

MONITORAMENTO EM TEMPO REAL DE TEMPERATURA DE OPERAÇÃO DE UMA PLANTA FV

Ivonne Montero Dupont (UFC) - ivonne.mdupont@gmail.com

Danielly Norberto Araujo (UFC) - danielly.araujo@ee.ufcg.edu.br

Alice Santana Passos Teles (UFC) - liceteless@gmail.com

PAULO C. M. CARVALHO (UFC) - carvalho@dee.ufc.br

Sandro César Silveira Jucá (IFCE) - sandrojuca@ifce.edu.br

Resumo:

O presente artigo tem 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 fotovoltaica (FV) conectada à rede elétrica instalada nas dependências do Laboratório de Energias Alternativas (LEA) da Universidade Federal do Ceará (UFC). O sensor digital modelo DS18B20 em conjunto com o protocolo de comunicação One-Wire foram selecionados para acompanhar a temperatura de operação de cada módulo que compõe a planta FV estudada. Como mestre da rede de comunicação One-Wire implementada, foi usada uma placa Raspberry Pi Zero W com o objetivo de gerenciar e controlar os múltiplos dispositivos conectados. Após o processo de calibração dos sensores de temperatura, os Coeficientes de Determinação obtidos variaram entre 98,99% e 99,91%, demonstrando uma boa correlação entre os valores de temperatura corrigidos pelas equações de ajuste dos sensores e os valores de temperatura medidos pelo sensor de referência.

Palavras-chave: *monitoramento, temperatura de operação, tempo real*

Área temática: *Conversão Fotovoltaica*

Subárea temática: *Controle e monitoramento de sistemas fotovoltaicos*

MONITORAMENTO EM TEMPO REAL DE TEMPERATURA DE OPERAÇÃO DE UMA PLANTA FV

Ivonne Montero Dupont - ivonne.mdupont@dee.ufc.br

Danielly Norberto Araújo - danielly.araujo@ee.ufcg.edu.br

Alice Santana Passos Teles – liceteless@gmail.com

Paulo Cesar Marques de Carvalho - carvalho@dee.ufc.br

Universidade Federal do Ceará, Departamento de Engenharia Elétrica, Laboratório de Energias Alternativas (LEA)

Sandro César Jucá - sandrojuca@ifce.edu.br

Instituto Federal do Ceará Campus Maracanaú, Laboratório de Eletrônica e Sistemas Embarcados (LAESE)

Resumo. O presente artigo tem 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 fotovoltaica (FV) conectada à rede elétrica instalada nas dependências do Laboratório de Energias Alternativas (LEA) da Universidade Federal do Ceará (UFC). O sensor digital modelo DS18B20 em conjunto com o protocolo de comunicação One-Wire foram selecionados para acompanhar a temperatura de operação de cada módulo que compõe a planta FV estudada. Como mestre da rede de comunicação One-Wire implementada, foi usada uma placa Raspberry Pi Zero W com o objetivo de gerenciar e controlar os múltiplos dispositivos conectados. Após o processo de calibração dos sensores de temperatura, os Coeficientes de Determinação obtidos variaram entre 98,99% e 99,91%, demonstrando uma boa correlação entre os valores de temperatura corrigidos pelas equações de ajuste dos sensores e os valores de temperatura medidos pelo sensor de referência.

Palavras-chave: monitoramento, temperatura de operação, tempo real.

1. INTRODUÇÃO

O uso de fontes energéticas poluentes para atender a crescente demanda mundial de eletricidade impacta diretamente o meio ambiente afetando a presente e as futuras gerações (Tsuruda, Mendes, e Silveira 2017). A análise deste impacto além da crise energética atual tem contribuído para o desenvolvimento de estudos e pesquisas para a diversidade da matriz energética mundial, implantando fontes energéticas alternativas e renováveis. Pesquisas ressaltando a realidade do aquecimento global apenas destacam a importância do uso de fontes renováveis e não poluentes (Zago, 2018).

Embora o território brasileiro apresente diferenças climáticas e ambientais, a irradiação solar global é razoavelmente uniforme. No clima semiárido da região Nordeste - onde há a menor média anual de cobertura de nuvens do país -, tem sido reportado um valor máximo diário de 7 kWh/m² Busson *et al.* (2018). Especificamente a cidade de Fortaleza/CE apresenta média diária de irradiação global de aproximadamente 5,5 kWh/m²/dia Pereira *et al.* (2018). Apesar do grande potencial de geração fotovoltaica (FV) que apresenta o semiárido brasileiro, as altas temperaturas que os módulos FV podem alcançar, podem comprometer o desempenho da geração de eletricidade. Pesquisas demonstram que os módulos FV podem atingir temperaturas máximas de 60°C ao meio-dia em dias ensolarados Sacramento *et al.* (2015).

A capacidade de geração dos módulos FV é influenciada por diversos fatores que afetam seu desempenho, e.g., localização geográfica, temperatura ambiente e de operação, velocidade do vento, irradiação solar incidente, orientação, disposição e inclinação dos módulos, entre outros. Estes podem ser tanto de origem elétrica e intrínseca das tecnologias utilizadas, como também da manutenção e cuidado da instalação. No entanto, a temperatura de operação dos módulos FV é um dos parâmetros mais importantes na avaliação de desempenho, da eficiência de conversão e da vida útil dos módulos em longo prazo Martín-Martínez *et al.* (2019). Observa-se então a necessidade do monitoramento individual dos módulos FV para uma análise mais precisa e detalhada e para facilidade no diagnóstico e detecção de falhas.

Em virtude da importância dos sistemas de monitoramento e aquisição de dados (SAD) para avaliar a geração de energia elétrica sob condições reais de operação, o presente artigo apresenta o desenvolvimento de um SAD de baixo custo para monitoramento em tempo real da temperatura de operação de uma planta FV conectada à rede elétrica.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Local do trabalho

A planta FV analisada está instalada nas dependências do Laboratório de Energias Alternativas (LEA) da Universidade Federal do Ceará (UFC), que tem parceria com o Núcleo de Ensino e Pesquisa em Agricultura Urbana (NEPAU) do Centro de Ciências Agrárias (CCA) da UFC. A Fig. 1a mostra a planta FV instalada no LEA-UFC,

composta por 12 módulos FV modelo JKM330PP de 330 Wp cada um, divididos em 2 *strings* de 6 módulos conectados em série que por vez estão conectadas em paralelo no inversor PHB5000D-NS mostrado na Fig. 1b, totalizando uma capacidade instalada de 3,9 kWp. Os dados técnicos do módulo FV utilizado são apresentados na Tab. 1. A planta FV está localizada em ambiente urbano próximo a uma avenida de grande movimentação em Fortaleza e cercada por abundante vegetação.

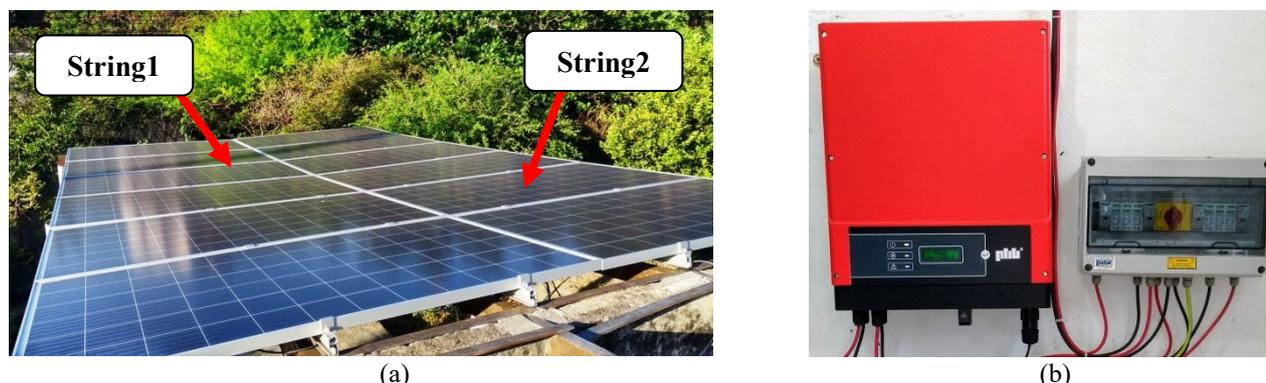


Figura 1 – (a) Planta FV (b) Inversor PHB5000D-NS instalada no LEA-UFC.

Tabela 1 - Especificações do módulo JKM330PP

Potência no MPP (P _{mpp})	330 Wp
Tensão no MPP (V _{mpp})	37,80 V
Corrente no MPP (I _{mpp})	8,74 A
Tensão de circuito aberto (V _{oc})	46,90 V
Corrente de curto circuito (I _{sc})	9,14 A
Eficiência do módulo (%)	17,01%
Dimensões do módulo	1956×992×40mm
Número de células	72

2.2 Transmissão de dados em uma rede *One-Wire*

Uma rede *One-Wire* é uma rede de transmissão de dados que permite a comunicação digital entre mestres e escravos. Entende-se por mestre, o componente capaz de coordenar e supervisionar a transmissão de dados, e.g. um computador. Por escravo, concebe-se o elemento endereçado e comandado pelo mestre, e.g. dispositivos da série *One-Wire* tais como sensores, adaptadores, dentre outros. Nestas redes, um único mestre pode gerenciar múltiplos escravos em diversos tipos de topologias, e.g. linear, ramificada e estrela. Estas topologias de conexão conferem às redes de transmissão clareza e flexibilidade.

Segundo (Maxim Integrated, 2019), basicamente três elementos compõem estas redes: computador para a supervisão e gerenciamento dos dispositivos conectados, meios físico (condutores) e protocolo de comunicação e finalmente os dispositivos *One-Wire*. Para uma maior flexibilidade e facilidade, o protocolo *One-Wire* permite um único mestre no barramento e utiliza um controle severo, não permitindo qualquer tipo de comunicação entre escravos.

Cada dispositivo *One-Wire* possui um código de identificação de 64 bits sendo único para cada dispositivo, resultando assim simples a sua detecção no barramento. Este código é gravado a laser em uma ROM (*Read-Only-Memory*) que se encontra no interior dos dispositivos. A família do dispositivo é identificada com os primeiros 8 bits, o número de série é representado pelos 48 bits seguintes e os últimos 8 bits estão reservados para identificação de erros sendo utilizado um código de redundância cíclica referente aos primeiros 56 bits (Dallas, 2019). Os dispositivos além do código de identificação contêm também um circuito interno de proteção contra descargas eletrostáticas capaz de resistir a $\pm 10\text{kV}$, o que permite que estes possam entrar em contato com o corpo humano sem serem destruídos (Neto, 2003).

O fornecimento de energia nestas redes pode ser de dois modos: alimentação externa em que três condutores são necessários em conjunto com uma fonte de alimentação de 5V regulada ou alimentação parasita (proveniente da própria linha de transmissão de dados), sendo necessário somente dois condutores. Normalmente, os dispositivos escravos *One-Wire* funcionam em um intervalo de tensão de 2,8 até 5,25V (Digitronics, 2003).

O protocolo de comunicação *One-Wire* utiliza níveis lógicos CMOS/TTL (*Complementary Metal Oxide Semiconductor Transistor Transistor Logic*) convencionais (valor máximo de 0,8V para o nível lógico “zero” e valor mínimo de 2,2V para o nível lógico “um”) com a operação especificada em uma faixa de tensão de alimentação de 2,8V a 6V. A Fig. 2 apresenta os níveis lógicos convencionais CMOS/TTL do protocolo de comunicação do protocolo *One-*

Wire. Nestas redes, tanto o mestre quanto os escravos são transmissores-receptores (transceptores), propiciando que a comunicação possa ser feita de forma sequencial em ambos os sentidos, porém a comunicação só pode ser feita num sentido de cada vez (*half-duplex*) (Digitronics, 2003).

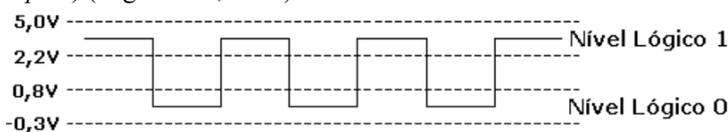


Figura 2 – Níveis lógicos CMOS/TTL.

No tempo em que inicia uma sequência de comunicação, a linha de dados é movida para o nível lógico zero pelo mestre segurando-a neste nível por um intervalo de 480 μ s, forçando os escravos que estejam na linha a fazer *reset*. Os escravos ligados à linha de dados reconhecem a operação e reagem ao mestre enviando um pulso de presença. Com esta operação o mestre apenas sabe que existe pelo menos um dispositivo na linha. Em seguida, o mestre acessa o código de identificação de um determinado escravo, envia comandos específicos de memória requeridos por este, e executa a transferência de dados. O mestre controla essa transferência de dados e examina a resposta do escravo (Dallas, 2019).

2.3 Sensor de Temperatura

O sensor digital modelo DS18B20 foi selecionado para medir a temperatura de operação de cada módulo que compõe a planta FV estudada. A versão à prova d'água do sensor, ilustrada na Fig. 3a, foi escolhida para evitar problemas de umidade e infiltrações. O sensor DS18B20 possui três terminais identificados com GND (terra), DATA (saída/entrada de dados) e VDD no modo de encapsulamento TO-92, correspondendo aos fios preto (GND), amarelo (DATA) e vermelho (VDD). O sensor DS18B20 é um dispositivo que opera com o protocolo *One-Wire* entregando valores digitais para cada temperatura medida.

Segundo o *datasheet* do sensor (Maxim Integrated, 2018), o intervalo de medição oscila entre -55 °C a +125 °C (-67 °F a +257 °F) com resolução de 0,1°C e precisão de $\pm 0,5$ °C na faixa de temperaturas entre -10 °C e +85 °C. Cada dispositivo contém um código serial exclusivo de 64 *bits* armazenado na memória ROM integrada no sensor, o que elimina a probabilidade de conflitos durante a transmissão de dados em redes com múltiplos dispositivos. A velocidade de aquisição e o tempo máximo de conversão dos sensores são afetados pela resolução escolhida, de 93 ms (resolução de 9 bits) a 750 ms (resolução de 12 bits). Conforme a norma IEC61724, a precisão dos sensores de temperatura deve ser melhor que ± 2 °C, portanto, a resolução mais alta é selecionada (British Standard, 1998).

Segundo recomendado pela norma IEC61724, os sensores de temperatura foram instalados na superfície traseira de cada módulo com adesivo resistente à altas temperaturas e isolados com pasta térmica, conforme ilustrado na Fig. 3b. Pasta térmica foi usada para melhorar o contato térmico dos sensores com a superfície do módulo FV.

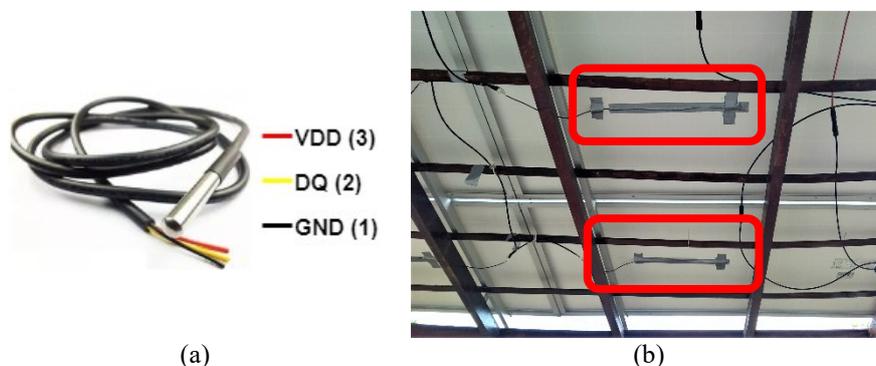


Figura 3 – (a) Sensor de temperatura DS18B20 (b) Vista inferior da planta FV instalada no LEA-UFC.

A alimentação parasita representa uma opção mais econômica, no entanto, esta mostra baixa confiabilidade em redes com comprimentos superiores a 30 m ou quando o número de dispositivos gerenciados é elevado. Dessa forma, optou-se pela configuração de alimentação externa (três condutores) com intenção de prevenir dificuldades relacionadas à alimentação. O consumo de energia destes sensores é muito baixo podendo-se usar as tensões, tipicamente, disponíveis na própria placa de aquisição de dados, ou seja, não se faz necessário a utilização de uma fonte de tensão externa exclusiva para os sensores. Para controle e aquisição de dados, foi usada uma placa *Raspberry Pi Zero W* (Rpi) com o objetivo de gerenciar e supervisionar os múltiplos dispositivos conectados.

Os sensores DS18B20 foram ligados aos condutores em conformidade com a topologia linear, como ilustrado na Fig. 4a. Nesta topologia, a rede *One-Wire* é organizada em uma única linha que inicia na placa Rpi e termina no último sensor conectado. Na Fig. 4b são mostrados os detalhes das conexões elétricas dos sensores e os conectores do tipo *Sindal* de 1mm.

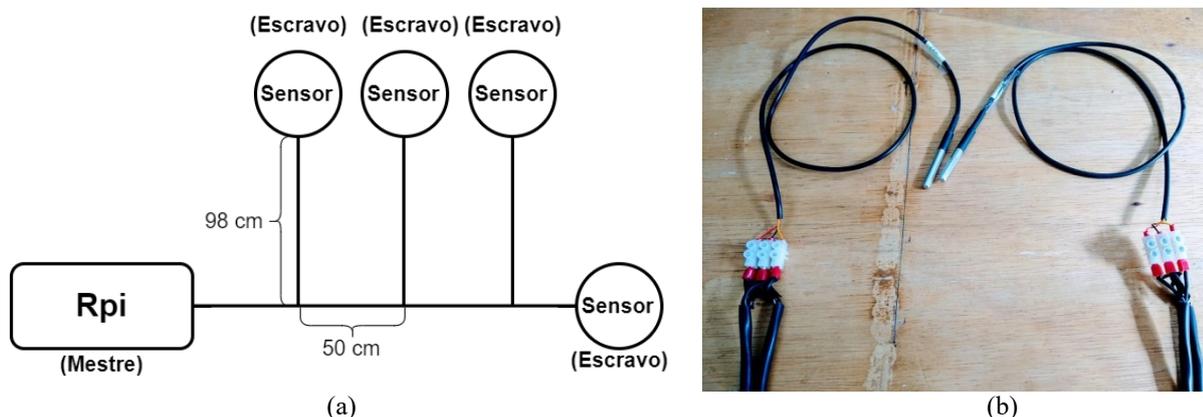


Figura 4 – (a) Esquema representando a montagem dos sensores de temperatura DS1820 (b) Detalhes das conexões elétricas: o sensor DS18B20 e seus terminais.

O *datasheet* do sensor sugere que para ligação do sensor é necessário colocar um resistor de *pull-up* de 4,7 k Ω entre os pinos de VCC e DATA. O esquemático completo da ligação é mostrado na Fig. 5a. Para facilitar a ligação entre os sensores e o Rpi, um módulo adaptador foi utilizado, como ilustrado na Fig. 5b. A tensão de alimentação de cada sensor DS1820 geralmente é 5 V, assim se faz necessário o uso de uma fonte de alimentação que possa garantir pelo menos a tensão de alimentação mínima (3,3V) a cada um dos sensores. Perdas podem ocorrer na linha de alimentação devido ao comprimento, o tipo de condutor e a topologia utilizada na conexão dos sensores, pelo que foi utilizado um relé externo para assegurar ao menos a tensão de alimentação mínima a cada um dos sensores.

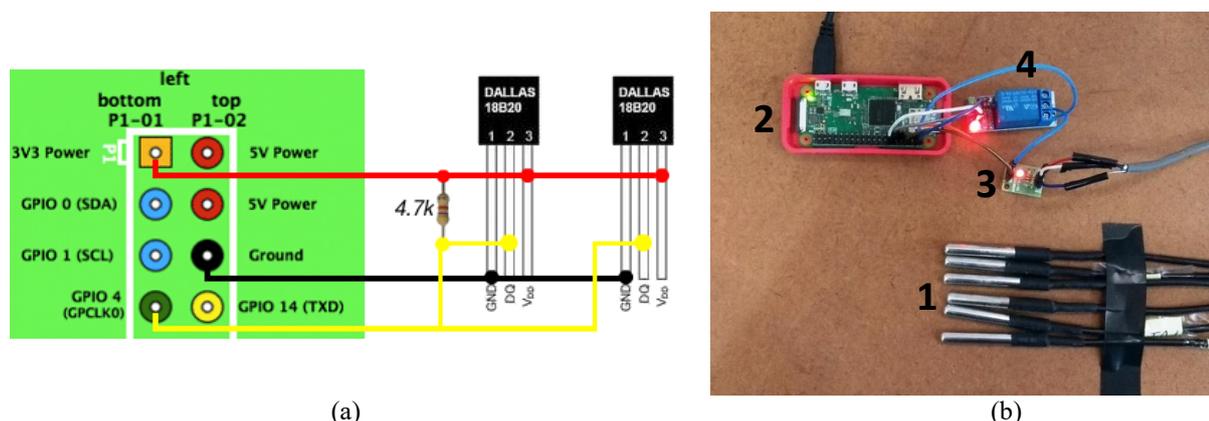


Figura 5 – (a) Circuito para funcionamento de múltiplos sensores de temperatura (b) Conexão múltiplos sensores de temperatura DS18b20 (1) com o Rpi Zero W (2) usando o módulo adaptador DS18B20 (3) e relé de controle (4)

O programa computacional para a supervisão e controle, leitura e postagem na Nuvem das medições de temperatura de cada módulo FV foi implementado consoante com o protocolo de comunicação *One-Wire*, sendo desenvolvido na linguagem *Python*. Os dados são substituídos a cada minuto e armazenados na Nuvem na plataforma *ThingSpeak*. A plataforma *ThingSpeak* é um serviço aberto que oferece uma infraestrutura web e protocolo HTTP para o envio e recebimento de dados gerados por qualquer microcontrolador com recursos para comunicação em rede. Os dados são armazenados no *website* e podem ser acessados publicamente ou privadamente, depende da configuração do usuário. Este serviço permite a criação de um canal de dados que contém oito campos capazes de comportarem qualquer tipo de dados, além de alguns outros complementares como nome do canal, descrição, localização, estado, entre outros. *ThingSpeak* uma ferramenta descentralizada e de código aberto que permite exportar os dados em formatos como *JSON*, *XML* e *CSV* permitindo sua visualização em programas como *MatLab*[®], *Microsoft Excel*[®], entre outros. Vale ressaltar que a plataforma apresenta um intervalo mínimo de 15 segundos para atualizações dos dados.

2.4 Calibração dos sensores de temperatura DS18B20

Com a finalidade de calibrar apropriadamente os sensores, um sensor de temperatura PT-100 (Fig. 6a) foi utilizado e instalado junto com os sensores DS18B20. O sensor PT-100 é um tipo particular de Detector de Temperatura por Resistência (*Resistance Temperature Detectors*) que mede a temperatura pela correlação da sua resistência elétrica com a temperatura (100 Ω a 0 $^{\circ}\text{C}$). Geralmente é considerado como o mais exato sensor de temperatura industrial disponível, além de proporcionar estabilidade aceitável em comparação com outros tipos de sensores de temperatura. A variação da resistência com a temperatura é chamada de coeficiente de temperatura e é especificada como a média da variação entre 0 e 100 $^{\circ}\text{C}$. Este coeficiente é de 0,385 por $^{\circ}\text{C}$, conforme a norma IEC 60751. Valores de resistência do PT-100 de

acordo com temperatura são disponibilizados pelos fabricantes. A faixa de operação do sensor PT-100 varia aproximadamente de -200 até 850°C, permitindo o controle total da temperatura com alto grau de precisão (Omega, 2019). Para a calibração da temperatura de todos os sensores configurados, foram comparadas as medições coletadas com as medições do sensor PT-100 instalado num sistema de supervisão e aquisição de dados comercial (SAD Comercial) (Fig. 6b). O SAD Comercial utilizado está composto por um software para monitorar, supervisionar e armazenar as variáveis e os dispositivos de sistemas de controle conectados através de drivers específicos, utilizando controladores lógicos programáveis (CLP) como protocolo de comunicação. A programação do CLP é efetuada pelo software *TwidoSuite* V2.20, sendo a interface com o computador efetuada através do *Driver Modicon Modbus*, que serve para implementar o protocolo de comunicação. O CLP faz aquisição de dados a cada minuto, onde as informações depois de coletadas são exportadas para um arquivo em *Microsoft Excel*®, (Mendoza, 2016).

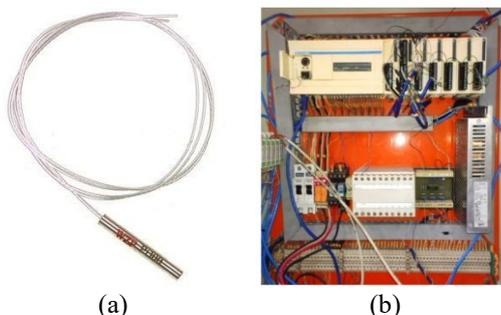


Figura 6 – (a) Sensor PT-100 (b) SAD Comercial instalado no LEA-UFC.

A temperatura ambiente interior do LEA onde foi realizada a calibração também foi monitorada por meio de outro PT-100 instalado no SAD Comercial e manteve-se entre 25,4°C e 32,0°C no decurso do período de calibração. A faixa de medição de temperatura na qual os sensores foram calibrados oscilou segundo a temperatura ambiente do laboratório, totalizando 2880 pontos de calibração. Foram usados 2 dias de medições a cada 1 minuto a fim de observar a variação diária e noturna da temperatura ambiente interior do laboratório. Foram armazenados em arquivos durante 1 minuto os valores instantâneos de temperatura. Para cada sensor e valor de temperatura, foram armazenados um conjunto de 60 valores. A temperatura média para cada sensor e ponto de calibração foi calculada como sendo a média aritmética dos 60 valores armazenados. Foram realizadas análises de regressão linear a partir das medições de temperatura coletadas, com o intuito de determinar as equações de ajuste para os sensores DS1820. Nestas análises, o seguinte modelo de equação foi utilizado:

$$y = \beta_0 + \beta_1 X + \varepsilon$$

em que:

y: Representa o conjunto de valores observados da variável dependente (temperatura medida pelo sensor DS1820)

X: Representa o conjunto de valores da variável independente (temperatura medida pelo sensor PT-100)

β_0 : Representa o ponto onde a reta de regressão intercepta o eixo das ordenadas (Constante de regressão)

β_1 : Representa a inclinação da reta de regressão (Coeficiente de regressão)

ε : Representa a perturbação ou erro aleatório, o que faz com que a dependência entre as variáveis dependentes e independentes não seja perfeita, mas esteja sujeita a incerteza. Denota o erro (ruído) aleatório, de média zero e variância σ_ε^2 , presente na medição de Y.

Para quantificar a qualidade do ajuste do modelo foi utilizada uma medida chamada Coeficiente de Determinação Linear R2, que no modelo de Regressão Linear corresponde ao quadrado do Coeficiente de Correlação Linear. Este parâmetro representa a proporção de variabilidade da variável Y que é explicada pelo modelo e cuja expressão é:

$$R2 = 1 - \frac{SSE}{SQT} = \frac{\sum_{i=1}^n e_i^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y}_i)^2} = \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y}_i)^2} \quad (1)$$

onde SSE representa a Soma dos Erros Quadráticos e SQT representa a Soma de Quadrados Total. O Coeficiente de Determinação R2 fornece uma informação auxiliar ao resultado da análise de variância da regressão, como uma maneira de se verificar se o modelo proposto é adequado ou não para descrever o fenômeno. O Coeficiente de Determinação R2 assume valores entre 0 e 1, e quanto mais próximo de 1, melhor o ajuste e, portanto, maior a confiabilidade das estimativas realizadas.

Os resultados do procedimento de calibração podem ser observados nos diagramas de dispersão dos dados com a reta de regressão para cada sensor, como ilustrado na Fig. 7. As equações de ajuste dos sensores DS1820 foram estimadas a fim de diminuir os desvios em relação aos valores de referência. Os parâmetros das equações de ajuste atingidos com as análises de regressão linear para cada um dos sensores DS1820 são apresentados na Tab. 2 com os respectivos Coeficientes de Determinação R2. Os coeficientes R2 variaram entre 98,99 e 99,91, demonstrando uma boa correlação entre os valores de temperatura corrigidos pelas equações de ajuste dos sensores e os valores de temperatura medidos pelo sensor PT-100. Segundo o *datasheet* do sensor (Maxim Integrated, 2018), os sensores DS1820 podem exibir uma alteração máxima de aproximadamente $\pm 0,5^\circ\text{C}$ em torno do valor de referência nas temperaturas abrangidas no intervalo de 0°C até 70°C. Com base nos resultados alcançados no processo de calibração dos sensores DS1820, foi

corroborado que as temperaturas medidas por estes sensores exibiram uma faixa de incerteza, em torno do valor de referência, inferior à mencionada pelo fabricante.

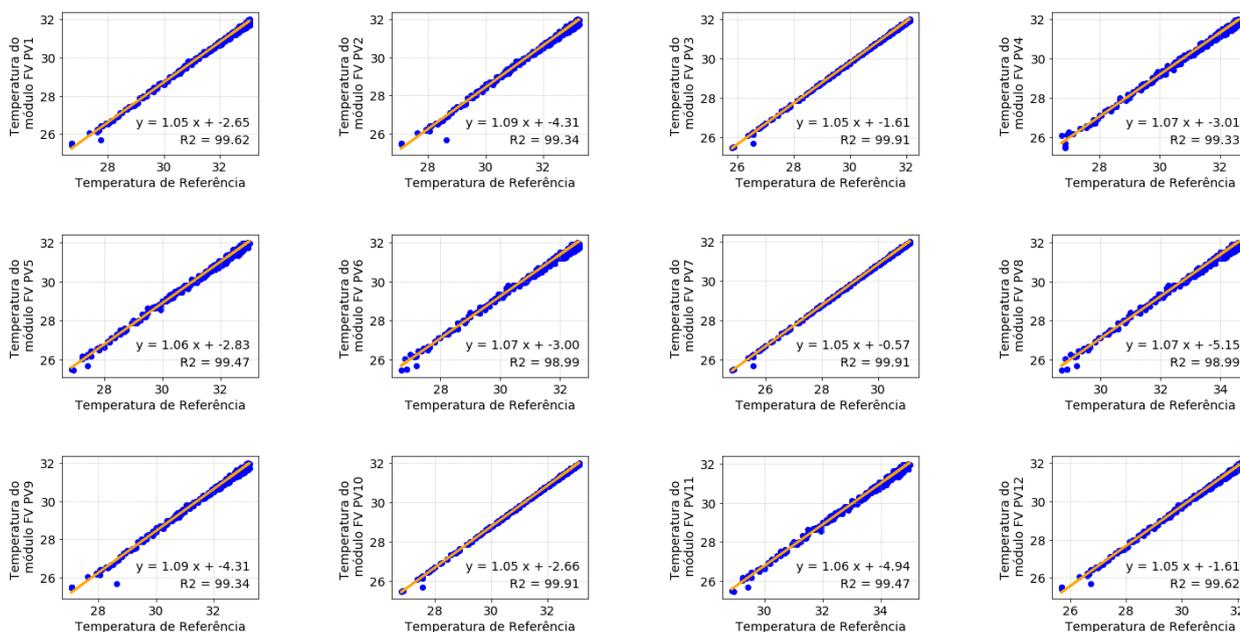


Figura 7 – Gráficos que relacionam as temperaturas medidas pelo sensor de referência (PT-100) com as medidas pelos sensores DS18B20.

Tabela 2 - Parâmetros das equações de ajuste e coeficientes de determinação R2 para cada sensor

Sensor	Inclinação	Intercepto	R2	Sensor	Inclinação	Intercepto	R2
1	1,05	-2,65	99,62	7	1,05	-0,57	99,91
2	1,09	-4,31	99,34	8	1,07	-5,15	98,99
3	1,05	-1,61	99,91	9	1,09	-4,31	99,34
4	1,07	-3,01	99,33	10	1,05	-2,66	99,91
5	1,06	-2,83	99,47	11	1,06	-4,94	99,47
6	1,07	-3,00	98,99	12	1,05	-1,61	99,62

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Como explicado anteriormente, o desempenho dos módulos FV depende de vários parâmetros físicos e meteorológicos. A análise da temperatura de operação das plantas FV sob condições climatológicas reais é essencial para prever com precisão a geração de eletricidade e avaliar se o nível de produtividade está dentro do esperado. Segundo o conhecimento dos autores, não foi encontrado nenhum estudo que faça uma comparação baseado na temperatura de operação das distintas *strings* que compõem as plantas FV. Assim, a motivação da presente pesquisa se deu diante da escassez deste tipo de análise. O monitoramento individual da temperatura de operação de cada *string* é de extrema importância para detecção de falhas e garantir um melhor desempenho da planta FV.

A presente seção mostra os resultados da avaliação da temperatura de operação de cada módulo FV que compõe a planta FV analisada. A análise foi realizada durante os dias 4 e 8 de novembro de 2019. A fim de facilitar a apresentação dos resultados, gráficos do comportamento diário da temperatura de operação de cada módulo separado por *string* com médias a cada 10 minutos são apresentados.

3.1 Comportamento da temperatura de operação durante o dia 04 de novembro de 2019

O gráfico de comportamento da temperatura de operação de cada *string* da planta FV analisada no dia 04/11/2019 é apresentado na Fig. 8. Observa-se que há uma similaridade entre as curvas de temperatura de operação de cada módulo FV durante os horários de início da manhã e ao entardecer. A temperatura de operação de cada módulo alcançou valores mínimos e máximos de 23,5°C e 58,3°C aproximadamente, com uma temperatura média de 33,8°C, conforme apresentado na Tab. 3. Destacar que os módulos 3 e 6 apresentaram as temperaturas de operação mais elevadas (58,3°C e 58,0°C, respectivamente) enquanto os módulos 2 e 12 apresentaram as temperaturas mais baixas

(24,2°C e 23,4°C, respectivamente). Conforme esperado, valores de temperatura maiores que 50°C foram alcançados entre 10:00 e 14:00.

Mesmo nos períodos de ausência de irradiância (antes das 05:00 e depois das 18:00), a temperatura de operação dos módulos atinge valores menores do que a temperatura ambiente. Esse fenômeno conhecido como resfriamento por irradiação noturna ocorre porque diferentemente do que acontece durante o dia (ou período de constante irradiação), no período noturno, o céu está a uma temperatura menor que a superfície terrestre. Por consequência o calor é liberado na forma de comprimento de onda da superfície para o céu (Busson et al. 2018).

Conforme apresentado na Fig. 8a, foi constatado que o sensor de temperatura instalado no módulo FV 11 da *string1*, estava medindo valores inferiores ao esperado dado que estava ligeiramente separado da superfície posterior do módulo. Assim que a falha foi detectada, esta foi corrigida e as medições voltaram a mostrar valores de temperatura semelhantes aos outros sensores.

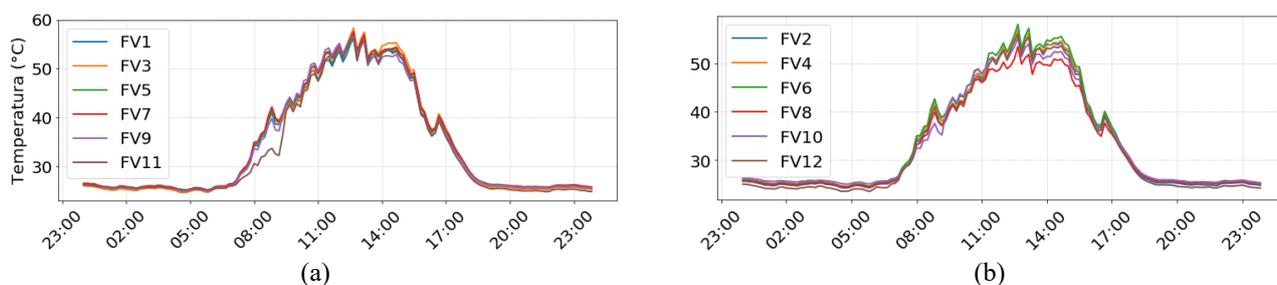


Figura 8 – Comportamento diário da temperatura de operação da planta FV instalada no LEA-UFC no dia 04/11/2019
(a) Temperatura dos módulos da *String1* (b) Temperatura dos módulos da *String2*

Tabela 3 – Valores mínimos e máximos para cada módulo FV no dia 04/11/2019

Parâmetro\Módulo FV	FV1	FV2	FV3	FV4	FV5	FV6	FV7	FV8	FV9	FV10	FV11	FV12
Temperatura Máxima	56,3	56,5	58,3	56,8	57,4	58,0	57,5	53,4	56,6	55,3	56,3	56,0
Temperatura Média	34,0	33,5	34,4	33,9	34,4	34,1	34,6	32,9	34,2	33,6	33,6	33,0
Temperatura Mínima	24,8	24,2	24,7	24,5	25,0	24,4	25,2	24,4	25,0	25,0	24,9	23,5

3.2 Comportamento da temperatura de operação durante o dia 05 de novembro de 2019

Quando observados os gráficos de comportamento da temperatura de operação de cada *string* da planta FV analisada no dia 05/11/2019 apresentados na Fig. 9, é possível observar um comportamento similar à análise realizada no dia anterior (04/11/2019). Neste dia, a temperatura de operação de cada módulo alcançou valores mínimos e máximos de 23,5°C e 57,2°C aproximadamente, com uma temperatura média de 33,8°C, conforme apresentado na Tab. 4. Destacar que os módulos 3 e 6 apresentaram as temperaturas de operação mais elevadas (57,2°C e 56,5°C, respectivamente) enquanto os módulos 1 e 11 apresentaram as temperaturas mais baixas (24,8°C e 23,5°C, respectivamente). Nas curvas de temperatura de operação da *string1* (Fig. 9a) é possível notar um comportamento mais similar entre a temperatura individual de cada módulo FV ao longo do dia analisado, enquanto no gráfico de comportamento da temperatura de operação da *string2* (Fig. 9b) observa-se uma maior variação entre a temperatura de cada módulo.

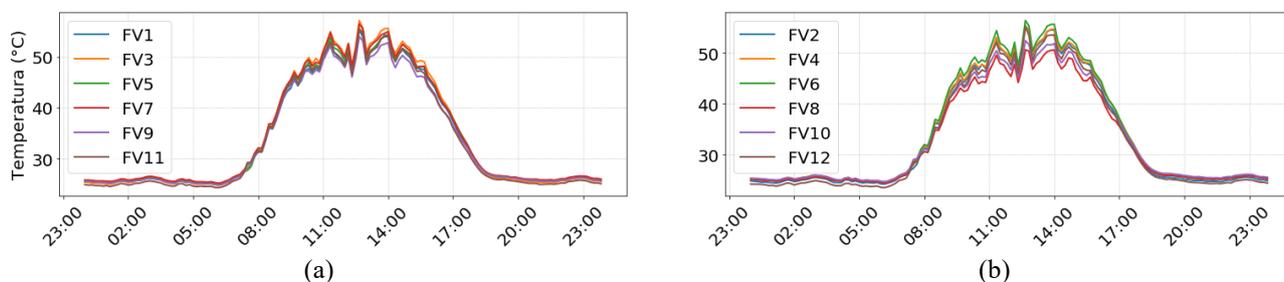


Figura 9 – Comportamento diário da temperatura de operação da planta FV instalada no LEA-UFC no dia 05/11/2019
(a) Temperatura dos módulos da *String1* (b) Temperatura dos módulos da *String2*

Tabela 4 – Valores mínimos e máximos para cada módulo FV no dia 05/11/2019

Parâmetro\Módulo FV	FV1	FV2	FV3	FV4	FV5	FV6	FV7	FV8	FV9	FV10	FV11	FV12
Temperatura Máxima	55,3	55,4	57,2	55,3	55,5	56,59	56,5	50,7	54,0	52,5	55,6	55,2
Temperatura Média	34,0	33,6	34,5	34,0	34,3	34,3	34,6	32,8	33,7	33,4	33,7	33,0
Temperatura Mínima	24,9	24,2	24,8	24,6	25,0	24,5	25,2	24,4	24,9	24,7	24,3	23,5

3.3 Comportamento da temperatura de operação durante o dia 06 de novembro de 2019

O gráfico de comportamento da temperatura de operação de cada *string* da planta FV analisada no dia 06/11/2019 é apresentado na Fig. 10. Um comportamento similar às análises prévias pode ser observado nestes gráficos. Neste dia, a temperatura de operação de cada módulo alcançou valores mínimos e máximos de 22,4°C e 56,1°C, com uma temperatura de operação média diária de 34,1°C, aproximadamente, conforme apresentado na Tab. 5. Similar aos resultados do dia 05/11/2019, o módulo 12 apresentou a menor temperatura de operação (22,4°C) seguido pelos módulos 1 e 10, ambos com temperatura de 23,1°C e 23,0°C, respectivamente. O módulo 3 apresentou a temperatura de operação mais elevada (56,1°C) seguido pelos módulos 6 e 7, ambos com uma temperatura de operação em torno de 55,0°C.

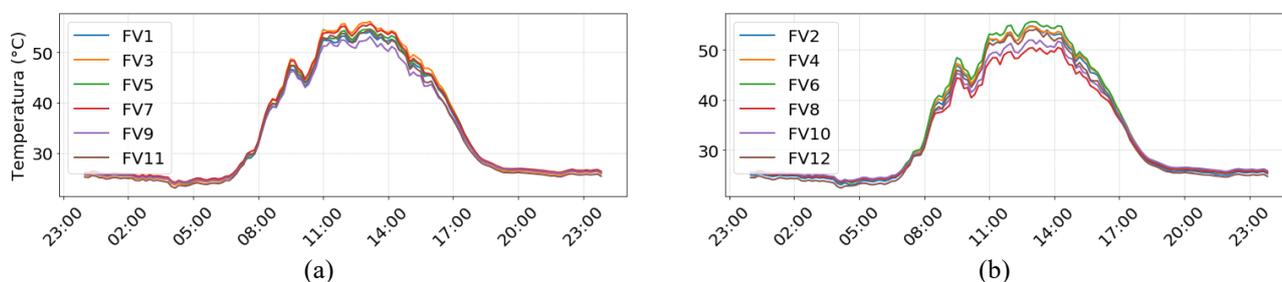


Figura 10 – Comportamento diário da temperatura de operação da planta FV instalada no LEA-UFC no dia 06/11/2019
(a) Temperatura dos módulos da *String1* (b) Temperatura dos módulos da *String2*

Tabela 5 – Valores mínimos e máximos para cada módulo FV no dia 06/11/2019

Parâmetro\Módulo FV	FV1	FV2	FV3	FV4	FV5	FV6	FV7	FV8	FV9	FV10	FV11	FV12
Temperatura Máxima	54,1	54,7	56,1	54,6	54,6	55,6	55,6	50,5	53,1	51,9	54,5	54,1
Temperatura Média	34,3	33,9	34,9	34,4	34,7	34,6	35,0	33,0	34,0	33,5	34,0	33,3
Temperatura Mínima	23,9	23,1	23,6	23,6	24,0	23,4	24,1	23,5	23,9	23,8	23,0	22,4

3.4 Comportamento da temperatura de operação durante o dia 07 de novembro de 2019

Na Figura 11 podem ser vistos os gráficos da temperatura de operação para cada módulo FV medida durante um dia ensolarado (07/11/2019). Como esperado em períodos com poucas nuvens o céu, todos os módulos atingiram altas temperaturas de operação, com valores mínimos e máximos de 23,2°C e 58,0°C, com uma temperatura de operação média diária de 34,5°C, aproximadamente, conforme apresentado na Tab. 6. Nas curvas de temperatura de operação da *string2* (Fig. 11b) é possível observar um comportamento mais oscilante ao longo do dia, enquanto a temperatura dos módulos FV da *string1* neste dia manteve-se com um comportamento quase similar.

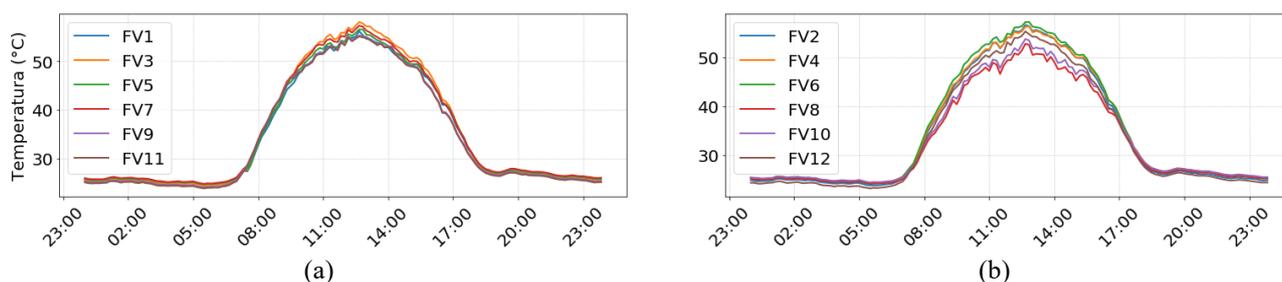


Figura 11 – Comportamento diário da temperatura de operação da planta FV instalada no LEA-UFC no dia 07/11/2019
(a) Temperatura dos módulos da *String1* (b) Temperatura dos módulos da *String2*

Tabela 6 – Valores mínimos e máximos para cada módulo FV no dia 07/11/2019

Parâmetro\Módulo FV	FV1	FV2	FV3	FV4	FV5	FV6	FV7	FV8	FV9	FV10	FV11	FV12
Temperatura Máxima	56,1	56,5	58,0	56,3	56,5	57,2	57,3	52,7	55,3	53,7	55,1	55,3
Temperatura Média	34,8	34,4	35,4	34,8	35,1	35,0	35,4	33,2	34,6	33,8	34,4	33,7
Temperatura Mínima	24,5	23,9	24,4	24,3	24,7	24,2	24,8	24,2	24,1	24,5	23,9	23,2

3.5 Comportamento da temperatura de operação durante o dia 08 de novembro de 2019

Na Figura12 pode-se observar o comportamento da temperatura dos módulos FV no dia 08/11 2019. Observa-se que há uma similaridade entre as curvas de temperatura de operação de cada módulo FV da *string1* ao longo do dia. A temperatura de operação de cada módulo alcançou valores mínimos e máximos de 23,4°C e 57,0°C aproximadamente, com uma temperatura média de 33,4°C, conforme apresentado na Tab. 7.

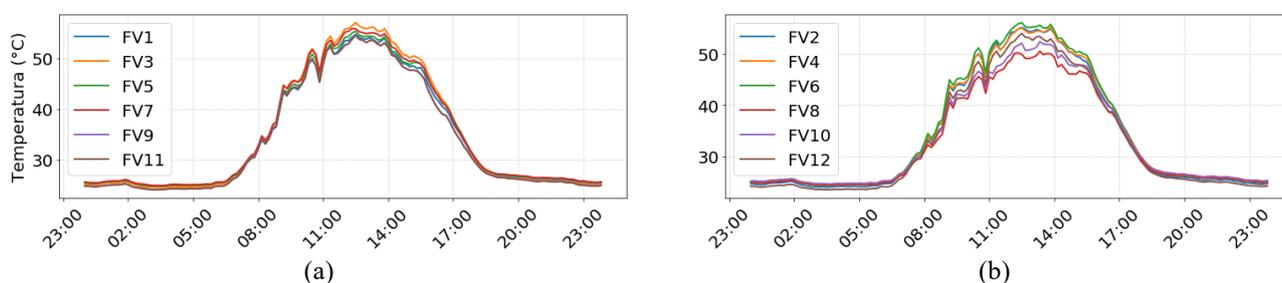


Figura 12 – Comportamento diário da temperatura de operação da planta FV instalada no LEA-UFC no dia 08/11/2019
(a) Temperatura dos módulos da *String1* (b) Temperatura dos módulos da *String2*

Tabela 7 – Valores mínimos e máximos para cada módulo FV no dia 08/11/2019

Parâmetro\Módulo FV	FV1	FV2	FV3	FV4	FV5	FV6	FV7	FV8	FV9	FV10	FV11	FV12
Temperatura Máxima	54,7	55,2	57,0	55,3	55,4	56,1	55,9	50,5	54,6	52,4	54,5	54,0
Temperatura Média	34,2	33,9	34,8	34,2	34,5	34,4	34,8	32,7	33,7	33,4	33,7	33,1
Temperatura Mínima	24,7	23,9	24,5	24,4	24,8	24,2	24,9	24,3	24,1	24,6	24,0	23,4

4. CONCLUSÕES

Dentre as variáveis meteorológicas que afetam a capacidade de geração dos módulos FV, a temperatura de operação se destaca, pois, conjugada a outros fatores como a localização geográfica, a temperatura ambiente, a velocidade do vento, a irradiação solar incidente, a orientação, a disposição e inclinação dos módulos, entre outros, pode comprometer o desempenho de plantas FV. Neste contexto, o monitoramento individual da temperatura de operação de módulos FV, contribui significativamente no diagnóstico e detecção de falhas bem como na otimização da eficiência de conversão. A falta de sistemas de monitoramento e aquisição de dados eficientes, de baixo custo e com alta exatidão e precisão, motivou a realização deste trabalho.

Os resultados obtidos nesta pesquisa demonstram que os módulos FV analisados apresentam variações na temperatura de operação individual, embora sejam da mesma tecnologia e do mesmo modelo. Considerando que, mesmo estando no mesmo ângulo de inclinação, os módulos FV não estão sujeitos à exposição de condições meteorológicas idênticas (irradiação solar, temperatura ambiente, velocidade do vento e precipitação), o que afeta a temperatura de operação de cada módulo e como consequência a eletricidade produzida por cada *string*. A geração desigual de energia elétrica pode ser atribuída também ao processo de fabricação ou possíveis sombreamentos como resultado de objetos próximos (árvores ou postes de energia) devido à localização física da planta FV (ambiente urbano), pois o sombreamento é um dos fatores que mais afetam o desempenho de plantas FV principalmente em áreas urbanas. Através do monitoramento e análise da temperatura de operação individual de cada módulo FV é possível detectar um desvio no desempenho da planta FV através do sobreaquecimento das células. Elevadas temperaturas de operação dos módulos FV causam a redução na eficiência energética.

O protocolo de comunicação *One-Wire* junto com os sensores de temperatura DS18B20 apresentou um comportamento estável. Este protocolo tem algumas limitações como uma distância máxima do conector de 150 m e uma capacidade máxima de carga não aconselhada a mais de 20 dispositivos, o que não representou nenhuma limitante no desenvolvimento do presente trabalho. Após o processo de calibração dos sensores de temperatura, os Coeficientes de Determinação obtidos variaram entre 98,99% e 99,91%, demonstrando uma boa correlação entre os valores de temperatura corrigidos pelas equações de ajuste dos sensores e os valores de temperatura medidos pelo sensor de referência. A partir dos resultados obtidos, conclui-se que sensores de temperatura DS18B20 em conjunto com o protocolo de comunicação *One-Wire* apresentam um alto nível de precisão e exatidão, representado excelentes opções para serem empregadas em aplicações de monitoramento e controle em instalações FV.

Agradecimentos

À CAPES pela bolsa concedida ao primeiro autor e segundo autor, ao CNPq pelo apoio financeiro ao projeto (420133 / 2016-0 Universal 01/2016) e pela bolsa de pesquisador concedida ao quarto autor, à Fundación Carolina pela bolsa de estágio pós-doutoral concedida ao último autor e à UFC pela disponibilidade de laboratórios e instrumentos.

REFERÊNCIAS

- British Standard. 1998. “IEC 61724:1998. Photovoltaic System Performance Monitoring — Guidelines for Measurement, Data Exchange and Analysis.” 20.
- Busson, Bruna de Oliveira et al. 2018. “Validação De Modelos De Comportamento Térmico De Painéis Fotovoltaicos Para O Semiárido Brasileiro.” VII Congresso Brasileiro de Energia Solar 26–40.
- Dallas. 2019. “Application Note 132 Quick Guide to 1-Wire Net Using PCs and Microcontrollers.” 1–7.
- Digitronics, Springbok. 2003. “1-Wire FAQ.” Retrieved (<http://www.chipkin.com/support/1-wire-support/1-wire-faq/>).
- Martín-Martínez, S., M. Cañas-Carretón, A. Honrubia-Escribano, and E. Gómez-Lázaro. 2019. “Performance Evaluation of Large Solar Photovoltaic Power Plants in Spain.” *Energy Conversion and Management* 183(September 2018):515–28. Retrieved (<https://doi.org/10.1016/j.enconman.2018.12.116>).
- Maxim Integrated. 2018. “DS18S20 High-Precision 1-Wire Digital Thermometer.”
- Maxim Integrated. 2019. “GUIDE TO 1-WIRE COMMUNICATION.” Retrieved (<https://www.maximintegrated.com/en/design/technical-documents/tutorials/1/1796.html>).
- Mendonça, Doglasse Ernesto. 2016. “Planta de Osmose Reversa Acionada Por Módulos Fotovoltaicos Com MPPT e Válvula Autoreguladora de Pressão.” Universidade Federal do Ceará.
- Neto, Antonio José Steidle. 2003. “Avaliação Do Sistema 1-Wiretm Para Aquisição De Dados De Temperatura Em Instalações Agrícolas.”
- Omega. 2019. “Sensores Pt-100 Introdução Às Termoresistências.” Retrieved (<https://br.omega.com/prodinfo/pt100.html>).
- Pereira, Renata I. S., Ivonne M. Dupont, Paulo C. M. Carvalho, and Sandro C. S. Jucá. 2018. “IoT Embedded Linux System Based on Raspberry Pi Applied to Real-Time Cloud Monitoring of a Decentralized Photovoltaic Plant.” *Measurement: Journal of the International Measurement Confederation* 114(September 2017):286–97. Retrieved (<http://dx.doi.org/10.1016/j.measurement.2017.09.033>).
- Sacramento, Elissandro Monteiro do et al. 2015. “Scenarios for Use of Floating Photovoltaic Plants in Brazilian Reservoirs.” *IET Renewable Power Generation* 9(8):1019–24. Retrieved (<http://digital-library.theiet.org/content/journals/10.1049/iet-rpg.2015.0120>).
- Tsuruda, L. K., T. A. Mendes, and L. R. B. Silveira. 2017. “A Importância Da Energia Solar Para o Desenvolvimento Sustentável e Social.” Retrieved (http://www.advancesincleanerproduction.net/sixth/files/sessoes/6B/1/tsuruda_et_al_report.pdf).
- Zago, Ricardo Mazza. 2018. “Sistema de Baixo Custo Para Monitoramento Da Geração de Energia Solar Com Conexão Para Internet Das Coisas.”

REAL-TIME ARCHITECTURE FOR PV PLANT OPERATING TEMPERATURE ACQUISITION

Abstract. *This paper aims to develop a low-cost data acquisition system for real-time monitoring of the individual operating temperature of a grid-connected photovoltaic plant. The photovoltaic plant is located in the facilities of the Alternative Energy Laboratory (LEA) of the Federal University of Ceará (UFC). The digital sensor model DS18B20 together with the One-Wire communication protocol were chosen to monitor the operating temperature of each module that makes up the studied PV plant. As master of the implemented One-Wire communication network, a Raspberry Pi Zero W board was used, to manage and control multiple connected devices. After the temperature sensor calibration process, the Determination Coefficients obtained ranged from 98.99 to 99.91, showing a good correlation between the temperature values corrected by the sensor adjustment equations and the temperature values measured by the reference sensor.*

Key words: *monitoring, operating temperature, real time*