

## RESULTADOS PRELIMINARES DE UMA COLABORAÇÃO INTERNACIONAL PARA A MELHORIA DO DESEMPENHO FOTOVOLTAICO EM DIFERENTES CLIMAS

**Aline Kirsten Vidal de Oliveira** – [alinekvo@gmail.com](mailto:alinekvo@gmail.com)

**Marília Braga**

Universidade Federal de Santa Catarina – Florianópolis, Brasil

**Laurie Burnham**

Sandia National Laboratories – Albuquerque, EUA

**Sebastian Dittmann**

**Ralph Gottschalg**

Anhalt University of Applied Sciences – Köthen, Germany e Fraunhofer-Center for Silicon Photovoltaics CSP – Halle, Germany

**Tom Betts**

Centre for Renewable Energy Systems Technology – Loughborough, United Kingdom

**Ben Figgis**

Qatar Environment and Energy Research Institute, HBKU – Doha, Qatar

**Soo-Young Oh**

Yeungnam University – Gyeongsan, República da Coreia

**Carlos D. Rodríguez-Gallegos**

**Thomas Reindl**

Solar Energy Research Institute of Singapore – Singapura, Singapura

**Ricardo Rütther**

Universidade Federal de Santa Catarina – Florianópolis, Brasil

**Resumo.** Este trabalho visa sumarizar os primeiros resultados obtidos de estudos da colaborativa internacional PV CAMPER (Photovoltaic Collaborative to Advance Multi-Climate Performance and Energy Research). O grupo foi estabelecido em 2018 e é hoje uma organização formalmente reconhecida, com onze instituições participantes e uma rede de 16 locais de estudo distribuídos em ambos os hemisférios e na maioria das principais zonas climáticas. Em um contexto de crescimento sem precedentes da capacidade instalada de energia solar fotovoltaica (FV) - que em anos recentes passou a abranger mercados antes não muito explorados pela tecnologia - e mudanças climáticas - que trazem condições cada vez mais extremas de operação para os sistemas FV -, a colaborativa visa a avaliação de diversos aspectos de durabilidade e desempenho de módulos FV em regiões climáticas diversas, visando um melhor entendimento das perdas e degradação da tecnologia em condições adversas pouco exploradas ou conhecidas pelo setor. Dentre as frentes de estudo do PV CAMPER estão a avaliação multiclimática de impactos na geração FV e incertezas na determinação do albedo, de taxas de sujidade, de perdas por temperatura, da ocorrência de eventos de sobreirradiação, e da deriva de piranômetros na medição de irradiação. O objetivo deste trabalho é descrever os principais estudos em desenvolvimento dentro do PV CAMPER, bem como apresentar resultados preliminares da cooperação.

**Palavras-chave:** Energia Solar, Colaborativa Internacional, Análises Multiclimáticas.

### 1. INTRODUÇÃO

A capacidade fotovoltaica (FV) global continua sua trajetória ascendente constante, impulsionada por uma queda abrupta nos custos, dinâmica industrial e políticas favoráveis, com uma taxa média de crescimento anual de 15% e uma taxa de duplicação de menos de três anos (IEA, 2021a). Mesmo com o impacto econômico da pandemia de Covid-19, pelo menos 127 GW de sistemas FV foram instalados em 2020 (IRENA, 2021). A disseminação da energia solar para áreas historicamente adversas é um exemplo notável desse rápido crescimento, já que há poucos anos, os custos eram muito altos e o retorno de energia era muito baixo para a viabilidade econômica. No entanto, à medida que os custos continuam caindo, a energia solar está aumentando rapidamente sua participação na geração de energia em países de alta latitude como a Noruega e nações tropicais como o Brasil, que só em 2020 instalou 3,1 GW em sistemas FV (IEA, 2021b).

Assegurar um alto desempenho ao longo da vida útil em regiões geográficas cada vez mais diversas, no entanto, é um desafio crescente. Um exemplo de desafio a ser investigado é como as tecnologias FV emergentes, de maior eficiência (desde o redesenho de interconexões e arquiteturas de células até inovações em nível de módulo), terão um desempenho de longo prazo em novos ambientes operacionais. Outra preocupação é a incerteza em torno da mudança climática, que está alterando os padrões tradicionais de umidade e temperatura, forçando os cientistas a repensar a definição de um ano

meteorológico típico e as suposições sobre a incerteza das medições. A terceira área de incerteza, também relacionada à mudança climática, é a elevação da temperatura global, que aumenta as áreas expostas a condições climáticas extremas, o que vem gerando maiores riscos dos sistemas FV sofrerem com desastres naturais, como furacões, tempestades de areia, granizo, nevascas e incêndios florestais.

Na falta de bons dados sobre o desempenho fotovoltaico em climas específicos, os fabricantes têm tido pouco incentivo para desenvolver módulos e sistemas fotovoltaicos personalizados para seus ambientes operacionais, ou seja, projetados para um ótimo desempenho e confiabilidade em climas específicos. Em vez disso, a tecnologia FV é vista como uma mercadoria de tamanho único e a maioria dos módulos implantados é fabricada e vendida sem consideração para projetar ou combinar essas tecnologias com a região geográfica na qual serão instalados. As classificações energéticas em conformidade com a IEC 61853-4 (International Electrotechnical Commission, 2018) são um passo para a otimização climática, mas ficam drasticamente aquém do que é necessário (Burnham *et al.*, 2021).

Para enfrentar estes desafios do setor solar global, a Colaboração Internacional para Avanços na Pesquisa Multiclimática em Energia Solar Fotovoltaica (do inglês *Photovoltaic Collaborative to Advance Multi-climate Performance and Energy Research*), mais conhecida como o PV CAMPER, foi criada em 2018. A organização é formada por uma rede global de instituições de pesquisa com onze instituições participantes e 16 locais de estudo distribuídos em ambos os hemisférios e na maioria das principais zonas climáticas (Fig. 1). O PV CAMPER busca solucionar problemas como a necessidade de modelos de desempenho e cálculos de custo nivelado de energia mais precisos, e de melhorias no desempenho e confiabilidade, bem como custos dos sistemas fotovoltaicos em todas as zonas climáticas do mundo (Braga *et al.*, 2020). O objetivo deste trabalho é descrever os principais estudos em desenvolvimento dentro do PV CAMPER, bem como apresentar resultados preliminares da cooperação.



Figura 1 – Mapa mundial que mostra os locais das instituições participantes do PV CAMPER (Sandia National Laboratories, 2021).

## 2. ESTUDOS EM DESENVOLVIMENTO E RESULTADOS PRELIMINARES

Medir e quantificar os múltiplos fatores que contribuem para o desempenho de um sistema FV é essencial para prever sua performance ao longo da vida útil, o que influencia diretamente na correta previsão do seu retorno sobre o investimento. Entretanto, dados de alta confiança são difíceis de obter: as variáveis específicas que contribuem para o desempenho a longo prazo e a degradação dos sistemas FV variam de acordo com a localização, níveis de umidade e precipitação, taxas de acumulação de sujidade etc. Além disso, os dados destinados a representar com precisão essas variáveis podem não ser precisos, dependendo da fonte (medida versus satélite) e da qualidade, calibração e manutenção da instrumentação, incluindo sua faixa de precisão, e da frequência com que os dados são coletados (Stein e King, 2013). Em razão da ausência de um conjunto de melhores práticas ou padrões para medir e prever o desempenho dos sistemas FV, existe uma incerteza significativa nas medições em campo, resultando em um potencial ainda maior para erros.

O PV CAMPER, portanto, considera a quantificação e redução da incerteza de medição, que por sua vez afeta diretamente a precisão e a aplicabilidade global dos modelos de desempenho, como um foco importante de pesquisa. Para isso, o PV CAMPER fez da geração e validação de um conjunto de melhores práticas para a coleta de dados entre locais uma importante prioridade. A comparação de dados de diferentes locais só é possível quando instrumentação comum,

protocolos comuns de O&M e técnicas comuns de validação são respeitados e empregados, uma característica marcante da colaboração. Para ilustrar o escopo e impacto das atividades de pesquisa do PV CAMPER, cinco projetos em andamento são descritos abaixo, um focado na medição e estimativa de temperatura de módulos fotovoltaicos, um sobre eventos de sobreirradiação, um focado na precisão de medição dos piranômetros, outro na medição e modelagem do albedo, que é um fator-chave para o ganho bifacial, e um quinto na condensação como um fator de perdas do sistema por sujeira. Todos os cinco projetos, tanto individualmente quanto coletivamente, buscam beneficiar o mercado FV como um todo, incluindo pesquisadores, fabricantes, desenvolvedores, investidores, assinantes e proprietários de ativos.

### 2.1 Análises comparativas de medidas e de métodos de estimativa de temperatura de módulos FV

A temperatura do módulo FV é um dos principais fatores que influenciam diretamente a produção de energia FV e, portanto, sua modelagem é de extrema relevância. A estimativa da temperatura do módulo leva a previsões mais precisas da produção de energia do sistema FV e a uma melhor compreensão do processo de degradação. No entanto, pouco se sabe sobre a precisão dos diferentes modelos de estimativa de temperatura disponíveis na literatura em diversas condições climáticas.

Por estas razões, o Estudo de Temperatura do PV CAMPER visa comparar diversos métodos de medição de temperatura de módulos FV e comparar a acurácia de diversos modelos de estimativa de temperatura de módulos para diferentes locais e diferentes condições climáticas. Para atingir estes objetivos, dados medidos de diferentes locais de teste ao redor do globo são tratados e analisados. Cada local de teste efetua medições de temperatura da superfície traseira de módulos FV, além de outras medições ambientais, tais como temperatura ambiente, irradiação do plano inclinado e velocidade do vento, que também são usadas como entradas para os modelos de temperatura. A análise da precisão dos métodos e a comparação entre eles é realizada através das seguintes métricas: Erro Médio Absoluto (MAE), Erro Médio Quadrático (RMSE) e Erro Médio Quadrático Normalizado (nRMSE).

Algumas das análises já realizadas incluíram a comparação de medições de temperatura de módulos fotovoltaicos com estimativas horárias obtidas com o modelo de Ross (Ross, 1976) e o modelo de Faiman (Faiman, 2008) em nove diferentes locais do globo. Os resultados preliminares mostraram que os dois métodos de estimativa de temperatura fornecem erros semelhantes entre as temperaturas estimadas e medidas para quase todos os locais e tecnologias FV avaliadas, incluindo climas diferentes. A Fig. 2 (esquerda) apresenta os erros MAE obtidos para todos os locais avaliados. Os resultados também indicam que mesmo quando os modelos fornecem pequenos erros médios anuais para os locais analisados, pode haver uma disparidade significativa entre as temperaturas estimadas e medidas ao longo do dia. Além disso, todos os locais apresentaram erros maiores para altos níveis de irradiação para ambos os modelos. Este aspecto gerou erros nas estimativas do local de teste brasileiro, que fica em Brotas de Macaúbas-BA, onde uma grande fração da radiação incidente vem de altos níveis de irradiação e os eventos de sobreirradiação são frequentes. A Fig. 2 (direita) mostra os erros obtidos na localidade para diferentes níveis de irradiação para dados de um módulo da tecnologia CIGS, o que demonstra os erros maiores para altas irradiações. Os resultados também confirmam uma correlação entre os resultados da estimativa e o tipo de sensor de temperatura do módulo e método de fixação empregado, que também deve ser investigado mais detalhadamente (Oliveira *et al.*, 2020).

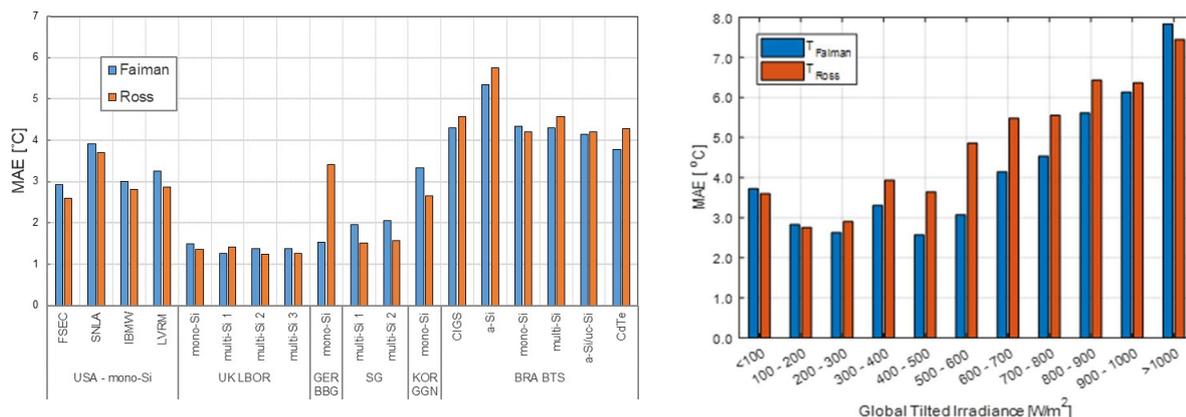


Figura 2 – Resultados da comparação de medições de temperatura de módulos FV com estimativas horárias pelos modelos de estimativa Ross e Faiman. À esquerda são apresentados os valores do Erro Médio Absoluto (MAE) para os locais analisados e à direita são apresentados os erros MAE para diferentes irradiações na localidade de Brotas de Macaúbas-BA para um módulo de tecnologia CIGS (Oliveira *et al.*, 2020).

Outra análise realizada comparou os modelos de Ross e Faiman com o modelo de Oh (Oh *et al.*, 2017), que avalia a capacidade térmica do módulo e a inércia de temperatura que ela produz. Os resultados mostram que ao analisar dados de resolução de 1 minuto, o modelo de Oh fornece um desempenho bastante preciso, comparado com os dois outros modelos em estudo. Especialmente para dados de alta resolução, as temperaturas calculadas com o modelo Faiman variam muito entre os passos de tempo, não levando em conta a inércia causada pela capacidade térmica do módulo. O modelo

de Oh considera este fator e, portanto, é o modelo mais adequado para simulações de 1 minuto e 5 minutos de resolução. Um exemplo desta comparação pode ser observado na Fig. 3. Estas mudanças rápidas diminuem conforme a resolução dos dados diminuem, resultando em melhores resultados para o modelo Faiman para simulações de resolução de 15 minutos (Oliveira *et al.*, 2021).

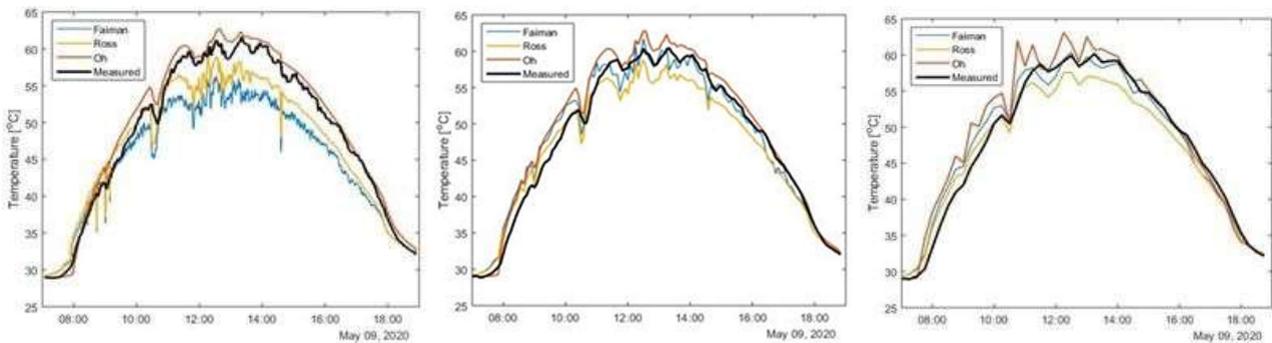


Figura 3 - Dados medidos e estimados de temperatura de módulos FV em 9 de maio de 2020 para a localidade de Singapura, utilizando diferentes modelos de estimativa de temperatura e diferentes resoluções de dados: 1 minuto (esquerda), 5 minutos (centro) e 15 minutos (direita) (Oliveira *et al.*, 2021).

O PV CAMPER tem como objetivo continuar este estudo de análise de temperatura de módulos FV, expandindo a análise para incluir outros locais e implementando uma configuração padrão de medição em todos eles. Investigações futuras analisarão o comportamento destes modelos e outros disponíveis na literatura de acordo com outros parâmetros que afetam a estimativa da temperatura do módulo, tais como irradiação difusa, velocidade do vento, método de fixação, tipo e precisão do sensor, temperatura ambiente e sazonalidade, para obter uma compreensão completa dos efeitos destes parâmetros na precisão dos modelos. Com o Estudo de Temperatura, o PV CAMPER pretende montar um conjunto de melhores práticas para medições de temperatura e diretrizes para a sua estimativa em diferentes climas em todo o mundo.

## 2.2 Ocorrência e impactos de eventos extremos de irradiância em diferentes climas

Eventos extremos de irradiância (referidos também na literatura pelo termo sobreirradiância, ou *over-irradiance* em inglês) ocorrem quando há uma amplificação da irradiância solar ocasionada pelo efeito de borda de nuvem. Estes eventos são ainda pouco explorados, mas podem impactar de forma direta e indireta o desempenho de usinas fotovoltaicas. Em função da resolução temporal comumente utilizada na aquisição de dados de irradiância para certificação de usinas e na simulação de sistemas FV, picos de sobreirradiância são geralmente amenizados em médias de minuto ou horárias, resultando em perdas simuladas por sobrecarregamento de inversores abaixo das reais, o que impacta diretamente o dimensionamento ótimo de inversores e acaba resultando em um subdesempenho de sistemas FV em relação ao previsto. Sob condições específicas, principalmente quando eventos de extremos de irradiância são associados a elevadas temperaturas, a magnificação da irradiância solar pode ainda causar a queima de fusíveis de *strings* FV, em função do fator de redução da capacidade de corrente deles sob condições de aumento de temperatura e a relação linear entre irradiância e a corrente de dispositivos FV.

A ocorrência destes eventos está ligada às condições climáticas locais, sendo este um tema pouco abordado na literatura em função da necessidade de dados de irradiância com alta resolução temporal para identificação dos eventos extremos. Adicionalmente, a importância de eventos de sobreirradiância para a geração e desempenho FV depende de sua frequência, duração e intensidade, bem como sua associação a outras condições climáticas, principalmente a temperatura. Para a avaliação multiclimática destes eventos, membros participantes do PV CAMPER contribuíram com um ano de dados de alta resolução temporal de irradiância. Resultados preliminares, publicados em Braga *et al.* (2020) e reproduzidos abaixo na Tab. 1 mostram resultados gerais de eventos de sobreirradiância para 5 localidades de estudo da colaborativa.

Os resultados obtidos até agora para esta frente de estudo sugerem que 1) os eventos de sobreirradiância são muito mais comuns em baixas altitudes do que se supunha anteriormente; 2) um entendimento completo da sobreirradiância, uma vez que pode afetar a geração FV, é necessário e requer dados de irradiância com alta resolução temporal; e 3) a sobreirradiância é uma preocupação séria, mas não reconhecida, para usinas FV (tanto para o projeto quanto para a operação da usina), com um número significativo (7%) de eventos de sobreirradiância durando um minuto ou mais e mais da metade dos eventos extremos de sobreirradiância ocorrendo em sucessão rápida (Braga *et al.*, 2020).

Tabela 1 - Resumo dos eventos de sobreirradiância horizontal para os locais avaliados (Braga *et al.*, 2020).

|  | Florianópolis,<br>Brasil | Brotas de Macaúbas,<br>Brasil | Albuquerque,<br>EUA | Loughborough,<br>Reino Unido |
|--|--------------------------|-------------------------------|---------------------|------------------------------|
| <b>Número de Eventos de Sobreirradiância</b> | 2882                     | 11251                         | 2361                | 3174                         |
| <b>Pico Máximo [W/m<sup>2</sup>]</b>         | 1703                     | 1802                          | 1578                | 1426                         |
| <b>Data do Pico Máximo</b>                   | 20/01/19                 | 27/11/19                      | 23/04/19            | 15/06/19                     |
| <b>Duração do Evento de Pico Máximo [s]</b>  | 16                       | 80                            | 64                  | 2                            |
| <b>Pico Máximo K<sub>T</sub></b>             | 1.22                     | 1.31                          | 1.31                | 1.24                         |
| <b>Duração do Evento Mais Longo [s]</b>      | 467                      | 1159                          | 1291                | 388                          |
| <b>Data do Evento Mais Longo</b>             | 24/04/19                 | 11/04/19                      | 17/02/19            | 01/07/19                     |

### 2.3 Avaliação da deriva do piranômetro e incerteza de medição

Como a irradiância é o fator mais importante do desempenho de um sistema FV, este estudo visa identificar influências específicas do clima e da instalação na incerteza da medição da irradiância solar e quantificar as contribuições dominantes para a incerteza em cada instalação, de modo que os operadores de instalações FV possam melhorar suas avaliações de desempenho e diagnósticos de saúde do sistema da maneira mais econômica.

Os dados de medição de irradiância sustentam a avaliação de desempenho do sistema FV, o que significa que a incerteza neste parâmetro afeta diretamente a precisão do cálculo da Taxa de Desempenho, assim como qualquer outro indicador que utiliza a geração FV como parâmetro de entrada. Enquanto os padrões existentes para monitoramento de sistemas fotovoltaicos (por exemplo, a IEC 61724 (Internacional Electrotechnical Commission, 2017)) especificam uma incerteza máxima de calibração permitida, a incerteza geral da medição no campo não é explicitamente considerada. A incerteza de calibração é uma contribuição importante para os erros de medição, mas há muitas outras incertezas conhecidas como a linearidade, a temperatura e o ângulo de incidência solar para o sensor, que raramente são quantificadas na prática.

Historicamente, a falta de fidelidade de medição foi justificada pela implantação limitada de sensores de monitoramento e pela significativa incerteza nos dados de saída elétrica capturados pelos sensores usados para monitoramento de energia. Entretanto, como a quantidade e a qualidade dos dados a nível de *string* FV e até de módulo aumentou muito nos últimos anos, o diagnóstico do sistema também evoluiu de um simples gráfico da saída de energia contra o tempo, para o monitoramento do comportamento FV sob condições específicas ou normalizadas. Como resultado, há agora uma maior necessidade de determinação mais precisa dessas condições (especialmente irradiância). Além disso, o rápido ritmo da evolução tecnológica, incluindo a implantação de sistemas com módulos bifaciais, requer medições de irradiância de albedo no solo, que impõem ao piranômetro um fluxo de irradiância que difere significativamente das condições típicas de calibração do sensor (alta irradiância e ângulo baixo ou zero para o sensor) e são não-uniformes na parte de trás de um arranjo FV.

Este estudo está, portanto, focado na caracterização completa de múltiplos sensores, para determinar as condições-limite para calibração e seu impacto na incerteza final. Os principais desafios são o desenvolvimento de métodos significativos de caracterização completa, a um custo razoável e prático de usar, e a compatibilidade com uma ampla variedade de tipos de instalação de sistemas e ambientes operacionais. Felizmente, a colaboração PV CAMPER é composta por parceiros distribuídos em todo o mundo em muitos climas operacionais diferentes, com acesso a sistemas FV comerciais de diferentes projetos e operando nos laboratórios de pesquisa da mais alta qualidade.

Até agora, o estudo concentrou-se em quantificar a variação na resposta angular de diferentes piranômetros, utilizando diferentes métodos de calibração. A próxima fase determinará a influência do clima de operação nas taxas de deriva de calibração, para fornecer decisões baseadas em dados sobre a frequência necessária para a recalibração do sensor. O objetivo é desenvolver métodos de caracterização completa prontamente implementados, a um custo razoável e prático para uso em uma ampla gama de tipos de instalação de sistemas e ambientes operacionais.

### 2.4 Um estudo da precisão das medições do albedo terrestre em comparação com os dados obtidos via satélite

O Albedo, a refletividade difusa de uma superfície, é uma medida importante na avaliação e simulação do desempenho FV, especialmente para as tecnologias de módulos bifaciais, que estão ganhando rapidamente participação no mercado. No entanto, muitos modelos de desempenho assumem que o albedo é constante ao longo do tempo para um determinado substrato, mesmo quando as evidências mostram que os valores do albedo podem mudar drasticamente, com base no ângulo solar, irradiação sazonal, tipo e variação sazonal na cobertura vegetal, grau de sombra da parte traseira do

sensor, presença e degradação da neve, e prevalência de partículas em suspensão no ar, como fuligem, que absorve a luz. Somente quantificando a variação temporal e espacial nas medidas do albedo é possível prever com precisão o desempenho dos sistemas bifaciais.

Igualmente preocupante é a falta de padrões para o monitoramento de albedo terrestre. Tipicamente, as medições baseadas no solo dependem de instrumentos de piranômetro duplo, que consistem em um piranômetro de classe A horizontal para o céu, e um piranômetro de "baixo custo" de classe C horizontal para o solo, embora às vezes sejam empregadas combinações de piranômetro e células de referência ou mesmo o conjunto de duas células de referência. A maioria desses instrumentos é fixa no lugar e sua altura pode variar. A falta de um conjunto de melhores práticas ou padrões para medir albedo cria inconsistências de dados e introduz uma incerteza significativa de medição, com mudanças diurnas e sazonais no albedo e sombreamento irregular na parte traseira raramente consideradas. Como resultado, o potencial de erro de medição pode ser significativamente maior do que o reconhecido.

Com a participação de cinco instituições participantes do PV CAMPER e o emprego de albedômetros de alta fidelidade (instrumentos de piranômetro duplo) em seis locais geograficamente diversos, os objetivos deste estudo são:

- Estabelecer um conjunto de melhores práticas para medições de albedo em terra, incluindo tipo e colocação de instrumentação, e protocolos de calibração e manutenção;
- Medir as mudanças diurnas e sazonais no albedo através de zonas climáticas diferentes e por vários anos;
- Quantificar a redução da incerteza nas medições do albedo pela abordagem técnica acima;
- Validar os métodos de simulação para irradiação traseira.

A Tab. 2 fornece a localização, coordenadas geográficas, classificação climática de Köppen-Geiger (Peel *et al.*, 2007) e o período de medição para os seis locais incluídos neste estudo. Três locais estão em climas temperados (Anhalt/CSP na Alemanha e YU na Coreia do Sul), enquanto Sandia\_VT (Vermont, EUA) representa um clima continental úmido. Sandia\_NM (Novo México, EUA) e QEERI (Qatar) estão em clima frio desértico e semiárido frio, respectivamente.

Tabela 2 – Descrição dos locais de estudo (Dittmann *et al.*, 2019).

| Site      | País            | Lat., Long.       | Zona Climática |
|-----------|-----------------|-------------------|----------------|
| Anhalt    | Alemanha        | 51,77°N; 1,76°E   | Cfb            |
| CSP       | Alemanha        | 51,49°N; 1,93°E   | Cfb            |
| YU        | Coreia do Sul   | 25,32°N; 1,43°E   | Cwa            |
| Sandia_VT | Vermont, EUA    | 44,47°N; 3,10°W   | Dfa            |
| Sandia_NM | New Mexico, EUA | 35,05°N; 106,54°W | Bsk            |
| QEERI     | Catar           | 35,83°N; 128,75°E | Bwh            |

Os dados preliminares coletados nos seis locais são mostrados na Fig. 4. Dois dos locais (Sandia no Novo México, USA e QEERI em Doha, Qatar) mostram um pequeno desvio no albedo, também chamado de relação de irradiação traseira/frontal (aqui representado por  $\alpha$ ), ao longo do ano, fato atribuível a um clima consistente. Em contraste, o único local que vê neve persistente no inverno (Sandia, Vermont) mostra picos claros em albedo cinco meses do ano.

A Fig. 4 (esquerda) mostra o histograma de  $\alpha$  para cada local de teste junto com a média ( $\mu$ ), a mediana e o desvio padrão ( $\sigma$ ). Em climas moderados,  $\alpha$  é mais amplamente distribuído em torno da média, enquanto nos climas desérticos a distribuição é muito estreita. Na Sandia\_VT, dois máximos são formados na distribuição: um em torno de 0,2 que representa os meses de verão e outro em torno de 0,7 que representa os meses de inverno com cobertura de neve persistente.

A Fig. 4 (direita) mostra o valor médio mensal de  $\alpha$  em um diagrama de caixa. A variação sazonal em Anhalt pode ser atribuída a mudanças na vegetação à medida que a grama passa de verde para amarelo/cinza para marrom. No CSP, o albedo reflete de forma semelhante às mudanças vegetativas, mas também é afetado pelo sombreamento dos módulos PV próximos. Em contraste, as medições constantes do albedo no QEERI são indicativas de um clima consistente e de um substrato altamente refletivo. Os dados da Universidade de Yeungnam, na Coreia, devem mostrar similarmente baixa variabilidade, mas neste caso os aumentos repentinos em maio e agosto podem ser atribuídos ao clareamento artificial do substrato.

No geral, este trabalho demonstra que o albedo ou a relação de irradiação traseira/frontal ( $\alpha$ ) pode variar com o tempo, dependendo principalmente do tipo de substrato, bem como do clima local. Se não forem considerados cuidadosamente, todos estes efeitos podem ter um impacto profundo na incerteza das projeções de desempenho. Este estudo trata da importância de aplicar métodos de medição padronizados e confiáveis em vários locais para reduzir as incertezas de medição e aumentar a precisão dos modelos de desempenho e dos cálculos de custo nivelado de energia (LCOE) associados para plantas PV bifaciais.

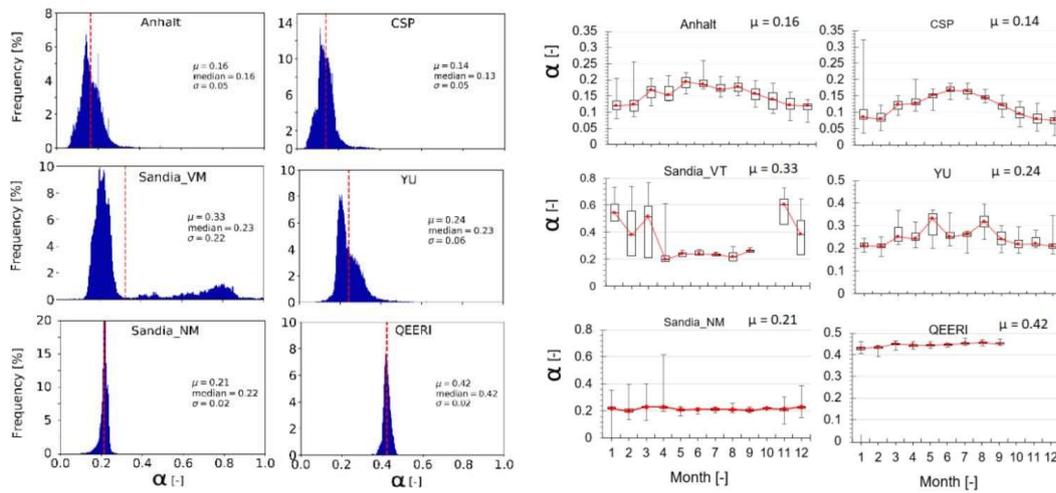


Figura 4. Resultados preliminares de dados de um ano de albedo com diferentes configurações de medidas: (esquerda) - Histograma do albedo ( $\alpha$ ) para cada local de teste junto com a média ( $\mu$ ), mediana e o desvio padrão ( $\sigma$ ); (direita) - Variação sazonal e média mensal de albedo ( $\alpha$ ) para diferentes locais avaliados (Dittmann *et al.*, 2019).

## 2.5 O efeito da condensação na taxa de sujidade FV - Um estudo global

As evidências qualitativas sugerem que a condensação (orvalho) desempenha um papel fundamental na sujidade de sistemas FV. Seu principal impacto é que a umidade atrai partículas de poeira para a superfície do módulo, e pode "cimentar" a poeira no local após a evaporação da condensação. Entretanto, se houver uma grande quantidade de condensação, ela pode escorregar dos módulos e limpá-los.

Apesar destes efeitos significativos, a relação quantitativa entre a condensação e a taxa de sujidade FV ainda não foi bem investigada na literatura. A principal razão para isto é que sensores de condensação (e dados) não são comuns, já que tais sensores não estão incluídos nas estações meteorológicas padrão, e há poucos equipamentos de "nível industrial" disponíveis no mercado para uso autônomo.

O estudo de condensação de PV CAMPER tem os seguintes objetivos:

- Desenvolver e validar um sensor de condensação barato para uso com sistemas FV;
- Implementar tais sensores globalmente para estudar o efeito da condensação sobre a taxa de sujidade FV, em diferentes ambientes;
- Quantificar o efeito da condensação do módulo sobre a sujidade FV (% da variação da sujidade explicada pela variação da condensação);
- Determinar a causa/efeito da quantidade e composição da sujeira na ocorrência da condensação;
- Avaliar a condensação como um preditor da taxa de sujidade FV em diferentes locais geográficos; e
- Melhorar a compreensão, modelagem e previsão da sujidade FV através de diferentes climas/locais.

O estudo é liderado pelo QEERI, e atualmente envolve nove locais de teste FV executados pela PV CAMPER e outras organizações. Os sensores de condensação foram desenvolvidos e validados pelo QEERI entre 2019 e 2020 e calibrados para dar valores semelhantes aos de um sensor de referência comercial. O QEERI começou a produzir e fornecer sensores de condensação para os participantes do projeto a partir de meados de 2020. A Fig. 5 mostra o sensor desenvolvido.

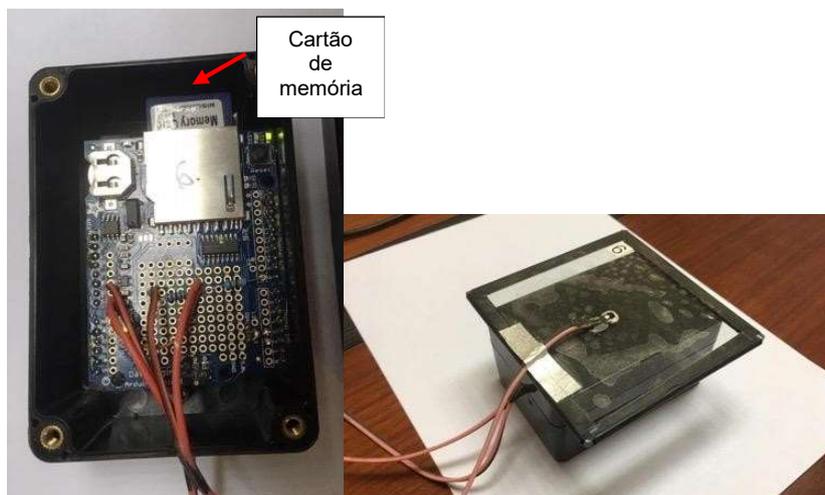


Figura 5 – Imagem da parte interna do sensor de condensação (esquerda), mostrando o cartão de memória, que deve ser lido a cada duas semanas e a superfície de vidro com sensor de umidade (direita).

Assim como a condensação, os participantes medem outras condições meteorológicas e a taxa de sujidade FV em seus locais de testes. Os dados estão sendo consolidados e verificados pelo QEERI. Até agora, o objetivo de alcançar uma grande variedade de condições de condensação e de sujidade foi alcançado. Espera-se que até o início de 2022, dados suficientes estejam disponíveis para uma análise estatística robusta do efeito da condensação na taxa de condensação FV em diferentes climas. Espera-se que estas informações ajudem a melhorar os modelos de previsão da taxa de sujidade FV e melhorar a compreensão física do processo de sujidade.

### 3. CONCLUSÕES

Com uma economia global em constante expansão, o setor de energia solar segue se expandindo e diversificando, se fazendo necessário um esforço coordenado de pesquisa para 1) assegurar o desempenho e a confiabilidade das tecnologias emergentes em diferentes ambientes operacionais; 2) apoiar o desenvolvimento de tecnologias que são otimizadas para o clima; e 3) criar maior confiança nas previsões de energia gerada pelos sistemas fotovoltaicos ao longo da sua vida útil, melhorando a precisão dos modelos de desempenho e dos dados que os alimentam. A colaborativa internacional PV CAMPER visa preencher este vazio, fornecendo tanto aos pesquisadores quanto aos parceiros industriais uma plataforma técnica para reduzir a incerteza no setor solar e uma base científica para a evolução tecnológica que reconhece que a energia solar não é em mercado de tamanho único, sendo que deve se adaptar a diferentes climas e condições ambientais para atender às diversas condições climáticas do crescente mercado global.

Para ilustrar o escopo e impacto das atividades de pesquisa do PV CAMPER, cinco projetos em andamento foram descritos neste estudo, todos visando a avaliação em diferentes zonas climáticas: um focado na medição e estimativa de temperatura de módulos fotovoltaicos; um sobre eventos de sobreirradiação; um focado na precisão de medição dos piranômetros; outro na medição e modelagem do albedo, um fator chave para o ganho bifacial; e um quinto na condensação como um fator contribuinte para perdas por sujeira de sistemas FV. Os resultados preliminares destes cinco estudos também foram apresentados, destacando a importância da colaborativa no contexto multiclímico global.

### Agradecimentos

Os autores desejam agradecer aos seus colegas do PV CAMPER que não participaram desta pesquisa diretamente, mas que ajudaram a criar a organização e estão promovendo ativamente a troca de ideias e dados.

Aline Kirsten de Oliveira Vidal, Marília Braga, Ricardo Rüther agradecem o apoio financeiro da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), por meio de projetos de P&D da ENGIE, CTG, ENEL, CPFL e STATKRAFT. Marília Braga agradece ainda o apoio recebido da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) através de sua bolsa de doutorado.

Este trabalho é financiado em parte pelo *U.S. Department of Energy Solar Energy Technologies Office - Award Number 34362*.

SERIS é um instituto de pesquisa da *National University of Singapore (NUS)*. O SERIS é apoiado pela NUS, a *National Research Foundation Singapore (NRF)*, o *Energy Market Authority of Singapore (EMA)* e o *Singapore Economic Development Board (EDB)*.

## REFERÊNCIAS

- Braga, M., Oliveira, A. K. V., Burnham, L., Dittmann, S., Gottschalg, R., Betts, T., Rodríguez-Gallegos, C. D., Reindl, T., e Rütther, R., 2020. Solar Over-Irradiance Events: Preliminary Results from a Global Study. *Conference Record of the IEEE Photovoltaic Specialists Conference*.
- Braga, M., Oliveira, A. K. V., Rütther, R., Burnham, L., Dittmann, S., Oh, S., Benlarabi, A., Choi, J., Ebert, M., Figgs, B., Gottschalg, R., Kim, K., e Reindl, T., 2020. PV CAMPER: Colaboração Internacional para Avanços na Pesquisa Multiclímática em Energia Solar Fotovoltaica. *VIII Congresso Brasileiro de Energia Solar*. Fortaleza. Obtido de <https://anaiscbens.emnuvens.com.br/cbens/article/view/900/900>
- Burnham, L., Dittmann, S., Gottschalg, R., Figgs, B., Betts, T., Oliveira, A. K. V., Braga, M., Guez-Gallegos, C. D. R., Reindl, T., Oh, S., Ettlbi, K., e Ruther, R., 2021. Inside PV CAMPER: A global research collaborative to advance photovoltaic performance across a range of operating climates. *PV Tech Power*, 28(August), 42–49.
- Dittmann, S., Sanchez, H., Burnham, L., Gottschalg, R., Oh, S., Benlarabi, A., Figgis, B., Abdallah, A., Rodriguez, C., Rütther, R., e Fell, C., 2019. Comparative Analysis of Albedo Measurements (Plane-of-Array and Horizontal) At Multiple Sites Worldwide. *36th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition*, 1388–1393. doi:10.4229/EUPVSEC20192019-5DO.1.4
- Faiman, D., 2008. Assessing the outdoor operating temperature of photovoltaic modules. *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, 16(4), 307–315. doi:10.1002/pip.813
- IEA., 2021a. Solar - Fuels & Technologies. Obtido 16 de agosto de 2021, de <https://www.iea.org/fuels-and-technologies/solar>
- IEA., 2021b. *Snapshot of Global PV Markets 2021*. Obtido de [http://www.iea-pvps.org/fileadmin/dam/public/report/technical/PVPS\\_report\\_-\\_A\\_Snapshot\\_of\\_Global\\_PV\\_-\\_1992-2014.pdf](http://www.iea-pvps.org/fileadmin/dam/public/report/technical/PVPS_report_-_A_Snapshot_of_Global_PV_-_1992-2014.pdf)
- International Electrotechnical Commission., 2017. IEC 61724-1:2017 -Photovoltaic System Performance Monitoring - Guidelines For Measurement, Data Exchange And Analysis.
- International Electrotechnical Commission., 2018. IEC 61853-4:2018 - Photovoltaic (PV) module performance testing and energy rating - Part 4: Standard reference climatic profiles.
- IRENA., 2021. *RENEWABLE CAPACITY STATISTICS 2021*. Abu Dhabi.
- Oh, S.-Y., Kim, M.-S., So, W.-S., Kyoung Kim, W., Hak Jung, J., Park, C., Aboubakr, B., Badr, I., Zakaria, N., e Ahmed, B., 2017. Outdoor Operating Temperature Modeling of Photovoltaic Modules Including Transient Effect. *2017 IEEE 44th Photovoltaic Specialist Conference (PVSC)* (p. 487–489). IEEE. doi:10.1109/PVSC.2017.8366327
- Oliveira, A. K. V., Braga, M., Burnham, L., Dittmann, S., Gottschalg, R., Betts, T. R., Rodríguez-Gallegos, C. D., Reindl, T., Oh, S.-Y., e Rütther, R., 2020. Comparative Analysis of Module Temperature Measurements and Estimation Methods for Various Climate Zones across the Globe. *37th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition* (p. 1345–1351). Lisbon. doi:10.4229/EUPVSEC20202020-5DO.2.2
- Oliveira, A. K. V., Braga, M., Oh, S., Dittmann, S., Gottschalg, R., Rodríguez-Gallegos, C. D., Reindl, T., Ettlbi, K., Betts, T., Burnham, L., e Rütther, R., 2021. Analysis of Temperature Inertia of PV Modules Using Different Temperature Estimation Models. *38th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition* (p. 1269–1274). doi:10.4229/EUPVSEC20215CV.2.40
- Peel, C. M., Finlayson, B. L., e McMahon, T. A., 2007. Updated world map of the Köppen-Geiger climate classification. *Hydrology and Earth System Sciences*, 11, 1633–1644. doi:<https://doi.org/10.5194/hess-11-1633-2007>
- Ross, R. G., 1976. Interface Design Considerations for Terrestrial Solar Cell Modules. *Proceedings of the 12th IEEE Photovoltaic Specialists Conference* (p. 801–806). Baton Rouge, LA.
- Sandia National Laboratories., 2021. PV CAMPER. Obtido 11 de janeiro de 2021, de <https://energy.sandia.gov/programs/renewable-energy/photovoltaics/pv-systems-and-reliability/pv-camper/>
- Stein, J. S., e King, B. H., 2013. Modelling for PV plant optimization. *Photovoltaics International*, 19th(February), 101–109.

### PRELIMINARY RESULTS OF AN INTERNATIONAL COLLABORATIVE TO ADVANCE PHOTOVOLTAIC PERFORMANCE ACROSS DIFFERENT CLIMATES

**Abstract.** This work aims to summarize the first results obtained from studies by the international collaborative PV CAMPER (Photovoltaic Collaborative to Advance Multi-Climate Performance and Energy Research). The group was established in 2018 and is today a formally recognized organization, with eleven member institutions and a network of 16 research sites spread across both hemispheres and most major climate zones. In a context of unprecedented growth in the installed capacity of photovoltaic (PV) solar energy - which in recent years has started to encompass markets not previously explored by the technology - and climate change - which brings increasingly extreme operating conditions to PV systems -, the collaborative aims to evaluate various aspects of durability and performance of PV modules in different climatic regions, aiming at a better understanding of the losses and degradation of the technology in adverse conditions little explored or known by the sector. To illustrate the scope and impact of the PV CAMPER research activities, five ongoing projects are described in this study, all aimed at multiclimate assessment: one focused on measuring and

*estimating the temperature of photovoltaic modules; another on over-irradiance events; one focused on measurement accuracy of pyranometers; another on albedo measurement and modeling, a key factor for bifacial gain; and a fifth on condensation as a contributing factor to PV system soiling losses.*

**Keywords:** *Solar Energy, International Collaborative, Multiclimatic Analyses.*