

Operação e manutenção de sistemas fotovoltaicos conectados à rede: inspeção termográfica e limpeza de módulos FV

Operation and maintenance of grid-connected photovoltaic systems: thermographic inspection and cleaning of PV modules

André Luis Crispim Costa 

Simone Queiroz da Silveira Hirashima 

Reginaldo Vagner Ferreira 

Resumo

Com a expansão dos sistemas fotovoltaicos (FV) no país, boas práticas para operação e manutenção (O&M) de usinas fotovoltaicas vêm sendo implementadas. Nota-se, contudo, uma lacuna de conhecimentos sobre essa questão. Procedimentos para identificação e prevenção de falhas têm auxiliado na busca por melhor desempenho, segurança e disponibilidade desses sistemas. Este trabalho apresenta métodos para inspeção termográfica e limpeza de módulos FV além de cálculo de perdas na geração. O estudo foi conduzido em usinas FV do Instituto Federal de Minas Gerais (IFMG), nos campi de Betim, e de Congonhas. Os valores de geração foram obtidos em sistemas de aquisição de dados das usinas. Por meio da inspeção termográfica qualitativa identificou-se que 12,7% dos módulos da usina de Betim apresentaram pontos de sobreaquecimento. Com a limpeza desse sistema, pôde-se estimar perdas de geração, pela sujidade dos módulos, de até 22,25%. Em Congonhas, essas perdas chegaram a 56,86%, possivelmente influenciadas pela poluição atmosférica. Com os resultados obtidos, nota-se a importância da manutenção preventiva e do monitoramento dos sistemas, na busca por maior durabilidade e desempenho energético das usinas FV.

Palavras-chave: Energia solar fotovoltaica. Operação e manutenção (O&M). Termografia. Limpeza de módulos FV. Sujidade em módulos FV. Desempenho de sistemas FV.

Abstract

Photovoltaic systems (PV) are expanding in Brazil, accompanied by the implementation of good practices for the operation and maintenance (O&M) of photovoltaic plants. There is, however, a gap of knowledge in the field. Procedures for the identification and prevention of failures have helped in the search for the better performance, safety and availability of these systems. This paper presents methods for thermographic inspection and cleaning of PV modules, in addition to calculating generation losses. The study was conducted in the PV plants of the Federal Institute of Minas Gerais (IFMG), on the Betim and Congonhas campuses. The generation values were obtained from data acquisition systems at the plants. A qualitative thermographic inspection revealed that 12.7% of the Betim plant modules had hot spots. Through the cleaning of this system, generation losses of up to 22.25%, caused by the soiling of the modules, were estimated. In Congonhas, these losses reached 56.86%, possibly caused by air pollution. These results highlight the importance of preventive maintenance and monitoring of the systems, with the aim of achieving greater durability and energy performance of PV plants.

Keywords: Photovoltaic solar energy. Operation and maintenance (O&M). Thermography. Cleaning PV modules. Soiling of PV modules. Performance of PV systems.

¹André Luis Crispim Costa
¹Instituto Federal de Minas Gerais
Belo Horizonte - MG - Brasil

²Simone Queiroz da Silveira
Hirashima
²Centro Federal de Educação
Tecnológica de Minas Gerais
Belo Horizonte - MG - Brasil

³Reginaldo Vagner Ferreira
³Instituto Federal de Minas Gerais
Betim - MG - Brasil

Recebido em 01/12/20
Aceito em 17/02/21

Introdução

A tecnologia fotovoltaica, dominada atualmente pelo uso de células de silício cristalino, destaca-se pela possibilidade de geração distribuída, na qual o consumidor pode gerar energia para seu próprio consumo e, também, injetá-la na rede elétrica. Um sistema fotovoltaico conectado à rede (SFCR) básico é constituído por uma estrutura de suporte onde são instalados os módulos fotovoltaicos que compõem o sistema de geração solar, os cabos de conexão, um ou mais inversores que convertem a corrente contínua gerada em corrente alternada (FERREIRA, 2018), bem como os equipamentos e dispositivos de proteção. Também estão presentes os sistemas de segurança, comunicação e monitoramento, além da rede elétrica e obras civis (CALLEJO; SAAVEDRA; GÓMEZ, 2019).

O processo de operação e manutenção (O&M) de um sistema fotovoltaico (SFV) é a atividade de gestão de uma usina de geração solar após a sua entrada em operação, integrando a fase principal desses sistemas e perdurando por toda sua vida útil. Esse processo envolve a operação em tempo real e performance da usina fotovoltaica, bem como manutenções preventivas e corretivas para solução de problemas que interfiram na geração de energia e resultem na perda de produtividade (EMAP SOLAR, 2020).

Nos últimos anos, diferentes técnicas para inspeção de módulos fotovoltaicos foram avaliadas e convertidas em métodos de verificações locais; ainda assim, um grande desafio observado é com relação à identificação do que possui maior eficácia (MÜHLEISEN *et al.*, 2019). Os métodos variam desde simples procedimentos de inspeção visual, até técnicas mais sofisticadas, como: abordagens de eletroluminescência e fotoluminescência no local, espectroscopia, inspeção termográfica infravermelha, além das medições de parâmetros elétricos pela verificação da curva I-V (curva que relaciona a tensão e a corrente de saída de um módulo ou conjunto de módulos).

Observa-se que às vezes mais de um método pode ser aplicado com sucesso para identificar problemas nos sistemas fotovoltaicos. Essa compreensão permite escolher equipamentos de medição adequados para detectar um erro de forma confiável e rápida (MÜHLEISEN *et al.*, 2019).

Além de fazer parte de um processo de verificações para o início de operação de um SFCR, um ensaio termográfico, conforme a NBR 16274 (ABNT, 2014), também pode ser empregado na solução de eventuais problemas em módulos, séries ou arranjos fotovoltaicos. Atualmente, essa técnica é comumente empregada para avaliar o comportamento térmico em SFCR, sendo usada para determinar o desempenho de módulos FV, detectar pontos quentes e investigar o efeito de sombras e sujidades sobre os módulos (FERREIRA, 2018).

É importante considerar os aspectos locais de cada instalação FV, pois a influência do clima e das características ambientais de cada região podem acarretar diferentes impactos na geração fotovoltaica (HICKEL, 2017). Temperatura ambiente, índices pluviométricos, nebulosidade, velocidade dos ventos, latitude, além de poluição atmosférica e propensão à deposição de sujidade sobre os módulos fotovoltaicos, são variáveis que interferem na produção de energia de cada usina solar.

Considerando tais influências, o desempenho dos módulos FV apresentado pelos seus fabricantes normalmente não se comprova em campo, sendo inferior ao valor previsto. Essa redução de desempenho pode ocorrer em função de flutuações nas condições reais de operação dos módulos solares, do aumento de temperatura das células e dos mecanismos de degradação que progressivamente se manifestam nos sistemas (FERREIRA, 2018). Dessa forma, a análise de desempenho das usinas fotovoltaicas torna-se fundamental para a gestão confiável desses sistemas.

Observa-se, na literatura, que diferentes mecanismos de envelhecimento ocorrem nos módulos fotovoltaicos, tais como:

- (a) descoloração;
- (b) delaminação;
- (c) bolhas;
- (d) degradação do revestimento antirreflexo;
- (e) corrosão; rachaduras nas células;
- (f) degradação das fitas e ligações de solda;
- (g) interconexão quebrada;

- (h) poeira e sujeira;
- (i) degradação induzida por potencial (PID);
- (j) defeitos da caixa de junção e dos diodos de desvio; e
- (k) fenômenos de aquecimento localizados ou pontos quentes (*hot spot*), e desprendimento da estrutura (MANGANIELLO; BALATO; VITELLI, 2015).

Estudos identificam, também, rastros de caracóis, marcas de queimadura e diodo de desvio com defeito (CALLEJO; SAAVEDRA; GÓMEZ, 2019), além de quebra de vidro e problemas de isolamento (MÜHLEISEN *et al.*, 2019).

Muitos desses problemas podem ser minimizados por meio de procedimentos de operação e manutenção (O&M) que auxiliem na identificação de falhas e no aumento da vida útil da usina solar, como: inspeções visuais, monitoramento dos dados, medições de curva I-V, realização de imagens de termografia, limpeza do sistema, dentre outros. A confiabilidade no monitoramento, aliada a um bom programa de O&M das usinas fotovoltaicas, podem evitar perdas financeiras significativas (MOSCARDINI JÚNIOR; RÜTHER; VERGARA, 2017).

O supervísório (sistemas de supervisão e aquisição de dados) de um SFCR é composto por um *software* que agrega os dados coletados pelos sensores dentro da usina e os transformam em diagramas, usados na análise da sua performance. Percebe-se, contudo, que muitos SFCR no Brasil, principalmente os de pequeno porte, não possuem instrumentos específicos para coleta de dados (sensores de vento, de temperatura ambiente, de umidade, de irradiação, de temperatura dos módulos, etc.) necessários para obtenção de informações ambientais específicas, não apresentadas, normalmente, pelos inversores (SERVIÇO..., 2020).

Considerando o exposto, o presente trabalho tem como objetivo propor a sistematização dos procedimentos de inspeção termográfica infravermelha qualitativa e de limpeza úmida de arranjos fotovoltaicos, bem como apresentar um método para cálculo estimado da perda de geração em SFCR devido à sujidade dos módulos FV. Tais procedimentos possibilitam verificações de falhas e desempenho de usinas FV mesmo em sistemas sem estação meteorológica ou em situações de indisponibilidade de equipamentos portáteis de medição de parâmetros climáticos locais.

Com base no detalhamento desses procedimentos, espera-se permitir um melhor planejamento e execução eficaz de atividades de O&M de usinas FV, bem como a maior disponibilidade, segurança, desempenho energético e durabilidade desses sistemas.

Operação e manutenção de SFCR

Como consequência do crescimento do mercado de energia fotovoltaica, as questões relacionadas à manutenção desses sistemas estão ganhando muita atenção, evidenciadas por esforços realizados por várias instituições e empresas, que visam ao desenvolvimento de melhores práticas para operações dos SFCR (DE BENEDETTI *et al.*, 2018).

A fim de aumentar a geração de energia e as receitas econômicas de um SFCR, as atividades de O&M têm se mostrado essenciais e, também, significam um mercado em expansão com um alto potencial de futuros negócios dentro do setor fotovoltaico (HACKE *et al.*, 2018).

Importante destacar que todo SFCR deve passar por procedimentos de inspeção e manutenção regulares, de forma a garantir uma operação mais eficaz e evitar a incidência de problemas futuros, permitindo a segurança dos usuários e confiabilidade para utilização da rede da concessionária, bem como aumento da vida útil da usina (PINHO; GALDINO, 2014).

A produção de energia elétrica em uma célula solar é reduzida, substancialmente, quando ela é sombreada total ou parcialmente (CASSINI, 2016). Esse sombreamento pode originar-se por um obstáculo no percurso da irradiação entre o sol e o módulo fotovoltaico ou pela deposição de sujeira sobre sua superfície (HICKEL, 2017).

Para evitar danos em SFCR, bem como perdas na geração fotovoltaica causadas pela sujidade depositada sobre os módulos solares e por outras formas de sombreamento nos arranjos FV, é necessário maior atenção às atividades de limpeza desses sistemas e aos procedimentos de identificação de falhas, como a inspeção termográfica dos módulos fotovoltaicos.

Sujidade do SFCR

A deposição de poeira sobre os módulos fotovoltaicos (*soiling*) limita a irradiância solar efetiva, causando perda na eficácia de conversão de energia do sistema. Tal fenômeno é o terceiro principal fator ambiental que influencia nos valores de geração do sistema FV, após irradiância e temperatura (HICKEL, 2016). No entanto, as perdas geradas pelo acúmulo de sujeira sobre os módulos têm sido normalmente deixadas de lado pelas empresas que implementam a tecnologia fotovoltaica (BARBOSA; FARIA; GONTIJO, 2019).

Na literatura é possível encontrar estudos vinculados ao desempenho de sistemas fotovoltaicos em diferentes regiões e ângulos de inclinação dos módulos fotovoltaicos, os quais apontam variações de perda de desempenho por sujidade entre 1% e 60% (HICKEL *et al.*, 2016; HUSSAIN; BATRA; PACHAURI, 2017), sendo o percentual mais alto observado em condições de análise de módulos em áreas desérticas.

Além das perdas de energia relacionadas à diminuição da radiação solar, a distribuição não uniforme de sujidade sobre os módulos FV propicia, ainda, perdas por descasamentos elétricos (*mismatch*) de tensão e corrente entre as células limpas e as células sujas, bem como entre módulos, limpos e sujos, dentro de uma mesma série (HICKEL *et al.*, 2016). Esse comportamento de sombreamento pode promover o surgimento de pontos quentes que degradam as células fotovoltaicas.

A tendência observada é que o rendimento do sistema diminua com o passar do tempo, pelo acúmulo de sujidades sobre as superfícies dos módulos FV, podendo variar em função do monitoramento efetuado, da frequência de inspeções termográficas, bem como de medidas adotadas para realização de limpezas regulares do sistema e solução de falhas.

Inspeção termográfica infravermelha

Várias pesquisas com foco no emprego da termografia em SFCR são observadas na literatura, apresentando esse método como ferramenta para identificação de anomalias térmicas e seus impactos no desempenho de arranjos fotovoltaicos.

Segundo a NBR 15424 (ABNT, 2016), as inspeções termográficas por infravermelho permitem avaliar a condição operacional de um componente, equipamento ou processo por meio da medição de temperaturas e visualização de distribuição térmica, com uso de câmeras termográficas (termovisor) capazes de gerar imagens térmicas, chamadas termogramas, com base na radiação infravermelha dos objetos.

Normalmente, as inspeções por termografia infravermelha em arranjos fotovoltaicos são realizadas com o uso de termovisores portáteis próximos ao solo ou em plataformas elevatórias para aumentar a área de cobertura (OLIVEIRA; AGHAEI; RÜTHER, 2020). As câmeras termográficas infravermelhas podem, ainda, ser acopladas a veículos aéreos não tripulados (drones) para melhorar a relação custo-benefício e permitir inspeções em sistemas fotovoltaicos montados em telhados com acesso limitado ou usinas FV de grande escala (AGHAEI *et al.*, 2018; MANOJ *et al.*, 2018). Uma combinação da termografia aérea, sistema de posicionamento global (GPS) e redes neurais artificiais permite detectar e localizar falhas em módulos FV automaticamente. Nesse caso, uma matriz de temperatura é gerada e um algoritmo de processamento é usado para detectar pontos quentes, localizados com o auxílio da telemetria (HERRAIZ; MARUGÁN; MÁRQUEZ, 2020).

A caracterização termográfica de um SFCR pode ser do tipo qualitativa quando se busca determinar falhas de forma parcial (pontos quentes, sujeira, desacoplamento de células, dentre outras) sem levar em conta a gravidade desses defeitos, como também do tipo quantitativa, quando se pretende determinar com precisão a temperatura, considerando a importância dos incidentes detectados e as consequentes operações de manutenção (ÁLVAREZ-TEY; JIMÉNEZ-CASTAÑEDA; CARPIO, 2017). A inspeção quantitativa normalmente está associada a modelos matemáticos para estabelecer a relação causa/efeito entre a temperatura medida e o tipo de falha que se quer monitorar (FERREIRA, 2018).

Temperatura ambiente elevada, altos níveis de irradiância, baixa velocidade do vento, condições de instalação do módulo (ângulo de instalação e desvio azimutal) e condições de resfriamento do substrato podem contribuir para incidência dos pontos de sobreaquecimento dos módulos (CASSINI, 2016), possibilitando a ruptura do vidro e fusão de polímeros (PINHO; GALDINO, 2014).

As variações de temperatura podem indicar problemas dentro dos módulos e/ou em arranjos fotovoltaicos, como células reversamente polarizadas, falha do diodo de *by-pass*, falha de conexões com solda, conexões ruins, resistência em série, resistência em paralelo, descasamento de parâmetros (*mismatch*), dentre outros (ABNT, 2014).

Para células fotovoltaicas de silício cristalino, a potência máxima diminui entre 0,4% e 0,5% para cada aumento de 1 °C na temperatura de operação, conforme apresentado na NBR 16690 (ABNT, 2019).

No decorrer da vida útil do sistema fotovoltaico, a diferença de temperaturas entre diversos pontos do módulo FV pode ultrapassar 10 °C, tornando assim o monitoramento térmico dos módulos essencial para previsão de possíveis falhas e para garantia do máximo rendimento possível (KOTINDA; OLIVEIRA; SILVA, 2018). Se forem identificados pontos quentes no módulo, deve ser observado se há sombreamentos ou sujeira e eliminá-los (PINHO; GALDINO, 2014).

As falhas causadas por superaquecimento em SFCR afetam, também, inversores, cabines de inversores, transformadores e controles de *string* (VILLARINI *et al.*, 2017). Dessa forma, a inspeção termográfica pode ser usada para inspecionar outros componentes elétricos importantes de uma instalação fotovoltaica, como cabos, contatos, fusíveis, interruptores, inversores, etc. (SOLARPOWER EUROPE, 2019).

Ações corretivas propostas com base nas inspeções com o uso de termovisores têm permitido melhorias nos planos de manutenção atuais dos sistemas fotovoltaicos (VILLARINI *et al.*, 2017), sendo um diagnóstico não destrutivo, rápido, eficaz e viável economicamente, além de poder ser efetuado com a usina FV em operação (CALLEJO; SAAVEDRA; GÓMEZ, 2019).

Limpeza de SFCR

Vários estudos relacionados à limpeza dos módulos fotovoltaicos e impacto da sujeira sobre o desempenho de SFCR têm sido realizados, incluindo influências do meio ambiente no acúmulo de sujeira, morfologia e composição química das partículas, desenvolvimento e aplicação de superfícies autolimpantes em geradores solares, periodicidade para realização de limpeza dos sistemas, dentre outros.

Os métodos gerais de limpeza de módulos FV, apresentados esquematicamente na Figura 1, podem ser classificados nas seguintes categorias: limpeza natural, tratamento de superfície, limpeza automática e limpeza manual (LE MOS *et al.*, 2016).

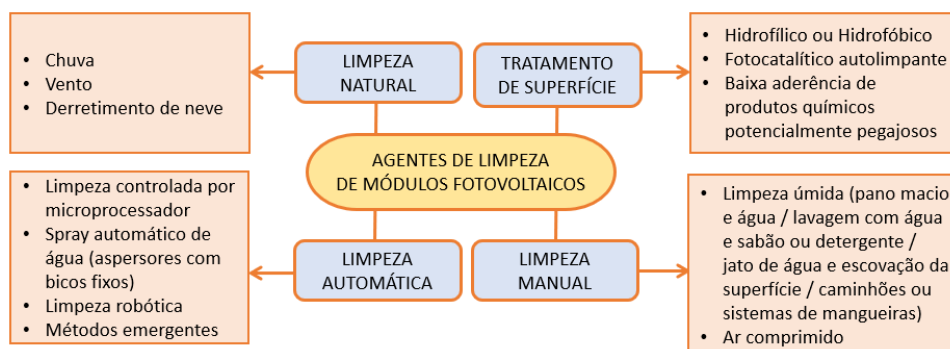
Um dos procedimentos de limpeza manual dos módulos fotovoltaicos é o de limpeza úmida. Essa atividade segue o mesmo procedimento usado para realizar limpeza de superfícies envidraçadas em fachadas de edifícios. Para limpar os módulos, é recomendável o uso de escovas com cerdas macias, que podem ser conectadas diretamente a um suprimento de água para realizar a limpeza e a lavagem simultaneamente (REZA *et al.*, 2016).

Para se estabelecer uma escala ideal de limpeza, tem que ser avaliada a intensidade de sujeira incidente em cada gerador fotovoltaico (REZENDE; ZILLES, 2018), promovendo a sua limpeza quando parecer ter um filme de poeira em sua superfície (ANANIAS, 2019) ou, ainda, quando for identificada queda significativa na geração de energia.

Método

Para realização dos procedimentos de inspeção termográfica infravermelha e limpeza úmida de módulos fotovoltaicos, foi escolhida, como objeto estudo, a usina FV localizada no Campus de Betim do Instituto Federal de Minas Gerais (IFMG), com as seguintes coordenadas geográficas (centro da instalação): latitude 19°56'21.68" sul e longitude 44° 7'3.51" oeste.

Figura 1 - Métodos de limpeza para remover a sujeira dos módulos fotovoltaicos



Fonte: adaptado de Lemos *et al.* (2016).

Tal sistema possui potência instalada de 25,0 kW e é composto de 110 módulos FV de silício policristalino, ocupando uma área aproximada de 180 m², divididos em dois arranjos fotovoltaicos com 10° de inclinação e orientados para noroeste com 10° de desvio azimutal.

Os módulos FV utilizados são da marca *Canadian Solar*, modelo CS6P-260P, de potência nominal 260 W_p (Watts pico). Eles apresentam tensão de máxima potência (V_{mpp}) de 30,4 V, corrente de máxima potência (I_{mpp}) de 8,56 A, corrente de curto circuito (I_{sc}) de 9,12 A, tensão de circuito aberto (V_{oc}) de 37,5 V, coeficiente de temperatura V_{oc} de -0,34%/°C, coeficiente de temperatura I_{sc} de +0,065%/°C e coeficiente de temperatura da potência de -0,43%/°C. Os módulos possuem garantia linear de desempenho de 25 anos, com decaimento anual máximo de 0,7%, após o 2° ano, e rendimento mínimo de 80% ao final do 25° ano (CANADIAN..., 2015).

O arranjo 01, posicionado sobre uma estrutura de madeira adjacente ao bloco de laboratórios do campus, é constituído por uma *string* de 20 módulos. O arranjo 02, instalado sobre o telhado do bloco de laboratórios, possui 90 módulos e está dividido em duas *strings* de 20 módulos e duas *strings* de 25 módulos. As *strings* estão conectadas a duas *string-box*, que por sua vez estão conectadas aos rastreadores de ponto de máxima potência (MPPT) do inversor.

O modelo do inversor utilizado no SFCR é o *SMA Sunny Tripower 25000TL* (SIW500), com potência de 25 kW e faixa de temperatura de operação de -25 a +60 °C. Dentre as características de entrada em corrente contínua (CC) o inversor possui: tensão máxima de 1.000 V, faixa de tensão MPPT de 390 a 800 V, tensão nominal de 600 V e corrente máxima por string 33 A. Com relação à saída em corrente alternada (CA), o inversor apresenta: potência nominal de 25 kW, tensão nominal de 380 V, corrente máxima de 36,2 A e eficiência máxima de 98,3% (SMA SOLAR, 2017).

A inspeção termográfica foi realizada no dia 12/08/2020, antes e após o procedimento de limpeza dos módulos fotovoltaicos, também efetuada nesse dia, permitindo identificar as variações de temperatura influenciadas pelo acúmulo ou não de sujidades sobre as superfícies dos módulos FV, bem como a existência de sombreamentos.

Pela indisponibilidade de instrumento de medição de irradiância, bem como devido às dificuldades para viabilizar o uso de equipamento portátil durante o período em que foi realizada a limpeza dos módulos e inspeção termográfica dos arranjos FV do campus do IFMG de Betim, buscou-se minimizar as variações de irradiância pela escolha de um dia de céu limpo para realização desses procedimentos.

Com os módulos FV do campus do IFMG Betim limpos, foi possível verificar o incremento na produção de energia, bem como identificar o percentual de decaimento da geração da usina FV na situação anterior à limpeza. Essa análise foi realizada com base no cálculo estimado da perda de geração fotovoltaica em função do acúmulo de sujidades nos módulos, por meio da comparação entre a energia gerada pelos arranjos fotovoltaicos sujos e os limpos. Tais informações foram obtidas por meio do sistema de aquisição de dados das usinas FV, que disponibiliza os valores de geração na *web* via o *Sunny Portal*, da *SMA Solar Technology AG*, fabricante alemã de equipamentos para sistemas fotovoltaicos.

Verificações análogas de variações na produtividade dos sistemas fotovoltaicos em função da presença de sujidades sobre os módulos também foram efetuadas, em situações de limpeza dos arranjos FV já realizadas nos *campi* do IFMG de Betim, em 30/09/2019, e de Congonhas, em 13/09/2017. Este último possui as seguintes coordenadas geográficas (centro da instalação): latitude 20°29'7.83" sul e longitude 43°50'29.22" oeste. O SFCR de Congonhas possui características semelhantes às da usina FV de Betim, estando os 110 módulos FV instalados sobre telhado com 7° de inclinação, orientados para noroeste e com 35° de desvio azimutal. Em Congonhas, notou-se que a incidência de sujidade sobre os módulos é bem mais intensa, provavelmente em função da poluição atmosférica gerada pela presença de mineradoras na região.

Inspeção termográfica infravermelha qualitativa de módulos FV

A técnica adotada foi a inspeção termográfica qualitativa, baseada na análise de padrões térmicos para detectar anomalias, em que não se pretendeu medir a temperatura de forma precisa, mas apenas identificar os padrões de temperatura dos elementos inspecionados e assim estabelecer parâmetros de comparação.

Orientações relativas aos parâmetros e precauções mínimos considerados na inspeção termográfica, estão presentes da NBR 16818 (ABNT, 2020), *Ensaios não destrutivos – Termografia infravermelha – Procedimento para aplicações do método da termografia infravermelha*.

Cada módulo foi inspecionado individualmente, antes e após uma limpeza realizada no sistema na ocasião da inspeção termográfica, atentando-se para as condições necessárias de angulação do termovisor, distanciamento do objeto inspecionado e ajustes do equipamento, para cada situação observada.

A técnica foi realizada por profissionais com capacidade teórica e prática apropriada sobre ensaios não destrutivos (END) e com treinamento na norma regulamentadora (NR) 06 (*equipamentos de proteção individual – EPI*), na NR 10 (*segurança em instalações e serviços em eletricidade*) e na NR 35 (*trabalho em altura*). Durante a execução da inspeção termográfica, o SFCCR manteve-se em modo de operação normal, com irradiância no plano do arranjo FV superior a 600 W/m², estimada em função das condições de céu limpo (*Clear Day*), sem interferência de sombreamentos nos módulos, gerados por nuvens, por ocasião da obtenção dos termogramas.

Angulação da câmera térmica

O controle da posição da câmera térmica, em relação à superfície frontal envidraçada dos módulos analisados é essencial para aquisição de resultados termográficos confiáveis, em função das variações na emissividade relacionadas ao ângulo de reflexão a partir do qual o inspetor analisa a superfície (FERREIRA, 2018).

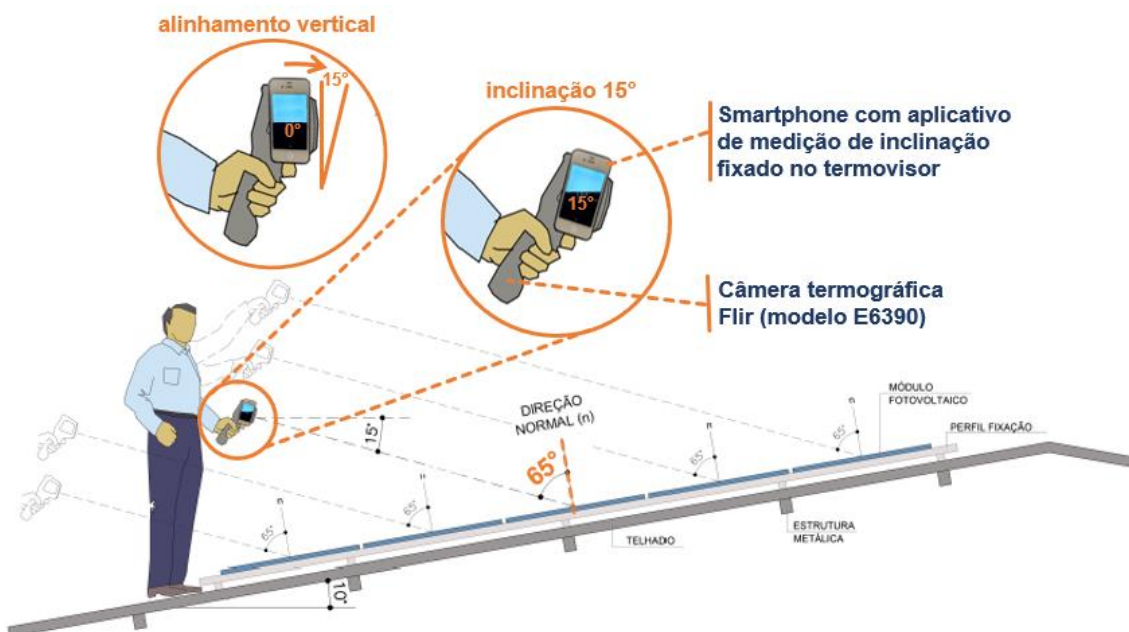
O ângulo formado entre a câmera térmica e a direção normal ao plano de inclinação do módulo variou em função do tipo de aquisição dos termogramas: pela superfície frontal (módulos localizados sobre o telhado do bloco de laboratórios) foi adotado o ângulo de 65° e pela superfície posterior dos módulos (módulos sobre a estrutura de madeira) buscou-se manter o eixo de visão da câmera perpendicular à superfície do módulo. A referência e a identificação de viabilidade para emprego do ângulo de 65° na inspeção frontal foram obtidas em estudo realizado por Ferreira (2018).

Na inspeção pela superfície frontal, a partir de uma posição de referência, inclinou-se o termovisor em 15°, com auxílio de um *smartphone* fixado junto à câmera termográfica e com um aplicativo de medição de inclinação. Dessa forma, obteve-se o ângulo de 65°, adotado para aquisição das imagens térmicas, conforme Figura 2.

Parâmetros do termovisor

Os parâmetros de emissividade, temperatura média refletida, temperatura ambiente e umidade relativa, bem como o distanciamento do objeto inspecionado podem ser ajustados diretamente na câmera termográfica ou após a realização da inspeção termográfica com auxílio de um *software* de pós-processamento.

Figura 2 - Posicionamento do termovisor para registro de termogramas em módulos FV sobre cobertura metálica



Para análises das superfícies frontais dos módulos, foi adotado o valor de emissividade direcional (ϵ) de 0,78, para o ângulo de 65°. Já no caso da superfície posterior, foi utilizado um valor típico de emissividade de 0,93 para o filme de fluoreto de polivinil. O emprego desses valores de emissividade direcional, nas condições apresentadas, está presente em estudo elaborado por Ferreira (2018), que apresentou a caracterização das propriedades ópticas da superfície de vidro dos módulos fotovoltaicos para as inspeções com o ângulo de observação de 65°, em que foram obtidos valores de emissividade direcional igual a 0,78. Os resultados desse estudo mostram que, para uma faixa típica de temperaturas de operação dos módulos FV entre 35 °C e 70 °C, a inspeção termográfica é capaz de efetuar o registro térmico com uma incerteza máxima de 2 °C. Em percentuais, a incerteza máxima obtida no referido estudo para esta faixa de medição correspondeu a apenas 3% do valor observado.

Considerando-se que a usina FV analisada não possui instrumentos de medição da temperatura ambiente e umidade relativa do ar, tais parâmetros foram obtidos conforme dados meteorológicos do dia da inspeção, apresentados na Figura 3.

A umidade relativa do ar média considerada para o dia da inspeção termográfica foi de 58%. Com relação aos valores de temperatura ambiente necessários para definição dos parâmetros do termovisor, foram definidos os valores médios dos intervalos de realização das verificações termográficas dos módulos. Desta forma, foram utilizados os valores de 22 °C para os registros obtidos antes da limpeza dos módulos (atividade efetuada das 8h40 às 10h00) e de 27° C para os registros obtidos após a limpeza dos módulos (atividade efetuada das 12h40 às 15h00).

A distância média, aproximada, considerada entre a câmera termográfica e o centro do módulo analisado, foi de 2,0 metros.

Finalmente, a temperatura média refletida adotada foi igual à temperatura ambiente. Cabe ressaltar que a temperatura média refletida, quando não existe outra fonte significativa de radiação no ambiente durante a inspeção termográfica, é normalmente considerada igual à temperatura atmosférica (GOMES JUNIOR, 2017).

Passos do procedimento

O esquema apresentado na Figura 4 evidencia os passos da inspeção termográfica qualitativa realizada nos módulos FV, bem como a periodicidade proposta para realização do procedimento.

Equipamentos utilizados

O equipamento utilizado para as inspeções foi a câmera termográfica da marca FLIR E5, modelo E6390, com resolução infravermelha de 120x90 pixels, sensibilidade térmica <0,10 °C (0,27 °F) / <100 mK, campo de visão 45° × 34°, distância mínima de foco 0,5 m, resolução espacial 6,9 mrad, frequência da imagem 9 Hz, faixa espectral 7,5-13 µm, faixa de temperatura do objeto -20 °C a + 250 °C e precisão ± 2 °C ou ± 2% da leitura, para temperatura ambiente 10 °C a 35 °C e objeto temperatura acima de + 0 °C.

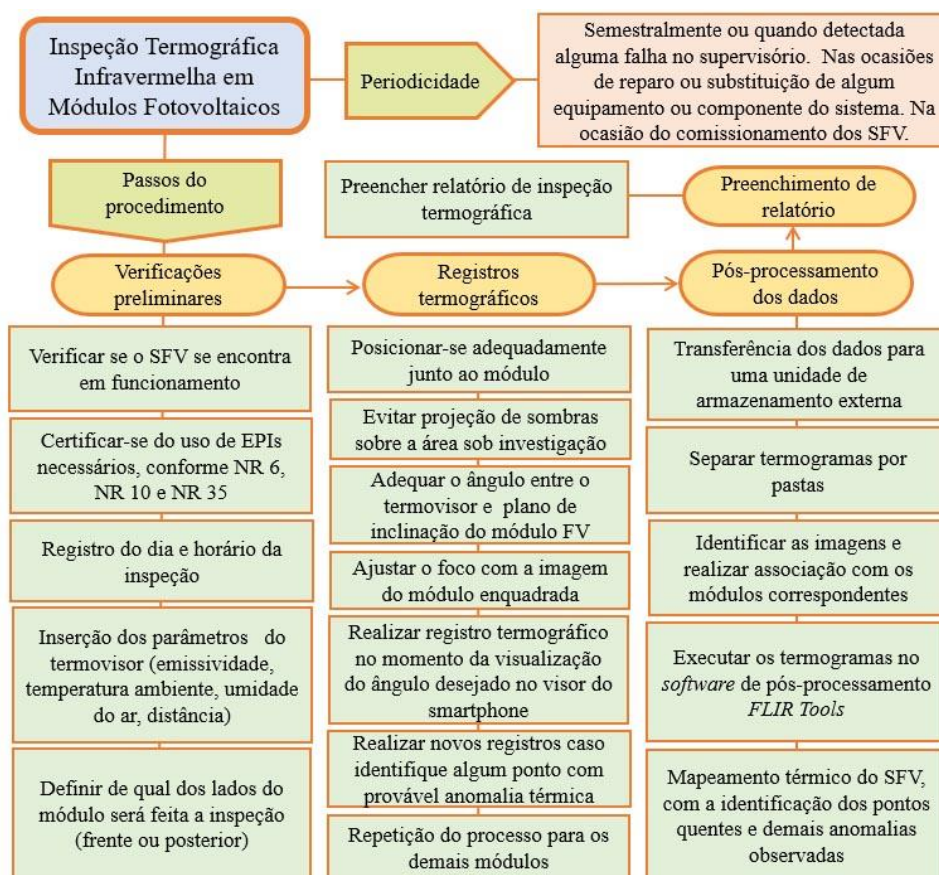
Devido ao fato de a câmera termográfica usada ser um equipamento novo e com pouco uso, foi considerado o certificado de calibração de fábrica do equipamento, atendendo as orientações da NBR 15718 – Ensaios não destrutivos – Termografia – Guia para verificação de termovisores (ABNT, 2009).

Figura 3 - Dados meteorológicos do município de Betim-MG, em 12/08/2020



Fonte: Clima Tempo (2020).

Figura 4 - Detalhamento do procedimento de inspeção termográfica infravermelha em módulos FV



Para identificação do ângulo da câmera térmica, foi utilizado um *iphone Apple*, *software* iOS 9.3.6, com aplicativo de medição de inclinação, fixado no termovisor, cuja calibração foi aferida previamente com auxílio de um nível de bolha e transferidor de graus.

O procedimento demandou, também, o emprego de equipamentos de proteção individual (EPIs) necessários para realização dessa atividade, conforme as normas NR 6, NR 10 e NR 35.

Para tratamento das imagens foi utilizada a ferramenta *FLIR Tools*, baseada em *MS Windows*, fornecida pelo fabricante da câmera termográfica.

A Figura 5 mostra os equipamentos e recursos usados na inspeção termográfica infravermelha e tratamento de dados.

Critérios de análise

A análise qualitativa de imagens térmicas ou de temperaturas medidas na inspeção termográfica baseou-se nos critérios de classificação de anomalias e nas ações propostas para solução dos problemas, presentes em normas técnicas, manuais de fabricantes e demais referências teóricas sobre o tema.

Aspectos considerados na análise dos termogramas incluíram: o tipo de instalação, as condições de ventilação dos arranjos fotovoltaicos, a existência de sombreamento, além de situações relativas à limpeza dos módulos.

Processamento da informação técnica

Após a transferência dos dados obtidos pela câmera termográfica para uma unidade de armazenamento externa, bem como identificação das imagens, cada termograma foi executado no *software* de pós-processamento *FLIR Tools*. Esse recurso permitiu a adequação de valores dos parâmetros de medição (emissividade, temperatura ambiente, umidade relativa do ar) e a aplicação de ferramentas de interpretação da imagem térmica.

Figura 5 - Equipamentos e recursos empregados no método de termografia infravermelha



Após a análise de cada termograma processado, foi possível realizar o mapeamento térmico do sistema fotovoltaico e o preenchimento do relatório de inspeção termográfica.

Limpeza úmida dos módulos fotovoltaicos

A técnica utilizada para a limpeza dos módulos fotovoltaicos foi o procedimento de limpeza manual úmida. Nessa técnica a sujeira nas superfícies dos módulos FV foi removida com o uso de água e implementos de limpeza suave.

O procedimento foi realizado por profissionais capacitados (treinados nas normas NRs 06, 10 e 35) e sob condições de céu limpo, utilizando-se água limpa, com pressão máxima de 4 MPa e com diferença de temperatura não superior a 20 °C da temperatura da superfície do módulo, para evitar choques térmicos.

Passos do procedimento

O esquema apresentado na Figura 6, evidencia os passos do procedimento da limpeza úmida dos módulos fotovoltaicos, além da periodicidade proposta para realização da atividade.

Equipamentos utilizados

A Figura 7 apresenta alguns dos materiais e equipamentos usados no procedimento de limpeza da usina fotovoltaica do campus do IFMG Betim.

Aplicação do procedimento de limpeza dos módulos

Antes do início da limpeza dos módulos, foi realizada uma inspeção visual de todo o sistema, para identificação de possíveis problemas. Além da observação de sujidades na superfície dos módulos, principalmente nas suas bordas inferiores, notou-se, também, a presença de pipas sobre os arranjos FV, conforme observado na Figura 8.

A Figura 9 apresenta o processo de limpeza dos arranjos fotovoltaicos localizados no telhado do prédio de laboratórios do campus do IFMG Betim e sobre estrutura de madeira.

Cálculo estimado do percentual de perda de geração por sujidade nos módulos FV

O percentual aproximado de perda de geração devido à sujidade dos módulos fotovoltaicos foi obtido comparando-se a média dos três maiores valores diários de geração, da quinzena anterior à data de limpeza do sistema, com a média dos três maiores valores diários de geração, da quinzena posterior à limpeza. Dessa forma, o período definido para análise não excedeu ao intervalo equivalente a um mês (31 dias), evitando inconsistências causadas por variações climáticas e de radiação solar significativas durante os meses do ano.

O cálculo teve como base a diferença entre o valor da geração obtido pelos módulos sem sujidades, em dias de céu limpo (considerados como percentual de geração 100%) e o valor de geração obtido pelos módulos sujos, também em dias de céu limpo. A escolha dos valores mais altos de geração diária, que normalmente geram gráficos em formato de “sino” (dias de céu limpo), objetivou minimizar as interferências relacionadas à nebulosidade, que impactam na geração e são claramente identificadas na forma mais fragmentada dos

gráficos gerados em dias com maior incidência de nuvens, que costumam apresentar menor geração de energia, conforme a Figura 10.

A definição pelo cálculo da média de geração FV dos três dias com maiores valores de produção de energia do sistema visou, ainda, minimizar eventuais variações climáticas pontuais ocorridas nesses dias, em especial relacionadas à irradiância solar e à temperatura ambiente, que poderiam deturpar a análise específica do impacto da sujeira sobre a geração fotovoltaica.

Para estruturação dessa análise, foram observados vários estudos sobre perdas de geração por acúmulo de sujidades que analisaram dados obtidos em sistemas com módulos FV sujos e limpos, sendo comuns a comparação de gráficos de geração de energia (SOARES JÚNIOR; CRUZ; AMARAL, 2018), de dados dos sistemas de monitoramento (REZENDE; ZILLES, 2018), além dos parâmetros elétricos obtidos pela Curva I-V (COSTA *et al.*, 2018; BRAGA *et al.*, 2018; HICKEL, 2017).

Figura 6 - Detalhamento do procedimento de limpeza úmida de módulos fotovoltaicos

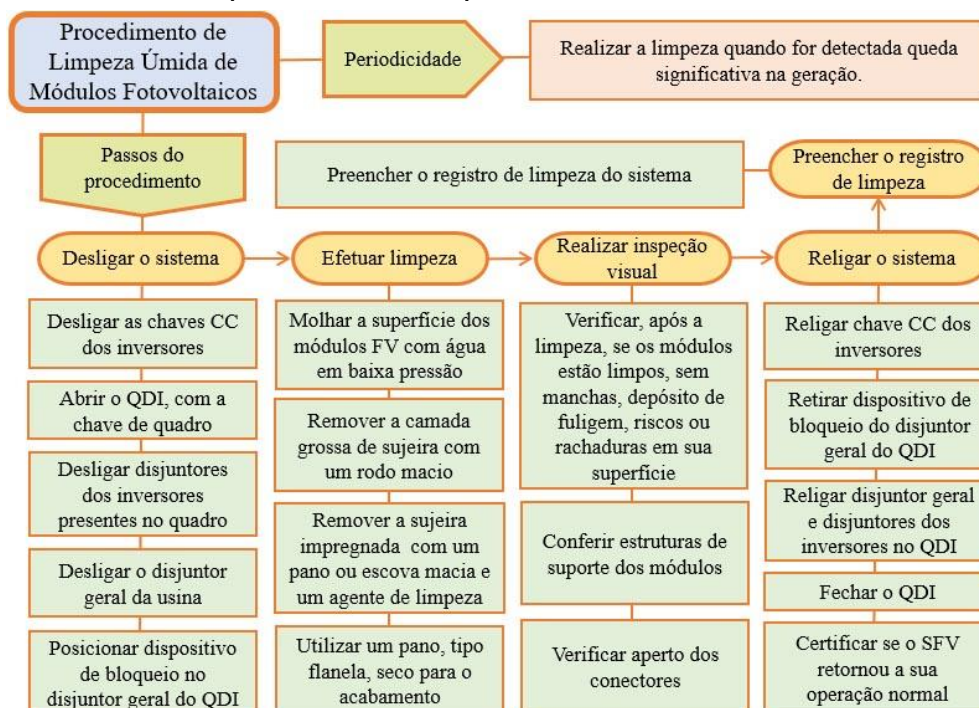


Figura 7 - Materiais e equipamentos utilizados na limpeza dos módulos (vassoura de cerdas macias, rodos, balde, esponjas, luvas, bomba de água pressurizada e panos tipo flanela)



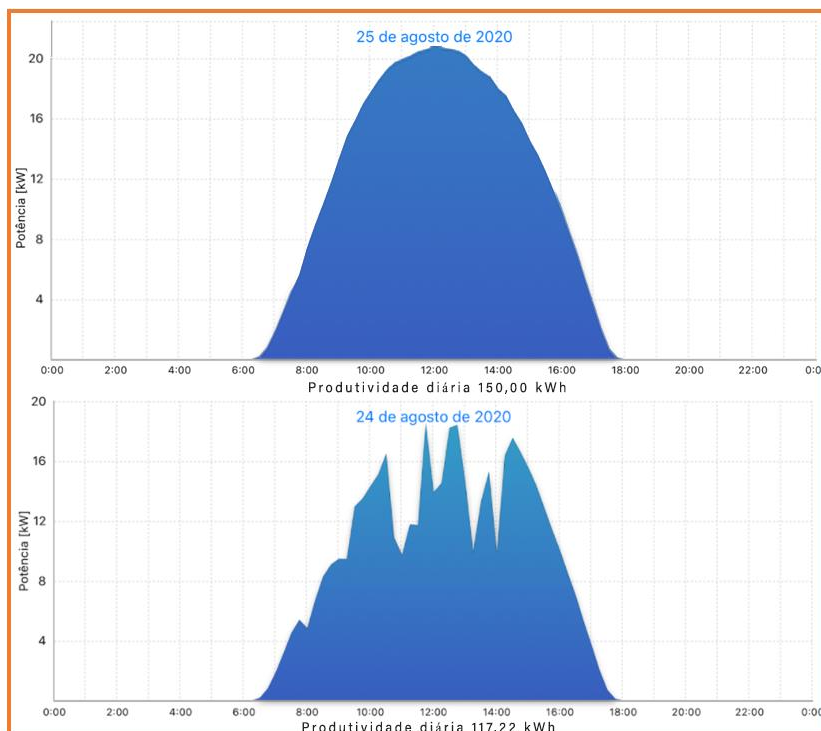
Figura 8 - Módulos antes da limpeza, com deposição de sujeira não uniforme (a) e presença de pipas sobre as superfícies (b)



Figura 9 - Limpeza dos módulos sobre cobertura do prédio de laboratórios (a) e sobre estrutura de madeira (b)



Figura 10 - Gráficos com valores de geração do SFV em dias de céu limpo (superior) e com nebulosidade (inferior), após a limpeza dos módulos



Fonte: Sunny Portal (2020).

Passos do procedimento

O esquema apresentado na Figura 11 evidencia os passos para o cálculo do percentual de perda de geração por acúmulo de sujeira na superfície dos módulos fotovoltaicos, além das condições necessárias para realização da atividade.

Resultados e discussões

Resultados da inspeção termográfica qualitativa do SFCR

No SFCR do campus do IFMG Betim, constatou-se que 14 módulos (12,7% do total) apresentaram pontos de sobreaquecimentos, conforme a Figura 12, identificados pela análise termográfica, que indicam potenciais problemas.

Dois pontos de sombreamento recorrente foram observados, conforme a Figura 13, em módulos localizados sobre a estrutura de madeira. O edifício adjacente e um poste de iluminação próximo ao local geram diariamente, no início da manhã, projeções de sombras nesses módulos, que promovem o surgimento de pontos quentes. Nesse local, pelo imageamento termográfico efetuado, foram observadas variações acentuadas de temperatura, que acompanharam a movimentação da sombra até o momento em que ela deixou de incidir sobre os módulos.

Outro local em que se identificou ponto quente, por meio do termograma obtido, foi em um módulo sobre a cobertura metálica devido ao sombreamento gerado pela presença de uma pipa, conforme a Figura 14. Após a limpeza promovida no sistema, com a retirada do elemento sobreposto ao módulo, percebeu-se que o ponto quente foi eliminado.

Os demais pontos de sobreaquecimento identificados no SFCR do IFMG Betim estão localizados em células fotovoltaicas da porção inferior dos módulos FV. Esse fato pode estar relacionado ao sombreamento heterogêneo dos módulos, em função do maior acúmulo de sujidades, carregadas por águas de chuvas, para as suas bordas inferiores, junto às molduras metálicas. A limpeza do sistema também contribuiu para solucionar tais problemas, conforme evidenciado na Figura 15.

A Figura 15 mostra, ainda, a influência da ventilação natural dos módulos em sua temperatura de operação. Os módulos sujeitos a uma maior ação dos ventos predominantes locais (N e NE), como os observados na imagem apresentada, demonstram, claramente, regiões menos quentes (ponto Sp1), assim como em outros módulos posicionados nas extremidades do arranjo fotovoltaico.

Figura 11 - Detalhamento do procedimento para cálculo da perda de geração por sujeira dos módulos FV

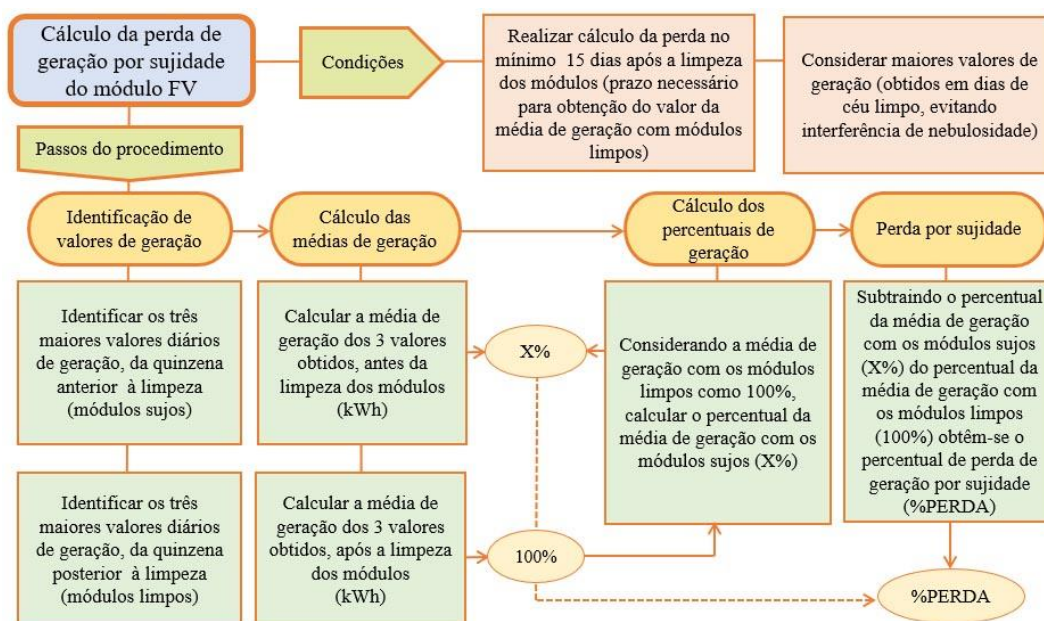


Figura 12 - Pontos quentes (*hot spots*) identificados no arranjo da usina fotovoltaica do campus do IFMG Betim

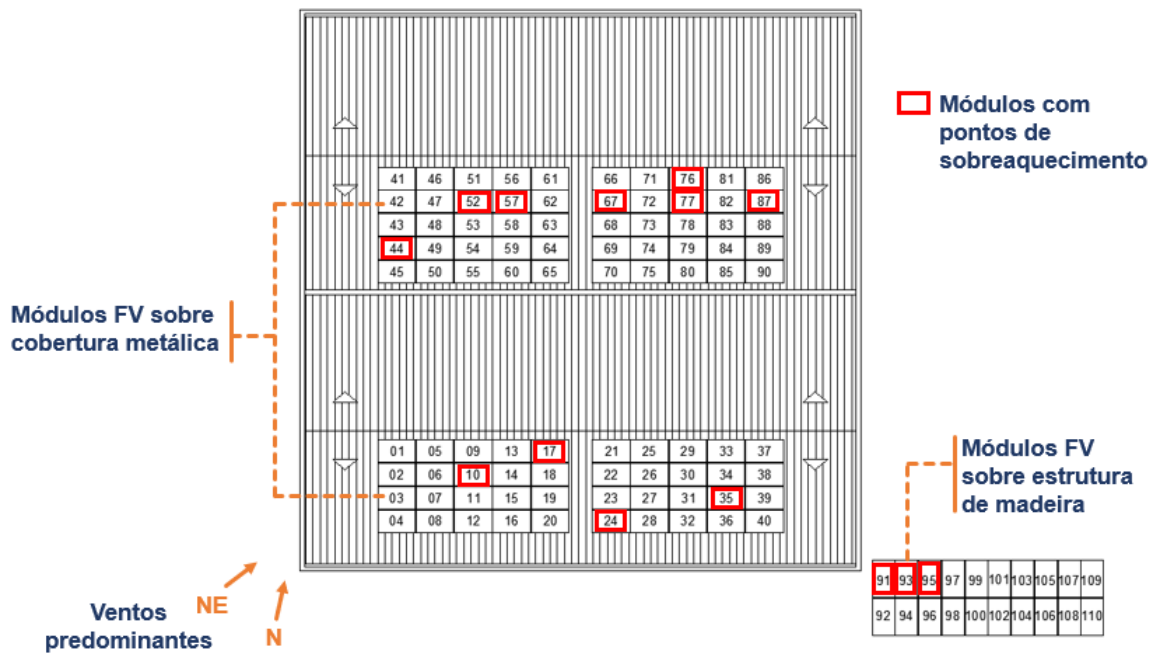


Figura 13 - Módulos FV com presença de pontos quentes em função da projeção de sombras de edificação e poste de iluminação existentes (a) identificados no termograma efetuado (b)

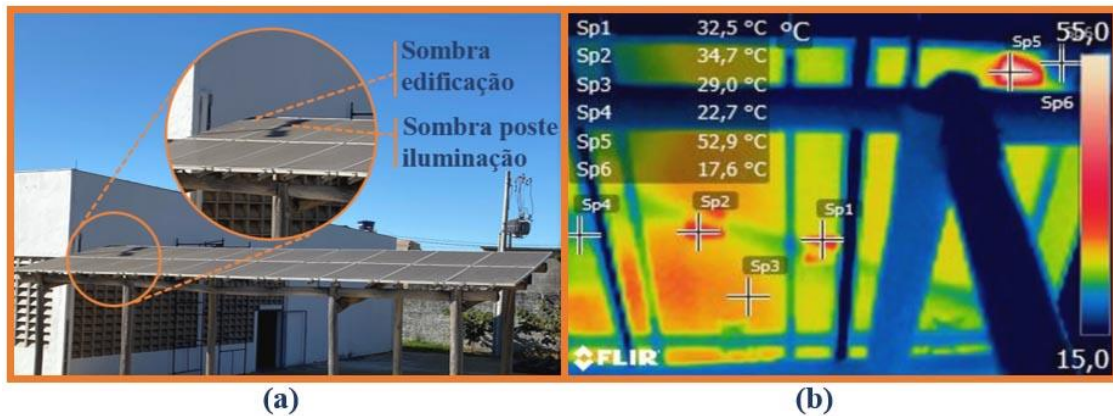


Figura 14 - Módulo FV com presença de ponto quente gerado devido a sombreamento por presença de pipa sobre o mesmo (a) identificado em imagem térmica realizada (b)

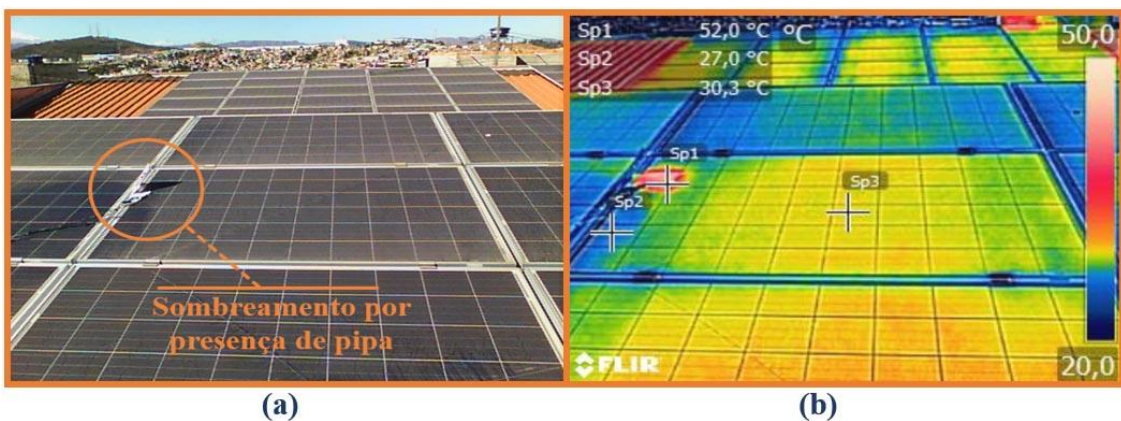
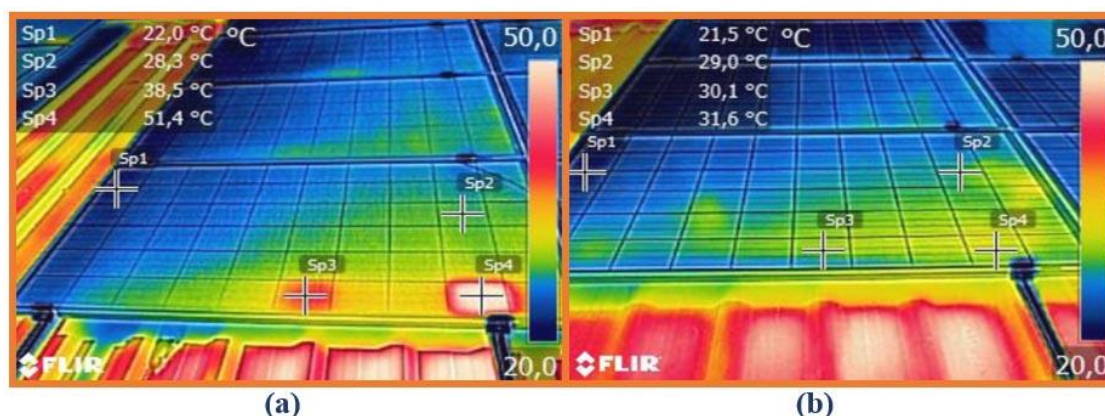


Figura 15 - Termogramas do módulo com anomalia térmica, antes (a) e após a limpeza (b)



Comparando as imagens térmicas, os padrões de distribuição e os níveis de temperatura nos módulos localizados sobre a cobertura metálica e os da estrutura de madeira, fica evidente a influência do modo de instalação na distribuição térmica. Nos módulos instalados diretamente sobre a cobertura metálica, com pouca ventilação e dificuldade de dissipação do calor, percebeu-se que as áreas próximas às suas bordas são normalmente menos aquecidas do que a sua parte central, onde se percebeu maior concentração de calor. Já no arranjo fotovoltaico localizado sobre a estrutura de madeira, por estar mais ventilado, não se verificou variações tão expressivas, entre as temperaturas das bordas e do centro dos módulos. Essas variações de temperatura em função do tipo de instalação estão apresentadas na Figura 16. Tal realidade permitiu constatar que, desconsiderando os pontos quentes, a distribuição das temperaturas dos módulos sobre a estrutura de madeira permaneceu mais uniforme e, em geral, menores que as temperaturas alcançadas pelos módulos localizados na cobertura metálica, que tiveram variações térmicas mais acentuadas.

Percebeu-se, ainda, que todos os pontos quentes identificados no arranjo fotovoltaico por meio da inspeção termográfica realizada antes da limpeza dos módulos, exceto os causados pelo sombreamento diário de elementos fixos do entorno, foram totalmente eliminados após o procedimento de limpeza. Tal constatação indica como causa do sobreaquecimento, em questão, o sombreamento gerado por sujidades sobre os módulos FV.

Resultados dos procedimentos de limpeza dos módulos FV

Limpeza dos módulos do SFV do IFMG Betim em 12/08/2020

A partir da limpeza dos módulos do SFV do IFMG Betim, realizada em 12/08/2020, observou-se a eliminação da sujidade depositada sobre a superfície frontal deles, bem como uma melhora significativa na geração do sistema. A Figura 17 mostra uma das *strings* do sistema após a limpeza dos geradores solares.

As médias de geração do SFCR com os módulos FV sujos, bem como com eles totalmente limpos, presentes na Tabela 1, demonstram os valores de geração da usina do IFMG Betim, antes e após a limpeza dos módulos, indicando uma perda estimada na geração fotovoltaica, em função da sujidade depositada sobre a superfície deles, de 22,25%.

A interferência da limpeza dos módulos FV na produção de energia em SFV também foi observada por meio da análise de geração, antes e após o procedimento de limpeza, em outras situações de limpezas das superfícies dos módulos, ocorridas no campus do IFMG Betim, em 30/09/19, e no campus do IFMG Congonhas, em 13/09/17, cujos dados de geração foram obtidos no *Sunny Portal*.

Limpeza dos módulos do SFV do IFMG Betim em 30/09/2019

Os resultados da limpeza dos módulos FV do Campus do IFMG Betim, realizada em 30/09/2019, com período de acúmulo de sujeira de aproximadamente 7 meses, evidenciou uma perda estimada por sujidade no sistema de 14,43%. O procedimento de limpeza, realizado à época, assim como a análise da perda de geração, também seguiram os passos metodológicos propostos.

Figura 16 - Termograma compreendendo módulos sobre a cobertura metálica (a), e módulo sobre a estrutura de madeira (b)

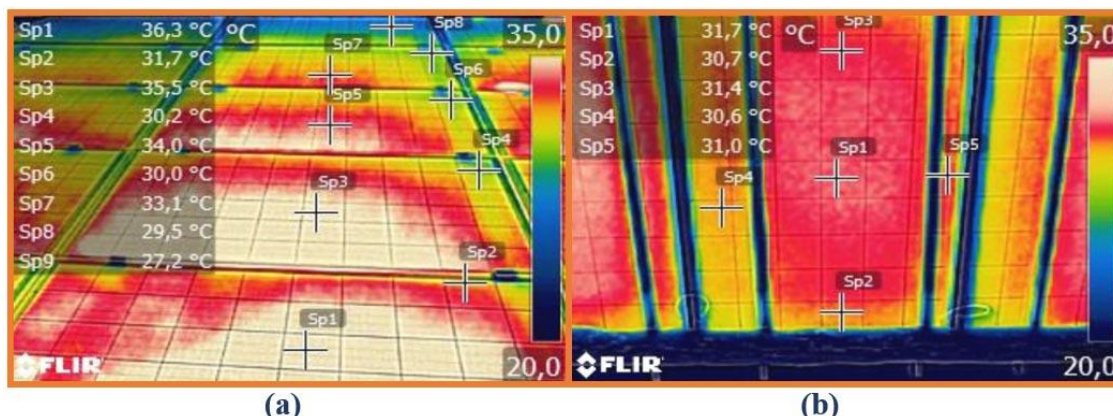


Figura 17 - Superfície dos módulos FV da usina antes (a) e após (b) a limpeza realizada



Tabela 1 - Impacto na geração fotovoltaica em função da limpeza dos módulos do SFV do IFMG Betim, realizada em 12/08/2020

Impacto na geração FV em função da limpeza dos módulos						
Campus	Campus IFMG Betim					
Período aproximado de acúmulo sujidade	desde 30/09/2019 (10,4 meses)					
Data da limpeza	12/08/2020					
Condição dos módulos	Sujos			Limpos		
Data verificação geração	04/08/20	05/08/20	07/08/20	25/08/20	26/08/20	27/08/20
Maiores valores de geração da quinzena anterior e posterior à limpeza (kWh)	115,17 kWh	115,88 kWh	114,32 kWh	150,00 kWh	146,64 kWh	147,55 kWh
Média de geração	115,12 kWh			148,06 kWh		
Percentual geração (%)	77,75%			100%		
Perda por sujidade (%)	22,25%					

Limpeza dos módulos do SFV do IFMG Congonhas em 13/09/2017

Na Figura 18, é possível identificar claramente o incremento na geração de energia no campus de IFMG Congonhas, após a realização da limpeza dos módulos, ocorrida em 13/09/17.

Para análise da perda de geração em função da sujidade dos módulos na usina do IFMG Congonhas, também foram selecionados três dias com pouca interferência de nebulosidade na geração, na quinzena anterior e após a limpeza, que permitiram o cálculo dos valores das médias de geração fotovoltaica e identificação de uma perda estimada na produção de energia de 56,85% em função da sujidade.

Figura 18 - Produtividade diária da usina do campus IFMG Congonhas, referente ao mês de setembro de 2017



Fonte: Sunny Portal (2020).

Conclusões

Os detalhamentos propostos para realização dos procedimentos de inspeção termográfica infravermelha qualitativa e de limpeza úmida de módulos FV permitem um melhor entendimento das técnicas, auxiliando no planejamento e execução de tais atividades, bem como na definição da periodicidade necessária para realização dos procedimentos com segurança.

O método apresentado para cálculo estimado da perda na geração de um SFCR devido à sujidade dos módulos FV permite avaliar o decaimento do desempenho dos sistemas, em função das condicionantes locais que impactam na deposição de partículas sobre a superfície desses módulos. Tal recurso possibilita verificações sistemáticas de perdas, com base na análise do desempenho das usinas solares após a realização de limpeza dos módulos FV, permitindo a definição de um cronograma para remoção da sujidade depositada sobre esses elementos com base nas condicionantes locais observadas.

Considerando os resultados obtidos por meio da inspeção termográfica infravermelha realizada, conclui-se que a termografia é uma poderosa ferramenta de análise de plantas fotovoltaicas para identificar variações térmicas provenientes de sombreamentos, deposição de sujidades, defeitos ou erros de montagem, tendo como principal vantagem a possibilidade de ser realizada com o SFV em funcionamento, sem contato e de maneira rápida. Com a aplicação da técnica, é possível avaliar a necessidade de limpezas dos sistemas, tendo em vista as implicações térmicas geradas pela sujidade dos módulos, bem como a existência de falhas, que demandam desde medidas mais simples até uma possível relocação ou substituição de componentes.

As atividades de limpeza dos módulos FV, realizadas em campo, permitiram identificar situações distintas relativas às interferências do meio ambiente na deposição de sujidades sobre os módulos, evidenciadas nos resultados obtidos para o campus do IFMG de Betim e Congonhas. Constatou-se, para esse último, valores de perdas na geração de energia de 56,85% em função de sujidades sobre os módulos FV, próximos a valores obtidos em regiões desérticas. Para melhorar a produtividade dessa usina, é necessário sistematizar as atividades de limpeza em intervalos menores, principalmente nos períodos de estiagem.

Os valores estimados de perdas na geração, por sujidades, observados nas análises dos dados da usina FV de Betim, 22,25% e 14,43%, variam principalmente em função do período de deposição da sujeira, bem como da incidência de chuvas no intervalo entre as limpezas. Apesar de apresentar percentuais de perdas mais baixos que os identificados no SFCR de Congonhas, é possível perceber que as perdas observadas são consideráveis, justificando, também, a realização periódica do procedimento de limpeza dos módulos FV.

Os métodos propostos trazem contribuições ao processo de operação e manutenção de SFCR, possibilitando verificações de falhas e do desempenho de arranjos FV mesmo em usinas desprovidas de um sistema de aquisição de dados (supervisório) mais completo ou em situações de indisponibilidade de equipamentos portáteis de medição de parâmetros climáticos locais.

É de suma importância a busca por mecanismos que permitam a estruturação da O&M, tendo em vista a multiplicidade de fatores que interferem na gestão dos sistemas fotovoltaicos. A identificação eficaz das falhas, por meio do monitoramento dos dados de geração, bem como a realização de manutenções e limpezas periódicas poderão permitir a previsão de aquisição de materiais para reposição, planejamento das atividades e contratação de equipes terceirizadas, caso necessário, além de minimizar o tempo de interrupções em função de falhas e necessidade de substituição de equipamentos.

Sugere-se que trabalhos futuros busquem, além da discussão técnica e prática dos métodos apresentados, uma abordagem científica com maior profundidade, utilizando instrumentação adequada para monitoramento do sistema e aquisição de dados, incluindo sensores para coleta de informações ambientais (irradiância, temperatura ambiente, umidade, ventos, etc.), a fim de melhor contribuir com o desenvolvimento e consolidação das boas práticas para operação e manutenção (O&M) de sistemas FV.

Outra sugestão para a continuidade desta pesquisa é implementar também medições de curva I-V, antes e após a limpeza dos módulos FV. Há inúmeros trabalhos na literatura científica com essa abordagem e que permitem análises interessantes e complementares.

Entende-se, por fim, que as propostas para realização dos procedimentos de limpeza e inspeção termográfica dos módulos FV, bem como análise de perdas de geração, apresentadas neste trabalho, permitem a busca por melhor desempenho energético, bem como aumento da vida útil dos componentes, maior disponibilidade do sistema e ampliação dos ganhos econômicos.

Referências

- AGHAEI, M. *et al.* Fault inspection by aerial infrared thermography in a PV plant after a meteorological tsunami. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENERGIA SOLAR, 7., Gramado, 2018. **Anais [...]** Gramado, 2018.
- ÁLVAREZ-TEY, G.; JIMÉNEZ-CASTAÑEDA, R.; CARPIO, J. Analysis of the configuration and the location of thermographic equipment for the inspection in photovoltaic systems. **Infrared Physics & Technology**, v. 87, p. 40–46, 2017.
- ANANIAS, T. **Maneiras para seus painéis solares durarem muito mais tempo**. 28 ago. 2019. Disponível em: http://blog.edeltec.com.br/2019/08/maneiras-para-seus-paineis-solares-durarem-muito-mais-tempo/?fbclid=IwAR2je36hxcwU9Tbnh1owEAUafjh-gA9EZBmY3P9eLyg2_4onfZXU0cdfEWI. Acesso em: 19 out. 2020.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15424**: ensaios não destrutivos: termografia: terminologia. 2. ed. Rio de Janeiro, 2016.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15718**: ensaios não destrutivos: termografia: guia para verificação de termovisores. Rio de Janeiro, 2009.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16274**: sistemas fotovoltaicos conectados à rede: requisitos mínimos para documentação, ensaios de comissionamento, inspeção e avaliação de desempenho. Rio de Janeiro, 2014.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16690**: instalações elétricas de arranjos fotovoltaicos: requisitos de projeto. Rio de Janeiro, 2019.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16818**: ensaios não destrutivos: termografia infravermelha: procedimento para aplicações do método da termografia infravermelha. Rio de Janeiro, 2020.
- BARBOSA, E. R.; FARIA, M. dos S. F. de; GONTIJO, F. de B. Influência da sujeira na geração fotovoltaica. In: **Energia Solar e Eólica 2**. Ponta Grossa: Atena Editora, 2019.
- BRAGA, D. S. *et al.* Relação entre distribuições não uniformes de sujidade e parâmetros de desempenho de módulos fotovoltaicos de tecnologias silício cristalino a telureto de cádmio. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENERGIA SOLAR, 7., Gramado, 2018. **Anais [...]** Gramado, 2018.
- CALLEJO, L. H.; SAAVEDRA, S. G.; GÓMEZ, V. A. A review of photovoltaic systems: design, operation and maintenance. **Solar Energy**, v. 188, p. 426-440, 2019.

- CANADIAN SOLAR. **Ficha técnica do módulo fotovoltaico I V5.1C2_EN**: CS6P-255/260P. Maio 2015. Disponível em: <https://download.aldo.com.br/pdfprodutos/Produto31534IdArquivo3715.pdf>. Acesso em: 25 maio 2021.
- CASSINI, D. A. **Impactos da degradação no desempenho elétrico e térmico de módulos fotovoltaicos de sistemas instalados em Minas Gerais**. Belo Horizonte, 2016. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Pontifícia Universidade Católica, Belo Horizonte, 2016.
- CLIMA TEMPO. **Dados meteorológicos de Betim MG**. Disponível em: <https://www.climatempo.com.br/previsao-do-tempo/cidade/108/betim-mg>. Acesso em: 12 ago. 2020.
- COSTA, S. C. S. *et al.* Avaliação da sujidade em módulos fotovoltaicos em Minas Gerais, Brasil. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENERGIA SOLAR, 7., Gramado, 2018. **Anais [...]** Gramado, 2018.
- DE BENEDETTI, M. *et al.* Anomaly detection and predictive maintenance for photovoltaic systems. **Neurocomputing**, v. 310, p. 59–68, 2018.
- EMAP SOLAR. **Energia Solar - Áreas de Negócio - O&M**. Disponível em: <https://emapsolar.com.br/area-de-negocio/om/>. Acesso em: 19 out. 2020.
- FERREIRA, R. A. M. **Metodologia para avaliação do desempenho de painéis fotovoltaicos utilizando um modelo elétrico-térmico e termografia quantitativa**. Belo Horizonte, 2018. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) - Programa de Pós Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2018.
- GOMES JUNIOR, S. C. **Sistema autônomo para inspeções visuais e termográficas em subestações de energia elétrica**. Belo Horizonte, 2017. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Programa de Pós Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2017.
- HACKE, P. *et al.* A status review of photovoltaic power conversion equipment reliability, safety, and quality assurance protocols. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 82, n. April 2017, p. 1097–1112, 2018.
- HERRAIZ, A. H.; MARUGÁN, A. P.; MÁRQUEZ, F. P. G. Photovoltaic plant condition monitoring using thermal images. **Renewable Energy**, v. 153, p. 334-349, 2020.
- HICKEL, B. M. *et al.* Análise da influência do acúmulo de sujeira sobre diferentes tecnologias de módulos fv: revisão e medições de campo. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENERGIA SOLAR, 7., Belo Horizonte, 2016. **Anais [...]** Belo Horizonte, 2016.
- HICKEL, B. M. **O Impacto no desempenho de sistemas fotovoltaicos causado pelo acúmulo de sujeira sobre os módulos fv – metodologia e avaliação através de curvas IxV em Campo**. Florianópolis, 2017. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2017.
- HUSSAIN, A.; BATRA, A.; PACHAURI, R. An experimental study on effect of dust on power loss in solar photovoltaic module. **Renewables: Wind, Water and Solar**, v. 4, article 9, 2017.
- KOTINDA, C. H. P.; OLIVEIRA, V.; SILVA, J. C. C. Monitoramento térmico de painel fotovoltaico utilizando redes de bragg em fibra óptica. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENERGIA SOLAR, 7., Gramado, 2018. **Anais [...]** Gramado, 2018.
- LEMOS, L. O. *et al.* Efeito da sujidade no desempenho de módulos fotovoltaicos. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENERGIA SOLAR, 6., Belo Horizonte, 2016. **Anais [...]** Belo Horizonte, 2016.
- MANGANIELLO, P.; BALATO, M.; VITELLI, M. A survey on mismatching and aging of PV modules: the closed loop. **IEEE Transactions on Industrial Electronics**, v. 62, p. 7276-7284, 2015.
- MANOJ, N. *et al.* On the technologies empowering drones for intelligent monitoring of solar photovoltaic power plants. **Procedia Computer Science**, v. 133, p. 585–593, 2018.
- MOSCARDINI JÚNIOR, E. de F.; RÜTHER, R.; VERGARA, L. G. L. Avaliação do conhecimento em O&M de sistemas fotovoltaicos por profissionais do mercado de energia solar brasileiro. **Revista Brasileira de Energia Solar**, v. 8, n. 2, p. 131-139, dez. 2017.
- MÜHLEISEN, W. *et al.* Scientific and economic comparison of outdoor characterisation methods for photovoltaic power plants. **Renewable Energy**, v. 134, p. 321–329, 2019.

- OLIVEIRA, A. K. V.; AGHAEI, M.; RÜTHER, R. Aerial infrared thermography for low-cost and fast fault detection in utility-scale PV power plants. **Solar Energy**, v. 211, p. 712-724, 2020.
- PINHO, J. T.; GALDINO, M. A. **Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos**. Rio de Janeiro, 2014. Grupo de Trabalho de Energia Solar (GTES), CEPEL – CRESESB, edição revisada e atualizada.
- REZA, M. *et al.* Power loss due to soiling on solar panel : a review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 59, p. 1307–1316, 2016.
- REZENDE, V. G. S.; ZILLES, R. Análise das perdas de produtividade em geradores fotovoltaicos por efeito de sujidade. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENERGIA SOLAR, 7., Gramado, 2018. **Anais [...]** Gramado, 2018.
- SERVIÇO NACIONAL DE APRENDIZAGEM INDUSTRIAL DO CEARÁ. **Webinar - O&M e Monitoramento Remoto**. Maio 2020. Disponível em: https://www.youtube.com/watch?v=iWK0npJW_n4. Acesso em: 11 maio 2020.
- SMA SOLAR. **Sunny Tripower 15000TL / 20000TL / 25000TL**. Outubro, 2017. Disponível em: <https://files.sma.de/downloads/STP15-25TL-30-DS-en-41.pdf>. Acesso em: 25 maio 2021.
- SOARES JÚNIOR, G. J.; CRUZ, S. R.; AMARAL, L. S. Impacto da sujidade sobre o desempenho de sistemas fotovoltaicos. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENERGIA SOLAR, 7., Gramado, 2018. **Anais [...]** Gramado, 2018.
- SOLARPOWER EUROPE. **Operation & maintenance: best practice guidelines**. Version 4.0. December 2019. Disponível em: <https://solarbestpractices.com/documentation/>. Acesso em: 7 abr. 2020.
- SUNNY PORTAL. **Energia e Potência - UFV - IFMG**. Disponível em: <https://www.sunnyportal.com>. Acesso em: 19 out. 2020.
- VILLARINI, M. *et al.* Optimization of photovoltaic maintenance plan by means of a FMEA approach based on real data. **Energy Conversion and Management**, v. 152, p. 1–12, 2017.

André Luis Crispim Costa

Assessoria de Administração, Planejamento e Infraestrutura | Instituto Federal de Minas Gerais | Av. Professor Mário Werneck, 2.590, 6° andar, Buritis | Belo Horizonte - MG - Brasil | CEP 30575-180 | Tel.: (31) 2513-5177 | E-mail: andre.crispim@ifmg.edu.br

Simone Queiroz da Silveira Hirashima

Departamento de Engenharia Civil | Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais | Av. Amazonas, 7.675, Nova Gameleira | Belo Horizonte - MG - Brasil | CEP 30510-000 | Tel.: (31) 3319-6810 | E-mail: simonehirashima@cefetmg.br

Reginaldo Vagner Ferreira

Departamento de Automação | Instituto Federal de Minas Gerais | Rua Itaguaçu, 595, Campus Betim, São Caetano | Betim - MG - Brasil | CEP 32677-562 | Tel.: (31) 3597-6360 | E-mail: reginaldo.ferreira@ifmg.edu.br

Ambiente Construído

Revista da Associação Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído

Av. Osvaldo Aranha, 99 - 3° andar, Centro

Porto Alegre - RS - Brasil

CEP 90035-190

Telefone: +55 (51) 3308-4084

www.seer.ufrgs.br/ambienteconstruido

www.scielo.br/ac

E-mail: ambienteconstruido@ufrgs.br



This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License.