

# INTERCOMPARAÇÃO ENTRE PIRANÔMETROS PARA ESTABELEECER UM PADRÃO DE REFERÊNCIA LOCAL

Sylvio Luiz Mantelli Neto

Daniele Conceição dos Santos - danieleconceicao.dcs@gmail.com

Isadora Maciel Queiroz

Ricardo Rütther

Centro de Pesquisa e Capacitação em Energia Solar da Universidade Federal de Santa Catarina (Fotovoltaica/UFSC)

**Resumo.** Estações solarimétricas de monitoramento contínuo frequentemente enfrentam interrupções nos dados devido a problemas operacionais. Algumas dessas estações utilizam mais de um sensor para monitorar o mesmo parâmetro, garantindo redundância e a continuidade dos dados. No entanto, a simples substituição de sensores muitas vezes é feita sem considerar suas diferenças. Este estudo visa analisar comparativamente sensores de irradiância em uma estação solarimétrica de precisão para avaliar a equivalência de suas medições. Utilizaremos sensores classificados como Classe A e B, conforme normas ISO 9060, tendo os sensores mais precisos como referência. Esses sensores de referência serão validados de acordo com os critérios da Baseline Surface Radiation Network da Organização Mundial de Meteorologia (WMO/BSRN). Os dados foram coletados em condições de céu claro, nublado e misto durante seis dias para cada condição, em 2019. Em seguida, os sensores foram comparados considerando três componentes da radiação solar: Global, Direta e Difusa. Os resultados apontaram que os sensores Classe A do tipo termopilha têm uma incerteza e variância significativamente menores em comparação aos sensores quânticos a semicondutores. Diferenças foram observadas mesmo entre diferentes sensores a termopilha, com e sem unidades de ventilação. A média simples entre os sensores não é suficiente para uma avaliação precisa, pois a variância apresentou divergências de até duas ordens de magnitude. A substituição de um sensor por outro deve considerar a variância, especialmente ao escolher a escala temporal. Períodos de observação com aumento gradual das médias a cada 10, 20, 60, 1440 minutos ou diárias tendem a suavizar progressivamente essas diferenças quando aplicados.

**Palavras-chave:** Intercomparação, Piranômetros, Irradiância Solar.

## 1. INTRODUÇÃO

A irradiância solar Global Horizontal (GHI) é uma componente solar de significativa relevância em atividades acadêmicas e levantamentos dedicados à exploração do recurso solar como fonte primária de energia renovável. A medição precisa da GHI é conduzida em estações de monitoramento contínuo, sendo que, em ambientes que demandam maior precisão, sensores adicionais são empregados como medida de redundância. Essa prática visa manter a integridade da sequência temporal dos dados, bem como mitigar possíveis falhas operacionais, já que estações de monitoramento contínuo, embora fundamentais, frequentemente enfrentam problemas operacionais que resultam em interrupções temporais nos dados, comprometendo sua continuidade. Nesse contexto, vale salientar que a operação, manutenção e o controle de qualidade, são as etapas mais relevantes de uma estação de monitoramento contínuo (Pereira *et al.*, 2017). Entretanto, a complexidade decorrente da utilização de sensores e sistemas provenientes de diferentes modelos e fabricantes, com distintos níveis de incerteza, impõe desafios substanciais. Essas divergências não apenas impactam a qualidade dos dados coletados, mas também influenciam as avaliações operacionais, sendo particularmente significativas em contextos como a monitorização solar em plantas fotovoltaicas, onde as incertezas podem repercutir na avaliação do retorno financeiro do investimento (Driese *et al.*, 2015; Saputro *et al.*, 2023). É imprescindível atentar-se para a relevância da incerteza na medição dessas variáveis. Em uma planta de 100 MW, por exemplo, uma incerteza de  $\pm 5\%$  no monitoramento pode se traduzir em  $\pm 5$  MW de imprecisões nas estimativas. Diante desse cenário, é evidente a urgência de medir os parâmetros envolvidos com a máxima precisão possível para garantir a confiabilidade das avaliações e distinguir se existe uma equivalência ou uma variável de equivalência entre os sensores dessa mesma grandeza física.

A literatura especializada já contempla diversos trabalhos de comparação entre piranômetros, conduzidos por organizações internacionais e grupos de pesquisa em diferentes regiões do mundo, incluindo Europa (Driese, 2015; Mathijssen, 2021), Ásia (Saputro *et al.*, 2023; Megantoro *et al.* 2022; Mubarak *et al.* 2017; Sanchez *et al.*, 2016), Estados Unidos (Vignola *et al.*, 2017), e América do Sul-Chile (Chong *et al.*, 2018). Essas comparações destacam não apenas a importância da escolha adequada do método de calibração, mas também a necessidade de considerar as particularidades do tipo de calibração realizado. Conforme definido pela norma ISO 9843:2023<sup>1</sup>, a calibração pode ser do Tipo A, realizada em ambiente "indoor" pelos fabricantes em bancadas com lâmpadas, ou do Tipo B, conduzida

<sup>1</sup> <https://www.iso.org/standard/78800.html>

"outdoor" em campo, utilizando a luz solar natural (Driese *et. al.*, 2015; Saputro *et. al.*, 2023). A norma ISO 9843:2023 orienta a calibração de piranômetros por comparação a um piranômetro de referência, podendo este estar em posição horizontal do Tipo B1, inclinado Tipo B2, ou de incidência normal Tipo B3. A calibração deve ser realizada com um piranômetro rastreável ao World Radiometric Reference<sup>2</sup> (WRR) Classe A. Além disso, a norma preconiza o levantamento das incertezas estatísticas das medidas, classificadas como Tipo A (relacionadas à variabilidade do fenômeno observado) e Tipo B (abarcando incertezas do sensor e do sistema de medida). No escopo deste estudo, as incertezas do Tipo B já foram detalhadamente abordadas em trabalho anterior (Mantelli *et al.*, 2019), enquanto as incertezas do Tipo A serão rigorosamente avaliadas durante este experimento.

Este trabalho tem como objetivo principal, a partir de um conjunto de dados representativos das condições isotrópicas e anisotrópicas do céu adquiridos no ano de 2019, realizar uma análise comparativa pareada e um controle de qualidade dos dados para diferentes sensores que monitoram as irradiâncias GHI (Global Horizontal Irradiance), DNI (Direct Normal Irradiance), DfHI (Diffuse Horizontal Irradiance) e LW (Long-wave downward Irradiance). Essa avaliação seguirá as normas do programa Baseline Surface Radiation Network (BSRN) da Organização Mundial de Meteorologia (WMO), para, em seguida, conduzir uma análise estatística com o intuito de verificar as diferenças entre esses sensores. O estudo busca, assim, estabelecer uma equivalência confiável entre os sensores utilizados. Os próximos capítulos apresentarão os procedimentos realizados, as análises aplicadas, os resultados obtidos e as conclusões relevantes, proporcionando uma compreensão detalhada do estudo comparativo entre diferentes sensores de irradiância solar.

## 2. MATERIAIS E MÉTODOS

Na presente seção serão descritos como os dados utilizados foram obtidos, validados e analisados estatisticamente, para realizar a comparação entre os sensores. Os dados utilizados foram obtidos na Estação Solarimétrica do Laboratório FOTOVOLTAICA-UFSC em Florianópolis SC. Uma descrição do sistema de medidas utilizado na estação com a análise de incertezas do tipo B, está descrito no artigo Mantelli (2019). Para tal fim, seis dias foram selecionados visualmente para cada uma das condições de céus isotrópicos claro e nublado. Os céus isotrópicos referem-se a condições onde a distribuição da radiação solar é uniforme em todas as direções, englobando tanto dias claramente ensolarados quanto dias completamente nublados. Além dos isotrópicos, outros seis dias anisotrópicos mistos foram selecionados ao longo do ano de 2019, que é quando o céu não apresenta uma única condição e sim ambas as condições simultaneamente. Os seguintes dias foram selecionados após uma inspeção visual a partir de gráficos de séries temporais: isotrópico claro 24 e 29 de abril, 03 de maio, 08 e 10 de junho, e 16 de julho. Isotrópico nublado 07 de abril, 30 de maio, 26 de junho, 02 de julho, 20 de setembro e 15 de outubro. Anisotrópico 10 de abril, 02 de maio, 30 de junho, 14 de agosto, 28 de setembro e 08 de outubro. Os dados encontram-se no *Universal Coordinated Time* (UTC) e no padrão horário inglês, porque seguem as recomendações operacionais da rede SONDA do INPE, que por sua vez foram baseadas na rede internacional BSRN. Vale a pena salientar que dias perfeitamente claros predominantemente ocorrem durante o inverno. Durante o verão, devido à dinâmica atmosférica local, é mais difícil encontrar dias perfeitamente claros.

Um sistema de aquisição de dados CR3000<sup>3</sup> realizou a leitura dos sensores a cada segundo e também as médias calculadas para cada minuto. Apesar dos sensores apresentarem em seu catálogo uma resposta temporal distinta conforme descrito na Tab. 1 do artigo Martins *et. al.* (2022), na prática, com a resolução temporal de um segundo durante a análise do efeito de sobre-irradiância causado pelas nuvens com os mesmos sensores não foi observada nenhuma diferença na resposta temporal conforme pode ser observado nos gráficos das figuras 5a e 5b de Martins *et. al.* (2022). Vale a pena observar nos gráficos que todos os piranômetros utilizados não apresentaram diferenças significativas quanto à resposta temporal quando comparados os sensores a semicondutores que são muito mais rápidos durante a análise das medidas observadas.

Para a irradiância global horizontal, foi estabelecido prefixo GHI para os sensores de modelos: SMP22T<sup>4</sup>, SMP22P, SMP11P, MS-80<sup>5</sup>, SR-20<sup>6</sup>, SPN1<sup>7</sup> e SiO<sub>2</sub>. Para a irradiância direta normal, foi estabelecido o prefixo DNI para o sensor de modelo SHP1 e DHI para o sensor modelo SPN1. O SPN1 É um sensor combinado que mede diretamente as componentes GHI e DfHI e indiretamente ou de maneira combinada a direta Horizontal DHI. Para a irradiância difusa horizontal, foi estabelecido o prefixo DfHI, para os sensores modelo SMP22T, SMP11R e o SPN1. Para a irradiância de onda longa, foi estabelecido o prefixo LW para o sensor SGR4. Os sensores, SHP1, MS-80, SR-20, SPN1 e SiO<sub>2</sub> não possuem unidades de ventilação externa. Somente os sensores da KIPP & ZONEN<sup>8</sup> (KZ) possuem o sistema

<sup>2</sup> <https://www.pmodwrc.ch/en/world-radiation-center-2/>

<sup>3</sup> <https://www.campbellsci.com.br>

<sup>4</sup> <https://www.kippzonen.com/Download/1122/CMP21-CMP22-SMP22-pyranometers-EN>

<sup>5</sup> <https://www.eko-instruments.com/media/hrhfxsyx/ms-80-product-sheet.pdf>

<sup>6</sup> [https://www.hukseflux.com/uploads/product-documents/SR20\\_v2313.pdf](https://www.hukseflux.com/uploads/product-documents/SR20_v2313.pdf)

<sup>7</sup> [https://delta-t.co.uk/wp-content/uploads/2021/02/SPN1-Datasheet\\_v6.pdf](https://delta-t.co.uk/wp-content/uploads/2021/02/SPN1-Datasheet_v6.pdf)

<sup>8</sup> <https://www.kippzonen.com/Products>

de ventilação modelo CVF-4. Os sensores MS-80 da EKO<sup>9</sup> e SR-20 HUKSEFLUX<sup>10</sup> (HS) utilizam um sistema interno de ventilação para evitar a condensação no domo. Os sensores SMP22T para GHI, o SMP22T para DfHI, o SGR4 para LW e o SHP1 para DNI foram instalados no rastreador modelo SOLYS-2. Este rastreador também sombreia o sensor SMP22T utilizado para DfHI e o SGR4 para LW. O sensor SMP22P para GHI encontra-se na plataforma fora do SOLYS2. O sensor SMP11R para DfHI, foi instalado em um anel de sombreamento modelo CM121-B. Os outros sensores da DELTA-T<sup>11</sup> (DT) para GHI e DfHI e INGENIEURBURO<sup>12</sup> (EB) para GHI, não possuíam acessórios e também foram instalados na plataforma. É importante observar, que os sensores da KZ eram piranômetros digitais, enquanto todos os demais eram analógicos. Quase todos os sensores eram do tipo térmicos ou termopilha, enquanto os sensores DT e EB eram do tipo quântico ou de silício. O EB também conhecido como célula de referência, usa a mesma tecnologia de construção de um módulo fotovoltaico do tipo monocristalino. Este conjunto de sensores, são os utilizados nas atividades de pesquisas do FOTOVOLTAICA, e não são os únicos modelos existentes para aquisição. Porém, são largamente empregados e bem representativos dos sensores disponíveis no mercado. Não foi utilizado ou realizada nenhuma compensação de temperatura nos dados dos sensores.

## 2.1 Validação dos sensores utilizados como referência

Após a coleta, os dados foram validados com base nos critérios dos programas BSRN, seguindo as recomendações de Long e Dutton QC 2.0 (2006) e Long e Shi (2008). Foram estabelecidos limites máximos fisicamente possíveis (FP) e extremamente raros (ER) para GHI, DfHI, DHI no plano horizontal e LW, incluindo limites máximos para LW considerando a temperatura ambiente. Além disso, foi conduzida uma análise comparativa que empregou a Razão Combinada (CoRa) para avaliar a relação entre as componentes global ou difusa sob análise e a SOMA das irradiâncias GHI e DfHI utilizadas como referência descritas na Eq. (3). A Razão Combinada (CoRa) é uma medida normalizada que estabelece limites distintos para a global e a difusa de acordo com o ângulo zenital. Por isso, existem dois intervalos de teste nas Eq. (4) e (5) para a irradiância global e dois distintos para a irradiância difusa nas Eq. (6) e (7).

Os testes descritos como climatológicos no artigo de referência da BSRN não foram realizados, por que demandam dados históricos de várias estações para determinação dos índices e limites utilizados nos cálculos. Os testes comparativos foram realizados tomando os dados de DHI<sup>13</sup> e DfHI.T do rastreador solar. Foram comparados os dados de dois sensores, um GHI.T com sufixo “T” instalado no SOLYS-2 e outro GHI.P com sufixo “P” instalado na plataforma de medida fora do SOLYS-2. O sistema de sombreamento do SOLYS-2 viabiliza um sombreamento em dois eixos da medida DfHI. Também foram comparadas as DfHI. Uma no SOLYS-2, outra instalada no anel de sombreamento com sufixo “R”, e outra no sensor combinado SPN1. Os dados de ângulo zenital (SZA) foram obtidos a partir da rotina SOLPOS disponibilizado pelo National Renewable Energy Laboratory (NREL)<sup>14</sup>.

Para fins de cálculo, os dados obtidos dos sensores com ângulo zenital solar (SZA) ou SZA>90° foram iguados a zero. Durante os cálculos será utilizado o cosseno de SZA (CSZA). Para os dias selecionados como céu claro, nublado e misto, o valor da constante solar segundo a World Meteorological Organization (WMO) é  $S_0 = 1367 \text{ W/m}^2$ . O valor da constante solar ajustado para o dia das medidas  $S_a = S_0 \cdot E_0$ , onde  $E_0$  é o fator de excentricidade obtido na tabela 1.2.1 de Iqbal(2012). As equações utilizadas nos limites foram extraídas de Long e Shi (2008) para FP dos sensores GHI e DfHI respectivamente reproduzidas nas Eq. (1) e (2) e ilustrados nas Fig. 1 e 2. Nestas figuras encontram-se ilustrados os limites ER e FP, de um dia claro para as irradiâncias globais e difusas, além dos dados dos sensores utilizados como referência em função da variação do ângulo zenital. Para o DNI será utilizada a componente horizontal DNI, e o máximo valor de FP é o  $S_a$ . Os testes recomendados pela BSRN para a direta horizontal e para o SHP1, foram obtidos a partir da relação  $DHI = DNI \cdot CSZA$  e encontra-se ilustrado na Fig. 3. Nesta figura também estão ilustrados os limites ER e FP para os valores de irradiação direta horizontal para um dia claro em função do ângulo zenital. Observe que o gráfico ilustra a horizontal da irradiação direta. Observe também que, este teste também foi utilizado para avaliar a componente direta horizontal obtida a partir do sensor combinado SPN1, ilustrado no último gráfico de caixa da Fig. 8. Para o teste combinado entre os sensores ou CoRa, foram utilizados os intervalos de confiança para a GHI e a DfHI. Para a GHI será utilizada a razão GHI/SOMA, descrito nas Eq. (3), (4) e (5). A Fig. 5 ilustra somente o limite superior do teste CoRa para a irradiação difusa normalizada do sensor de referência em função do ângulo zenital para um dia claro. A Fig. 6 ilustra os limites superiores e inferiores do teste CoRa para a irradiação global normalizada do sensor de referência em função do ângulo zenital para um dia claro.

Não é possível realizar este teste para valores de SOMA <50 W/m<sup>2</sup>. Para o teste CoRa da DfHI/SOMA, serão utilizados os intervalos de confiança utilizados nas Eq. (6) e (7). Para a LW os FP devem estar entre 40 e 700 W/m<sup>2</sup>, e extremamente raros entre 60 e 500 W/m<sup>2</sup> conforme ilustrado na Fig. 4. O teste de LW, também utilizou limites baseados na temperatura ambiente em K e a constante de Stephan-Boltzmann  $\sigma$ , conforme descrito na Eq. (8) e ilustrado na Fig.

<sup>9</sup> <https://www.eko-instruments.com/eu>

<sup>10</sup> <https://huksefluxbrasil.com.br>

<sup>11</sup> <https://delta-t.co.uk/product/>

<sup>12</sup> <https://www.imt-solar.com/>

<sup>13</sup> Observe a diferença entre irradiância direta de incidência normal (DNI) e Horizontal (DHI).

<sup>14</sup> <https://midcdmz.nrel.gov/solpos/solpos.html>

6. Outras validações propostas no artigo Long e Shi (2008) não se aplicam às variáveis utilizadas neste artigo, porque dependem do uso de longas séries de dados de várias estações estabelecidas em locais diferentes.

$$GHI_{max} = S_a \cdot 1,5 \cdot CSZA^{(1,2)} + 100 \frac{W}{m^2} \quad (1)$$

$$DfHI_{max} = S_a \cdot 0,95 \cdot CSZA^{(1,2)} + 50 \frac{W}{m^2} \quad (2)$$

$$SOMA = DNISHP1 \cdot CSZA + DfNISMP22 \quad (3)$$

$$\frac{GHI}{SOMA} \in \pm 8\%, SZA < 75^\circ \quad (4)$$

$$\frac{GHI}{SOMA} \in \pm 15\%, 75^\circ < SZA < 93^\circ \quad (5)$$

$$\frac{DfHI}{SOMA} < 1,05, SZA < 75^\circ e GHI > 50 \frac{W}{m^2} \quad (6)$$

$$\frac{DfHI}{SOMA} < 1,10, 75^\circ < SZA < 93^\circ e GHI > 50 \frac{W}{m^2} \quad (7)$$

$$0,4\sigma T^4 < LW < \sigma T^4 + 25 \frac{W}{m^2} \quad (8)$$

## 2.2 Testes estatísticos

Depois que os sensores utilizados como referência para GHI (GHI\_SMP22P), DfHI (DfHI\_SMP22T) e DHI (DNI\_SHP1) foram qualificados na seção anterior, foi realizada uma análise exploratória dos dados disponíveis de todos os sensores. Observou-se as diferenças entre os sensores que se acentuavam mais ao pôr do sol, do que ao seu nascer. Estas diferenças aconteciam com todos os sensores inclusive entre os sensores mais precisos, embora em menor escala. As diferenças ocorrem porque no oeste do local de medidas existem edificações que interferem nos dados, enquanto a leste o horizonte é bem livre. Outra característica informada na nota de aplicação do fabricante é que os piranômetros K&Z possuem uma resposta direcional definida para  $SZA < 80^\circ$  Kipp&Zonen(2023). Por esta razão, todos os dados para  $SZA > 80^\circ$  foram removidos da análise. Também foram removidos os dados noturnos para não causar uma tendência na análise da diferença entre os sensores. O conjunto de dados utilizados na análise estatística foi de  $N=10293$  pontos, para condições de céu claro (c), nublado (n) e misto (m).

Os sensores monitoram simultaneamente o mesmo fenômeno físico da irradiação solar, a uma taxa de aquisição de 1 segundo, sendo que, cuja taxa de aquisição é a capacidade máxima de todos os sensores de estudo, e o CR3000 armazena as médias a cada minuto. Vale a pena salientar o efeito da média na irradiação solar. A média a cada minuto, substitui toda a variabilidade no intervalo de medida realizada a cada sessenta segundos por um único valor médio causando uma suavização (*smoothing*). Neste caso, todas as incertezas padrão do intervalo de medida de um segundo levantadas a partir de Mantelli (2019) devem ser divididas por  $60^{1/2}$ . Nestas condições os sensores que possuem melhor qualidade, o erro do tipo B pode ser considerado desprezível.

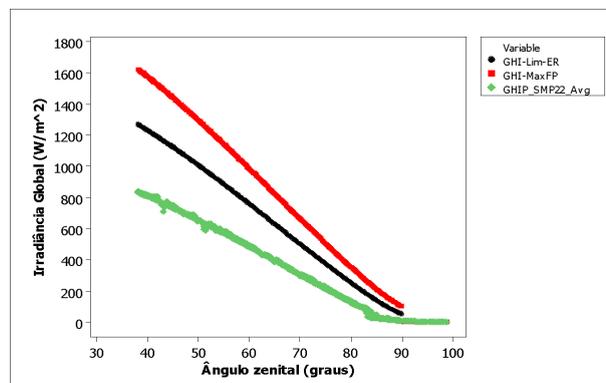


Figura 1 – Limites FP e ER com os dados do sensor Global SMP22P utilizado como referência.

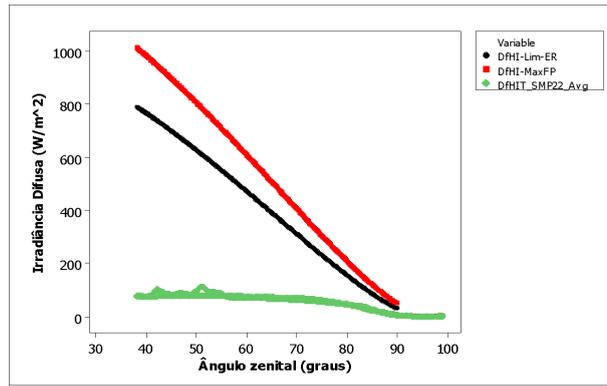


Figura 2 – Limites FP e ER com os dados do sensor Difusa SMP22T utilizado e range como referência.

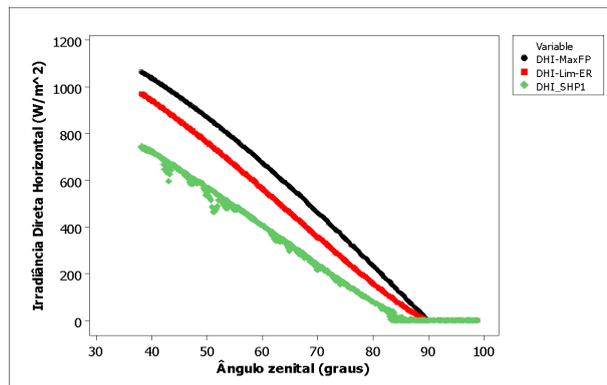


Figura 3 – Limites FP e ER com os dados do sensor Direta Horizontal SHP1 utilizado como referência.

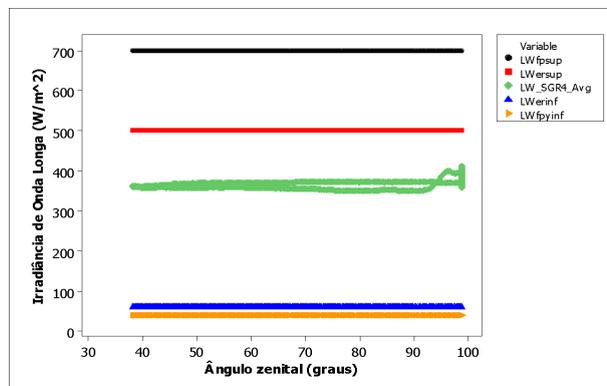


Figura 4 – Limites FP e ER, com os dados do sensor CGR4 e Onda Longa.

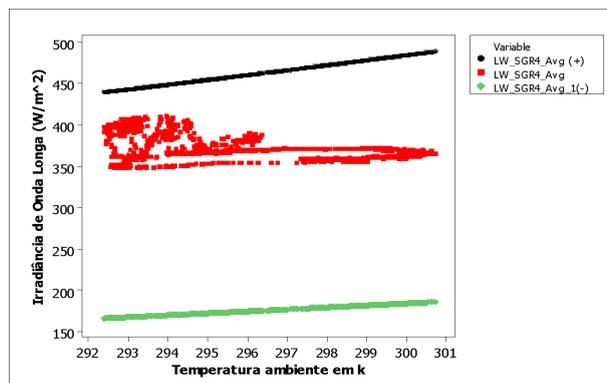


Figura 5 – Limites do teste CoRa com os dados da Global, normalizados com a soma da Direta e Difusa.

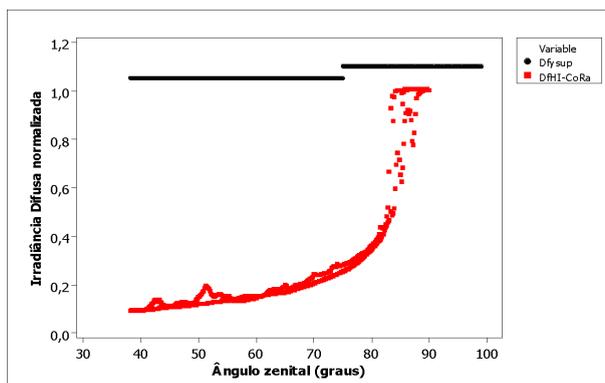


Figura 6 – Limites do teste CoRa com os dados da Difusa, normalizados com a soma da Direta e Difusa.

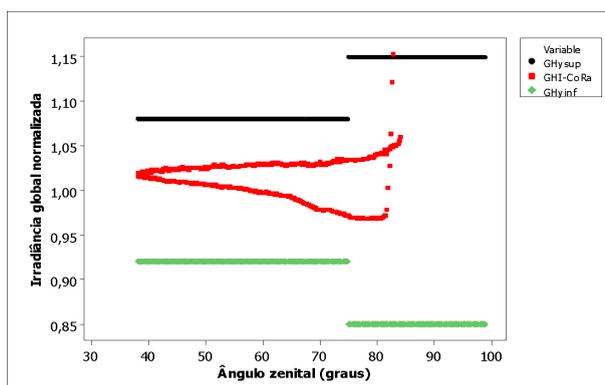


Figura 7 – Limites da irradiação de onda longa considerando a temperatura ambiente.

### 3. RESULTADOS E CONCLUSÕES

Os resultados obtidos da comparação entre os sensores estão descritos na Tab. 1 e ilustrados na Fig. 8. A Tab. 1 apresenta um sumário dos parâmetros obtidos com a estatística da diferença em relação ao sensor de referência, e a Fig. 8 o boxplot ou diagrama de caixa que ilustra graficamente os resultados obtidos. Considerando que valores máximos de irradiância podem chegar a  $S_0$ , as médias das diferenças apresentadas na terceira coluna da Tab. 1 aparentemente não parecem muito discrepantes entre os sensores. Entretanto, pode ser notado que o mesmo não ocorre com as variâncias.

Tabela 1 - Parâmetros obtidos durante a análise estatística, utilizando a diferença entre os sensores de referência.

Irradiância	Diferença	Media W/m <sup>2</sup>	Variância
GHI	22P-22T	0,34	6.674
GHI	22P-SOMA	7,82	68,41
GHI	22P-11P	3,14	9,17
GHI	22P-80	8,97	66,46
GHI	22P-20P	10,01	137,57
GHI	22P-SPN1	1,16	532,83
GHI	22P-SiO <sub>2</sub>	22,80	465,50
DfHI	22T-11R	19,77	339,36
DfHI	22T-SPN1	-4,39	226,82
DHI	DHI-SPN1	-2,71	336,18

Observa-se que os valores para a GHI dos SMP22 T e P apresentam média e variância muito menores do que os outros. A variância é muito maior para os sensores SiO<sub>2</sub> e SPN1, podendo variar de uma a duas ordens de magnitude entre os sensores. Conforme observado por Mathijesen (2021), as diferenças se acentuam para SZA maiores e podem ser atribuídas à diferença na qualidade dos domos dos sensores. Os SMP22, SHP1 e CGR4 são equipados com domos de quartzo, enquanto os outros possuem domos de vidro de alta qualidade óptica. Observou-se também o aumento das variâncias de uma ordem de magnitude, para os sensores de ventilação interna MS-80 e SR-20. A ventilação externa

com aquecimento do ar utilizada nos sensores K&Z, mantêm os domos mais limpos, evitando a deposição de particulado sobre o domo, e a formação de orvalho, promovendo a eliminação das gotas de chuva mais rapidamente do que os de ventilação interna. Com uma ordem de magnitude maior ainda na variância, os sensores SPN1 e SiO<sub>2</sub> apresentaram o pior desempenho na variância, apesar dos valores médios não serem tão discrepantes dos demais. O SiO<sub>2</sub> apresenta uma variabilidade constante ao longo do SZA, enquanto que para o sensor SPN1 ela é mais acentuada nos menores valores do que nos maiores valores de SZA. Observa-se que os valores de DfHI, para o SMP11R apresentam o seguinte comportamento a ser notado. O SMP11 apresenta uma variância maior e uma tendência de ser menor do que o SPN1. Isto ocorreu porque os dados do SMP11 estavam sem a correção no sombreamento do anel. O anel de sombreamento obstrui uma porção maior da DfHI, do que o sistema de sombreamento do SOLYS2. Isto resulta em um aumento não somente na tendência como nos valores da variância. Os valores de DHI apresentaram uma média bem baixa, mas com grande variância, porque eram valores derivados dos valores GHI e DfHI que também apresentavam grande variância. Aparentemente todos os sensores, exceto os SMP22, entre si, apresentavam uma pequena tendência de medir um pouco mais ou menos do que a referência, já o SiO<sub>2</sub> apresentou uma tendência maior de medir valores menores que o SMP22. Mas isto pode ser corrigido com um procedimento de calibração exclusivo para corrigir os valores e melhorar as incertezas. O presente trabalho deve ser consultado pelo usuário dos dados, antes de substituir por um sensor de acordo com o seu objetivo. Para uma resolução temporal com médias acima de 1 minuto, i.e. 10, 15, 60, 1440 minutos ou até um mês, estas diferenças devem ser avaliadas. Abaixo podemos visualizar na Fig. 8 de maneira ilustrada as informações da Tab. 1.

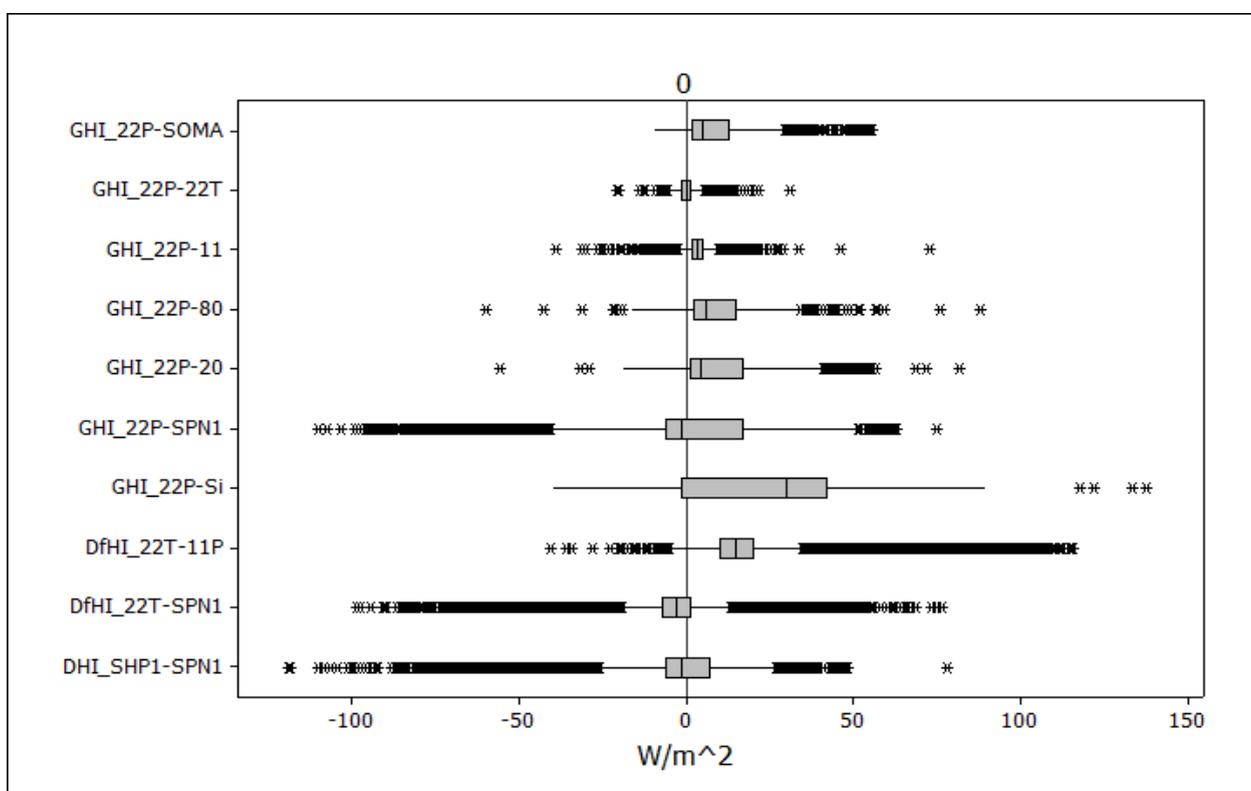


Figura 8 - Boxplot ilustrando o resultado da análise estatística dos sensores estudados.

### Agradecimentos

Os autores agradecem aos financiadores do projeto de pesquisas para a implantação da estação de referência. ANEEL projeto PE-0403-0027/2011, GUASCOR POWER P&D-0498-0001/2009 e CPFL ENERGIA. Aos Bolsistas de Iniciação Científica do FOTVOLTAICA-UFSC e aos pesquisadores do INPE-CST-LABREN que contribuíram com assessoria e implantação da infraestrutura.

### REFERÊNCIAS

- Albertazzi, A., Souza A. R.. Fundamentos de Metrologia Científica e Industrial. Book: Manole publishers 3rd ed. 2013. ISBN 978-85-204-2116-1.
- BIPM - Bureau International des Poids et Mesures. Evaluation of Measurement Data – Guide to Expression of Uncertainty in Measures JCGM 100:2008.

- Chong, M. I. Z. , Finsterle, W., Cordero, R., Sepúlveda, E., Jorquera, J., Abal, A., Monetta, A., Jesiotr, V., Castillo, H., Figueiredo, G., Ávila, R. , Perilla, C. Norambuena, M. international Pyranometer and Pyrhemometer comparison Santiago, Chile. 3 Sep. - 7 Sep.. 2018 Tech. Report: Training Activity: “Strengthening the capabilities for the calibration of Pyranometers and Pyrhemometers for use in Solar Radiation Measurements”.  
URL: [http://les.edu.uy/report/Intercomparison\\_campaign\\_USACH\\_rev2.pdf](http://les.edu.uy/report/Intercomparison_campaign_USACH_rev2.pdf).
- Driesse, A., Zaaïman, W., Riley, D., Taylor, N. and Stein, J. Indoor and Outdoor Evaluation of Global Irradiance Sensors 31st European Photovoltaic Solar Energy Conference, 14-18 September 2015, Hamburg, Germany.
- Kipp&Zonen Premium Pyranometers for Highest Requirements. Application Note for Scientific Research BSRN baixado em outubro de 2023.
- Long, C. N., Shi, Y. The QCRad Value Added Product: Surface Radiation Measurement Quality Control Testing, Including Climatology Configurable Limits. Technical Report of Department of Energy USA Sep. 2006 DOE/SC-ARM/TR-074.
- Long, C. N., Shi, Y. An Automated Quality Assessment and Control Algorithm for Surface Radiation Measurements. The Open Atmospheric Science Journal, 2008, 2, 23-37.
- Mantelli Neto, Martins G.M., Ruther, R. Uncertainty Analysis of Solar Monitoring Station: A Case STUDY. In proceedings of ISES Solar World Congress, Chile 2019. doi:10.18086/swc.2019.44.03.  
<https://proceedings.ises.org/?conference=swc2019>.
- Martins, G. L., Mantelli, S. L., and Ruther, R. Evaluating the performance of radiometers for solar over irradiance events. Solar Energy 2022 v. 231, p. 47-56. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2021.11.050>.
- Mathijesen, T. and Knap, W. Photovoltaic Pyranometers intercomparison at the BSRN site in Cabawv. The Neederlands. Technical Report TR-390, 2021 Royal Netherlands Meteorological Institute.  
<https://cdn.knmi.nl/knmi/pdf/bibliotheek/knmipubTR/TR390.pdf>.
- Megantoro, P. Syahbani, M. A., Perkasa, S. D. , Muzadi, A. R., Afif, Y. , Mukhlisin, A., Vigneshwaran, P. Analysis of instrumentation system for photovoltaic pyranometer used to measure solar irradiation level. Bulletin of Electrical Engineering and Informatics. Vol. 11, No. 6, December 2022, pp. 3239~3248 ISSN: 2302-9285, DOI: 10.11591/eei.v11i6.4390. URL: <https://beei.org/index.php/EEI/article/view/4390>.
- Mubarak, R.; Hofmann, M.; Riechelmann, S.; Seckmeyer, G. Comparison of Modelled and Measured Tilted Solar Irradiance for Photovoltaic Applications. *Energies* 2017, 10, 1688. <https://doi.org/10.3390/en10111688>.  
URL: <https://www.mdpi.com/1996-1073/10/11/1688>.
- NASA. Measurement Uncertainty Analysis Principles and Methods. Washington DC 20546: [s.n.], Handbook NASA-HDBK-8739.19-3 July 2010. URL: <https://standards.nasa.gov/standard/NASA/NASA-HDBK-873919-3>.
- Pereira, E.B., Martins, F. R., Gonçalves. A. R., Costa, R. S., Lima, F. J. L., Ruther, R., Abreu, S. L., Tiepolo, G. M., Prereira, S. V., Souza, J. G.. INPE/CCST/LABREN Atlas Brasileiro de Energia Solar. 2. ed., 2017 São José dos Campos. URL: [http://labren.ccst.inpe.br/atlas\\_2017.html](http://labren.ccst.inpe.br/atlas_2017.html).
- Sanchez, G. , Cancillo, M. L. and Serrano, A. An intercomparison of the thermal offset for different pyranometers. Journal of Geophysical Research: Atmospheres. 2016 v. 121, 13 p.7901-7912  
<https://doi.org/10.1002/2016JD024815>,  
URL: <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1002/2016JD024815>.
- Saputro, R. D. *et al* The comparison of indoor and outdoor pyranometer calibration method in Jakarta 2023 IOP Conference Series.: Earth and Environment Sciences. Jacarta 2023 1167 012004.  
doi:10.1088/1755-1315/1167/1/012004.  
URL: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1755-1315/1167/1/012004>
- Taylor, B. D., Kyuatt, C. E. Guidelines for Evaluating and Expressing the Uncertainty of NIST Measurement Results. NIST technical note 1297 1994 ed. URL <http://www.nist.gov/pml/pubs/tn1297/>
- Vignola F, Josh, P. , Chiu, C. , Dooraghi, M., Sengupta, M., Mavromatakis, F. Comparison of Pyranometers and Reference Cells on Fixed and One-axis Tracking Surfaces. ASES National Solar Conference Proceedings 2017. DOI:10.18086/solar.2017.07.01. URL:<https://api.semanticscholar.org/CorpusID:125354640>.

## INTERCOMPARISON BETWEEN PYRANOMETERS TO ESTABLISH A LOCAL REFERENCE STANDARD

**Abstract.** *Continuous solarimetric monitoring stations often experience data interruptions due to operational issues. Some of these stations use multiple sensors to monitor the same parameter, ensuring redundancy and data continuity. However, sensor replacement is often done without considering their differences. This study aims to comparatively analyze irradiance sensors in a precision solarimetric station to evaluate the equivalence of their measurements. We will use sensors classified as Class A and B, according to ISO 9060 standards, with the more accurate sensors serving as the reference. These reference sensors will be validated following the criteria of the World Meteorological Organization's Baseline Surface Radiation Network (WMO/BSRN). Data were collected under clear, cloudy, and mixed sky conditions for six days for each scenario in 2019. Subsequently, these sensors were compared considering three components of solar radiation: Global, Direct, and Diffuse. The results indicated that Class A thermopile sensors have significantly lower uncertainty and variance compared to semiconductor quantum sensors. Differences were observed even among different thermopile sensors, with and without ventilation units. Simple averaging between sensors is*

*insufficient for accurate assessment, as variance showed differences of up to two orders of magnitude. The replacement of one sensor with another should consider variance, especially when choosing the temporal scale. Observation periods with gradually increasing averages at 10, 20, 60, 1440 minutes, or daily tend to progressively smooth out these differences when applied.*

**Keywords:** *Intercomparison, Pyrometers, Solar irradiance.*