conexão, danos aos componentes ou mesmo condições ambientais adversas. Quando não são identificadas e tratadas a tempo, as falhas por arco podem resultar em danos substanciais e colocar em risco vidas e bens.

Portanto, é fundamental implementar medidas de detecção e interrupção de falhas por arco nos sistemas FV para mitigar esses riscos. A segurança humana e a proteção das propriedades são prioridades essenciais na indústria de energia solar, e a prevenção de falhas por arco desempenha um papel crucial nesse processo. Garantir a conformidade com normas e regulamentos de segurança é fundamental para minimizar os perigos associados às falhas por arco em sistemas FV (Lu et al., 2022).

As falhas de arco apresentam confiabilidade e segurança significativas nos sistemas FV. Este estudo apresentou um método eficaz baseado na transformada *wavelet* e vetor de suporte máquinas (SVM) para detecção de falhas de arco em sistemas fotovoltaicos CC. Devido às suas vantagens no processamento de sinais de tempo-frequência, a transformada *wavelet* é aplicada para extrair os recursos característicos dos sinais de tensão/corrente do sistema. SVM é então usado para identificar falhas de arco. Demonstra-se como resultados a proposta de uma técnica para detecção de falta de arco em sistemas FV usando transformada *wavelet* discreta para extração de recursos e máquina de vetores de suporte para decisão. Como o classificador desenvolvido é projetado para aplicações DSP/MCU, a carga de computação envolvida na classificação e o espaço de memória usado para vetor de suporte armazenamento são duas preocupações principais (Wang & Balog, 2022).

Com a expansão do setor solar FV, especialmente na modalidade de Geração Distribuída (GD), observou-se uma lacuna na segurança, onde profissionais ingressaram no setor sem formação adequada, sem conhecimento das normas técnicas como

ABNT5410, ABNT5419 ABNT16690 e outras, assim como normas, NR10 e NR35, essenciais para a segurança em instalações elétricas e trabalhos em altura (ABNT, 2018).

O crescente número de incêndios em sistemas fotovoltaicos, notadamente em telhados de residências e comércios, tem despertado a atenção das autoridades brasileiras. Um exemplo recente foi o incêndio em uma fábrica de calçados em Patos de Minas (MG), atribuído a uma possível instalação inadequada de painéis solares. Em resposta a essa preocupação, o Corpo de Bombeiros enviou uma carta à ABNT solicitando urgência na criação de normas de segurança para mitigar os riscos de incêndios em usinas solares. O documento destaca a importância da agenda sustentável e do uso de sistemas fotovoltaicos, reconhecendo a evolução positiva que essas tecnologias trouxeram para a sociedade. No entanto, ele ressalta que várias corporações de bombeiros relataram ocorrências de incêndios associados a sistemas fotovoltaicos, especialmente em circuitos de corrente contínua entre os painéis e os inversores.

O Conselho Nacional de Controle Interno (CONACI) propõe medidas, incluindo a evolução normativa para exigir dispositivos adicionais de proteção, o uso de materiais adequados, e procedimentos de comissionamento e inspeção para reduzir riscos. Além disso, destaca a necessidade de desenergização dos circuitos de corrente contínua, possibilitando um combate mais seguro ao incêndio (Canal Solar, 2023).

O órgão enfatiza a importância da reciclagem e capacitação dos bombeiros para lidar com incêndios em sistemas fotovoltaicos. Também sugere uma abordagem normativa e regulatória, focada na segurança contra incêndios e na proteção dos profissionais envolvidos. Países desenvolvidos já adotaram tais medidas após eventos similares, indicando uma abordagem proativa para evitar acidentes e mortes relacionadas a incêndios em instalações solares.

O mercado oferecia cursos online de curta duração, muitas vezes insuficientes para abordar adequadamente temas cruciais. A legislação exige cursos mais extensos, como 40 horas para NR10 e um mínimo de 160 horas para eletricitistas. Produtos no mercado também careciam de proteção adequada contra riscos elétricos, como falhas de arco elétrico. A recente Portaria do Inmetro estabelece um prazo de 12 meses para que todos os inversores implementem a proteção contra incêndios, encerrando discussões e promovendo avanços significativos na segurança do setor FV no Brasil.

Com isso foi possível concluir que através da Inteligência Artificial, o inversor percebeu a perturbações no lado CC e quando identificou um espectro com arco elétrico devido a falha de instalação no conector MC4 na String 1, o circuito CC é interrompido imediatamente, garantido assim a segurança da propriedade e de vidas dos usuários.

A introdução e a obrigatoriedade de Disjuntores de Circuito de Falha de Arco (AFCI, do inglês Arc Fault Circuit Interrupter) nas instalações elétricas são medidas essenciais para melhorar a segurança contra incêndios. A National Electrical Code (NEC) nos Estados Unidos é uma referência importante para as práticas seguras em instalações elétricas, e suas atualizações refletem avanços contínuos em tecnologia e conhecimento sobre segurança.

Na Figura 22, são apresentados os disjuntores de falha de arco (AFCI) instalados em ambientes residenciais. Esta representação visual destaca a disposição ou configuração específica desses dispositivos de segurança elétrica em um contexto doméstico. O propósito é proporcionar uma visão clara e compreensível da implementação dos AFCIs, destacando sua importância na prevenção de incêndios elétricos em residências.

Figura 22 - Disjuntores de falha de arco (AFCI) nos ambientes residenciais.



Fonte: AFCI - ABB Group (2023).

Os AFCIs ajudam a prevenir falhas de arco elétrico, reduzindo o risco de incêndios elétricos em residências. A exigência NEC até o ano 2023, tornando-se obrigatório o uso de AFCIs em determinados espaços residenciais. Os locais de instalação obrigatória, sendo assim, os AFCIs devem ser utilizados nos seguintes ambientes residenciais: a) quarto de família; b) sala de jantar; c) sala de estar; d) quarto; e) marquise; f) biblioteca; g) covil; h) corredores de escritório; i) armários; j) sala de recreação; k) Cozinha (exceto quando indicado de outra forma).

Desta forma, destaca-se a necessidade de instalação de AFCIs em uma variedade de espaços residenciais para melhorar a segurança elétrica e prevenir incêndios relacionados a falhas de arco elétrico.

A implementação obrigatória de AFCIs em todos os circuitos elétricos residenciais nos Estados Unidos é uma medida crucial para prevenir acidentes relacionados a arcos elétricos e fortalecer a segurança nas residências. Os AFCIs são projetados para detectar falhas de arco elétrico, que podem ser causadas por problemas como fios desgastados, conexões soltas ou danos nos cabos. Essas condições podem levar a incêndios se não forem detectadas e interrompidas a tempo. A inclusão de AFCIs nos disjuntores e outros dispositivos elétricos é uma medida proativa para mitigar os riscos de incêndios relacionados à eletricidade. Isso demonstra um comprometimento crescente com a segurança residencial e a proteção dos ocupantes.

Sendo assim, torna-se fundamental que os profissionais da área elétrica, construtores e proprietários de imóveis estejam cientes dessas atualizações e sigam as normas para garantir ambientes mais seguros. A prevenção de incêndios em instalações elétricas é crucial para proteger vidas e propriedades, e a adoção de tecnologias como os AFCIs desempenha um papel fundamental nesse esforço.

5. Considerações Finais

Nas considerações finais, é importante ressaltar a relevância da pesquisa e análise realizadas no âmbito dos sistemas de geração solar FV. Foram identificados vários aspectos significativos que impactam a eficiência, o desempenho e a segurança desses sistemas. Verificou-se que a capacidade de realizar medições e monitorar sistemas em tempo real, como demonstrado com o aplicativo Sun2000, é fundamental para identificar falhas, problemas de desempenho e garantir a segurança do sistema. Isso permite ação imediata e ajuda a evitar problemas mais graves.

Na detecção de falhas de arcos elétricos, como indicado nas análises, é crucial para garantir a segurança dos sistemas. O uso de tecnologia de detecção de arcos elétricos (AFCI) é altamente recomendado, mesmo em sistemas de inversores de string

convencionais. A análise reforça a importância da manutenção preventiva em sistemas de geração solar. Isso inclui inspeções regulares, monitoramento contínuo e ação rápida em caso de problemas. Considerando a expansão contínua da geração solar FV, é sugerido que pesquisas adicionais sejam conduzidas para aprimorar a tecnologia de detecção de arcos elétricos, melhorar os métodos de monitoramento e aprofundar a compreensão dos sistemas de geração distribuída. Foram abordadas ainda as normas e regulamentações, relacionadas à segurança e desempenho dos sistemas solares FV que devem ser continuamente revisadas e atualizadas para refletir as melhores práticas e a evolução da tecnologia.

Este artigo demonstrou a importância do monitoramento contínuo e da detecção de falhas em sistemas de geração solar FV. A implementação de tecnologias avançadas, como a detecção de arcos elétricos, é fundamental para garantir a segurança e a eficiência desses sistemas. O futuro da energia solar FV depende de pesquisas contínuas, inovação tecnológica e conformidade com as normas e regulamentações. A implementação da IA é uma abordagem promissora para melhorar a segurança contra incêndios em sistemas de energia solar FV. Essa tecnologia oferece soluções eficazes para a detecção precoce de falhas por arco e a ativação de desligamentos rápidos, reduzindo significativamente os riscos associados a incêndios em plantas fotovoltaicas.

Como propostas para trabalhos futuros, citam-se as seguintes: a) O AFCI nos disjuntores, amplamente utilizado nos Estados Unidos, não se limita apenas à proteção contra incêndios na geração de energia, mas também desempenha um papel crucial na distribuição. Implementado nos quadros de distribuição de instalações elétricas residenciais, comerciais e industriais, o AFCI age como um sistema de proteção contra incêndios ao detectar anomalias elétricas, como arcos elétricos, que podem resultar em incêndios; b) desenvolver um sistema de IA para diagnosticar falhas em instalações elétricas residenciais, otimizar a eficiência energética e integrar fontes renováveis. Uma análise de impacto ambiental, guiada por IA, avaliará e reduzirá o impacto ambiental das instalações elétricas, promovendo práticas mais sustentáveis; c) implementar planos de manutenção preditiva de equipamentos elétricos realizados por meio de sistemas de IA prevenindo falhas e reduzindo custos de reparo. Algoritmos inteligentes serão criados para otimizar o consumo de energia, considerando padrões de uso, condições climáticas e tarifas, incluindo automação para maximizar a eficiência.

Ao analisar as projeções futuras, torna-se importante ressaltar que até 2040, prevê-se que a energia solar fotovoltaica representará aproximadamente 32% da matriz energética global. Além disso, estima-se que cerca de 75% da energia solar será gerada por sistemas de geração distribuída. Essas projeções refletem a crescente importância e adoção da energia solar como uma fonte significativa de eletricidade. A geração distribuída, em particular, destaca a tendência de sistemas de energia descentralizados, nos quais a geração de eletricidade ocorre em pequena escala e próximo aos pontos de consumo. Isso pode incluir instalações solares em residências, empresas e comunidades, contribuindo para uma rede mais resiliente e sustentável. As referidas estimativas refletem o crescente reconhecimento do papel fundamental da energia solar na transição para fontes mais limpas e renováveis. A expansão da geração distribuída também reflete a busca por soluções mais descentralizadas e resilientes, reduzindo a dependência de grandes centrais elétricas tradicionais.

Referências

- ABB Group. *Disjuntores de falha de arco (AFCI) nos ambientes residenciais*. <https://new.abb.com/news/pt-br/detail/105885/protecao-contra-arco-eletrico>.
- ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2018). *NBR-16.690: instalações elétricas de arranjos fotovoltaicos - Requisitos de projeto*. Rio de Janeiro.
- ABSOLAR. (2022). *93% dos consumidores estão satisfeitos com seus sistemas*. Associação Brasileira de Energia Solar Fotovoltaica - ABSOLAR. <https://www.absolar.org.br/noticia/93-dos-consumidores-estao-satisfeitos-com-seus-sistemas/>.
- ANEEL. Agência Nacional de Energia Elétrica (2019). *Revisão das regras aplicáveis à micro e minigeração distribuída* – Resolução Normativa nº 482/2012 Relatório de Análise de Impacto Regulatório nº 003-SRD/SGT/SRM/SRG/SCG/SMA/ANEEL. Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL). <http://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren2015687.pdf>.
- Brasil (2022). *Lei 14.300, de 06 de janeiro de 2022*: Institui o marco legal da microgeração e minigeração distribuída, o Sistema de Compensação de Energia Elétrica (SCEE) e o Programa de Energia Renovável Social (PERS), altera as Leis nºs 10.848, de 15 de março de 2004, e 9.427, de 26 de dezembro de 1996, e dá outras providências. <https://in.gov.br/en/web/dou/-/lei-n-14.300-de-6-de-janeiro-de-2022-372467821>.

- Brasil. (2023). *Portaria nº 515, de 10 de novembro de 2023*: Altera a Portaria Inmetro nº 140, de 21 de março de 2022, que aprova o Regulamento Técnico da Qualidade e os Requisitos de Avaliação da Conformidade para Equipamentos de Geração, Condicionamento e Armazenamento de Energia Elétrica em Sistemas Fotovoltaicos – Consolidado. <http://sistema-sil.inmetro.gov.br/rtac/RTAC003010.pdf>.
- Canal Solar. (2020). *Proteção contra arco elétrico nos inversores fotovoltaicos*: O arco elétrico é um fenômeno temido e indesejado nos sistemas fotovoltaicos. Mateus Vinturini, 15 dez. <https://canalsolar.com.br/protecao-contra-arco-eletrico-nos-inversores-fotovoltaicos/>
- Canal Solar. (2022). AFCI e rapid shutdown: como melhorar a segurança dos sistemas FV. <https://canalsolar.com.br/afci-e-rapid-shutdown-como-melhorar-a-seguranca-dos-sistemas-fv/>
- Canal Solar. (2023). *Eficiência energética em sistemas FV*: avanços impulsionados por baterias de lítio: Como essa tecnologia tem sido crucial para impulsionar o armazenamento de energia fotovoltaica? 06/10/. <https://canalsolar.com.br/eficiencia-energetica-em-sistemas-fv-avancos-impulsionados-por-baterias-de-litio/>.
- CBMMS. (2023). Corpo de Bombeiro Militar do Estado de Mato Grosso do Sul. *Corpo de Bombeiros Militar de Porto Murtinho atende ocorrência de incêndio em sistema de energia solar*. 03/02. <https://www.bombeiros.ms.gov.br/corpo-de-bombeiros-militar-de-porto-murtinho-atende-ocorrencia-de-incendio-em-sistema-de-energia-solar/>.
- Conrado, D. M. (2021). *Estudo dos Principais Aspectos de Manutenção em Sistemas Fotovoltaicos On-grid*. Trabalho de Conclusão de Curso em Bacharel de Engenharia Elétrica, Universidade Federal Rural de Pernambuco, 1-91. https://repository.ufrpe.br/bitstream/123456789/2705/1/TCC_DeyvisonMunizConrado.pdf.
- Gil, A. C. (2017). *Como elaborar projetos de pesquisa*. (6a ed.), Atlas.
- Goodwe. (2023). *Bateria de lítio*. <https://br.goodwe.com/lynx-home-u-series-low-voltage-lithium-battery>.
- GO. Governo do Estado de Goiás (2023). Corpo de Bombeiros Militar. *Norma técnica 44/2023*: segurança em sistemas fotovoltaicos. Editada pela Portaria 544, de 20 de outubro de 2023.
- IRENA (2023). Agência Internacional de Energias Renováveis. *Matriz elétrica brasileira*: projeção até ano 2040 – BNEF. www.irena.org/publications.
- Kalogirou, S. & Senc, A. (2012). Artificial Intelligence Techniques in Solar Energy Applications. *Solar Collectors and Panels, Theory and Applications*, p. 1–8.
- Kim, M. A., Chun, J., & Shim, H. (2022). Using photovoice with male problematic gamblers to understand their lived story on the path to recovery in South Korea. *SAGE Open*. Advance online publication.
- Lu, S., Sahoo, A., Ma, R., Phung, B.T. (2022). DC Series Arc Fault Detection Using Machine Learning in Photovoltaic Systems: Recent Developments and Challenges. *The 8th International Conference on Condition Monitoring and Diagnosis*. Jul.
- MME. Ministério de Minas e Energia (2023). *Micro e Minigeração Distribuída*. 29/08. <https://www.gov.br/aneel/pt-br/assuntos/geracao-distribuida>.
- MG. Estado de Minas Gerais (2022). *Instrução Técnica nº 30/2022*. Corpo de Bombeiros Militar do Estado de Minas Gerais.
- MT. Estado do Mato Grosso (2022). *Norma Técnica do Corpo de Bombeiros nº 49/2022*. Corpo de Bombeiros Militar.
- Nascimento, L. R., Viana, T. S., Campos, R. A., & Rüther, R. (2019). Extreme solar overirradiance events: Occurrence and impacts on utility-scale photovoltaic power plants in Brazil. *Solar Energy*. 186, 370-381. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2019.05.008>
- Pereira, A. S., Shitsuka, D. M., Parreira, F. B., & Shitsuka, R. (2018). *Metodologia da pesquisa científica*. Universidade Federal de Santa Maria - UFSM
- Wang, Z., & Balog, R. S. (2022). Arc Fault and Flash Detection in Photovoltaic Systems Using Wavelet Transform and Support Vector Machines. *IEEE Power & Energy Society Section*. Jul.
- Xi, P., Lin, P., Lin, Y., Zhou, H., Cheng, S., Chen, Z., & Wu, L. (2021). Online Fault Diagnosis for Photovoltaic Arrays Based on Fisher Discrimination Dictionary Learning for Sparse Representation. *IEEE Power & Energy Society Section*. (9).
- Yin, R. K. (2015). *Estudo de caso: planejamento e métodos*. (5a ed.), Bookman.
- Zgonena, T., Ji, L., & Dini, D. (2011). *Photovoltaic DC Arc-Fault Circuit Protection and UL Subject 1699B*.