

Inspeção termográfica na usina solar fotovoltaica Mossoró II - UFERSA Campus Leste

1st Edson Freire Targino
Departamento de Engenharia e Tecnologia - DET
Universidade Federal Rural do Semi-Árido - UFERSA
Mossoró – RN, Brasil
edson.targino@alunos.ufersa.edu.br

2nd Ednardo Pereira da Rocha
Departamento de Engenharia e Tecnologia - DET
Universidade Federal Rural do Semi-Árido - UFERSA
Mossoró – RN, Brasil
ednardo.pereira@ufersa.edu.br

Resumo—Diante da crise do petróleo e das preocupações com a emissão de gases poluentes, surgiu o interesse pela exploração de fontes de energias limpas e renováveis. A utilização da energia solar como fonte alternativa de geração de energia elétrica tem crescido de forma exponencial no mundo e no Brasil. A geração de energia elétrica através de módulos fotovoltaicos já não é mais uma novidade, e torna-se cada vez mais atrativa por sua simplicidade de instalação, operação e manutenção. Sendo assim, boas práticas de manutenção nesses sistemas garantem uma confiabilidade e eficiência de geração. Diante disso, o presente trabalho tem como objetivo, realizar uma inspeção termográfica na usina Mossoró II, localizada na UFERSA Campus Leste, na cidade de Mossoró, para tentar identificar anomalias térmicas e, com os resultados, recomendar medidas de operação e manutenção para garantir uma boa geração do sistema e preservar a vida útil dos equipamentos.

Palavras-chave—inspeção termográfica, pontos quentes, sistema fotovoltaico.

I. INTRODUÇÃO

Como pode ser observado, o crescimento de instalações de Sistemas Fotovoltaicos Conectados à Rede (SFCR) têm crescido de forma exponencial no Brasil e no mundo. Sendo assim, boas práticas de operação e manutenção desses sistemas vêm sendo implementadas. Procedimentos para identificação e prevenção de falhas têm contribuído na procura por melhor desempenho e funcionalidade dos sistemas fotovoltaicos [1].

Um SFCR é constituído, basicamente, por módulos fotovoltaicos, sendo estes os responsáveis pela geração de energia, os cabos de conexão (CC e CA), um ou mais inversores, responsáveis pela conversão da corrente contínua para alternada, bem como, os dispositivos de proteção, como exemplo, os disjuntores termomagnéticos.

É de conhecimento da maioria que todo e qualquer sistema eletromecânico necessita de manutenção para manter-se em bom funcionamento. Os conceitos de manutenção podem ser divididos em três tipos básicos: a manutenção corretiva, na qual há a intervenção após a parada do equipamento. A manutenção preventiva, em que é realizada a manutenção antes da máquina apresentar o problema. Por fim, a manutenção preditiva, na qual são realizados testes e análises para verificar a necessidade de troca ou manutenção de alguns equipamentos [2].

Quando trata-se de técnicas utilizadas para elaboração de plano de manutenção ou medidas que contribuam para redução de perdas em sistemas fotovoltaicos conectados à

rede, a termografia é uma das principais, sendo ela uma técnica não destrutiva que possibilita analisar e medir a temperatura de um objeto através da radiação infravermelho emitida por ele. O instrumento que é utilizado nessa técnica é a câmera termográfica ou termovisor. Essa técnica tem sido bastante utilizada pela sua praticidade, sobretudo, de poder ser empregada sem qualquer interferência no funcionamento do sistema [3].

O *hot spot*, comumente denominado de ponto quente, é um dos problemas mais comuns em sistemas fotovoltaicos conectados à rede. Estes, podem ser provocados tanto por sombreamento dos módulos, sujeira sobre os mesmos, até mesmo defeitos de fábrica nos componentes do sistema de geração. Um fato é, tal problema é um dos principais causadores da redução tanto do desempenho dos sistemas fotovoltaicos, bem como da vida útil dos equipamentos instalados, levando riscos até mesmo para aqueles que têm seus sistemas instalados sobre suas residências ou comércios, haja vista, que já há casos de incêndios provocados por sistemas fotovoltaicos tendo como princípio de incêndio um ponto quente em algum local ou equipamento do sistema.

Posto isto, o presente trabalho tem como objetivo realizar uma inspeção termográfica no Sistema Fotovoltaico Conectado à Rede (Usina Mossoró II), localizada na UFERSA Campus Leste, para identificação de pontos quentes (*hot spot*) e elaboração de medidas para se ter um maior controle de perdas provocadas por pontos quentes, sugerindo melhorias com base na inspeção realizada nos componentes do sistema fotovoltaico.

II. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Esta seção aborda os principais componentes de um sistema fotovoltaico conectado à rede, bem como as principais perdas existentes nesses sistemas e alguns tipos de manutenções aplicadas a eles, sobretudo, a inspeção termográfica para identificação de pontos quentes.

A. Energia Solar Fotovoltaica

A crise do petróleo no ano de 1970, bem como as preocupações com a emissão de gases poluentes na atmosfera no ano de 1990, veio como uma forma de alavancar o interesse pela utilização de fontes de energias renováveis, como exemplo, a energia emitida pelo sol, pelos ventos e marés.

As energias renováveis são sem dúvidas uma alternativa ao problema de dependência das fontes de energia que usam como combustível material fóssil, a saber, o petróleo, carvão

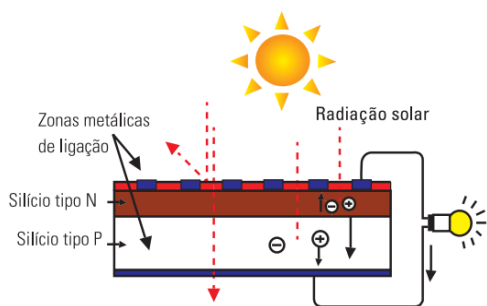
mineral, dentre outros. O Brasil é um dos países que possui um grande potencial de energia solar, eólica, biomassa e de ondas, o que possibilita, ainda mais, uma desagregação da utilização de fontes geradoras de energia elétrica poluentes [4].

Uma das formas de aproveitamento da energia solar que tem tido considerado avanço no Brasil é a geração de energia elétrica através dos sistemas fotovoltaicos, isto é, energia solar fotovoltaica. As diversas vantagens desta forma de geração de energia elétrica é o que tem tornado esse mercado bastante atrativo, haja vista que tal geração é considerada uma fonte limpa e renovável, economicamente competitiva e permitindo retornos financeiros em curtos períodos de tempo, com uma tecnologia já consolidada no mercado e de fácil manutenção [4].

A energia solar fotovoltaica é obtida através da conversão direta da radiação solar para energia elétrica, por meio de um processo denominado de efeito fotovoltaico. A célula fotovoltaica é um dispositivo fabricado em material semicondutor e sendo esta considerada a unidade fundamental no processo de conversão de energia solar em eletricidade [5].

O efeito fotovoltaico é o fenômeno que transforma a energia luminosa em energia elétrica, e foi observado pela primeira vez no ano de 1839 pelo físico francês Edmond Becquerel, que ao inserir placas metálicas em um eletrólito e sob incidência de luz, era gerado uma diferença de potencial (ddp) entre elas. A Figura 1 apresenta uma ilustração de como dar-se o efeito fotovoltaico em uma célula.

Figura 1: Funcionamento de uma célula solar fotovoltaica.



Fonte: [4].

A célula é composta por duas camadas de material semicondutor dopados de forma diferente. A camada do tipo N é onde encontra-se um excesso de elétrons periféricos, já na camada do tipo P existe um deficit de elétrons. Em virtude da diferença de potencial (ddp) existente entre estas duas camadas, os elétrons que estão situados na camada N ao captarem a energia radiada pelo sol saltam a barreira de potencial, dando origem a um fluxo contínuo de elétrons, denominado de corrente elétrica contínua.

B. Sistemas fotovoltaicos

Os sistemas fotovoltaicos podem ser classificados em três tipos, a saber: os sistemas isolados ou autônomos, também conhecidos como *off-grid*, os sistemas *on-grid* e os sistemas híbridos. A principal diferença entre os dois primeiros está na necessidade que o *off-grid* tem de armazenar energia em um banco de baterias durante o dia para utilizar à noite. Estes sistemas são mais utilizados em locais onde não há redes de distribuição de energia ou o acesso é restrito. Já os sistemas *on-grid* é aquele em que está interligado diretamente à rede

elétrica da concessionária, por intermédio de um inversor solar, e toda energia excedente gerada durante o dia é injetada na rede e ao final do mês essa energia retorna em forma de crédito. Por fim, o sistema híbrido é composto por uma junção dos dois sistemas citados anteriormente.

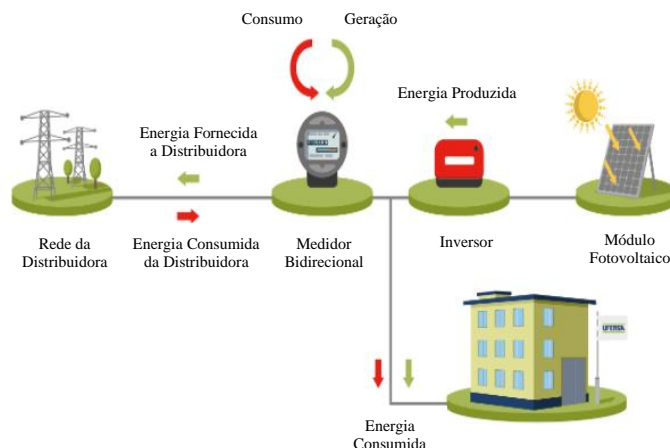
C. Sistemas Fotovoltaicos Conectados à Rede (SFCR)

Os sistemas fotovoltaicos conectados à rede caracterizam-se, basicamente, devido a energia gerada ser injetada diretamente na rede da concessionária, não necessitando de um banco de baterias, tornando o sistema mais simples e de fácil manutenção.

Podem ser descritos, como principais componentes desse sistema, os módulos fotovoltaicos, responsáveis pela conversão da energia luminosa em energia elétrica; o inversor de corrente, o qual realiza a conversão de energia em corrente contínua (CC) para corrente alternada (CA); os dispositivos de proteção, como os disjuntores termomagnéticos e os dispositivos de proteção contra surtos (DPS), sendo estes os responsáveis pela proteção, sobretudo, dos cabos que interligam os módulos fotovoltaicos aos inversores do sistema; por fim, o medidor bidirecional, sendo este o responsável pela mensuração dos valores de geração injetados na rede elétrica e os valores consumidos na unidade consumidora.

A Figura 2 mostra um esquema simplificado da dinâmica de funcionamento de um sistema fotovoltaico conectado à rede elétrica da concessionária.

Figura 2: Esquema de funcionamento do SFCR.



Fonte: [6].

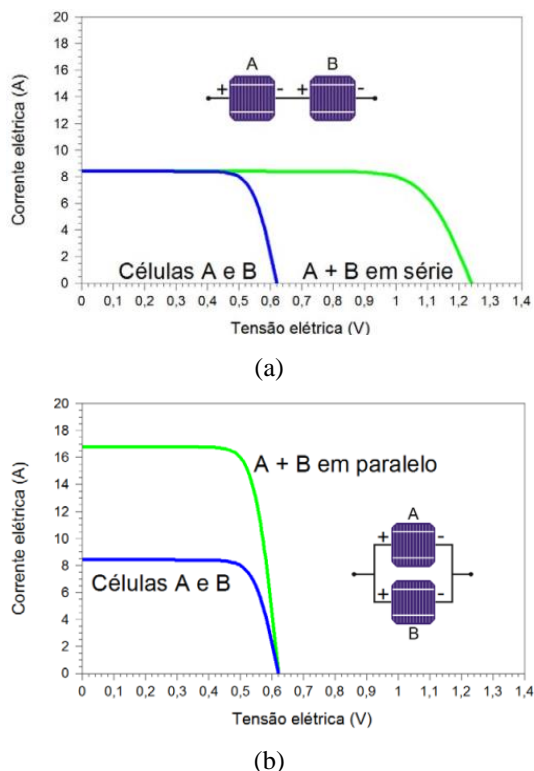
Módulo fotovoltaico

Vale destacar que existem diferenças entre células, módulos e painéis fotovoltaicos. De acordo com [4], módulo fotovoltaico é aquele constituído por um conjunto de células conectadas em arranjos condicionados individualmente para produzir correntes e tensões suficientes para gerar energia elétrica em níveis comerciais.

Os painéis fotovoltaicos são formados por um conjunto de módulos associados eletricamente em série ou paralelo, de modo a garantir-se uma saída de tensão e corrente desejada [5]. A associação de módulos em série tem como objetivo obter um sistema fotovoltaico com um maior valor de tensão e mesma corrente na saída do sistema. Por outro lado, uma associação em paralelo de módulos tem como objetivo aumentar a corrente de saída e manter a tensão de um só módulo.

De forma análoga, as células fotovoltaicas são associadas em série ou paralelo, a depender da aplicação e níveis de tensão e corrente desejados na saída do sistema, entretanto, a associação mais comum, atualmente, é a ligação em série destas células. A Figura 3 (a) e (b) mostra as associações existentes entre células, equivalente para os módulos fotovoltaicos.

Figura 3: Associação em série entre células fotovoltaicas (a). Associação em paralelo entre células fotovoltaicas (b).



Fonte: [5].

O fato de os módulos ficarem expostos a intemperie exige-se que os mesmos sejam dotados de características que lhes permitam suportar condições adversas, como sol, chuva, sujidades, temperaturas, esforços mecânicos, dentre outros. Pode ser citado como um dos elementos mais importantes dos módulos fotovoltaicos o encapsulamento (EVA). A Figura 4 mostra como é constituído um módulo fotovoltaico.

Figura 4: Constituição de um módulo fotovoltaico.



Fonte: [7].

Como pode ser observado através da Figura 4 as células são normalmente envolvidas por duas camadas de de acetato de vinilo etileno (EVA). Este composto consiste em um material flexível, translúcido e não refletor da radiação emitida pelo sol. Além disso, é um material essencial para garantir a isolamento elétrica entre as células dos módulos [7].

Inversor solar

Os inversores são considerados equipamentos eletrônicos, e em sistemas fotovoltaicos conectados à rede eles são projetados para realizar a conversão da corrente contínua (CC), gerada pelos módulos, em corrente alternada (CA). Além disso, são eles os responsáveis por realizar a sincronização da tensão gerada pelo sistema fotovoltaico e a tensão da rede da concessionária, bem como injetar o sinal de tensão com mesma frequência, conteúdo harmônico e sequência de fase [5].

Outra grande e importante função do inversor nos SFCR é o sistema de proteção denominado de anti-ilhamento, ou seja, ao detectar uma sobrecarga ou falta de energia fornecida pela concessionária, os inversores utilizam dessa proteção interna para isolar as cargas conectadas ao sistema e para evitar que qualquer energia seja injetada na rede elétrica, preservando, assim, a vida de quem utiliza desse benefício, bem como de quem é responsável pela manutenção desses sistemas e da rede elétrica de distribuição.

Dispositivo de proteção

Para garantir a proteção dos sistemas fotovoltaicos conectados à rede existem diversos dispositivos auxiliares que objetivam reduzir as falhas que possam vir ocorrer nesses sistemas, e na ocorrência destas, devem notificar imediatamente o operador do sistema fotovoltaico para que sejam tomadas as devidas providências para sanar tal problema.

De acordo com [5], o correto dimensionamento e utilização dos dispositivos de proteção contribui de forma significativa na extinção de falhas e minimização dos impactos causados ao sistema fotovoltaico. Além dos de proteção integrados aos equipamentos é importante a instalação de dispositivos de proteção externos, como os disjuntores termomagnéticos, dispositivos de proteção contra surtos (DPS), sistemas de aterramento e sistemas de proteção contra descargas atmosféricas (SPDA).

O dispositivo de proteção mais comum nos sistemas fotovoltaicos conectados à rede é o disjuntor termomagnético, como seu próprio nome sugere, sua atuação ocorre devido ao aumento de temperatura provocado por uma corrente de magnitude que é superior a sua corrente nominal de operação, ou seja, seus componentes internos ao serem aquecidos acima da temperatura máxima de operação ele faz a abertura do circuito para que se garanta a proteção do sistema

D. Perdas nos sistemas fotovoltaicos conectados à rede

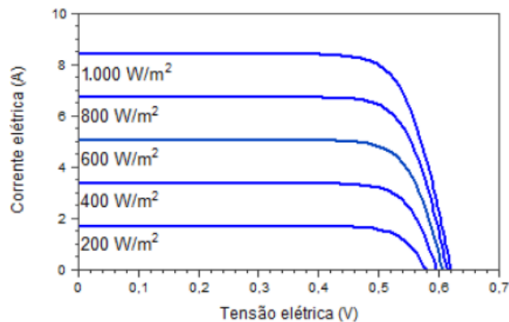
Para uma melhor avaliação do desempenho de geração de um sistema fotovoltaico, assim como a elaboração de medidas que contribuam para maior eficiência do mesmo, é relevante o estudo das perdas presentes nesses sistemas. Nesta seção serão apresentadas as principais perdas presentes nos SFCR, a saber: perdas por sombreamento dos módulos; perdas por sujidade nos módulos; perdas por aumento de temperatura e perdas ocasionadas por *hot spot*.

Perdas por sombreamento:

A geração máxima de energia em um sistema fotovoltaico está pautada, sobretudo, na ausência de sombreamentos sobre os módulos. Do contrário, quando há o sombreamento parcial ou total dos módulos ou células, tem-se uma redução da corrente e da potência de geração, desta forma, deslocando o

ponto de máxima potência da curva: corrente por Tensão ($I-V$). A Figura 5 mostra a relação que existe entre a incidência de radiação sobre os módulos e a corrente gerada por eles.

Figura 5: Relação entre a radiação solar e a corrente gerada em módulo fotovoltaico.



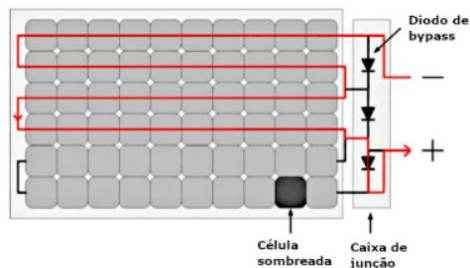
Fonte: [5].

Como exposto anteriormente, os módulos são formados por um conjunto de células fotovoltaicas associadas em série, e na ocorrência de uma ou mais destas células estarem recebendo uma quantidade de radiação solar menor do que as demais do mesmo arranjo, sua corrente irá limitar a corrente de todo conjunto série.

Além da perda de potência no gerador fotovoltaico, o sombreamento dos módulos trás grandes riscos de danos na estrutura física dos módulos, haja vista, que a potência que está sendo gerada e não está sendo entregue ao consumo, está sendo dissipada na forma de calor na célula/módulo sobre a qual está situada o sombreamento. A este evento é dado o nome de “ponto quente”, também conhecido pelo termo inglês *hot-spot*, que é a produção intensa de calor situado em um ponto específico, neste caso, na célula fotovoltaica, podendo levar a ruptura do vidro do módulo e até mesmo a fusão de polímeros e metais presentes no mesmo [5].

Com o objetivo de mitigar os danos provocados pelos pontos quentes nas células fotovoltaicas, os módulos são protegidos por diodos de desvio (*by-pass*), isto é, esses diodos oferecem um caminho alternativo para a corrente, dessa forma, limitando a dissipação de energia no arranjo de células afetadas [5]. A Figura 6 mostra uma representação de um módulo fotovoltaico de 60 células e três diodos de *by-pass*.

Figura 6: Representação de um módulo fotovoltaico e diodo de desvio.



Fonte: [1].

Como pode ser observado na Figura 6, o diodo de *by-pass* é conectado em anti-paralelo com um conjunto de células que estão associadas em série. Na ocorrência de sombreamento ou defeito em uma das células do conjunto, o diodo oferece um caminho alternativo para a corrente, assim, impedindo o aparecimento de tensões inversas elevadas e reduzindo os danos em todo o sistema de geração.

Como cada diodo está associado a um conjunto de células que representa 1/3 do total de células do módulo, na atuação de um dos diodos de desvio a corrente do módulo será reduzida em 1/3 do que o módulo fotovoltaico produziria em plena operação, assim, minimizando os danos ao sistema e a geração.

Perdas por sujidade nos módulos:

O acúmulo de poeira, folhas e dejetos de animais sobre os módulos fotovoltaicos ocasiona uma limitação de irradiância solar efetiva, provocando perdas na conversão de energia do sistema [6].

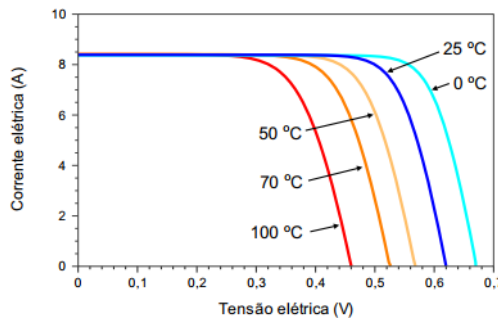
Além das perdas na geração de energia devido o sombreamento provocado pelo acúmulo de sujeiras, a distribuição não uniforme dessas sujidades sobre os módulos, propicia perdas por descasamentos elétricos de tensão e corrente entre as células limpas e as células sujas, assim como entre os módulos que estão em uma mesma associação série. Vale destacar, que esse comportamento é responsável pelo surgimento de pontos quentes em módulos fotovoltaicos [8].

Diante disso, torna-se notória a importância de um cronograma de inspeção visual ou termográfica e, quando necessário, programar uma limpeza de todo o sistema, garantindo, assim, uma boa eficiência de geração e prolongamento da vida útil dos equipamentos.

Perdas por aumento de temperatura:

A temperatura de operação dos módulos fotovoltaicos é um parâmetro importante de ser avaliado, haja vista, que este pode alterar as características elétricas do sistema, a saber, tensão, potência e corrente elétrica, entretanto, a variação que ocorre neste último parâmetro pode ser desconsiderando [2]. A Figura 7 ilustra o comportamento da corrente e da tensão a partir da variação de temperatura de uma célula fotovoltaica.

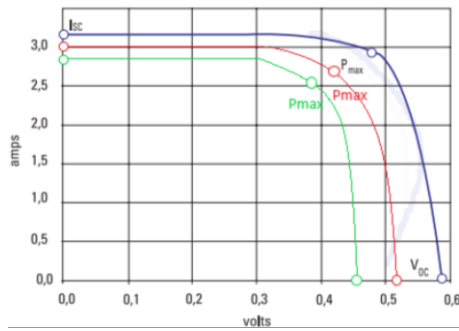
Figura 7: Influência da temperatura da célula fotovoltaica na curva $I-V$.



Fonte: [5].

Como pode ser observado na Figura 7, quanto maior a temperatura da célula fotovoltaica, menor será a diferença de potencial gerada por ela. Destacando, que a corrente elétrica gerada por esta mesma célula sofre alterações desprezíveis, entretanto, a relação $I-V$ faz com que o ponto de máxima potência sofra um deslocamento para a esquerda, o que representa um menor desempenho na geração de energia elétrica, assim como ilustrado na Figura 8.

Figura 8: Deslocamento do ponto de máxima potência.



Fonte: Adaptado de [4].

Perdas por defeitos nos módulos:

Os módulos fotovoltaicos são equipamentos passíveis a falhas, acarretando em perdas de potência ou até mesmo na interrupção do funcionamento dos mesmos [2]. Seus defeitos podem estar relacionados ao seu processo de fabricação, devido a inserção de impurezas, microfissuras ou até mesmo a uma solda mal elaborada entre as células. Além disso, durante o manuseio dos módulos, assim como durante a instalação, muitas vezes, ocorre a ruptura do vidro que protege a parte interna e até mesmo a ruptura de algumas células.

Vale destacar, que na maioria dos casos, os defeitos encontrados nos módulos, sejam eles decorrentes do processo de fabricação ou de manuseio, têm como principal consequência uma alteração na temperatura do equipamento, provocando, assim, o surgimento de pontos quentes. Estes, são possíveis de ser identificados através de uma inspeção termográfica, haja vista, que dificilmente serão identificados apenas por uma inspeção visual.

Perdas por hot spot

O *hot spot*, na verdade, é uma perda consequente das demais perdas apresentadas anteriormente, e não estão limitadas apenas aos módulos fotovoltaicos. Outro local bastante comum de se encontrar um ponto quente é nos conectores MC6 ou MC4, são os conectores que fazem a ligação entre os módulos, isto ocorre devido a conexão de forma inadequada ou cripage incorreta dos conectores.

No quadro onde estão alocados os dispositivos de proteção é outro local bastante comum de se encontrar pontos quentes. A utilização de terminais tubulares nos cabos ou parafusos com pouco aperto deixam os cabos com folgas nas conexões dos disjuntores gerando os *hot spot*. Como já comentado anteriormente, os disjuntores termomagnéticos também atuam quando sua temperatura de operação é ultrapassada, e em casos onde o sistema fotovoltaico não tem um monitoramento constante, a usina pode ficar desativada por vários dias sem nenhuma geração.

Os inversores também não estão distantes desta realidade, também é possível encontrar pontos quentes em seus terminais de conexão das *strings* (conjunto de módulos em série), assim como na conexão dos cabos de alimentação na sua parte interna. Desta forma, vale salientar, quanto maior for a temperatura interna do inversor, menor será sua potência de geração entregue. Por isso, é importante, no ato da instalação, procurar locais arejados e manter sempre o distanciamento correto entre inversores recomendados nos manuais fornecidos pelos fabricantes.

E. Manutenção em SFCR

O processo de operação e manutenção em sistemas fotovoltaicos tem início logo após sua entrada em operação, e perdura até o fim de sua vida útil [4]. Observa-se na literatura que diferentes causas de defeitos ocorrem nos módulos fotovoltaicos, a saber: degradação do revestimento antirreflexo; corrosão e rachaduras nas células; degradação das fitas e ligações de solda; poeira e sujeira; defeitos na caixa de junção e dos diodos de desvio, dentre outros.

Por isso, todo sistema fotovoltaico deve passar por inspeção e manutenção periodicamente, de forma a garantir uma operação eficiente e evitando danos futuros [5]. Muitos dos problemas encontrados em sistemas fotovoltaicos podem ser mitigados por boas práticas de manutenção e operação, tais como inspeções visuais, o monitoramento dos dados de geração, inspeções termográficas, limpeza dos módulos fotovoltaicos, dentre outros.

É importante destacar, que a implementação de planos de manutenção e operação em sistemas fotovoltaicos demanda periodicidades diferentes para cada subsistema e equipamentos, sendo importante, sempre consultar os manuais fornecidos pelos fabricantes e as recomendações informadas por eles com relação a vida útil de alguns componentes ou rendimento de geração ao decorrer dos anos. Também é importante levar em consideração o ambiente no qual o sistema está instalado, se é um local com muita agressividade de intempéries, como poeira, folhas de árvore, dejetos de animais, local com agressividade salina, dentre outras.

F. Inspeção Termográfica em SFCR

A termografia é considerada uma técnica intrusiva e não destrutiva (não necessitando um contato direto com o equipamento para ser realizada uma inspeção, tão pouco a parada de um sistema) capaz de informar a temperatura de um corpo através de um termograma, que é obtido por uma câmera capaz de detectar a radiação infravermelha emitida pelo corpo em análise [9].

A caracterização termográfica de um SFCR pode ser do tipo qualitativa, ou seja, quando o importante é o perfil térmico e não os valores de temperatura, como também do tipo quantitativa, neste caso, é quando se pretende definir o nível de gravidade da anomalia produzida pelo aquecimento do objeto.

Existem algumas condições importantes para uma implementação de uma inspeção termográfica, tais como: a especificação da câmera utilizada deve ser adequada para o tipo de medição; a usina fotovoltaica deve estar em pleno funcionamento; a irradiação solar, preferencialmente, superior a 600 W/m²; o ângulo de captura das imagens no momento da inspeção deve ser pequeno para uma boa emissividade infravermelha, entretanto, não deixando a câmera perpendicular aos módulos fotovoltaicos, assim, evitando reflexões por parte do vidro dos módulos nas imagens do termovisor [6].

III. METODOLOGIA

A metodologia deste trabalho utilizou como método de avaliação, a inspeção termográfica para identificar inconformidades térmicas nos equipamentos elétricos da usina solar fotovoltaica conectada à rede – Usina Mossoró II e, com os resultados obtidos elaborar medidas de manutenção e operação para melhorar o desempenho de geração do sistema, bem como aumentar a vida útil dos equipamentos.

A usina solar fotovoltaica Mossoró II está localizada sob as coordenadas geográficas 05°02'03''S 37°34'16''W, instalada na Universidade Federal Rural do Semi-Árido (UFERSA) Campus Leste, na cidade de Mossoró/RN. Atualmente, o sistema é composto por 580 módulos, do modelo *Canadian Solar CS6P-260P-SD*, instalados em solo, e subdividido em 10 conjuntos de 58 módulos por inversor. A usina produz uma potência total de 150,8 kWp. O sistema também é composto por 10 inversores trifásicos de 15 kW cada, do modelo *Ginlong Technologies Solis* [10].

O equipamento utilizado para realizar a inspeção termográfica foi a câmera ou termovisor *FLUKE TI9* e, para o tratamento das imagens foi utilizado o *software Smart View Class 4.4* [11]. A estratégia utilizada para otimizar e organizar a inspeção foi a de subdividir o sistema em partes e avaliar cada um separadamente, a saber: análise dos módulos; análise dos componentes de conexão, cabos e dispositivos de proteção e por fim, análise dos inversores.

IV. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os resultados alcançados na inspeção termográfica estão apresentados nas subseções *A*, *B* e *C*. Vale destacar, que no dia da análise o céu encontrava-se parcialmente nublado, o que prejudica a geração máxima por parte do sistema fotovoltaico. A inspeção foi realizada no dia 27 de Abril de 2023 entre às 10h30 e às 12h00, com o objetivo de se trabalhar em um intervalo de tempo com maior irradiação solar.

Outro detalhe importante a ser observado é que durante os registros das fotos com o termovisor, a escala de temperatura na qual o mesmo estava configurado era na escala de *Fahrenheit*, sendo necessário uma conversão para graus *Celsius*.

A. Inspeção dos módulos fotovoltaicos

Antes de realizar a inspeção termográfica foi realizada uma inspeção visual para tentar identificar alguma inconformidade que pudesse provocar pontos quentes nos módulos fotovoltaicos, de imediato, o que constatou-se foi apenas sujidades por dejetos de animais. Os módulos encontravam-se com pouca sujeira depositada sobre os mesmos, haja vista, que o período de realização da inspeção é um período de chuvas na região de Mossoró. A Figura 9 mostra alguns dos módulos onde foram identificados dejetos de pássaros e que pode ser um possível causador de ponto quente, conforme já informado anteriormente na seção 2 deste trabalho.

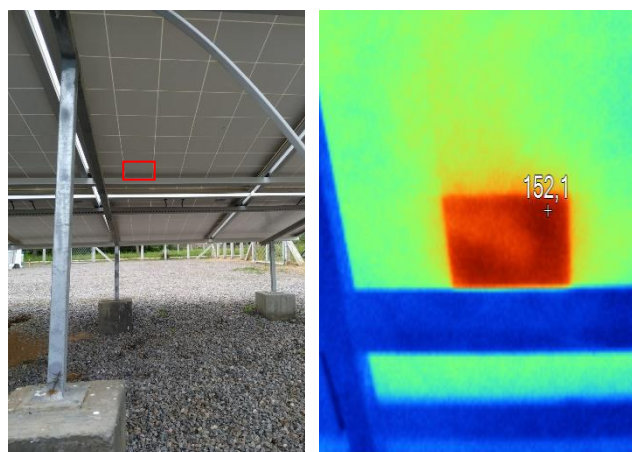
Figura 9: Módulos fotovoltaicos com dejetos de pássaros.



Fonte: Autoria própria, 2023.

O que já era esperado foi comprovado após a inspeção termográfica, isto é, que os dejetos de pássaros seriam suficientes para provocar pontos quentes e até mesmo a queima de células fotovoltaicas. A Figura 10 mostra uma célula fotovoltaica queimada por consequência destes dejetos já mostrados na Figura 9.

Figura 10: Célula fotovoltaica queimada.



Fonte: Autoria própria, 2023.

O fato da usina fotovoltaica Mossoró II ter entrado em operação em outubro de 2016, quase 7 anos de operação, esperava-se encontrar mais problemas por sobreaquecimento das células fotovoltaicas, entretanto, os únicos pontos quentes encontrados nesta inspeção inicial foram por consequência de dejetos de pássaros.

B. Inspeção dos componentes de conexão, cabos e dispositivos de proteção

Na inspeção das conexões e cabos CC constatou-se que os mesmos encontravam-se em boas condições de trabalho, não sendo identificado anomalias térmicas tão pouco desgaste desses componentes. Não foi possível avaliar os conectores MC6/MC4, pois estes estavam embutidos em canaletas, impossibilitando a inspeção. Entretanto, para a parte CA, foi observada uma temperatura elevada dos cabos e componentes de proteção, como pode ser observado nas Figuras 11, 12 e 13.

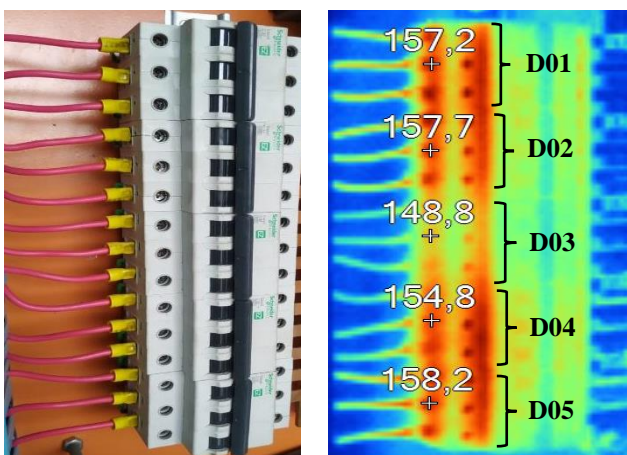
Figura 11: Cabos e conexões CC e CA.



Fonte: Autoria própria, 2023.

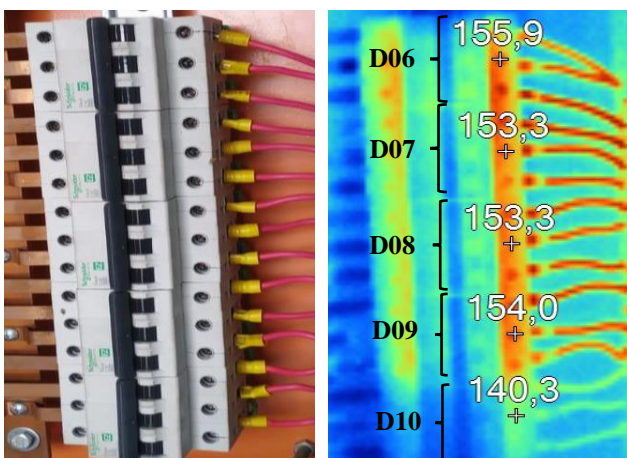
Em relação aos dispositivos de proteção CA, no caso, os disjuntores termomagnéticos, foi observado que os mesmos apresentavam temperaturas acima da faixa de temperatura nominal de operação informado pelo fabricante. Além disso, 2 dos 10 disjuntores utilizados na proteção dos inversores apresentaram um nível de temperatura menor que os demais. As Figuras 12 e 13 apresentam o comportamento térmico dos 10 disjuntores referentes à proteção CA.

Figura 12: Disjuntores 01, 02, 03, 04 e 05.



Fonte: Autoria própria, 2023.

Figura 13: Disjuntores 06, 07, 08, 09 e 10.



Fonte: Autoria própria, 2023.

Para um melhor tratamento dos dados apresentados nas Figuras 12 e 13 foi elaborada a Tabela 1, na qual está sendo mostrada uma comparação entre os valores de temperaturas nominais dos disjuntores informados pelo fabricante e os valores coletados no dia da inspeção destes dispositivos.

Tabela 1: Comparativo entre temperatura nominal de operação e medida dos disjuntores termomagnéticos.

Disjuntor	Faixa de Temperatura nominal (°C)	Temperatura medida (°C)
Disjuntor 01	25 - 60	69,55
Disjuntor 02	25 - 60	69,83
Disjuntor 03	25 - 60	64,88
Disjuntor 04	25 - 60	68,22
Disjuntor 05	25 - 60	70,11
Disjuntor 06	25 - 60	68,83
Disjuntor 07	25 - 60	67,39
Disjuntor 08	25 - 60	67,39
Disjuntor 09	25 - 60	67,78
Disjuntor 10	25 - 60	60,17

Fonte: Autoria própria, 2023.

De acordo com as informações apresentadas na folha de dados para o modelo de disjuntor instalado na usina Mossoró II, a saber, *Easy9 3P 32A*, sua faixa de temperatura para funcionamento está entre os 25 e 60 °C. e como pode ser observado na Tabela 1, 100% dos disjuntores estão trabalhando a uma temperatura acima da faixa de temperatura ideal de trabalho estipulado por seu fabricante. Embora estes acréscimos de temperatura não sejam suficientes para acionar os disjuntores, em longo prazo, isso leva a um desgaste dos contatos dos dispositivos e, conseqüentemente, a redução da vida útil dos mesmos.

Os disjuntores 03 e 10 foram os que apresentaram menor temperatura em seus terminais de conexão, haja vista, que no dia e momento da inspeção os inversores 03 e 10 estavam registrando uma potência instantânea de geração de 7,15 kWp e 5,71 kWp, respectivamente, enquanto os demais apresentavam potências de geração entre 12 kWp e 13,5 kWp, fato que deve ser avaliado com mais detalhes, já que a quantidade de módulos fotovoltaicos foi distribuído igualmente entre os inversores, ou seja, a geração apresentada em um dos inversores deveria ser semelhante aos demais.

C. Inspeção dos inversores

Na inspeção dos inversores foi avaliada a temperatura na qual se encontravam cada um deles, assim como as instalações dos inversores e do local onde estes estavam alocados.

Ao acessar os parâmetros informados na folha de dados dos inversores instalados na usina, observou-se que sua faixa de temperatura ambiente de operação deve estar entre 25 e 60 °C, como mostrado na Tabela 1 e recomendações importantes como manter um distanciamento mínimo de 30 cm entre inversores faz com que esses equipamentos dissipem calor de forma mais rápida, com isso, melhorando seu desempenho, o que não foi constatado no momento da inspeção. A Tabela 2 apresenta os resultados obtidos em relação às temperaturas dos inversores no momento da inspeção.

Tabela 2: Comparativo entre temperatura nominal de operação e medida dos inversores.

Inversor	Faixa de Temperatura nominal (°C)	Temperatura medida (°C)
Inversor 01	25 - 60	61,88
Inversor 02	25 - 60	57,11
Inversor 03	25 - 60	54,11
Inversor 04	25 - 60	58,44
Inversor 05	25 - 60	60,33
Inversor 06	25 - 60	69,17
Inversor 07	25 - 60	60,00
Inversor 08	25 - 60	50,33
Inversor 09	25 - 60	61,55
Inversor 10	25 - 60	58,16

Fonte: Autoria própria, 2023.

Como pode ser observado na Tabela 2, apenas 60% dos inversores avaliados estão trabalhando dentro da faixa de temperatura recomendada por seu fabricante. Um detalhe importante que foi observado e registrado, é que no dia da inspeção foi verificado que o inversor 08 apresentava uma potência de geração instantânea de aproximadamente 13 kWp, quase o dobro apresentado pelos inversores 03 e 10, mesmo assim, sua temperatura de operação foi a menor registrada entre os demais.

Também foi observado que a distância máxima entre os inversores era de 22 cm, o que não está de acordo com o recomendado pelo fabricante. Esta configuração de instalação dificulta a dissipação de calor com o ambiente, consequentemente, reduzindo seu desempenho de geração e vida útil, em longo prazo. Além disso, o único equipamento (exaustor) responsável pela circulação forçada de ar no abrigo não está em funcionamento e as entradas para circulação natural de ar não são suficientes para proporcionar uma efetiva troca de calor por parte dos inversores.

V. CONCLUSÕES

Para o desenvolvimento do presente trabalho foi necessária uma revisão da literatura para constatar onde estão e quais as perdas mais comuns nos sistemas fotovoltaicos conectados à rede elétrica. Com isso, pode-se notar que as perdas mais comuns nesses sistemas são advindas de sujidades e sobreaquecimentos sobre os módulos, defeitos nos módulos, problemas de conexão, cabos, nos dispositivos de proteção e até mesmo nos inversores, sendo um ponto comum entre esses defeitos, a geração de pontos quentes.

Diante disso, escolheu-se uma técnica simples e não destrutiva para se realizar uma inspeção na usina solar fotovoltaica Mossoró II, com o objetivo de identificar pontos quentes e elaborar medidas para tentar solucionar tais problemas. Com isso, melhorar o desempenho de geração do sistema como um todo.

Como a usina não tem um plano de manutenção ativo, isso compromete significativamente a geração e vida útil dos equipamentos. Seja uma simples inspeção visual ou até mesmo uma inspeção termográfica, ambas são de extrema

necessidade para identificação de anomalias no sistema e o traçar de medidas para solucionar tais inconformidades. Sendo assim, a partir dos resultados obtidos na análise, algumas recomendações são feitas para melhorar o desempenho do sistema e contribuir para o aumento da vida útil dos equipamentos:

- Implantação de dispositivos (bastante utilizados em lavouras) que emitem disparos sonoros para refugiar os pássaros para longe da usina, assim, evitando o depósito de dejetos sobre os módulos fotovoltaicos.
- Alocar em uma mesma *string*, placas que apresentam algum defeito, para que as perdas de geração ocorram em um único MPPT.
- Elaboração de um plano periódico de inspeção visual e termográfico, e caso necessário, realizar a limpeza dos módulos e ajustes mecânicos e elétricos no sistema.
- Melhorar a circulação natural de ar no cubículo dos inversores. Retirar alguns cobogós e instalar grades metálicas, aumentando a área de entrada de ar, melhorando, assim, a troca de calor por parte dos inversores.
- Consertar o exaustor que está sem funcionar e instalar mais um, para melhorar a circulação forçada de ar.
- Ajustar a distância de instalação entre os inversores, instalar a uma distância mínima de 30 cm, que é a recomendada em sua folha de dados.
- Trocar os cabos CA de cada inversor por cabos de seção transversal maior, realizar a limpeza dos contatos dos disjuntores termomagnéticos e retirar os terminais tubulares utilizados para realizar a conexão nos disjuntores, evitando pontos quentes.

Como proposta para trabalhos futuros, sugere-se a aplicação das medidas mencionadas anteriormente e a realização de uma nova inspeção termográfica e uma comparação de geração entre o mês anterior a aplicação das melhorias e o mês seguinte, para comprovar se as medidas tomadas surtiram um real efeito na geração.

REFERÊNCIAS

- [1] COSTA, André Luis Crispim; HIRASHIMA, Simone Queiroz da Silveira; FERREIRA, Reginaldo Wagner. Operação e Manutenção de Sistemas Fotovoltaicos Conectados à Rede: inspeção termográfica e limpeza de módulos FV. *Ambiente Construído*, Porto Alegre, v. 21, p. 1-20, out. 2021.
- [2] SILVA, Bruno Phillip Alves da. *Metodologia para a Determinação de Temperatura em Painéis Fotovoltaicos por Meio de Termografia Qualitativa*. 2017. 75 f. Dissertação - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2017.
- [3] COUTINHO, Ítalo de Azeredo. Proposição de Procedimento de Termografia Para Avaliação e Perícias - Aplicação em Painéis Solares. In: COBREAP, Não use números Romanos ou letras, use somente números Arábicos., 2021. Goiânia/Go. *Anais [...]*. Goiânia: Vistoria e Técnica: Segurança da Sociedade, 2021. p. 1-24.
- [4] PEREIRA, Felipe Alexandre de Sousa; OLIVEIRA, Manuel Ângelo Sarmento de. *Curso Técnico Instalador de Energia Solar Fotovoltaico*. 2. ed. Porto: Publindústria, Edições Técnicas, 2015.
- [5] PINHO, João Tavares; GALDINO, Marcos Antonio. *Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos*. Ria de Janeiro: Cresesb, 2014.
- [6] SOUSA, Emanuella Maria Rodrigues de. *Análise da Operação e Manutenção da Usina Solar Fotovoltaica Mossoró II da UFERSA*. 2019. 9 f. TCC - Curso de Engenharia Elétrica, Ufersa, Mossoró, 2019.
- [7] ANJOS, Ruben Serra dos. *Análise e Simulação de Pontos Quentes em Painéis Fotovoltaicos*. 2016. 186 f. Dissertação - Curso de Engenharia Eletrotécnica, Instituto Superior de Engenharia de Lisboa, Lisboa, 2016.
- [8] SOUZA, Thiago Miranda de. *Estudo de Técnicas de Manutenção Preventiva em Instalações Fotovoltaicas*. 2021. 67 f. TCC - Curso de Engenharia de Energia, Universidade de Brasília - Unb, Brasília, 2021.

- [9] MLYNARCZUK, Lucas Borges. **Aplicação de Termografia para Manutenção Preditiva em Painéis Elétricos**. 2018. 40 f. TCC - Curso de Automação Industrial, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Ponta Grossa, 2018.
- [10] ASSECOM (Ed.) “**Usinas solare da Ufersa.**” 2023. Disponível em: < <https://usinasolar.ufersa.edu.br/>> Acesso em: 29/04/2023.
- [11] FLUKE **Software de termografia da Fluke.**“FLUKE”. Disponível em:<<https://www.fluke.com/pt-br/suporte/downloads-de-software/software-para-cameras-de-infravermelho-fluke.>> Acesso em: 29/04/2023.