

# MONITORAMENTO DA TEMPERATURA DE OPERAÇÃO EM MÓDULOS FOTOVOLTAICOS

**Ana Teresa Caldas Araripe** – anateresacaldas@alu.ufc.br

**Letícia de Oliveira Santos**

Universidade Federal do Ceará, Programa de Pós Graduação em Engenharia Elétrica

**José Janiere Silva de Souza**

Universidade Federal do Ceará, Programa de Pós Graduação em Engenharia Elétrica

**Cláudio Albuquerque Frate**

Universidade Federal do Ceará, Programa de Pós Graduação em Engenharia Elétrica

**Paulo Cesar Marques de Carvalho**

Universidade Federal do Ceará, Programa de Pós Graduação em Engenharia Elétrica

## 1.1. Recurso solar e meteorologia da radiação solar

**Resumo.** Um dos parâmetros que afetam a eficiência dos módulos fotovoltaico (FV) e, portanto, sua produção de eletricidade, é a sua temperatura de operação. O presente artigo se concentra no monitoramento da temperatura de módulos FV e na análise do comportamento térmico de uma planta FV em dias típicos de baixa, média e alta irradiação. Com base na literatura científica, foram identificados os tipos de sensores, os dispositivos de processamento e aquisição de dados, as influências da calibração, do isolamento e da impermeabilização. Após a revisão da literatura, foi implementado o sistema de monitoramento utilizando sensores do tipo DS18B20 e um sistema de baixo custo para aquisição e armazenamento de dados. A pesquisa permite a geração de dados para aplicação em pesquisas atuais e futuras que ocorrem em paralelo. O sistema foi validado com um teste termográfico e provou ser preciso após a análise. Os sensores se comportaram de forma semelhante e com maior variação entre as temperaturas dos módulos FV nos dias de média e baixa irradiação em comparação ao dia de alta irradiação devido à nebulosidade; todos apresentaram valores medidos com variação inferior a 1K. A porcentagem de falhas do sistema para os dias estudados foi de 1,02%.

**Palavras-chave:** Fotovoltaica, temperatura, monitoramento

## 1. INTRODUÇÃO

A demanda energética ao redor do mundo cresce em níveis acelerados e a necessidade de conversão de energia elétrica torna-se uma das principais preocupações da engenharia na atualidade. As fontes renováveis de energia se tornaram alvo de empresas e governos pelo mundo devido ao aumento do aquecimento global, dos preços do petróleo, entre vários outros fatores. De acordo com a Agência Internacional para as Energias Renováveis (IRENA), a capacidade global média do custo total instalado dos projetos FV comissionados em 2020 foi de USD 883/kW, valor 81% menor que em 2010 e 13% menor que em 2019 (IRENA, 2022). Isso mostra que a conversão fotovoltaica (FV) tem se tornado cada vez mais viável economicamente, entretanto é preciso verificar como alguns fatores influenciam na conversão.

A temperatura de operação dos módulos FV ( $T_m$ ) impacta a eficiência de conversão FV, e há diferentes maneiras de realizar esta medição. Ruviano *et al.* (2018) estudam a influência da temperatura através de dados já existentes e cálculo da perda de eficiência, comparando a conversão real, com as perdas relacionadas à temperatura e uma conversão estimada. Kipper e Gasparin (2022) buscam determinar os comportamentos em função da temperatura em um módulo de filme fino CIGS. De Souza, Cassini e Diniz (2020) buscam detectar pontos quentes a fim de evitar degradação de módulos FV. Os pontos quentes interferem na eficiência de conversão e podem até provocar chamas.

Diversos estudos utilizam modelos térmicos para estimar a temperatura de operação dos módulos FV (Santos, Carvalho, Filho, 2020). Busson *et al.* (2018) comparam as temperaturas de operação de módulos FV medidas no semiárido brasileiro, com temperaturas estimadas por meio de três modelos já estabelecidos na literatura. Através dos dados de temperatura ambiente, irradiação e velocidade do vento coletados no Laboratório de Energias Alternativas da Universidade Federal do Ceará (LEA – UFC), conclui-se que nenhuma das equações prevê o comportamento de temperatura real no local estudado adequadamente. Siqueira, Lima e Junior (2020) e Haeberle *et al.* (2022), realizam uma análise térmica utilizando dados experimentais para um balanço de energia a fim de estimar a temperatura de módulos FV. Também em um estudo baseado em um modelo de transferência de calor, Guimarães *et al.* (2022) analisam a queda de desempenho dos módulos FV devido à temperatura em telhados de edifícios residenciais.

Há também estudos que buscam estimar os valores de temperatura baseados em aprendizado de máquina. Campos, Martins e Rütther (2020) utilizam variáveis climáticas e irradiação entre outros, nos modelos k-Nearest Neighbors e redes neurais artificiais (RNA) do tipo perceptron multicamadas. Já Coutinho, Tiba e de Melo (2020), estimam essa temperatura utilizando uma RNA, a partir de variáveis meteorológicas e comparar os resultados com os da correlação de Skoplaki. É visto que há diferentes maneiras de se determinar a temperatura de operação de módulos FV, seja utilizando métodos

matemáticos, dados meteorológicos, computação, entre muitos outros; todos estes métodos necessitam de valores experimentais da temperatura dos módulos FV para validação. Além disso, o monitoramento em tempo real da temperatura de operação de uma planta FV contribui para a detecção de falhas (Dupont *et al.*, 2020). Diante do exposto, o presente artigo apresenta uma revisão da literatura, analisando métodos de monitoramento da temperatura de operação de módulos FV, assim como implementa um sistema monitoramento a partir de sensores instalados no LEA – UFC.

## 2. REVISÃO DA LITERATURA

O monitoramento da temperatura com a utilização de sensores apresenta grandes vantagens: possibilita o armazenamento e leitura de dados que podem contribuir para diversas linhas de estudo na área FV. Alguns exemplos são estudos de métodos de resfriamento FV, de módulos térmicos-FV, de detecção de falhas e condições não ideais de operação. Um estudo realizado no LEA – UFC teve como objetivo desenvolver um Sistema de Aquisição de Dados (SAD) de baixo custo para o monitoramento em tempo real da temperatura de operação de uma planta FV (Dupont *et al.*, 2020). A metodologia utiliza sensores de temperatura impermeáveis e isolados, do tipo DS18B20, para medir a temperatura de operação dos módulos. A calibração do equipamento foi realizada antes dos testes, utilizando outro tipo de sensor de temperatura (sensor pt100). Além disso, cada módulo foi analisado individualmente, tendo os dados processados por meio de uma placa *Raspberry pi*. O método utilizado é eficaz, tendo registrado com precisão as temperaturas de operação dos 12 módulos utilizados, nos dias monitorados as medições variaram desde 23,2°C, nos horários noturnos, até 58,3°C nos instantes com maior incidência de irradiação. Conclui-se que o monitoramento individual contribui para a detecção de falhas mais precisamente, além de conseguir afirmar que módulos de mesmo modelo e instalados próximos possuem valores de temperatura diferentes, pois as condições como um pequeno sombreamento ou a inclinação do módulo podem variar minimamente afetando o valor medido.

Piombini, Melo e Campos (2018) desenvolvem um aplicativo de celular para acompanhar de maneira prática e remota o monitoramento da temperatura e outros dados de módulos FV. O envio é realizado via rede sem fio, utilizando a plataforma Arduino e apenas um sensor impermeável do tipo probe NTC 10K. Não foi realizada calibração do sensor, o que pode levar a erros de leitura. Como resultado, o aplicativo conseguiu sucesso em todas as tentativas de recebimento das leituras realizadas pelos sensores e processadas pelo Arduino, tornando o método uma solução alternativa e acessível para realizar o monitoramento em módulos de pequena conversão, de maneira remota, com o uso de internet. Junior, Blasques e do Nascimento (2018) desenvolvem um sistema de monitoramento para estudar os efeitos da temperatura em dois casos distintos, utilizando 10 módulos de silício amorfo de 100 Wp cada e 4 módulos de silício policristalino de 250 Wp cada, ambos sistemas foram testados no mesmo local. Os sensores utilizados foram do tipo PT100, e houve a calibração de todo o sistema, utilizando termômetros e o processamento dos dados coletados foi realizado por uma placa do tipo pci. Os resultados demonstram os efeitos da temperatura de operação na conversão de um sistema em relação ao outro, tendo o sistema com módulos de silício amorfo apresentado uma produção de energia elétrica maior em todas as medições. Conclui-se que o *software* de monitoramento elaborado foi eficaz para o objetivo de comparação de eficiência entre os sistemas.

Um estudo realizado em Curitiba tem como objetivo monitorar a temperatura de módulos FV utilizando sensores de fibra óptica, visando acompanhar a diferença de temperatura (que pode chegar a 10°C) entre dois pontos no módulo (Kotinda; De Oliveira; Da Silva, 2018). Foi utilizada a rede *Bragg* de fibra óptica para o monitoramento, onde 20 sensores calibrados com banho térmico são colocados diretamente nas células de um único módulo em diversos pontos; um sensor mede a temperatura ambiente. As vantagens dos sensores de fibra óptica é que podem ser utilizados diretamente na superfície do módulo sem causar sombreamento significativo e o seu baixo custo. O sistema FBG (*Fiber Bragg Grating*) é eficaz e preciso, com erro de 0,05°C e possui boa resistência aos eventos climáticos devido ao seu tamanho.

Gomes *et al.* (2020) desenvolvem um sistema de monitoramento para a conversão FV barato, acessível para sistemas FV de pequeno porte e capaz de monitorar simultaneamente 6 variáveis (vento, chuva, tensão, corrente, irradiância e temperatura do módulo). Em relação ao monitoramento da temperatura, foi utilizado o sensor DS18B20, que possui uma capacidade de leitura na faixa entre -55°C a 125°C (Dallas Semiconductor Corp., 2000) com processamento dos dados realizado com o sistema Arduino e auxílio de um microcontrolador; não houve calibração dos sensores. Em relação à temperatura dos módulos, o erro entre valores de proposta e solução comercial são entre 0% e 8%. Conclui-se que o sistema proposto para o monitoramento de microgeração atende ao objetivo por ser de baixo custo, mais acessível e poder monitorar todas as variáveis, podendo ainda armazenar dados de 2.285 dias de medições, o que dispensa o uso de *wi-fi* constantemente.

O monitoramento de sistemas FV é extremamente necessário e deve estar em conformidade com o padrão de operação da rede elétrica de distribuição (Rodrigues Neto *et al.* 2020). No trabalho foi desenvolvido um sistema de monitoramento de tensão e corrente, irradiância e temperatura de operação da célula, visando avaliar a operação de um sistema FV conectado à rede. A medição de temperatura foi realizada de maneira individual para cada módulo, utilizando o sensor LM35DZ, totalizando 6 medições; os dados obtidos (processados pela plataforma Arduino) foram comparados a outros dados medidos através de termômetros e parâmetros matemáticos. Os resultados obtidos pelo método aplicado, quando comparados às outras medições, se mostraram satisfatórios, concluindo que o método é eficaz.

Campos, Martins e Rütther (2020) estimam os valores de temperatura baseados em variáveis climáticas e irradiação entre outros, utilizando *machine learning*, além de medir a temperatura através de sensores PT1000. Foram utilizados dois métodos de previsão no experimento (*k-Nearest Neighbors* e RNA do tipo *perceptron* multicamadas) para calcular

as temperaturas, treinados com 20% dos dados medidos e os 80% restantes experimentalmente. Os dados foram adquiridos por um *datalogger* CR1000, que está detalhado no artigo de Nascimento *et al.* (2018). Os resultados são comparados com os resultados obtidos pelo método de Ross. A principal conclusão é que os resultados do *machine learning* são bem precisos.

Carvalho *et al.* (2016) apresentam um protótipo de monitoramento de  $T_m$  em módulos FV utilizando o Arduino Mega 2560 para aquisição e processamento de dados. Os sensores de medição da temperatura não foram especificados no trabalho, porém o sistema e os sensores chegaram a ser calibrados utilizando termômetros. O protótipo consegue analisar e comparar dados de temperatura e irradiação, e suas influências entre si e na conversão de eletricidade. O Arduino é ideal para o projeto por ser de baixo custo e fácil programação, além de controlar o sistema, que também é conectado à rede. Dupont *et al.* (2016) propõem um monitoramento de temperatura nos módulos, aquisição de dados e armazenamento em nuvem. A estratégia possibilita um monitoramento e um controle de plantas de microgeração, com comunicação com um banco de dados *on-line*. Ademais, possibilita o uso de sensores tanto digitais quanto analógicos. O sensor de temperatura utilizado foi o LM35, que é impermeável, e os dados são processados com *Raspberry pi*. O experimento foi eficaz, pois o objetivo de propor uma solução online, remota e barata foi atingida; além disso, por funcionar através da nuvem, não há necessidade de desbloquear *firewalls*, tornando o uso mais democrático. Na Tab. 1 é apresentado um compilado das informações extraídas durante o processo de levantamento do estado da arte.

Tabela 1 – Resumo do estudo do estado da arte.

Autor	Tipo de sensor	Processamento de dados	Calibração	Método de calibração	Isolamento	Impermeável	Nº de sensores
Carvalho et al. 2016	-	Arduino Mega 2560	Sim	Termômetro digital mt455	Não	-	-
Dupont et al. 2016	LM35DZ	<i>Raspberry Pi</i>	Não	Dados do fabricante	Não	Sim	-
Junior et al. 2018	PT100	Placa PCI	Sim	Termômetro	Não	Sim	-
Kotinda et al. 2018	FBG	I_MON Ext Evaluation 4.0. vi; Excel	Sim	Banho térmico	Não	-	21
Piombini et al. 2018	Probe NTC 10K	Arduino Mega 2560	Não	Dados do fabricante	Não	Sim	1
Campos et al. 2020; Nascimento et al. 2018	PT1000	<i>Datalogger CR1000</i> (Fabricante Campbell)	Não	Dados do fabricante	Não	Sim	-
Dupont et al. 2020	DS18B20	<i>Raspberry Pi Zero W</i>	Sim	Sensor pt100	Sim	Sim	12
Gomes et al. 2020	DS18B20	Arduino; Microcontrolador ESP32	Não	Dados do fabricante	Não	Sim	1
Rodrigues Neto et al. 2020	LM35DZ	Arduino	Não	Dados do fabricante	Não	Sim	6

Diante do exposto, foi possível visualizar que diversos trabalhos na literatura propõem o monitoramento de sistemas FV, enfatizando a importância desse tipo de monitoramento. No geral, foram utilizados seis tipos de sensores de temperatura, com destaque para o DS18B20 e o LM35, ambos mencionados duas vezes. Quanto ao sistema de processamento de dados mais utilizado foi o Arduino, utilizado em quatro dos estudos previamente mencionados, seguido de *Raspberry Pi*, que aparece duas vezes e *pci*, bibliotecas de *excel* e *python* (uma vez cada). A calibração dos sensores foi realizada apenas em 44,4% das vezes, com métodos diversos; e em apenas um dos experimentos foi feito o isolamento dos sensores.

### 3. MATERIAIS E MÉTODOS

#### 3.1 Local de Trabalho

A planta FV analisada está localizada no Laboratório de Energias Alternativas (LEA) no Campus do Pici da UFC, Fortaleza (Fig. 1); denominada LEA-2, possui 12 módulos FV do modelo JKM330PP, cada um com 330 Wp, divididos em duas *strings* de 6 módulos cada, conectados em série, totalizando 3,9 kWp de potência instalada. As *strings* estão conectadas em paralelo a um inversor de modelo PHB5000D-NS.



Figura 1 – Plantas FV instaladas no LEA - UFC.

### 3.2 Sensores de Temperatura

O sensor escolhido para medir a temperatura dos módulos é o DS18B20. O sensor é impermeável, o que permite medições em ambientes úmidos e em períodos chuvosos. Este sensor tem precisão de  $\pm 0,5^\circ\text{C}$ , e mede temperaturas na faixa de  $-55^\circ\text{C}$  a  $+12^\circ\text{C}$ , segundo informações do fabricante (Dallas Semiconductor Corp., 2000). Este sensor atende a norma IEC 61724 que estabelece a precisão de no máximo 1K para sensores de monitoramento de temperatura de módulos FV. Além disso, o modelo permite a conexão de várias unidades em um único pino.

### 3.3 Calibração dos Sensores de Temperatura

A calibração dos sensores é uma etapa necessária no processo para atestar sua precisão e exatidão, pois apesar de apresentar confiabilidade nas medições, podem perder a calibragem devido a diversos fatores atrelados à fabricação ou desgaste durante o uso. O objetivo do protocolo experimental descrito na presente seção é testar os sensores DS18B20 a serem utilizados, com a finalidade de garantir que a acurácia esteja dentro dos limites estabelecidos. O processo pode ser realizado com imersões em misturas bifásicas de substâncias puras, com pontos de equilíbrio conhecidos, pois quando uma substância muda de estado, sua temperatura permanece constante. Os valores de referência das temperaturas são facilmente encontrados em tabelas, e podem ser medidos por termômetros, juntamente com os sensores durante o processo de calibração. A maioria dos sensores de temperatura são confiáveis e resistentes, pouco alterando o resultado de suas medições ao longo do tempo de uso. Entretanto, podem ficar sem calibragem devido a vazamentos durante o uso ou contaminação durante a fabricação e devem, portanto, ser verificados para atestar a confiança nas medições (Dunn, 2005).

Para a calibração foram utilizados os seguintes materiais: Sensores de temperatura do modelo DS18B20 à prova d'água; 1 controlador ESP 32; 1 resistor; *Jumpers*. Para a obtenção de temperaturas de referência, foram utilizados: Termômetro de mercúrio; Recipiente isolante com água a  $0^\circ\text{C}$ ; Recipiente com ebulidor e água a  $100^\circ\text{C}$ .

A calibração foi realizada com uso de um termômetro padrão de mercúrio, onde o termômetro e os sensores a serem calibrados são postos em banhos com temperaturas fixas e a medida do sensor é comparada com a medida do termômetro padrão (Bolton, 2015). O teste dos sensores foi realizado em duas temperaturas conhecidas: equilíbrio sólido/líquido da água ( $0^\circ\text{C}$ ) e equilíbrio líquido/gasoso ( $100^\circ\text{C}$ ). Os sensores a serem calibrados foram conectados ao microcontrolador ESP 32 para realizar a leitura dos sinais. Após os testes, os sensores que apresentaram valores maiores que a variação permitida (1K) nos testes foram separados e não foram utilizados no monitoramento. Os sensores que apresentaram erros máximos durante o experimento menor que 1K foram selecionados para serem utilizados. Na Fig. 2 são apresentadas as diferenças máximas entre a leitura dos 12 sensores utilizados e os valores de referência.

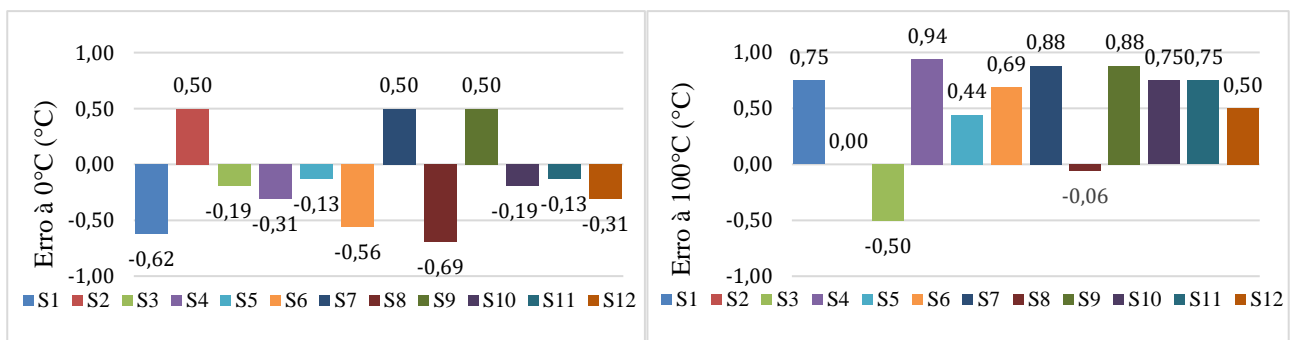


Figura 2 – Erro máximo dos sensores utilizados nas temperaturas de referência a  $0^\circ\text{C}$  e  $100^\circ\text{C}$ .

### 3.4 Isolamento e fixação

O isolamento dos sensores é fundamental para uma estimativa de temperatura eficiente, pois se apenas colar os mesmos no módulo, ocorre uma troca de calor com o ambiente, alterando a qualidade da medição. O isolamento limita o fluxo de calor, fazendo com que a medição seja mais próxima da realidade, segundo estudos da universidade de Genebra, que compara a medição em uma planta FV com e sem isolamento. Vários testes com tipos diferentes de isolamento foram realizados, e o mais adequado é cobrir o sensor com poliestireno com dimensões limitadas para que não interfira no funcionamento natural do módulo (PVSYST, 2017); este processo foi aplicado nos sensores utilizados na LEA2 para o monitoramento da temperatura de operação.

Como isolante térmico foi utilizado um tubo esponjoso de polietileno com recobrimento de uma película protetora UV (blindado). O tubo escolhido possui o diâmetro da parede de 10 mm e diâmetro interno de 6 mm, suficiente para acomodar e isolar o sensor. O isolante térmico oferece maior resistência mecânica e barreira de vapor contribuindo também para a preservação do sensor. A fim de evitar total contato com o ar ambiente, e garantir uma boa fixação, o espaço no interior do tubo não ocupado pelo sensor foi preenchido com silicone adesivo de altas temperaturas. Por fim, foi aplicada uma camada de pasta térmica entre o sensor e a superfície do módulo, para garantir o bom contato térmico. O esquema de isolamento do sensor é demonstrado na Fig. 3.

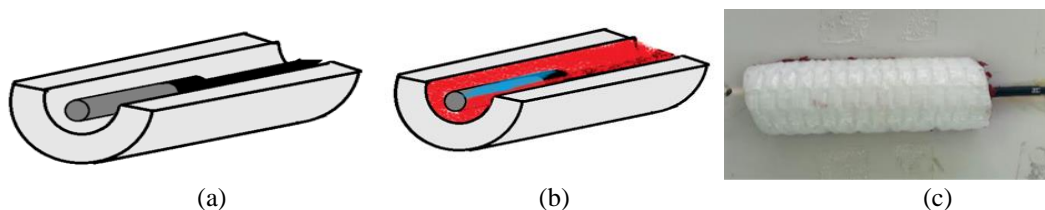


Figura 3 – Isolamento e fixação dos sensores: (a) sensor com a camada de isolamento; (b) sensor com o silicone térmico (vermelho) e pasta térmica (azul); e (c) sensor acoplado ao módulo FV.

### 3.5 Monitoramento

Para monitoramento de  $T_m$ , foi definido uma amostra de 12 pontos, no centro dos 12 módulos da planta LEA2. Os 12 sensores DS18B20 foram testados com relação a calibração e em seguida instalados com a aplicação de pasta térmica para garantir o contato térmico e isolamento em relação ao ambiente, para medir unicamente a temperatura do módulo. Para coleta de dados foi utilizado um microcontrolador ESP 32 utilizando o protocolo *One Wire*, que permite a leitura de todos os sensores utilizando um único pino. O intervalo de coleta de dados é a cada um minuto, após a leitura dos valores de temperatura os mesmos são transmitidos via *wi-fi* para a plataforma em nuvem. Os dados obtidos foram comparados com resultados obtidos por um estudo termográfico. O esquema de monitoramento está representado na Fig. 4. A validação dos dados de temperatura foi realizada através de um ensaio termográfico. A termografia é utilizada na avaliação de módulos FV, como uma maneira de identificar falhas ou defeitos e é uma maneira alternativa de medir a temperatura (Garcia *et al.*, 2012).

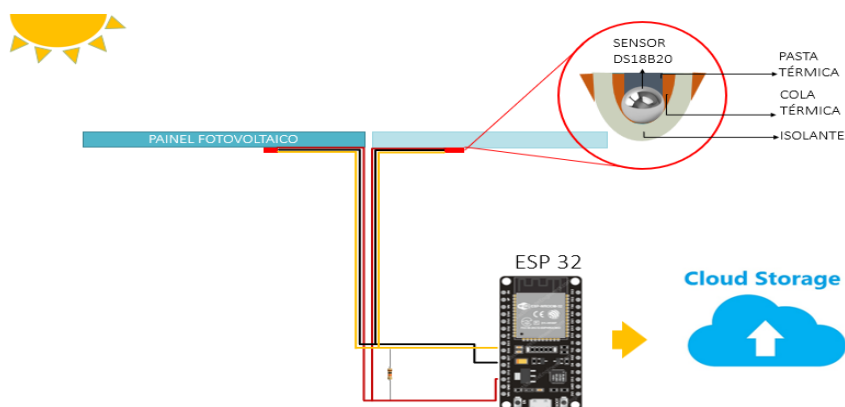


Figura 4 – Esquema de monitoramento dos módulos FV.

## 4. RESULTADOS

Após a instalação do sistema de monitoramento nos módulos FV, deu-se início à coleta dos dados de temperatura em dezembro de 2022. Para análise dos resultados, selecionou-se o mês de março de 2023. O critério de classificação dos

dias foi: dias com valores de irradiação até 200 W/m<sup>2</sup> são de baixa irradiação, dias com valores de irradiação até 600 W/m<sup>2</sup> são de média irradiação e dias com valores que ultrapassem a irradiação média são de alta irradiação. Tais dados foram medidos a cada hora por um piranômetro localizado ao lado dos módulos e estão apresentados na Fig. 5. Como esperado, o período de maior irradiação nos três dias foi entre 10:00 h e 15:00 h.

Após a escolha dos dias, deu-se início ao estudo do comportamento da temperatura de operação nos módulos, um parâmetro que é importante para o desempenho dos mesmos e para prever com maior precisão a conversão de energia elétrica (Dupont *et al.*, 2020).

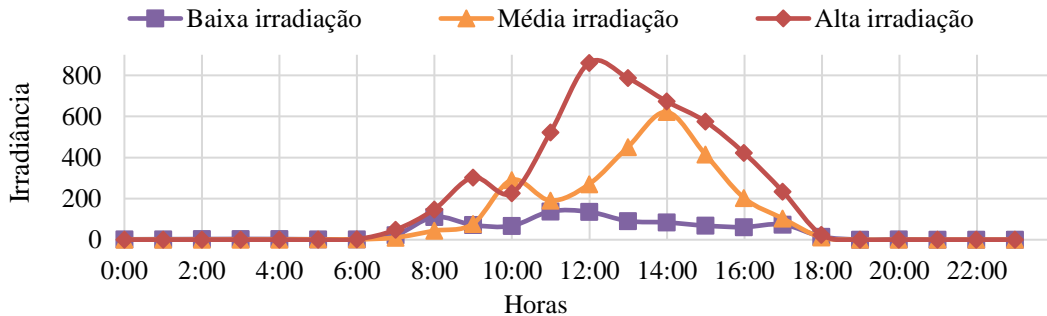


Figura 5 – Irradiação nos dias escolhidos

#### 4.1 Comportamento da temperatura no dia de alta irradiação

O dia de maior irradiação escolhido foi 11/03. Na Fig. 6 é apresentada a temperatura medida pelos 12 sensores instalados na planta LEA 2. Todos os sensores apresentam comportamento semelhante, o que significa que há pouca imprecisão ao compará-los. Como esperado, as temperaturas mais altas são alcançadas no período entre 10:00 h e 15:00 h, o que coincide com o período de alta irradiação verificado na Fig. 5. Durante os períodos do dia sem irradiação, a temperatura dos módulos se manteve aproximadamente constante, próxima dos 24 °C. A maior temperatura registrada no dia é de 68,31 °C, registrada pelo sensor t11 às 11:48h, como visto no resumo apresentado na Tab. 2.

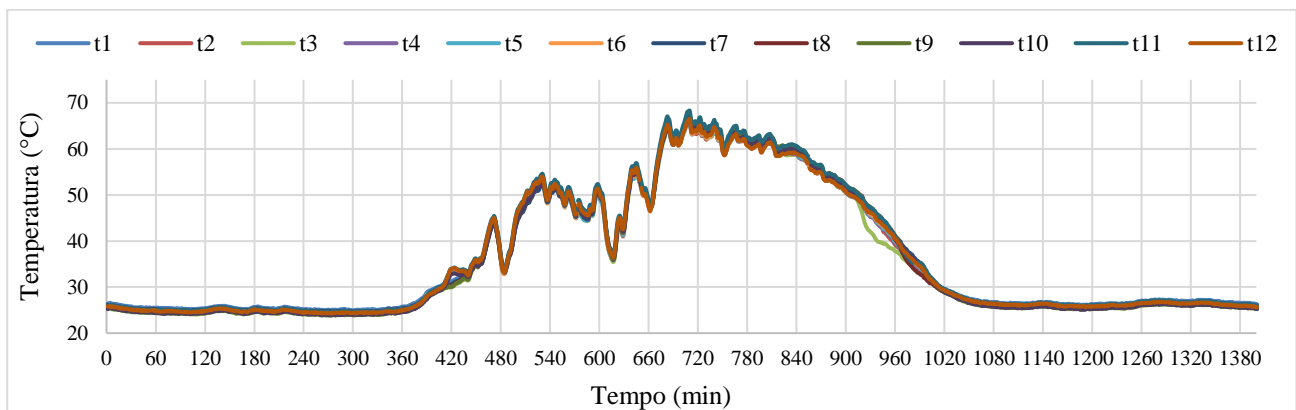


Figura 6 – Temperatura dos módulos no dia de maior irradiação

Tabela 2 – Resumo das temperaturas medidas no dia de maior irradiação

	t1(°C)	t2(°C)	t3(°C)	t4(°C)	t5(°C)	t6(°C)	t7(°C)	t8(°C)	t9(°C)	t10(°C)	t11(°C)	t12(°C)
máximo	66,62	65,88	66,06	66,56	66,19	66,56	66,31	67,31	67,50	66,75	68,31	66,44
mínimo	24,88	24,25	23,75	24,25	24,31	24,19	24,62	24,12	23,88	23,88	24,50	24,25
média	38,96	38,55	37,82	38,38	38,55	38,45	38,87	38,67	38,78	38,51	39,26	38,42

#### 4.2 Comportamento da temperatura no dia de média irradiação

Conforme Fig. 7, no dia 29/03, o comportamento dos 12 sensores também se mostrou semelhante, assim como no dia de alta irradiação, entretanto, há uma maior diferença entre as leituras, o que pode ser explicado pela maior nebulosidade em dias de menor irradiação. Nos períodos de 00:00 hr a 05:59 hr e 18:00 hr e 23:59 hr, caracterizados pela ausência de irradiação, a T<sub>m</sub> se manteve aproximadamente constante e próxima de 21 °C. A maior temperatura foi registrada pelo sensor t11, às 13:31hr no valor de 63,50 °C, como visto a seguir na Tab. 3.

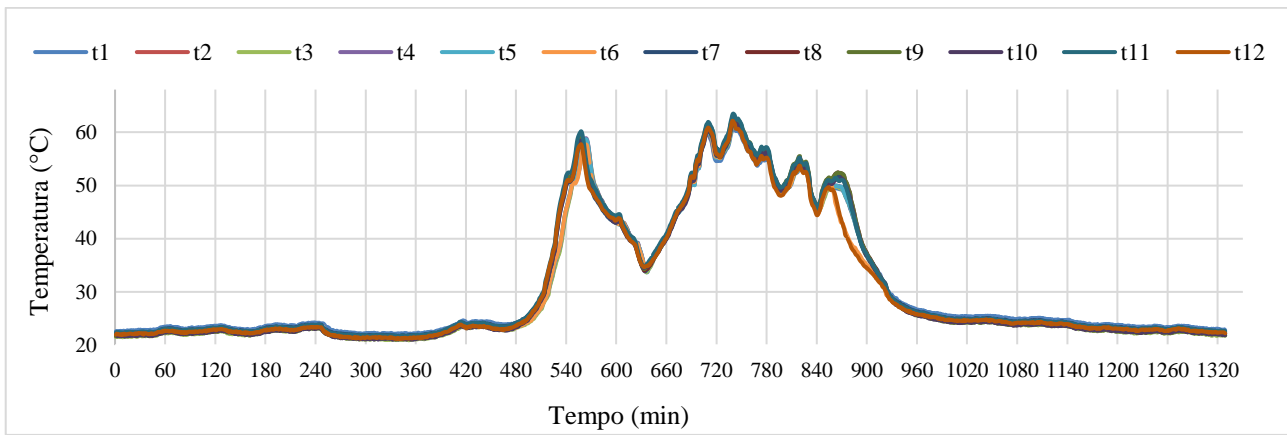


Figura 7 - Temperatura dos módulos no dia de média irradiação

Tabela 3 – Resumo das temperaturas medidas no dia de média irradiação

	t1(°C)	t2(°C)	t3(°C)	t4(°C)	t5(°C)	t6(°C)	t7(°C)	t8(°C)	t9(°C)	t10(°C)	t11(°C)	t12(°C)
máximo	61,00	61,56	61,62	62,19	62,06	62,38	61,81	62,62	63,12	62,06	63,50	62,12
mínimo	22,06	21,38	20,94	21,38	21,44	21,19	21,69	21,31	21,06	21,06	21,62	21,19
média	31,08	30,72	30,39	30,74	30,75	30,49	31,04	30,92	30,86	30,64	31,29	30,54

### 4.3 Comportamento da temperatura no dia de baixa irradiação

Conforme apresentado na Fig. 8, durante o dia 14/03 a variação de temperatura não foi alta; os valores máximos e mínimos foram relativamente próximos, devido ao baixo valor de irradiação durante o período entre 06:00 h e 18:00 h. A divergência entre os sensores pode ser explicada pelo mesmo motivo do dia 29/03, a presença de nuvens, que é mais constante em dias de baixa irradiação. O valor máximo de temperatura medido no dia foi de 30,56 °C, pelo sensor t11 às 08:57 h. Os valores mínimos também foram aproximadamente constantes neste cenário, por volta de 22 °C. Um resumo das temperaturas máximas, mínimas e médias medidas pelos sensores pode ser visto na Tab. 4.

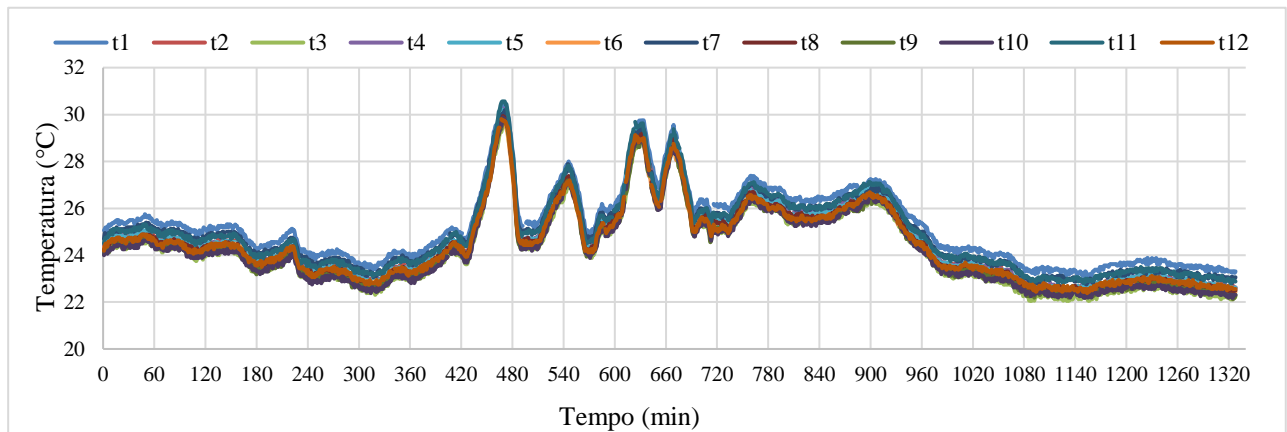


Figura 8 – Temperatura dos módulos no dia de menor irradiação

Tabela 4 – Resumo das temperaturas medidas no dia de menor irradiação

	t1(°C)	t2(°C)	t3(°C)	t4(°C)	t5(°C)	t6(°C)	t7(°C)	t8(°C)	t9(°C)	t10(°C)	t11(°C)	t12(°C)
máximo	30,44	30,19	29,69	30,25	30,19	29,69	30,19	29,94	29,81	29,88	30,56	29,81
mínimo	23,12	22,44	22,06	22,44	22,44	22,31	22,75	22,38	22,12	22,19	22,81	22,38
média	24,61	24,55	24,55	24,58	24,57	24,56	24,58	24,51	24,51	24,57	24,73	24,53

### 4.4 Resumo dos dias analisados

Ao comparar as medições nos três dias estudados no LEA – UFC em Fortaleza, é verificada pouca variação nos valores de  $T_m$  durante os períodos sem irradiação (noite), entre 20,94°C e 24,88°C, o que é próximo da temperatura ambiente para o horário. A temperatura variou de 23,75 °C a 68,31 °C no dia 11/03, 20,94 °C a 63,50 °C no dia 29/03 e 22,06 °C a 30,56 °C no dia 14/03, de alta, média e baixa irradiação respectivamente.

Para módulos FV instalados relativamente próximos e com mesma inclinação há uma pequena diferença na temperatura medida em cada sensor, que pode se dar por pequenos sombreamentos causados por nuvens ou dejetos de animais, e o acúmulo de sujeira. A variação de  $T_m$  entre os 12 sensores foi calculada através do desvio padrão. A Tab. 5 mostra um resumo dos cálculos realizados.

Tabela 5 – Variação nas temperaturas máximas e mínimas medidas em cada sensor

11/03 (Tmax)	11/03 (Tmin)	29/03 (Tmax)	29/03 (Tmin)	14/03 (Tmax)	14/03 (Tmin)
0,688 °C	0,322 °C	0,682 °C	0,315 °C	0,290 °C	0,306 °C

Nos dias estudados, houve uma média de 16068 medições por dia, considerando os 12 sensores, temos que cada sensor teve em média 1339 medições por dia, durante 24 horas. A média de falhas considerando os três dias foi calculada considerando o número de vezes que o sistema não esteve online, e a média para os três dias foi de 164 medições. Com isso, a porcentagem de falhas do sistema para os dias estudados foi de 1,02%.

#### 4.5 Validação dos dados

Um ensaio termográfico realizado na planta FV LEA 2 e que serviu para a validação dos dados medidos com os sensores DS18B20 ocorreu no dia 07/06 período entre 13:30hr e 14:00hr; a câmera utilizada para captura de imagens é do modelo Termovisor InfraCam SD. De acordo com o manual do fabricante (Flir Systems, 2007) o equipamento pode operar na faixa de temperatura entre -10 °C e 350 °C e possui precisão de 2%. Na Fig. 9 são mostrados os resultados obtidos no estudo termográfico em comparação com as temperaturas medidas pelos sensores no mesmo dia e horário.

Comparando com as temperaturas medidas pelos sensores no mesmo horário do dia, é possível ver que os dados de estão bem próximos e com variação menor que 1K, o que validou os dados experimentais. As pequenas variações entre os dois podem ser explicadas por fatores como o local de cada medição (embaixo do módulo para os sensores e acima para a câmera) e pela presença de vidro e das condições ambientais, que não são levados em consideração pois os sensores estão isolados.

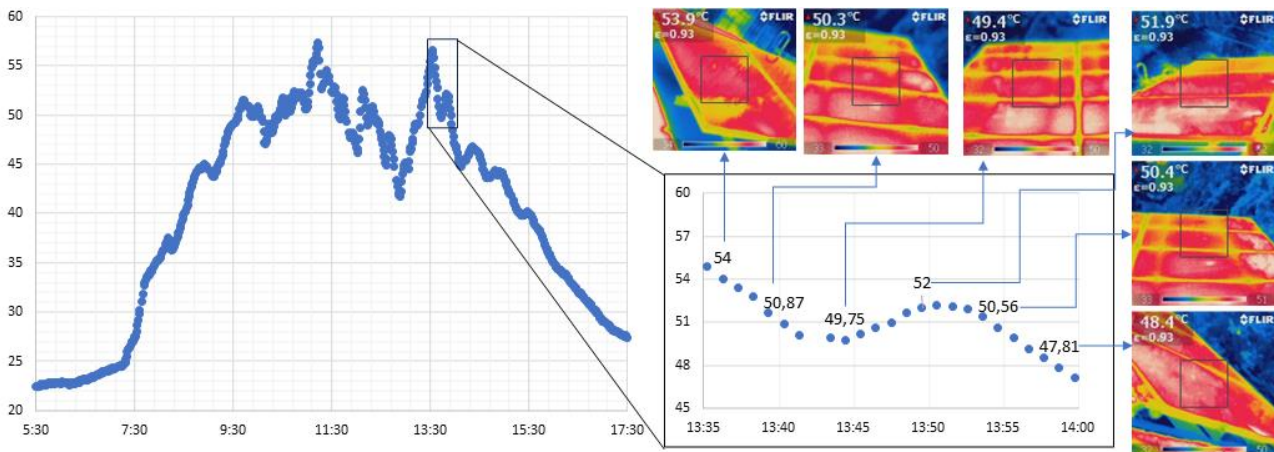


Figura 9 – Imagens do estudo termográfico

#### 4. CONCLUSÃO

A temperatura de operação dos módulos FV é um parâmetro importante a ser monitorado, possibilitando acompanhar o comportamento dos módulos FV e possíveis falhas. O presente artigo tem como objetivo implementar e analisar a performance de um sistema de monitoramento da temperatura de módulos FV instalados no LEA – UFC e uma revisão da literatura atualizada na área de monitoramento da temperatura FV. Entre as melhorias realizadas após a análise estão a recalibração e o isolamento dos sensores, os dois parâmetros visam a diminuição de erros nas medições e não são realizados na maioria dos sistemas como constatado na revisão de literatura. Conclui-se que o sistema é adequado para uso em pesquisas e foi comprovado através da validação realizada com termografia que a variação entre os dois métodos de medição é inferior a 1K, o que prova a acurácia do monitoramento.

Com a análise dos gráficos dispostos nas Fig. 7, 8 e 9, é possível ver que a variação entre as temperaturas de operação dos módulos FV é menor no dia de maior irradiação e maior no dia de menor irradiação. Isto se dá devido à menor constância de incidência dos raios do sol por causa da presença de nuvens, e assim o módulo não apresenta uma distribuição de temperatura tão uniforme como no dia de maior irradiação. Por fim, é visto que em alguns momentos os sensores podem ficar *offline*, isto se dá devido à conexão *wi-fi* apresentar instabilidades. O sistema apresentou em média



1,02% de falhas. A falha, mesmo que mínima, afeta o resultado, aumentando o erro e a imprecisão no sistema de medição por sensores. Outras redes de armazenamento que não utilizem o *wi-fi* são uma alternativa para diminuir esse problema.

### Agradecimentos

Ana Teresa Caldas Araripe, agradece ao CNPq pela bolsa de iniciação científica. Leticia de Oliveira Santos, agradece a Fundação Cearense de Apoio ao Desenvolvimento Científico e Tecnológico (FUNCAP) pelo apoio nos termos da Instrução Normativa Nº 04/2019. Claudio Albuquerque Frate, agradece a FUNCAP pelo apoio da bolsa de pós doutorado PD2-0175- 00351.03.01/20, Edital 03/2020. Paulo Cesar Marques de Carvalho, agradece ao CNPq pela bolsa de produtividade em pesquisa.

### REFERÊNCIAS

- Bolton, William. *Mechatronics: Electronic Control Systems in Mechanical and Electrical Engineering*. 6. Ed. Pearson, 2015
- Busson, B. De O. Validação de modelos de comportamento térmico de painéis fotovoltaicos para o semiárido brasileiro. *Anais CBENS 2018*. Anais... In: VII CONGRESSO BRASILEIRO DE ENERGIA SOLAR. Gramado - RS: Congresso Brasileiro de Energia Solar, 1 dez. 2018. Disponível em: <<https://anaiscbens.emnuvens.com.br/cbens/article/view/385>>. Acesso em: 3 jan. 2023
- Campos, R. A.; Martins, G. L.; Rütther, R. Aplicação de machine learning para a previsão de temperatura de módulos solares fotovoltaicos. *Anais CBENS 2020*. Anais... In: VIII CONGRESSO BRASILEIRO DE ENERGIA SOLAR. 2020. Disponível em: <<https://anaiscbens.emnuvens.com.br/cbens/article/view/877>>. Acesso em: 3 jan. 2023
- Carvalho, L. H. L. et al. Desenvolvimento de um sistema de monitoração para avaliação de desempenho operacional de um sistema fotovoltaico conectado à rede de baixa tensão. *Anais CBENS 2016*. Anais... In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENERGIA SOLAR. Congresso Brasileiro de Energia Solar, 2016. Disponível em: <<https://anaiscbens.emnuvens.com.br/cbens/article/view/1912>>. Acesso em: 30 out. 2023
- Coutinho, F. A. De B.; Tiba, C.; De Melo, R. O. Modelagem da temperatura de módulo fotovoltaico com rede neural artificial. *Anais CBENS 2020*. Anais... In: VIII CONGRESSO BRASILEIRO DE ENERGIA SOLAR. 2020. Disponível em: <<https://anaiscbens.emnuvens.com.br/cbens/article/view/863>>. Acesso em: 3 jan. 2023
- Dallas Semiconductor Corp. Programmable Resolution 1-Wire Digital Thermometer. [s.l.: s.n.]. Disponível em: <<https://dlnmh9ip6v2uc.cloudfront.net/datasheets/Sensors/Temp/DS18B20.pdf>>. Acesso em: 9 ago. 2023.
- Dunn, William C. *Fundamentals of Industrial Instrumentation and Process Control*. 1. Ed. McGraw-Hill, 2005.
- Dupont, I. M. et al. Monitoramento em tempo real de temperatura de operação de uma planta FV. *Anais CBENS 2020*. Anais... In: VIII CONGRESSO BRASILEIRO DE ENERGIA SOLAR. 2020. Disponível em: <<https://anaiscbens.emnuvens.com.br/cbens/article/view/897>>. Acesso em: 3 jan. 2023
- Dupont, I. M. et al. Sistema embarcado linux aplicado ao monitoramento em nuvem de planta de microgeração fotovoltaica. *Anais CBENS 2016*. Anais... In: VI CONGRESSO BRASILEIRO DE ENERGIA SOLAR. 2016. Disponível em: <<https://anaiscbens.emnuvens.com.br/cbens/article/view/1285>>. Acesso em: 3 jan. 2023
- Flir Systems. *InfraCAM SD Thermal Imager*. [s.l.: s.n.]. Disponível em: <[https://www.instrumart.com/assets/InfraCAMSD\\_datasheet.pdf](https://www.instrumart.com/assets/InfraCAMSD_datasheet.pdf)>. Acesso em: 8 out. 2023.
- Garcia, S. B. et al. Análise por Termografia De Módulos Fotovoltaicos com Células Solares com Base N e Diferentes Malhas de Metalização Posterior. set. 2012.
- Gomes, G. C. et al. Sistema de baixo custo para o monitoramento climático e de geração de mini e microgeração fotovoltaica. *Anais CBENS 2020*. Anais... In: VIII CONGRESSO BRASILEIRO DE ENERGIA SOLAR. 2020. Disponível em: <<https://anaiscbens.emnuvens.com.br/cbens/article/view/770>>. Acesso em: 3 jan. 2023
- Guimarães, B. De S. et al. Modelagem de temperatura do gerador fotovoltaico montado sobre telhados residenciais, com base em materiais de cobertura comuns no brasil. *Anais CBENS 2022*. Anais... In: VIX CONGRESSO BRASILEIRO DE ENERGIA SOLAR. 16 ago. 2022. Disponível em: <<https://anaiscbens.emnuvens.com.br/cbens/article/view/1098>>. Acesso em: 3 jan. 2023
- Haerberle, F. et al. Estimativa da temperatura do módulo fv a partir de um modelo de balanço de energia. *Anais CBENS 2022*. Anais... In: VIX CONGRESSO BRASILEIRO DE ENERGIA SOLAR. 16 ago. 2022. Disponível em: <<https://anaiscbens.emnuvens.com.br/cbens/article/view/1122>>. Acesso em: 3 jan. 2023
- IRENA. *Renewable Technology Innovation Indicators: Mapping progress in costs, patents and standards*. [s.l.: s.n.]. Disponível em: <[https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2022/Mar/IRENA\\_Tech\\_Innovation\\_Indicators\\_2022\\_](https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2022/Mar/IRENA_Tech_Innovation_Indicators_2022_)>. Acesso em: 9 ago. 2023.
- Junior, L. R. T.; Blasques, L.; Do Nascimento, A. C. Desenvolvimento de um sistema de monitoração para análise comparativa de dois sistemas fotovoltaicos conectados à rede com diferentes configurações. *Anais CBENS 2018*. Anais... In: VII CONGRESSO BRASILEIRO DE ENERGIA SOLAR. 1 dez. 2018. Disponível em: <<https://anaiscbens.emnuvens.com.br/cbens/article/view/199>>. Acesso em: 3 jan. 2023
- Kipper, F. D.; Gasparin, F. P. Efeitos da estabilização por light soaking e determinação dos coeficientes térmicos para diversas irradiâncias de um módulo fotovoltaico cigs. *Anais CBENS 2022*. Anais... In: VIX CONGRESSO BRASILEIRO DE ENERGIA SOLAR. Florianópolis - SC: Congresso Brasileiro de Energia Solar, 16 ago. 2022. Disponível em: <<https://anaiscbens.emnuvens.com.br/cbens/article/view/1081>>. Acesso em: 2 jan. 2023
- Kotinda, C. H. P.; De Oliveira, V.; Da Silva, J. C. C. Monitoramento térmico de painel fotovoltaico utilizando redes de bragg em fibra óptica. *Anais CBENS 2018*. Anais... In: VII CONGRESSO BRASILEIRO DE ENERGIA SOLAR. 1 dez. 2018. Disponível em: <<https://anaiscbens.emnuvens.com.br/cbens/article/view/213>>. Acesso em: 3 jan. 2023
- Piombini, E. S.; Melo, W. W. M.; Campos, G. A. Do P. Aplicativo android para monitoramento remoto de módulos fotovoltaicos. *Anais CBENS 2018*. Anais... In: VII CONGRESSO BRASILEIRO DE ENERGIA SOLAR. 1 dez. 2018. Disponível em: <<https://anaiscbens.emnuvens.com.br/cbens/article/view/189>>. Acesso em: 3 jan. 2023

- PVSYST. Cell temperature or back-of-module temperature. 2017. Disponível em: <<https://forum.pvsyst.com/topic/1420-cell-temperature-or-back-of-module-temperature/>>. Acesso em: 20 de jun. de 2021
- Rodrigues Neto, J. A. et al. Sistemas de monitoração de parâmetros elétricos e solarimétricos para a avaliação operacional de sistemas fotovoltaicos conectados à rede. Anais CBENS 2020. Anais... In: VIII CONGRESSO BRASILEIRO DE ENERGIA SOLAR. 2020. Disponível em: <<https://anaiscbens.emnuvens.com.br/cbens/article/view/904>>. Acesso em: 3 jan. 2020
- Ruviaro, R. S. et al. Análise da variação da eficiência do módulo fotovoltaico em função da temperatura. Anais CBENS 2018. Anais... In: VII CONGRESSO BRASILEIRO DE ENERGIA SOLAR. Gramado - RS: Congresso Brasileiro de Energia Solar, 1 jan. 2018. Disponível em: <<https://anaiscbens.emnuvens.com.br/cbens/article/view/29>>. Acesso em: 8 out. 2023
- Santos, L. De O.; Carvalho, P. C. M. De; Filho, C. De O. C. Photovoltaic Cell Operating Temperature Models: A Review of Correlations and Parameters, no IEEE Journal of Photovoltaics, vol. 12, no. 1, pp. 179-190, Jan. 2022, doi: 10.1109/JPHOTOV.2021.3113156.
- Siqueira, M. B. B.; Lima, A. M. C.; Junior, A. B. Balanço térmico de painel fotovoltaico – um estudo experimental. Anais CBENS 2020. Anais... In: VIII CONGRESSO BRASILEIRO DE ENERGIA SOLAR. 2020. Disponível em: <<https://anaiscbens.emnuvens.com.br/cbens/article/view/818>>. Acesso em: 3 jan. 2023
- Souza, F. R. De; Cassini, D. A.; Diniz, A. S. A. C. Desenvolvimento de um código computacional capaz de detectar pontos quentes em módulos fotovoltaicos em operação usando imageamento termográfico. Anais CBENS 2020. Anais... In: VIII CONGRESSO BRASILEIRO DE ENERGIA SOLAR. 2020. Disponível em: <<https://anaiscbens.emnuvens.com.br/cbens/article/view/884>>. Acesso em: 2 jan. 2023

## MONITORING THE OPERATING TEMPERATURE OF PHOTOVOLTAIC MODULES

**Abstract.** *One of the parameters that affects the efficiency of the photovoltaic (PV) modules, and therefore its power output, is its module operating temperature. This study focuses on monitoring the module temperature and studying the thermal behavior of a PV plant in three typical days: low, medium and high radiation. Based on gathering information from existing scientific literature, we identified types of sensors, data processing and acquisition devices, influences of calibration, isolation and waterproofing. After the literature was reviewed, the monitoring system was implemented, using DS18B20 type sensors and a low-cost system for data acquisition and storage. The research enables the generation of data for application in current and future research taking place in parallel at the laboratory. The system was validated with a thermographic test and proved to be accurate after analysis. The sensors behaved similarly and with lower precision on medium and low radiation days compared to high radiation days due to cloudiness; all showed measured values with a variation of less than 1K. The percentage of system failures for the days studied was 1.02%.*

**Keywords:** *Photovoltaic, temperature, monitoring*