

# DESENVOLVIMENTO E CARACTERIZAÇÃO DE UM PIRANÔMETRO TÉRMICO -ANÁLISE PRELIMINAR DAS MEDIDAS DE IRRADIAÇÃO

**Lauren Merlini Santos** (UERGS) - lauren.merlini@gmail.com

**Jahel Emmanuhel Motta da Silva** (UERGS) - jahel.ems@gmail.com

**Marcos Mello Inhaquites** (UERGS) - mvini2806@gmail.com

**Fabiano Perin Gasparin** (UFRGS) - gasparin.fabiano@gmail.com

## **Resumo:**

*. Nos sistemas de aproveitamento de energia solar os estudos de disponibilidade de radiação solar são essenciais, sendo que para a análise da viabilidade da implantação do sistema são necessários longos períodos de medição da irradiância solar na localidade da instalação. O piranômetro térmico é um dos principais dispositivos utilizados para obtenção de tais dados, sendo que atualmente a classificação de um piranômetro se dá por três classes: A, B e C. Considerando a carência no mercado brasileiro de piranômetros térmicos de fabricação nacional, o objetivo deste trabalho foi o desenvolvimento e caracterização de um piranômetro térmico de baixo custo que produzisse medições comparáveis a um piranômetro de Classe B conforme a norma ISO 9060(2018). Dois protótipos foram desenvolvidos e finalizados e um terceiro protótipo está em fase de construção. O elemento sensor é baseado em um a pastilha Peltier comercialmente disponível coberta com um disco de cobre pintado de preto. Neste trabalho serão apresentados os resultados de medidas de irradiância referentes ao segundo protótipo e suas análises. A caracterização foi realizada com base na norma ISO 9847(1992), que descreve o processo de calibração de um piranômetro por meio de um piranômetro de referência. Foi obtida uma constante de calibração de valor  $10,21 \mu\text{V}/\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$  e o protótipo apresentou erro médio absoluto de medição de irradiância minuto a minuto de 8,24% em relação ao piranômetro EKO MS-60 Classe B. A comparação entre a irradiação diária, isto é, a integração da irradiância ao longo do dia teve erro médio absoluto de 4,24%. O desenvolvimento dos protótipos contribuiu para a formação de recursos humanos e ampliação do conhecimento nesta área, e possivelmente poderá fomentar o desenvolvimento do instrumento em nível comercial, após a fase de pesquisa acadêmica.*

**Palavras-chave:** *Energia Solar, Piranômetro térmico, Caracterização.*

**Área temática:** *Radiação Solar*

**Subárea temática:** *Instrumentação vinculada à medições meteorológicas*

# DESENVOLVIMENTO E CARACTERIZAÇÃO DE UM PIRANÔMETRO TÉRMICO –ANÁLISE PRELIMINAR DAS MEDIDAS DE IRRADIAÇÃO

Lauren Merlini Santos – lauren.merlini@gmail.com

Jahel Emmanuhel Motta da Silva – jahel.ems@gmail.com

Marcos Vinícius Mello Inhaquites – mvini2806@gmail.com

Universidade Estadual do Rio Grande do Sul, Engenharia de Energia

Fabiano Perin Gasparin – gasparin.fabiano@gmail.com

Universidade Federal do Rio Grande do Sul. LABSOL- Departamento de Engenharia dos Materiais

**Resumo.** Nos sistemas de aproveitamento de energia solar os estudos de disponibilidade de radiação solar são essenciais, sendo que para a análise da viabilidade da implantação do sistema são necessários longos períodos de medição da irradiância solar na localidade da instalação. O piranômetro térmico é um dos principais dispositivos utilizados para obtenção de tais dados, sendo que atualmente a classificação de um piranômetro se dá por três classes: A, B e C. Considerando a carência no mercado brasileiro de piranômetros térmicos de fabricação nacional, o objetivo deste trabalho foi o desenvolvimento e caracterização de um piranômetro térmico de baixo custo que produzisse medições comparáveis a um piranômetro de Classe B conforme a norma ISO 9060(2018). Dois protótipos foram desenvolvidos e finalizados e um terceiro protótipo está em fase de construção. O elemento sensor é baseado em um a pastilha Peltier comercialmente disponível coberta com um disco de cobre pintado de preto. Neste trabalho serão apresentados os resultados de medidas de irradiância referentes ao segundo protótipo e suas análises. A caracterização foi realizada com base na norma ISO 9847(1992), que descreve o processo de calibração de um piranômetro por meio de um piranômetro de referência. Foi obtida uma constante de calibração de valor  $10,21 \mu V/W.m^{-2}$  e o protótipo apresentou erro médio absoluto de medição de irradiância minuto a minuto de 8,24% em relação ao piranômetro EKO MS-60 Classe B. A comparação entre a irradiação diária, isto é, a integração da irradiância ao longo do dia teve erro médio absoluto de 4,24%. O desenvolvimento dos protótipos contribuiu para a formação de recursos humanos e ampliação do conhecimento nesta área, e possivelmente poderá fomentar o desenvolvimento do instrumento em nível comercial, após a fase de pesquisa acadêmica.

**Palavras-chave:** Energia Solar, Piranômetro térmico, Caracterização.

## 1. INTRODUÇÃO

Grande parte das formas de energia conhecidas no mundo são originadas pela energia solar. O Sol se comporta como um corpo negro com uma temperatura efetiva de aproximadamente 5777 K, sua energia irradia pelo espaço em uma ampla faixa do espectro eletromagnético. Desta energia, cerca de 81% da fração que chega ao sistema Terra-Atmosfera está em uma faixa de comprimentos de onda que vai do visível ao infravermelho próximo (INPE, 2017). Quando a radiação solar atinge o topo da atmosfera terrestre, sofre processos de absorção e espalhamento, resultando em uma parcela que atinge a superfície da Terra diretamente, radiação direta (ou de feixe) e uma parcela proveniente de todas as direções, que atinge a superfície terrestre após sofrer espalhamento pela atmosfera, radiação difusa. Em um dia totalmente sem nuvens, pelo menos 20% da radiação que atinge a superfície terrestre é difusa. Já em dias totalmente nublados 100% da radiação é difusa (CRESESB, 2014).

As variações da energia solar, em largas escalas de tempo, têm impactos na atmosfera e no clima da Terra (VIEIRA et al., 2011 apud GÓMEZ et al., 2018). De acordo com PEREIRA et al., (2006), a avaliação do potencial disponível traz informações importantes para áreas da atividade humana, como a meteorologia, climatologia e agronegócios, além de ser imprescindível como suporte científico para incentivar a exploração comercial dessa fonte de energia. O levantamento e a análise da disponibilidade da radiação solar são os parâmetros de maior importância em qualquer projeto de aproveitamento da energia solar, e para a obtenção de dados representativos de radiação disponível em uma determinada localidade, são necessárias medições em longos intervalos de tempo.

Os instrumentos solarimétricos medem a potência incidente por unidade de superfície, integrada sobre diversos comprimentos de onda (TIBA et al., 2000). O piranômetro térmico é um instrumento utilizado na medição do fluxo de radiação solar hemisférica total (componente direta e difusa) e é um dos instrumentos de medição utilizados para a caracterização do recurso solar disponível. Possui como elemento sensor uma pilha termoeletrica, que apresenta uma tensão elétrica proporcional à diferença de temperatura entre suas extremidades, de modo que a variação da sua fonte de aquecimento pode ser determinada pelo comportamento da tensão medida. Dentre os piranômetros termoeletricos em uso, existem basicamente dois tipos: piranômetros com a superfície receptora totalmente enegrecida e piranômetros com o detector pintado de branco e preto (*Black & White*).

Nos piranômetros com a superfície receptora totalmente enegrecida, a termopilha é revestida com uma tinta preta especial com a finalidade de simular a resposta de um “corpo negro” à radiação solar incidente, de modo que praticamente toda a energia incidente seja convertida em energia térmica. Já nos piranômetros *Black & White* as juntas quentes das termopilhas estão em contato com as superfícies enegrecidas, sendo estas altamente absorventes, e as frias em contato com as superfícies brancas, de grande refletividade (TIBA et al., 2000).

As classificações como padrão secundário, 1ª classe e 2ª classe foram alteradas para Classe A, Classe B e Classe C, respectivamente, pela norma atualizada. As classes são determinadas a partir de parâmetros de medição padronizados pela norma ISO 9060-2018, sendo que a edição anterior era do ano 1990. Tendo em vista o tempo de lançamento da norma atualizada e o elevado custo para aquisição da nova versão, a norma ISO 9060-1990 foi utilizada como referência para a classificação do piranômetro desenvolvido neste trabalho. As atualizações gerais presentes na norma de 2018 foram disponibilizadas por diversas fontes e foram apresentadas neste trabalho, como por exemplo as novas formas de classificação para os piranômetros apresentadas. A Tab. 1 apresenta os parâmetros para classificação dos piranômetros conforme a norma ISO 9060-1990.

Tabela 1 - Classificação dos piranômetros segundo a norma ISO 9060 - 1990.

Especificação	Padrão secundário	1ª classe	2ª classe
Tempo de resposta (a 95%)	< 15s	< 30s	< 60s
Zero Offset:	Offset A <sup>a</sup>	+ 7 W/m <sup>2</sup>	+ 7 W/m <sup>2</sup>
	Offset B <sup>b</sup>	± 2 W/m <sup>2</sup>	± 2 W/m <sup>2</sup>
Instabilidade (variação anual)	± 0,8%	± 1,5%	± 3%
Não-linearidade <sup>c</sup>	± 0,5%	± 1%	± 3%
Resposta cosseno(60°)	± 1%	± 2%	± 5%
[desvio máx entre 60° e 80°]	[± 3%]	[± 5%]	[± 10%]
Resposta azimutal	± 3%	± 5%	± 10%
Seletividade espectral	± 3%	± 5%	± 10%
Resposta a temperatura	2%	4%	8%
Resposta à inclinação	± 0,5%	± 2%	± 5%

a. resposta a 200 W/m<sup>2</sup> de radiação térmica líquida, ventilado.

b. resposta a uma mudança de 5 K/h na temperatura ambiente.

c. % de desvio da resposta a 500 W/m<sup>2</sup> devido a variação de irradiância de 100 ... 1000 W/m<sup>2</sup>

De acordo com o texto integral da Portaria MME n° 102/2016 serão exigidos no ato do cadastramento de empreendimentos solares, sem tecnologia de concentração de radiação, no mínimo 12 (doze) meses consecutivos de medição da irradiância global horizontal no local do empreendimento, integralizadas a cada dez minutos. A estação deve estar equipada, com no mínimo, dois piranômetros padrão “*First Class*” ou superior, conforme a norma ISO 9060:1990, orientados no plano horizontal, para medição da irradiância global horizontal (EPE, 2018)<sup>1</sup>. Esta exigência demonstra a necessidade do desenvolvimento tecnológico nacional de instrumentos de medida de irradiância solar que atendam no mínimo os requisitos de instrumentos de primeira classe (Classe B).

O Brasil possui uma rede radiométrica relativamente pequena em relação ao território nacional. A principal dificuldade para ampliação das redes solarimétricas está relacionada aos elevados custos dos sensores de medida de irradiância solar no país, tendo em vista que o Brasil atualmente não possui fabricação de piranômetros térmicos de primeira classe. Os instrumentos importados são oferecidos no mercado nacional com preços da ordem de R\$ 10.000 a R\$ 15.000. O desenvolvimento nacional de instrumentos de medida de irradiância solar pode contribuir para o desenvolvimento e ampliação da rede solarimétrica, caso torne-se viável a fabricação nacional de instrumentos. Há inúmeros desenvolvimentos em universidades de piranômetros fotovoltaicos, que são de baixo custo e de fácil montagem. Entretanto, o piranômetro fotovoltaico tem limitações relativas à resposta espectral do sensor de silício, o que limita seu uso. O desenvolvimento de piranômetros térmicos não é tão difundido, dada suas dificuldades de confecção, principalmente nas cúpulas de vidro que são componentes críticos para a qualidade do instrumento. Uma iniciativa no sentido de desenvolver nacionalmente piranômetros térmicos foi apresentada por de Escobedo *et al.* (1997a) e Escobedo *et al.* (1997b), com um protótipo de boa qualidade, entretanto, o projeto não evoluiu para uma escala comercial.

O objetivo deste trabalho foi a construção e caracterização de um piranômetro térmico utilizando como elemento sensor uma pastilha termoelétrica do tipo *Peltier* usada em refrigeração termoelétrica, porém no instrumento é utilizada como gerador termoelétrico. A pastilha está em contato com uma superfície circular pintada de preto, de modo que

<sup>1</sup>A norma ISO 9060:1990 foi reformulada em novembro de 2018, apresentando novas formas de classificação para os piranômetros, porém a instrução apresentada pela Empresa de Pesquisa Energética (EPE) para solicitação de cadastramento e habilitação técnica com vistas à participação nos leilões de energia elétrica teve sua última revisão em 23 de outubro de 2018, utilizando como base a norma ISO 9060:1990, vigente para a época.

medições de irradiação comparáveis a um piranômetro de classe B. Foi determinada a constante de calibração do protótipo de acordo com a norma ISO 9847(1992) para um piranômetro ao ar livre, utilizando outro piranômetro já calibrado como referência. O trabalho apresenta as comparações de medidas de irradiância integradas minuto a minuto e da irradiação ao longo do dia entre um piranômetro classe B e o protótipo construído.

## 2. METODOLOGIA

Durante o desenvolvimento dos protótipos foram priorizados materiais de baixo custo e, de preferência, disponíveis comercialmente, mas que não comprometessem o desempenho dos aparelhos. O experimento para determinar a qualidade de medição de radiação do sensor do protótipo consistiu em expor o protótipo à radiação solar ao lado do piranômetro Classe B da marca EKO modelo MS-60, durante 33 dias de forma ininterrupta (no período de 06/07/2019 a 07/08/2019). As medições foram integradas minuto a minuto e o armazenamento dos dados de todos os ensaios realizados foi feito por um módulo de registro de variáveis (NOVUS FieldLogger), o sensor de temperatura utilizado no monitoramento dos protótipos foi do tipo Pt100. Esta temperatura não foi utilizada na análise deste trabalho, sendo necessária para as futuras caracterizações de resposta à variação de temperatura. É importante informar que a caracterização de todos os parâmetros (tempo de resposta, resposta angular entre outros) ainda está em elaboração e está fora do escopo deste trabalho.

### 2.1 Construção

A estrutura de todos os protótipos desenvolvidos no projeto se divide em três partes principais: a carcaça metálica e sua tampa, o sistema de duas cúpulas e o suporte para o sensor termoeletrônico, que é uma pastilha *Peltier* comercialmente disponível. A pastilha *Peltier* é utilizada em geral para refrigeração termoeletrica, porém ela pode ser também usada como gerador termoeletrico a partir do efeito *Seebeck*. Além dessas três partes essenciais, o dispositivo possui um disco de fixação acoplado à carcaça, parafusos e roscas para fixação e nivelamento, nível de bolha e o escudo plástico (*shield*) que cobre a carcaça para amenizar o efeito da radiação no corpo do instrumento.

Todos os componentes empregados na construção do segundo protótipo foram escolhidos com o objetivo de testar a interferência de novos materiais e disposições bem como verificar a facilidade de construção. Os protótipos construídos serão descritos a seguir e podem ser observados na Fig. 1, instalados em um plano de medição.



Figura 1 – Protótipos construídos ao lado do piranômetro de referência (à esquerda na foto).

**Protótipo 1.** Todo o sistema do dispositivo está contido em uma caixa de ligação redonda de alumínio com tampa, da marca Tramontina, que funciona como carcaça de proteção ao sistema do sensor termoeletrônico. A Fig. 2 ilustra o aspecto do protótipo 1. A tampa possui vedação de borracha e tampões de vedação para os furos não utilizados. O cabo tem saída por um prensa cabos plástico.



Figura 2 – Detalhes do primeiro protótipo desenvolvido no projeto.

Na tampa do protótipo foi realizada uma abertura circular que permite a exposição do disco do sensor à radiação e o sistema de duas cúpulas sobrepostas foi fixado na tampa da carcaça. A composição das cúpulas é de vidro borossilicato produzidas por meio da técnica sopro, adquiridas através de um laboratório de vidros. Não foi realizado vácuo entre as cúpulas, apenas redução da umidade relativa do ar em estufa antes da montagem das cúpulas na carcaça. O funcionamento do sensor tem como princípio que a radiação é absorvida por uma superfície preta de alta absorvidade em amplo espectro que eleva a temperatura da junção quente do sensor, enquanto a junção fria fica em contato térmico com o corpo do instrumento, que atua como dissipador térmico. No caso dos protótipos, a superfície preta receptora é um disco de cobre de 0,15 mm de espessura e 21 mm de diâmetro pintado de preto. O disco foi fixado junto à face quente do elemento termoelétrico do tipo pastilha *Peltier* de 15 mm de lado e 4 mm de espessura. A pastilha e o disco estão posicionados sobre um suporte metálico cilíndrico próximos a abertura feita na tampa da caixa para que desta forma estejam devidamente expostos a radiação solar, mas protegidos de agentes como vento, chuva e partículas contaminantes pelas cúpulas. O escudo para proteção deste protótipo é de formato circular e caimento reto de composição metálica, sendo utilizado uma canopla de ventilador de teto disponível no mercado local para tal finalidade.

**Protótipo 2.** Assim como no protótipo 1, uma caixa de ligação com tampa foi utilizada para ser o corpo do dispositivo e proteger o circuito interno, apenas a marca da caixa foi alterada para um modelo semelhante. As cúpulas utilizadas são compostas semelhantes à do protótipo 1. A pastilha *Peltier* utilizada é da mesma dimensão (15x15mm), porém optou-se por uma pastilha que apresentasse espessura ligeiramente menor em relação ao primeiro protótipo de 3,7mm. O objetivo foi testar a influência da espessura do material na sua resistência térmica e consequentemente no tempo de resposta do dispositivo. O escudo de proteção deste protótipo é semelhante ao anterior, conforme Fig. 3.



Figura 3 – Detalhes do segundo protótipo desenvolvido no projeto.

**Protótipo 3.** Assim como nos outros dois protótipos, uma caixa de ligação com tampa do mesmo modelo do protótipo 1 foi utilizada para ser o corpo do dispositivo e manter o circuito interno. As cúpulas utilizadas são do mesmo conjunto adquirido para a construção do primeiro protótipo. A pastilha *Peltier* utilizada permanece sendo do mesmo modelo do protótipo 1. Houve um acréscimo no corpo do disco de fixação de alumínio para que fosse possível observar se há influência significativa no comportamento térmico do piranômetro ao aumentar a massa total da sua estrutura. O escudo de proteção deste protótipo é diferente dos anteriores possuindo caimento côncavo e sendo feito de material plástico e consiste em uma canopla de ventilador de teto, a qual teve o furo aumentado e revestida de fundo especial para plástico e tinta spray branca brilhante. O aspecto construtivo do protótipo 3 é muito semelhante ao protótipo 1 e as imagens específicas não são apresentadas, já que ele ainda está em desenvolvimento e ajustes de montagem.

## 2.2 Ensaios

O piranômetro quando exposto a radiação solar, sofre o aquecimento da parte superior de seu sensor, resultando em um gradiente de temperatura, que pelo efeito Seebeck produz uma diferença de potencial (tensão) que pode servir como sinal variável de acordo com a irradiância solar que é a fonte de aquecimento. Para o protótipo 2, este sinal foi medido e registrado em um intervalo de 1 minuto e foi obtida a média de tensão para esse intervalo de tempo. Todos os ensaios foram realizados com o auxílio de um módulo de registro de variáveis (NOVUS FieldLogger) e a temperatura do corpo do piranômetro foi monitorado por um sensor de temperatura do tipo PT100. Para obtenção do valor de irradiância a partir dos valores de tensão fornecidos pelos aparelhos é necessário dividir o valor de medição obtido pelo valor da constante de calibração do próprio piranômetro. Para o piranômetro de referência, EKO MS-60 este valor de constante é fornecido pelo fabricante, e para o protótipo a constante foi determinada utilizando os procedimentos de calibração de piranômetros presentes na norma ISO 9847-1992. A partir das medições diárias totais de irradiância do

piranômetro, calculou-se o erro médio e desvio padrão do protótipo em relação ao piranômetro Classe B, em cenários com diferentes disponibilidades de radiação.

### 2.3 Custos

A maior parte dos materiais adquiridos é de fácil acesso e disponível comercialmente, e seus custos unitários estão apresentados na Tab. 2. O custo total para a construção do protótipo é consideravelmente baixo em termos de materiais empregados, porém ainda há um desenvolvimento tecnológico importante a ser empreendido até que os protótipos atinjam um nível de qualidade superior.

**Tabela 2 – Relação de valores de custo para a construção do protótipo de piranômetro térmico.**

Especificação do material	Valor Unitário (R\$)	Especificação do material	Valor Unitário (R\$)
Pt100	28,00	Disco do Sensor	0,50
Cúpula interna	25,00	Cabo 2X 0.14 mm	7,75
Prensa Cabo	2,65	Disco da Base da carcaça	12,20
Cúpula externa	40,00	Carcaça do piranômetro	22,29
Parafusos	5,45	Escudo de proteção de radiação	15,00
Nível de Bolha	2,99	Cabo 4X0.14 mm para Pt100	14,75
Elemento sensor	30,00	Tinta spray, lixas, fita adesiva, cola	20,00
Base do sensor	4,15		
<b>Total</b>		<b>230,73</b>	

### 3. RESULTADOS

Considerando o período total de medidas de 33 dias, 2 dias foram excluídos devido a falhas de medição, os restantes foram classificados em quatro categorias, de acordo com a condição climática: (a) céu limpo, (b) céu parcialmente nublado, (c) céu predominante nublado e (d) totalmente nublado, conforme exemplifica a Fig. 5 onde foram selecionados dias específicos para ilustrar cada cenário citado.

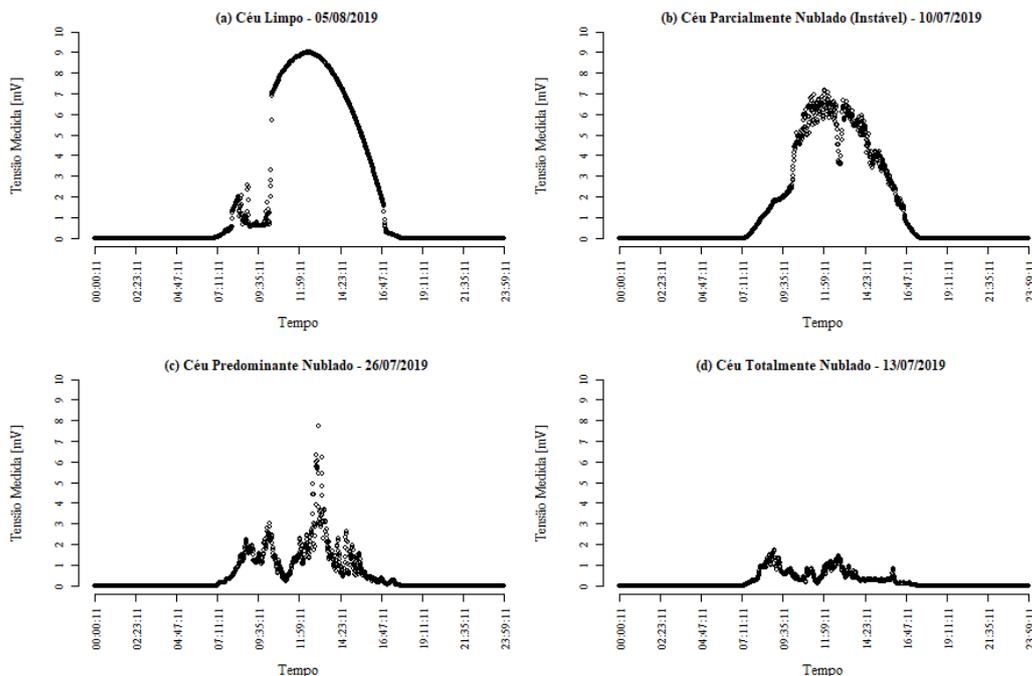


Figura 5 - Curvas de tensão obtidas pelo piranômetro EKO MS-60 em diferentes condições climáticas.

#### 3.1 Cálculo da Constante de Calibração

Conforme os procedimentos informados pela norma ISO 9847-1992, dos 33 dias medidos, foram selecionados 3 classificados como de céu limpo, 3 dias de céu parcialmente nublado e 3 dias de céu nublado, totalizando 9 dias de

referência para o cálculo da constante de calibração. Uma constante foi obtida para cada medida de 1 minuto do dia a partir da relação entre a tensão gerada no protótipo e a irradiância obtida pelo piranômetro de referência, conforme preconiza a norma ISO 9847 – 1992. Para visualizar a correlação entre o protótipo 2 e o EKO MS-60, são apresentados os gráficos na Fig. 6 para as quatro condições ilustradas na Fig. 5. Observa-se um maior desvio do comportamento linear dos dados em dias com maior incidência de radiação solar direta o que provavelmente é ocasionado pelo erro proveniente da resposta angular do protótipo decorrente das imperfeições geométricas das cúpulas de vidro, que para grandes ângulos de zênite solar afetam os resultados pela resposta cosseno do instrumento. Para dias de céu nublado, a correlação tende a ser melhor.

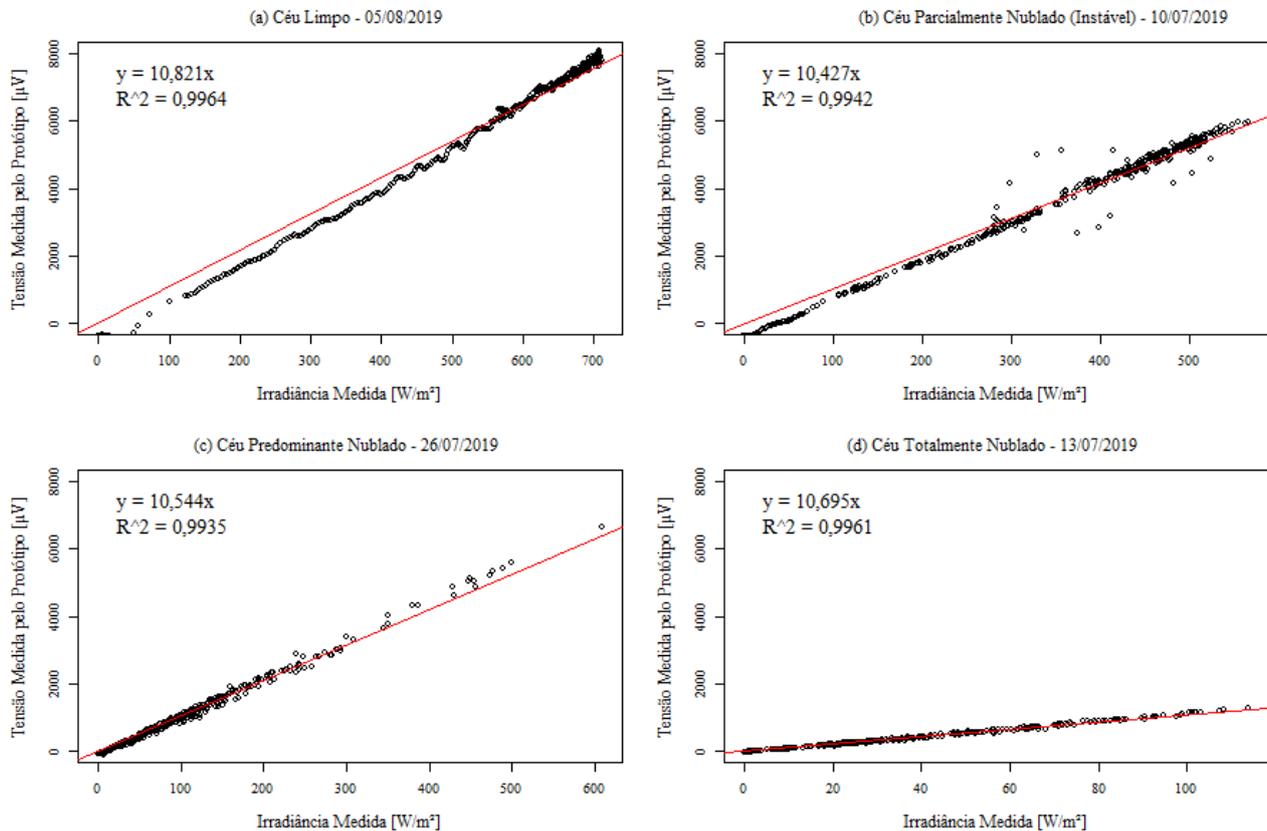


Figura 6 – Relação obtida entre a Irradiância do piranômetro EKO e as tensões medidas pelo protótipo 2 utilizada para obtenção da constante de calibração.

No procedimento de calibração da norma ISO 9847-1992, o valor da constante do piranômetro é calculada pela média das constantes ao longo do dia e em dias diferentes. Desta maneira, calculou-se então a média diária dos valores da constante de calibração para cada um dos dias selecionados que podem ser observadas na Tab. 3. Os experimentos foram realizados nos meses de inverno devido ao cronograma de atividades do projeto.

Tabela 3 - Média diária dos valores de constante de calibração.

	Data	Média Norma ISO ( $\mu\text{V}/\text{Wm}^{-2}$ )	Desvio Padrão	Regressão Linear ( $\mu\text{V}/\text{Wm}^{-2}$ )
	07/07/2019	10,05	1,91554106	10,23
Céu Limpo	03/08/2019	10,55	0,53917007	10,72
	05/08/2019	10,61	0,65660151	10,82
Céu Parcialmente Nublado (Instável)	10/07/2019	10,19	0,87175761	10,43
	11/07/2019	10,2	2,03871655	10,6
	16/07/2019	9,95	2,45748759	10,28
	14/07/2019	10,45	0,54639567	10,82
Céu Nublado	15/07/2019	10,56	0,52615098	10,82
	26/07/2019	9,31	1,55739419	10,54
<b>Média Final</b>	-	10,21	0,41	10,58

Para fins de comparação também foi aplicado o método de regressão linear para a obtenção da constante de calibração. O método consiste na projeção de uma linha de tendência sobre pontos que apresentam comportamento aproximadamente linear, a partir dessa projeção se obtém a equação da reta. Na relação entre a tensão do protótipo e a irradiância do piranômetro referência, a constante de calibração será igual ao coeficiente de inclinação da reta. Diferentemente do método estabelecido pela norma, a regressão linear realiza uma análise a partir do comportamento da correlação dos pontos do gráfico. Devido ao local dos ensaios, em Porto Alegre, latitude 30°S e à época do ano das medições (inverno), ocorriam sombreamentos e interferências no campo de medição no início e final do dia, motivo pelo qual o horário estabelecido para as análises foi das 10h30min às 16h30min.

O valor médio da constante de todos os nove dias de referência está apresentada na Tab. 4.

Tabela 4 – Média geral dos valores da constante de calibração.

	Média Norma ISO	Média R. Linear	Diferença (%)
Céu Limpo	10,40	10,59	1,8269
Céu Parcialmente Nublado (Instável)	10,11	10,44	3,2641
Céu Nublado	10,11	10,73	6,1325
Total	10,21	10,59	3,7218

O método de regressão linear forneceu uma confirmação de que o procedimento da norma foi executado corretamente, porém somente a constante de calibração obtida a partir da ISO 9847-1992 foi considerada para a geração das medidas em  $W/m^2$ . A constante de calibração encontrada é de  $10,21 \mu V/W.m^{-2}$ .

### 3.2 Cálculo de erro da irradiância integrada a cada minuto

Após a definição do valor da constante de calibração do protótipo, é possível obter as curvas de irradiância ao longo do dia, registradas tanto pelo protótipo quanto pelo piranômetro de referência. Pode-se realizar uma comparação qualitativa geral do comportamento das duas curvas, conforme apresenta a Fig. 7. No dia de céu limpo houve um erro maior do protótipo, porém hipóteses e o motivo para tal desvio ainda não foram estabelecidos.

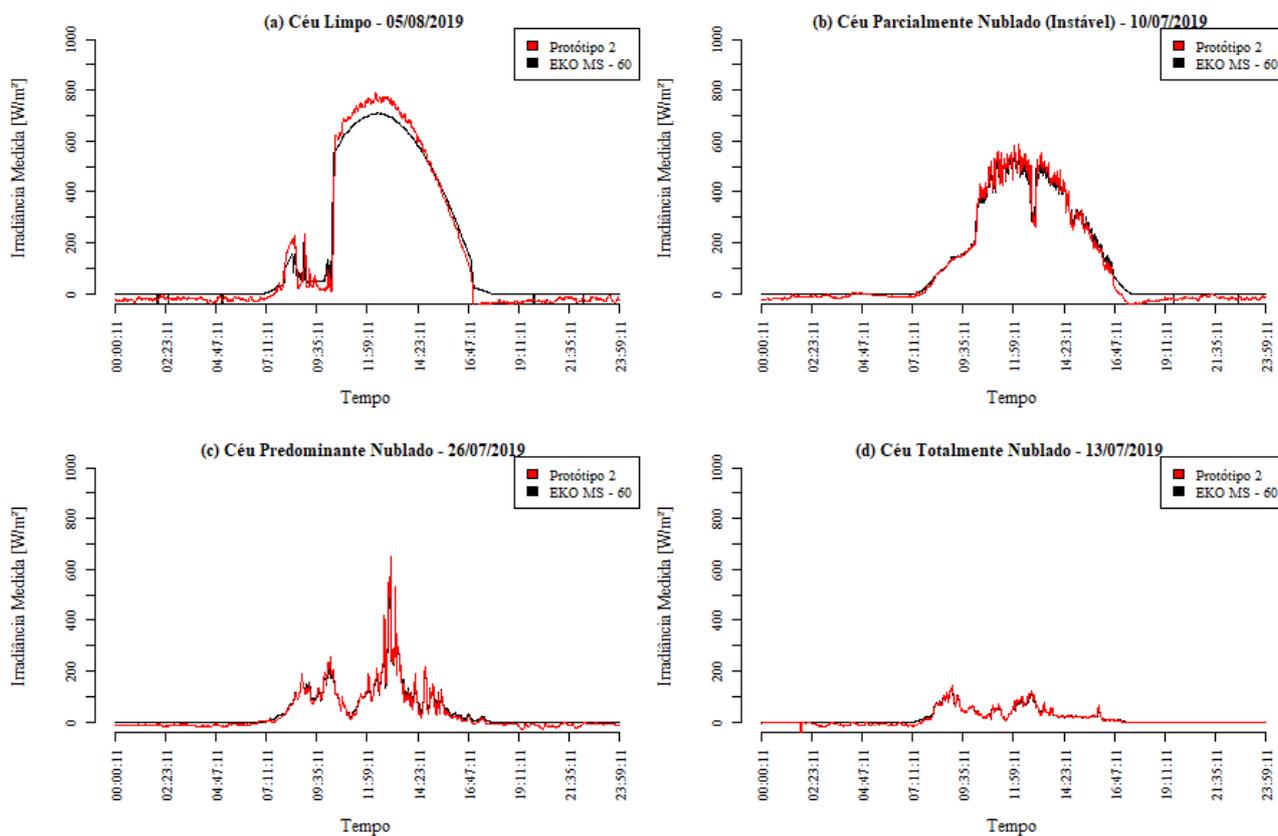


Figura 7 – Comparação das medições de irradiância do protótipo em relação a do piranômetro EKO MS-60

Conhecendo o conjunto de medidas das irradiâncias dos dois piranômetros através da utilização da constante de calibração, pode-se realizar o cálculo do erro da irradiância minuto a minuto ao longo do dia, como ilustrado na Fig. 8

para quatro dias típicos. Observa-se que a integração minuto a minuto tem um erro relativamente grande quando há mudanças na irradiância solar por nuvens ou outros obstáculos. A principal fonte desta diferença é o tempo de resposta do protótipo, que é da ordem de 60 s, enquanto o EKO MS-60 é menor que 18 s, conforme o manual de instruções do equipamento.<sup>2</sup> O gráfico apresenta somente o intervalo de horário em que não há interferências de sombreamento no local de ensaio, e, portanto foi analisado o erro relativo percentual das medidas realizadas entre 10h30min e 16h30min.

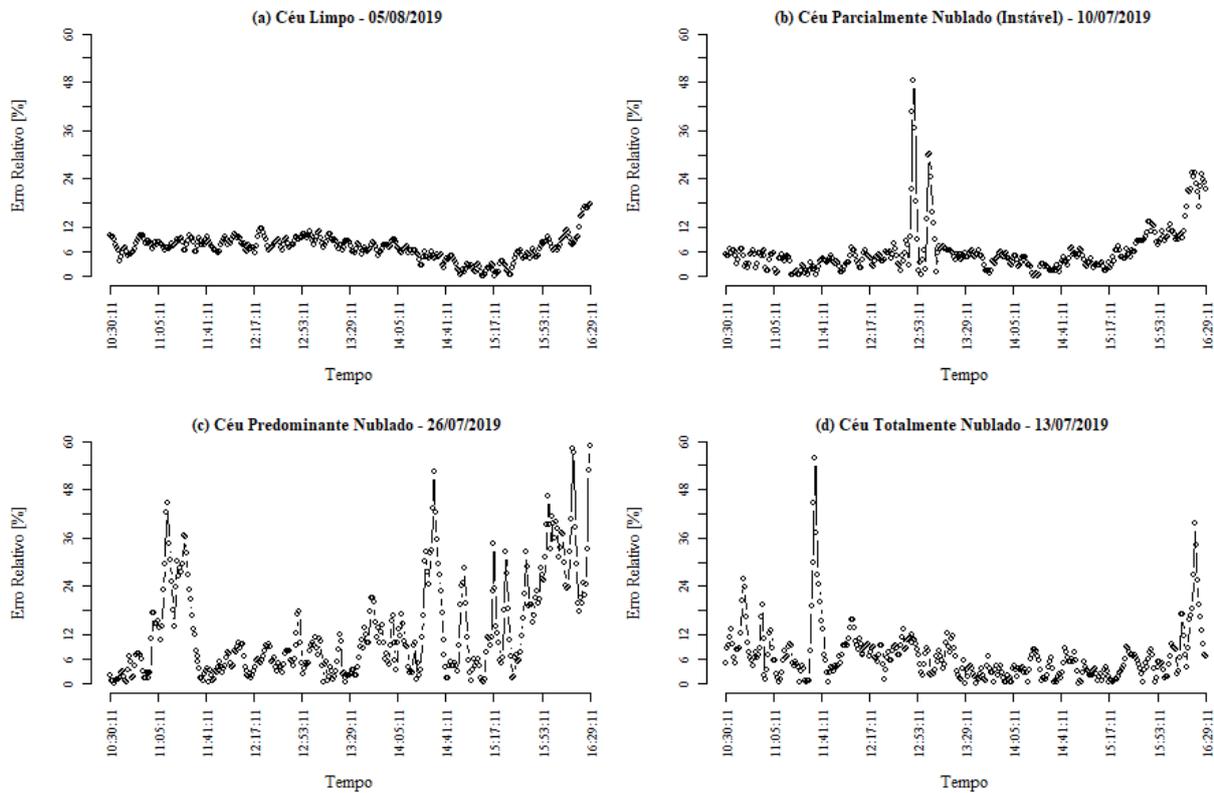


Figura 8 – Comportamento do erro da irradiação ao longo de quatro dias típicos.

O erro médio ao longo do mês para as medições entre o período de 10h30min e 16h30min, foi de 8,24% com desvio padrão de 2,30 e está ilustrado na Fig. 9

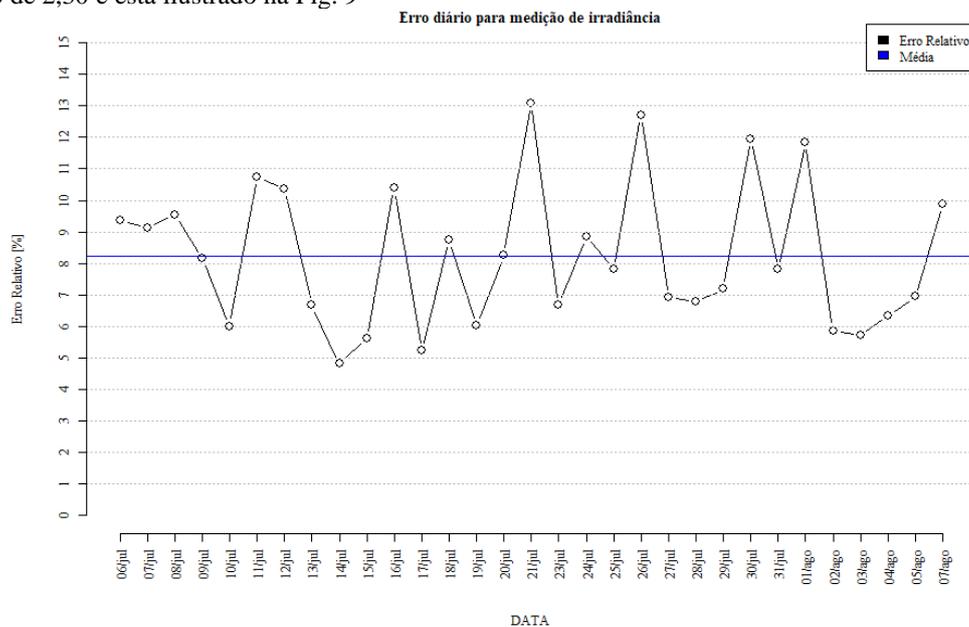


Figura 9 – Erro médio relativo da irradiação média diária ao longo do tempo de exposição.

<sup>2</sup> A determinação do tempo de resposta foi realizada por medida do tempo para o instrumento atingir 95% da resposta estável após uma variação em formato de degrau. Os resultados dos ensaios de tempo de resposta são apresentados em outro estudo e não pertence ao escopo deste trabalho.

Um segundo cálculo de erro diário foi realizado através da comparação das medidas de irradiação registradas pelo piranômetro EKO MS-60 e pelo protótipo. As medidas de irradiação foram calculadas a partir da integração das irradiâncias ao longo do dia, considerando o intervalo de integração das 10h30min às 16h30min, sendo os valores dos erros da irradiação diária apresentados na Fig. 10.

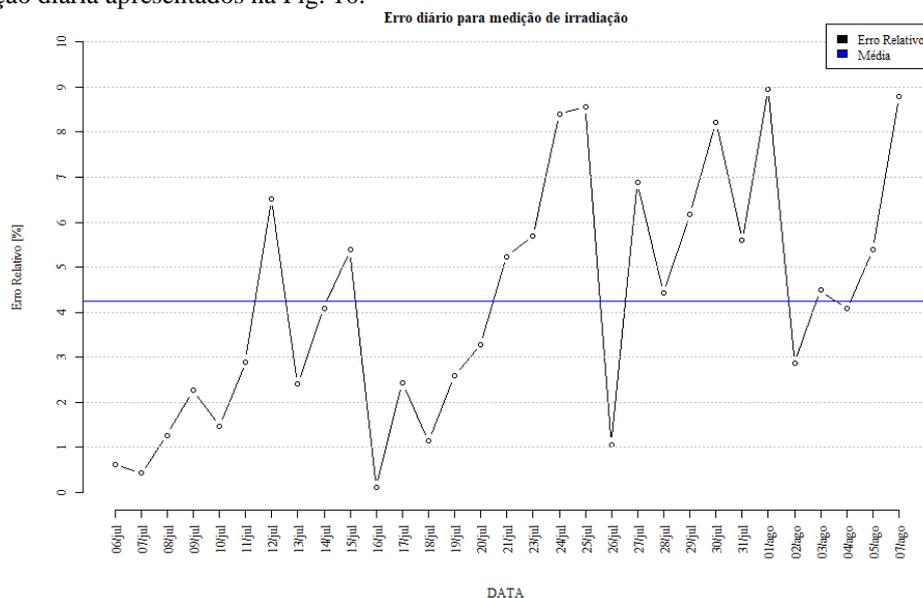


Figura 10 – Erro médio diário obtido pela integração de medidas de irradiância

Essa análise foi realizada para se observar a interferência na medição do erro ocasionada pela diferença entre os tempos de resposta dos dispositivos. Ao se verificar a irradiação total registrada ao longo de um dia se elimina os erros pontuais que aparecem elevados pelos diferentes tempos de resposta dos instrumentos. O valor de erro diário obtido com esse método da integração da irradiação diária foi de 4,25% com desvio padrão 2,69%.

#### 4. CONCLUSÕES

A pastilha *Peltier* disponível comercialmente é um elemento sensor de radiação solar eficiente e de baixo custo, e seu emprego no piranômetro exige pouco investimento para bons resultados. O grande desafio na construção de um protótipo de piranômetro térmico é a qualidade das cúpulas de vidro, o que não é possível obter a custos reduzidos. O emprego das cúpulas de vidro artesanais, embora acarretam um erro nas medidas, permitiram a construção de um instrumento que não tem as características ainda desejáveis para ser comercializado, porém é adequado a aplicações acadêmicas de medições de irradiância solar e desenvolvimento tecnológico.

O erro médio absoluto obtido na integração minuto a minuto do protótipo em relação a um instrumento Classe B, ficou em torno de 8,2%, enquanto que o erro da irradiação diária integrada ficou em torno de 4,25%, que a primeira vista pode parecer elevado, porém considerando o custo extremamente reduzido e a construção artesanal do protótipo, pode ser considerado um bom resultado.

O desenvolvimento de um piranômetro térmico em laboratório acadêmico é um importante passo para formação de recursos humanos e para desenvolvimento tecnológico. O protótipo desenvolvido e com resultados medidos ao longo do mês apresentou um comportamento satisfatório, considerando o custo reduzido dos materiais empregados na sua construção.

#### Agradecimentos

Os autores gostariam de agradecer ao CNPq (Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico) pela concessão de recursos para fomento à pesquisa e bolsas de iniciação científica. Os autores agradecem também à FAPERGS (Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado do Rio Grande do Sul) pela concessão de bolsa de iniciação científica e à UERGS (Universidade Estadual do Rio Grande do Sul), que pelo programa inicie-UERGS concedeu bolsas de iniciação científica aos acadêmicos que participaram na realização deste trabalho.

#### REFERÊNCIAS

Escobedo, J.F., Frisina, V. A., Ricieri, R.P., Oliveira, A.P., 1997a. Radiômetros Solares com Termopilhas de Filmes Finos I – Descrição e Custos. Revista Brasileira de Aplicações de Vácuo, Vol. 16, n° 1.

- Escobedo, J.F., Frisina, V. A., Chaves, M. A., Oliveira, A.P., 1997b. Radiômetros Solares com Termopilhas de Filmes Finos II – Desempenho. Revista Brasileira de Aplicações de Vácuo, Vol. 16, n° 1.
- Gómez, J. M. R., Carlesso, F., Vieira, L. E., Da Silva, L. 2018. A irradiância solar: conceitos básicos, Revista Brasileira de Ensino de Física, vol. 40, n. 3, pp. e3312-e3312-12.
- INPE - Atlas Brasileiro de Energia Solar (2017) - LABREN / CCST / INPE (Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais)".
- International Organization for Standardization – ISO 9060:1990. Solar energy -- Specification and classification of instruments for measuring hemispherical solar and direct solar radiation.
- International Organization for Standardization – ISO 9847:1992. ‘Solar energy — Calibration of field pyranometers by comparison to a reference pyranometer.
- Ministério de Minas e Energia. Gabinete do Ministro. Portaria n° 102, de 22 de março de 2016. Dispõe sobre o registro de empreendimentos de energias alternativas em leilões de energia elétrica. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 22 mar 2016.
- Tiba C. et al. 2000. Atlas Solarimétrico do Brasil. Recife.
- Pereira, E. B. et al. 2006. Atlas Brasileiro de Energia Solar.
- CEPEL – CRESESB - Pinho, J.T., Galdino, M. A., 2014. Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos.

### DEVELOPMENT AND CHARACTERIZATION OF A THERMAL PYRANOMETER – PRELIMINARY ANALYSIS OF IRRADIATION MEASUREMENTS

**Abstract.** *Solar radiation availability studies are essential for solar energy harnessing systems. For the feasibility analysis of the system installation, long periods of solar radiation measurement in the installation site are necessary. The thermal pyranometer is one of the main devices used to obtain solar radiation data. Currently, the classification of a pyranometer is given by three classes: A, B and C. Considering the lack in the Brazilian market of thermal pyranometers of national manufacture, the objective of this work was the development and characterization of a low cost thermal pyranometer that would produce measurements comparable to a Class B pyranometer. Two prototypes have been developed and a third prototype is under construction. The sensor element is based on a commercially available Peltier insert coated with a black painted copper disc. In this paper we will present the results of solar radiation measurements for the second prototype and its analysis. Characterization was performed based on ISO 9847 (1992), which describes the calibration process of a pyranometer using a reference pyranometer. A calibration constant of  $10.21 \mu\text{V} / \text{Wm}^{-2}$  was obtained and the prototype showed an absolute mean error of 8.24% comparing minute-to-minute irradiance measurement with the EKO MS-60 Class B pyranometer. Daily irradiation, that is, the integration of irradiance throughout the day had an average absolute error of 4.24%. The development of prototypes contributed to the formation of human resources and the expansion of knowledge in this area, and possibly could promote the development of the instrument at the commercial level, after the academic research phase.*

**Keywords:** *Solar Energy, Pyranometer, Characterization*