

CARACTERIZAÇÃO DA RESPOSTA TEMPORAL E ANGULAR DE PIRANÔMETRO TÉRMICO COM RADIAÇÃO SOLAR NATURAL

Marcos Vinicius Mello Inhaquites – mvini2806@gmail.com
Renan Vinicius de Barros Becker – renanbbecker@hotmail.com
Lauren Merlini Santos – lauren.merlini@gmail.com
Jahel Emmanuhel Motta da Silva – jahel.ems@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- UFRGS

Resumo. O aproveitamento da Energia Solar tanto em aplicações térmicas ou fotovoltaicas é fundamental para a redução de emissões e diversificação da matriz energética brasileira. O levantamento da radiação solar disponível é um passo importante na ampliação do uso da energia solar, sendo que o piranômetro de termopilha é o instrumento de medida da radiação solar global hemisférica necessário para este levantamento terrestre da radiação solar. Neste trabalho foi desenvolvido um dispositivo colimador para realização de ensaios de resposta angular de piranômetros com radiação solar direta. Um piranômetro protótipo baseado em uma pastilha peltier como elemento sensor foi construído e seu tempo de resposta e resposta angular foi determinado. O dispositivo colimador foi testado com o ensaio de resposta angular de um piranômetro padrão secundário, mostrando-se satisfatório. O protótipo desenvolvido atendeu aos parâmetros da norma ISO 9060-1990 para um instrumento de segunda classe no tempo de resposta e para a resposta angular a 60° em uma direção (leste). Na outra direção (oeste) o erro foi maior ao limite da norma, ocasionado pela imprecisão geométrica da cúpula de vidro de baixo custo utilizada. O trabalho contribuiu para o desenvolvimento de recursos humanos na Universidade Estadual do Rio Grande do Sul, além de possibilitar novos avanços no desenvolvimento nacional de instrumentos de medida de radiação solar e metodologia de ensaio.

Palavras-chave: Radiação solar, Piranômetro, Resposta Angular

1. INTRODUÇÃO

O aproveitamento da energia solar para aplicações térmicas e fotovoltaicas é uma alternativa importante para redução de emissões de gases e diversificação da matriz energética. Desde 2016, todos os empreendimentos fotovoltaicos brasileiros devem realizar uma campanha de medição da irradiação solar horizontal por um período não inferior a 12 meses (EPE, 2014). De acordo com a Portaria nº 21 de 2008 do ministério de minas e energia (MME, 2008), no ato do cadastramento do empreendimento fotovoltaico a um leilão de energia é exigida a certificação dos dados solarimétricos. A estação deve estar equipada, no mínimo com dois instrumentos de medição de irradiância global horizontal, piranômetros padrão “First Class”, classe B, ou superior, conforme norma ISO 9060:1990, sensor de umidade relativa, temperatura e velocidade do vento. São dois instrumentos para haver redundância de medidas.

Para a ampliação da medição do potencial solar na superfície terrestre, um dos principais entraves é o alto custo dos piranômetros, cujo preço no mercado nacional para o instrumento classe B é da ordem de R\$ 10000. Uma manufatura nacional poderia reduzir esse custo e influenciar o mercado de energia solar positivamente. Uma excelente iniciativa no sentido de desenvolver nacionalmente instrumentos de medida de radiação solar foi apresentada no trabalho de Escobedo *et al.* (1997a) e Escobedo *et al.* (1997b), com um protótipo de boa qualidade, entretanto, por razões desconhecidas, não houve continuidade do projeto em nível comercial.

Tão importante quanto a produção de um protótipo é a necessidade do mesmo ser classificado conforme os padrões internacionais, tanto da norma ISO 9060 como nos padrões da WMO (*World Meteorological Organization*), de modo que apenas assim o mesmo será aceito em projetos que envolvam financiamento. Para tal, são necessários equipamentos e laboratórios de calibração que sejam acreditados para fazer os ensaios de acordo com as referidas normas. Entretanto, tais equipamentos são, por via de regra, encontrados em laboratórios específicos para essa finalidade, que usam fontes de radiação artificiais visando uma maior estabilidade na irradiância de referência. Projetar e construir um dispositivo capaz de realizar de maneira eficiente a caracterização de alguns parâmetros dos piranômetros com radiação natural é um processo que irá fomentar estas medições nos laboratórios acadêmicos a um baixo custo e possivelmente incentivar a manufatura de equipamentos solarimétricos nacionais, tornando-os mais acessíveis e aumentando sua gama de uso.

De todas as características que compõem um piranômetro térmico, este trabalho irá apresentar a metodologia e resultados para a caracterização do tempo de resposta e da resposta angular de um protótipo de piranômetro térmico montado na Universidade Estadual do Rio Grande do Sul e na Universidade Federal do Rio Grande do Sul. O protótipo foi construído utilizando-se materiais comerciais, sendo o elemento sensor uma pastilha Peltier coberta com um disco circular de cobre pintado com tinta spray comercial preta fosca. O corpo do instrumento foi construído com uma caixa de ligação elétrica redonda em alumínio. As cúpulas de vidro foram confeccionadas artesanalmente, sendo sopradas a partir

de um tubo de vidro borossilicato por um laboratório que produz vidrarias essencialmente para a área de química. As cúpulas não tem a qualidade desejada para um instrumento a ser comercializado, porém será analisado o resultado do uso de uma cúpula de custo muito reduzido em comparação à uma cúpula óptica. O objetivo deste trabalho é apresentar os resultados para os ensaios de tempo de resposta e da resposta angular do protótipo, determinados com radiação solar natural. Outro objetivo importante é o desenvolvimento de um dispositivo colimador para radiação direta utilizado para medidas de resposta angular do piranômetro. Um piranômetro de referência da marca Kipp & Zonnen modelo CM-21 foi utilizado para verificação do dispositivo de ensaio e da metodologia empregada. Os detalhes construtivos do protótipo desenvolvido serão apresentados em outro trabalho, sendo que no presente artigo será apresentada apenas imagens na Fig. 1, a fim de ilustrar sua construção.



Figura 1 – Imagens do protótipo do piranômetro térmico. Na imagem à esquerda o protótipo está em primeiro plano. Os instrumentos no segundo plano são piranômetros comerciais utilizados para medições comparativas. Na imagem à direita há um detalhe do instrumento com o escudo desmontado.

2. CARACTERIZAÇÃO DOS PIRANÔMETROS

Um piranômetro térmico é baseado no uso de termopilhas para fazer a medição da irradiância através da variação de temperatura entre as junções quente e fria do elemento sensor, sendo a junção quente revestida de preto, e a junção fria em contato com a caixa do piranômetro, que age como um dissipador de calor. O piranômetro térmico se difere dos piranômetros fotovoltaicos, que tem custo muito menor, por possuir uma resposta espectral ampla e plana, respondendo a toda faixa de interesse do espectro solar para conversão térmica e fotovoltaica. As respostas espectrais do piranômetro de termopilha e fotovoltaico estão apresentadas na Fig. 2 para ilustrar a faixa de operação dos instrumentos em relação à irradiância espectral solar.

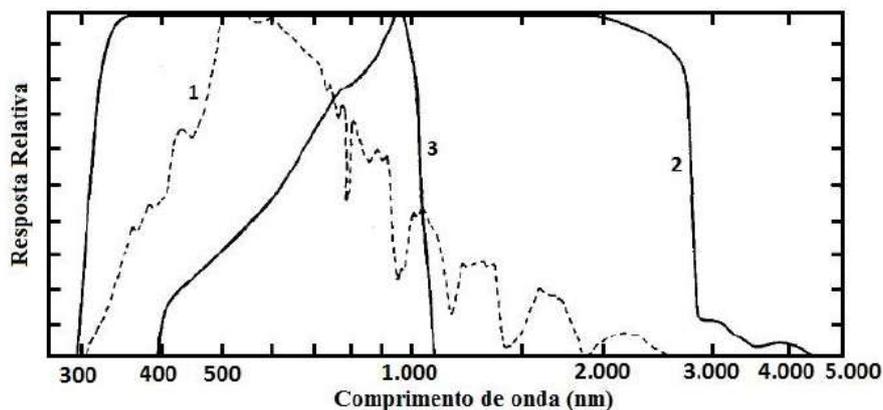


Figura 2 – Comparativo entre respostas espectrais dos diferentes tipos de piranômetros. 1 – Distribuição espectral da irradiância solar na superfície da Terra. 2 – Resposta do piranômetro termoeletrico. 3 – Resposta do piranômetro FV (silício). Fonte:(Alados-Arboleta et al., 1995 apud Pinho J.T. et al., 2014)

2.3 Classificação e características dos piranômetros

A Tab.1 apresenta a classificação dos piranômetros de acordo com a norma internacional ISO 9060 (1990). Convém destacar que no ano de 2018 foi lançada uma versão revisada da norma ISO 9060, com algumas atualizações e alterações

nas denominações. Entretanto, devido ao alto custo da aquisição da versão atualizada e da indisponibilidade de acesso ao documento, a norma ISO 9060 – 1990 foi utilizada como referência neste trabalho.

Tabela 1 – Classificação e características dos piranômetros

Especificação	Padrão secundário	1ª classe	2ª classe
Tempo de resposta (a 95%)	< 15s	< 30s	< 60s
Offset A	+ 7 W/m ²	+ 7 W/m ²	+ 7 W/m ²
Offset B	± 2 W/m ²	± 2 W/m ²	± 2 W/m ²
Instabilidade (variação anual)	± 0,8%	± 1,5%	± 3%
Não-linearidade	± 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 descrição de cada uma das características é apresentada a seguir.

Tempo de resposta

Qualquer dispositivo de medição requer um certo tempo para reagir a uma alteração no parâmetro que está sendo medido. O radiômetro requer tempo para responder a mudanças na radiação incidente. O tempo de resposta é normalmente citado como o tempo para que a saída atinja 95% do valor final após uma mudança em degrau na irradiância. É determinado pelas propriedades físicas do termopilha e construção do radiômetro. (Kipp & Zonen, 2016).

Resposta angular

A resposta angular ou resposta cosseno, diz respeito à capacidade do piranômetro realizar medições da radiação direta com a mesma qualidade independente do ângulo em que se encontra em relação ao Sol. A relação entre a radiação direta normal (G_{BN}) e a radiação direta inclinada (G_B) é dada pela Eq. (1) (Duffie e Beckman, 1991).

$$G_B = G_{BN} \cos\theta \quad (1)$$

onde θ é o ângulo entre a normal da superfície de interesse e a radiação direta normal. A Eq.(1) demonstra que a irradiância direta será igual à irradiância direta normal multiplicada pelo cosseno do ângulo de incidência, ou seja, numa condição de $G = 1000 \text{ W/m}^2$ e uma incidência de 60° , a medição obtida será de 500 W/m^2 .

Off-Set A

Qualquer objeto com uma certa temperatura trocará radiação com o ambiente. As cúpulas externas do piranômetro trocam radiação principalmente com a atmosfera relativamente fria. Em geral, a atmosfera será mais fria que a temperatura ambiente na superfície da Terra. Por exemplo, um céu limpo pode ter uma temperatura efetiva de até 50° C mais fria que a ambiente, enquanto um céu nublado terá aproximadamente a mesma temperatura da superfície da Terra. Devido a isso, as cúpulas do piranômetro “perdem” energia para a atmosfera mais fria por meio de transferência radiativa. Isso faz com que o domo se torne mais frio que o resto do instrumento. Essa diferença de temperatura entre a 'visualização' do detector e o corpo do instrumento gerará um pequeno sinal de saída negativo, que é comumente chamado de Zero Offset Tipo A. Esse efeito é reduzido usando uma cúpula interna, que atua como um 'buffer de radiação', isolando melhor o instrumento. Quantitativamente é determinada como a resposta a 200 W/m^2 de radiação térmica líquida, com o instrumento ventilado (Kipp & Zonen, 2016).

Off-Set B

Proporcionalmente à temperatura ambiente, a temperatura do instrumento varia e causa correntes térmicas no interior do instrumento. Isso fará com que uma diferença, chamado de zero offset tipo B apareça no sinal de saída. Ele é quantificado na ISO 9060: 1990 como a resposta em W / m^2 causada por uma variação na temperatura ambiente de 5 K por hora (Kipp & Zonen, 2016).

Não-estabilidade

Essa é a alteração percentual na sensibilidade ao longo de um período de um ano. Este efeito é principalmente devido à degradação pela radiação UV do revestimento absorvedor preto na superfície da termopilha (Kipp & Zonen, 2016).

Não-linearidade

A não linearidade de um piranômetro é definida na norma ISO 9060: 1990 como o desvio percentual na sensibilidade sobre uma irradiância variando de 100 a 1000 W / m² em comparação com a sensibilidade na irradiância de calibração de 500 W / m². O efeito não linear é amplamente devido a perdas de calor convectivas e radiativas na superfície do absorvedor preto, que tornam o equilíbrio térmico condicional do radiômetro não linear. Em resumo, é a porcentagem de desvio da resposta a 500 W/m² devido a variação de irradiância de 100W/m² a 1000 W/m² (Kipp & Zonen, 2016).

Sensibilidade espectral

Desvio percentual do produto da absorbância espectral e da transmitância espectral em relação à média correspondente em comprimentos de onda de 0,35 µm e 1,5 µm.

Resposta à temperatura

A mudança de sensibilidade de um radiômetro com mudança de temperatura ambiente está relacionada à termodinâmica do radiômetro. O valor é dado como desvio percentual em relação à sensibilidade calibrada a + 20 ° C. É determinada como a variação na resposta do piranômetro causada por uma alteração de ± 50 °C na temperatura ambiente (Kipp & Zonen, 2016).

Resposta à inclinação

Desvio percentual na resposta do equipamento causada por uma alteração da inclinação do mesmo, saindo de 0° e indo até 90° em uma irradiância de 1000 W/m². Este é o desvio da sensibilidade na inclinação de 0 ° (exatamente horizontal) na faixa de 0 ° a 90 ° de inclinação (vertical) com irradiância de incidência normal de 1000 W / m² de irradiância de incidência normal. A resposta de inclinação é proporcional à radiação incidente. O erro pode ser corrigido em aplicações onde é necessário instalar o piranômetro em uma superfície inclinada, mas geralmente é insignificante (Kipp & Zonen, 2016).

3. MATERIAIS E MÉTODOS

Nesta seção será descrito o dispositivo desenvolvido para a realização dos ensaios de resposta angular e a metodologia utilizada para a medição do tempo de resposta e da resposta angular do protótipo de piranômetro térmico. A metodologia utilizada foi baseada no método *outdoor* de caracterização, sendo que outros detalhes de ensaios parecidos foram apresentados por Guimarães *et al.* (2013).

3.1 Dispositivo colimador de radiação solar direta

De modo a permitir um ensaio de resposta angular com radiação solar natural, foi projetado um equipamento de custo baixo para tal finalidade. O conceito baseava-se em equipamento móvel, de fácil manejo e com materiais possíveis de trabalhar no laboratório acadêmico. Pela facilidade de obtenção comercial e processamento artesanal, foram utilizadas chapas de MDF (*medium density fiberboard*) de 18mm. A caixa possui uma porta, uma área que permitisse manuseio no interior e espaço para dois piranômetros, um com ângulo móvel e outro fixo para conferência de estabilidade da radiação solar durante uma medida. Um dos requisitos era a possibilidade de fixação bem como fosse possível alterar o ângulo do piranômetro sob ensaio. A caixa tem duas aberturas no topo para receber radiação direta, com 50mm de diâmetro, dois furos menores para a passagem de cabos, bem como um eixo que torna possível a alteração de ângulo, junto de um transferidor, para medição do ângulo em que o mesmo estaria. Na Fig. (3) são apresentadas a caixa antes da instalação do dispositivo para alteração do ângulo do piranômetro e dos demais componentes e do disco graduado para verificação do ângulo do piranômetro.

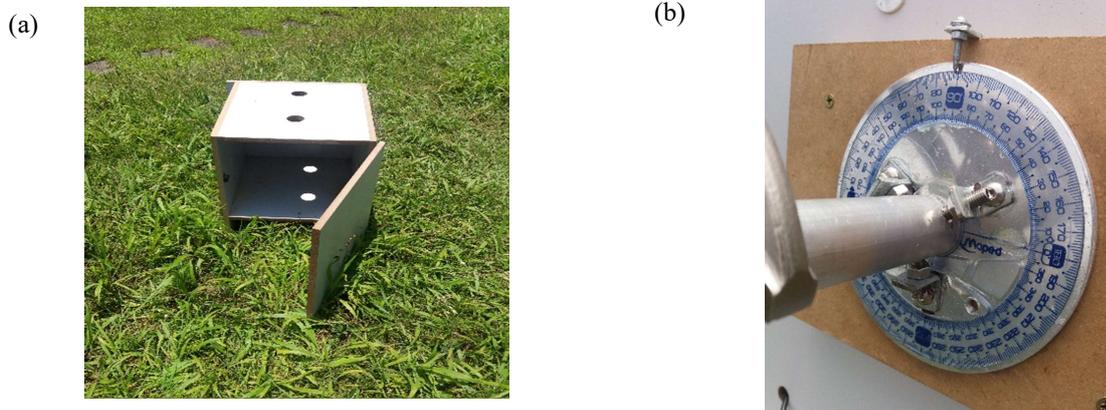


Figura 3 – (a) Dispositivo parcialmente montado. (b) Eixo com disco graduado para alteração do ângulo do piranômetro

A base para o piranômetro ligada ao eixo móvel foi projetada para que os instrumentos pudessem ser fixados e terem seu ângulo alterado, e que também permitisse que a altura dos mesmos fosse ajustada. Esta última medida é necessária pois o plano do sensor deve ser ajustado para a mesma altura do eixo de rotação. A Fig. 4(a) apresenta a parte interna do dispositivo colimador, onde é possível ver os suportes dos piranômetros.

Para a verificação do posicionamento correto do dispositivo em relação à radiação normal direta, foi adicionado um sistema simples, mas eficaz, semelhante a uma mira, de modo a ser possível que os responsáveis acompanhem o movimento do Sol fazendo que a radiação recebida pelos piranômetros seja sempre a componente direta conforme ilustrado na Fig. 4 (b). No projeto da mira, foi definido que o ângulo θ de controle deveria ser de $0,5^\circ$ dentro da mira, minimizando o erro e proporcionando uma verificação precisa do posicionamento. O cálculo do deslocamento do ponto luminoso em relação ao centro da mira foi realizado através Eq. (2), isolando o X. O resultado do deslocamento do ponto luminoso é de 0,9 mm quando a variação de θ é $0,5^\circ$, já que o anteparo está a 100 mm do alvo.

$$\operatorname{tg} 0,5^\circ = \frac{X}{100 \text{ mm}} \quad (2)$$

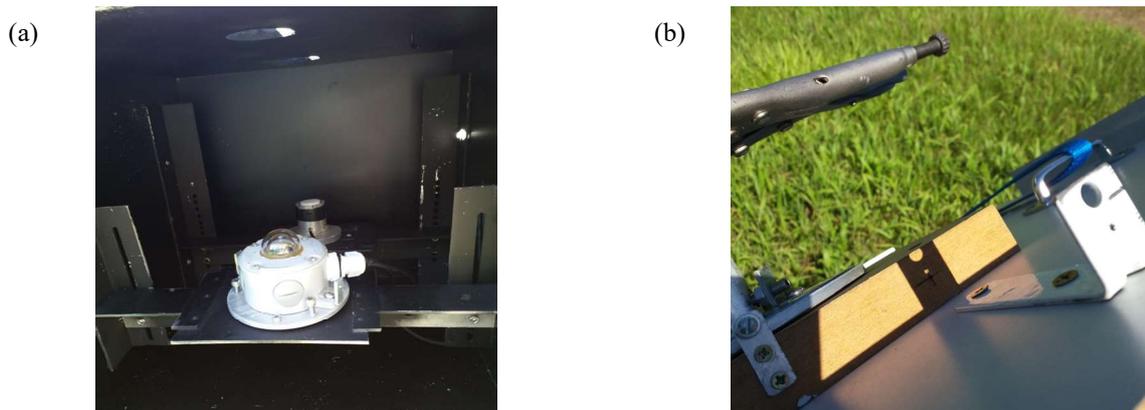


Figura 4 – (a) Suportes internos para os piranômetros. Ao fundo está um piranômetro fotovoltaico com função de verificação da estabilidade da radiação durante ensaio de resposta angular. No primeiro plano é possível ver o protótipo montado no suporte giratório com ajuste de altura. (b) mira montada no dispositivo

Após os detalhes interiores da caixa terem sido resolvidos, uma estrutura para a mesma foi construída. A caixa do colimador foi montada e fixada com dobradiças sobre um disco de MDF para ajuste azimutal do colimador, que é realizado pelo giro do disco. Inicialmente este disco foi montado sobre uma mesa escolar com pés extras a fim de proporcionar maior estabilidade. Em um segundo momento foi construído um suporte com ajuste de nível obtido por três barras roscadas distribuídas em 120° pelo perímetro do disco. O suporte foi montado sobre um carrinho de madeira com rodinhas robustas o suficiente para rodarem em diferentes terrenos como apresentado na Fig. 5. O ajuste do ângulo da caixa foi obtido de maneira bastante eficiente e econômica com o uso de um macaco automotivo posicionado abaixo da caixa para que a mesma possa ter sua inclinação alterada. Posteriormente, foi adicionada uma barra roscada, colocada sobre o macaco, para permitir maiores ângulos de inclinação e assim tornar medidas no inverno possíveis. Amortecedores e uma cinta de segurança, prendendo a caixa à base e impede que a mesma venha a tombar mesmo em inclinações mais elevadas, bem como auxiliando para que a mesma retorne à posição inicial. A Fig. 5 apresenta duas fotos do dispositivo em uso no LABSOL – UFRGS.

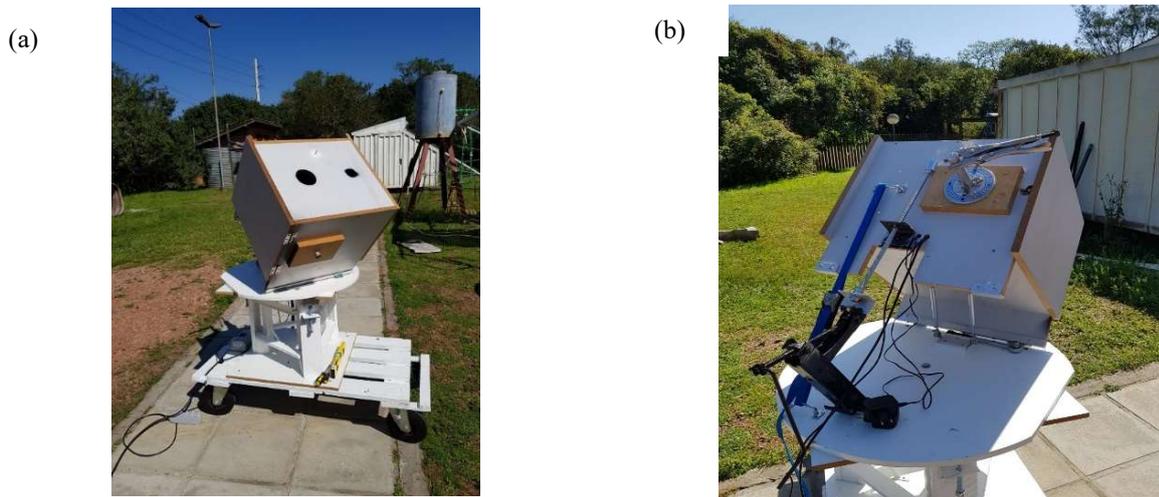


Figura 5 – (a) Dispositivo colimador finalizado e já equipado com o suporte móvel. (b) Visão traseira do dispositivo, com destaque ao macaco, barra roscada e amortecedores, cinta de segurança azul e disco graduado para ajuste de ângulo.

3.2 Metodologia para caracterização do tempo de resposta

Foram realizadas medidas para conferir o tempo de resposta de um piranômetro de padrão secundária Kipp&Zonnen modelo CM 21. O tempo de resposta é importante para os ensaios de resposta angular, já que o piranômetro deve estar com a saída estável para fazer os ensaios. Após a caixa ser posicionada no local desejado, em campo aberto com boa incidência de radiação, a inclinação e posicionamento azimutal são ajustados, já com os instrumentos em seu interior, para que a caracterização tenha início. O processo consiste em bloquear as entradas de radiação do piranômetro por 4 minutos, e então abrir as entradas por outros 4 minutos, utilizar o sistema de posicionamento para manter o dispositivo sempre na direção da radiação direta, e então repetir o processo por pelo menos 3 vezes. As medições são feitas automaticamente por um coletor de dados que toma uma medida a cada 0,5 s.

Terminada esta parte, os dados de medição são transferidos para um computador onde são analisados de modo determinar o tempo de resposta. Importante salientar que, junto do piranômetro de referência, um piranômetro fotovoltaico, também é instalado no outro suporte fixo da caixa colimadora, de modo a conferir se a radiação recebida no era estável durante o ensaio. Concluídos os objetivos e sendo a caixa considerada apta a fazer as medições desejadas, o mesmo processo supracitado foi então repetido, desta vez com o protótipo, para, então, ser possível definir o tempo de resposta do instrumento.

3.3 Metodologia para caracterização da resposta angular

Para a realização da medição da resposta angular utiliza-se o tempo de resposta obtido anteriormente, de modo a saber o tempo necessário de exposição do equipamento para a realização do ensaio desejado. A metodologia utilizada consistiu em, novamente, levar o dispositivo, com as entradas de radiação bloqueadas e com o piranômetro em seu interior, para a área utilizada para as medições, fazer o ajuste da elevação para recepção da radiação direta e então seguir os seguintes passos, sendo todas as medidas realizadas a cada 0,5 s com um coletor de dados NOVUS Fieldlogger. Para os ensaios de resposta angular o piranômetro permaneceu em cada um dos passos abaixo descritos por 2min, ou seja, aproximadamente 2 vezes o tempo de resposta. Uma outra medida com ângulo de 60° foi realizada com tempo de exposição de 3 min, o que melhorou ainda mais o resultado, pois o piranômetro estava em regime de maior estabilidade. Os passos seguidos para as medidas necessárias para determinação da resposta angular são os seguintes:

1. medição com a radiação bloqueada, para obtenção da saída do piranômetro no escuro e compensar algum offset presente;
2. posicionamento no ângulo 0°, isto é, radiação direta normal que será usada como referência;
3. posicionamento no ângulo desejado a leste;
4. outro posicionamento a 0°, para ter a referência de irradiância normal após a medida angular;
5. posicionamento no ângulo desejado a oeste;
6. posicionamento no ângulo 0° para verificação da irradiância de referência;
7. medição com a radiação bloqueada.

O tempo em que os instrumentos ficaram em cada passo descrito anteriormente foi cuidadosamente controlado para ser o mesmo. Esta metodologia deve ser repetida nas direções leste e oeste em intervalos de 10°, até o ângulo de 70°. A sequência utilizada na medição do piranômetro padrão secundário foi ligeiramente diferente, pois foram realizadas

primeiramente todas as medidas a leste e depois a oeste, porém a essência da medição é a mesma, isto é, para cada medida angular deve ter uma medida a 0° (incidência normal) como referência antes e depois da medida angular.

Como o coletor de dados fica gravando as medições a cada 0,5 s, em cada medida era anotado o horário preciso, ressaltando a necessidade de sincronizar o relógio do coletor de dados com o relógio utilizado para anotar o momento correto da medida. No método de análise dos dados é realizada a média dos dados de saída do piranômetro medidos por 2,5 s, isto é, a média dos 5 valores medidos a cada 0,5s pelo coletor de dados antes da mudança de cada passo descrita anteriormente. De modo a facilitar o entendimento dos passos do processo citado anteriormente, a Tab. 2 apresenta todas as variáveis utilizadas nos cálculos em sua devida ordem.

Tabela 2 – Variáveis utilizadas para cálculo da resposta angular

\bar{X}_C'	Média dos 5 valores com o piranômetro coberto, obtidos ao final do passo 1.
\bar{X}_{0°'	Média dos 5 valores de tensão à 0°, nos 2,5 s ao final do passo 2.
$\bar{X}_{\theta^\circ}L$	Média dos 5 valores de tensão no ângulo θ a leste, nos 2,5 s ao final do passo 3.
\bar{X}_{0°''	Média dos 5 valores de tensão à 0°, nos 2,5 s ao final do passo 4.
$\bar{X}_{\theta^\circ}O$	Média dos 5 valores de tensão no ângulo θ a oeste, nos 2,5 s ao final do passo 5.
\bar{X}_{0°'''	Média dos valores de tensão à 0°, nos 2,5 s ao final do passo 6.
\bar{X}_C''	Média dos 5 valores com o piranômetro coberto, nos 2,5 s ao final do passo 7.

Feitas as referidas médias dos valores de tensão de saída do piranômetro, é possível aplicá-las em equações visando chegar no erro obtido. A Eq. (3) se refere ao valor médio de tensão em 0° (incidência normal), gerando um valor de tensão médio antes e depois da medição angular à leste. A Eq. (4) realiza o mesmo processo para oeste, sendo a média entre os valores de tensão para incidência normal antes e após a medida à oeste. A Eq. (5) faz uma média total entre os valores médios dos dados de tensão do equipamento coberto, antes e depois das medições angulares, a fim de obter o valor de tensão sem radiação e compensar possíveis offsets.

$$\bar{X}_{0^\circ}Tot' = \frac{\bar{X}_{0^\circ}' + \bar{X}_{0^\circ}''}{2} \quad (3)$$

$$\bar{X}_{0^\circ}Tot'' = \frac{\bar{X}_{0^\circ}'' + \bar{X}_{0^\circ}'''}{2} \quad (4)$$

$$\bar{X}_C = \frac{\bar{X}_C' + \bar{X}_C''}{2} \quad (5)$$

As Eq. (6) e Eq. (7) fazem uma razão entre os valores de tensão médio medidos nas direções leste e oeste respectivamente, descontando o valor da tensão do piranômetro sem radiação solar incidente (\bar{X}_C).

$$R' = \frac{\bar{X}_{\theta^\circ}L - \bar{X}_C}{\bar{X}_{0^\circ}Tot' - \bar{X}_C} \quad (6)$$

$$R'' = \frac{\bar{X}_{\theta^\circ}O - \bar{X}_C}{\bar{X}_{0^\circ}Tot'' - \bar{X}_C} \quad (7)$$

Por fim, as Eq. (8) e Eq. (9) calculam o erro percentual da resposta cosseno para ambas as direções, sendo eL o erro a leste e eO o erro a oeste.

$$eL = \frac{R' - \cos\theta}{\cos\theta} 100\% \quad (8)$$

$$eO = \frac{R'' - \cos\theta}{\cos\theta} 100\% \quad (9)$$

4 RESULTADOS

Após a transferência dos dados para um computador a análise dos mesmos é realizada com o auxílio de uma planilha eletrônica.

4.1 Análise do tempo de resposta

Tendo em mente o conceito de tempo de resposta, o tempo para que a tensão de saída do piranômetro alcance 95% da tensão estável após uma mudança em formato de degrau, procura-se na planilha de dados pelo valor de tensão máximo obtido nas medições realizadas após a exposição à radiação solar. Define-se o valor de partida como 0% caso algum offset esteja presente, o valor estável como 100%, e através de uma relação linear, chega-se nos valores do tempo de resposta. O gráfico da Fig. 6 ilustra a saída de tensão do piranômetro protótipo ao longo do tempo para ilustrar o procedimento. Foram realizados ensaios com os piranômetros dentro da caixa colimadora e fora da caixa colimadora, pois os resultados não foram iguais devido às diferenças nas trocas de radiação com o interior da caixa colimadora.

A Tab. 3 sintetiza o tempo de resposta obtidos nos ensaios e a média do valor para o piranômetro protótipo, sendo medido 3 vezes o tempo no aquecimento do piranômetro (exposição à radiação solar) e 3 vezes no resfriamento (bloqueio da radiação solar).

Tabela 3 – Dados referentes ao tempo de resposta do protótipo.

	Tempo de resposta dentro da caixa (s)	Tempo de resposta fora da caixa (s)
Medida 1 - aquecendo	78	60
Medida 2 - resfriando	81	61
Medida 3 - aquecendo	73	59
Medida 4 - resfriando	77	58
Medida 5 - aquecendo	79	59
Medida 6 - resfriando	82	56
Média do tempo de resposta	78,33	58,83

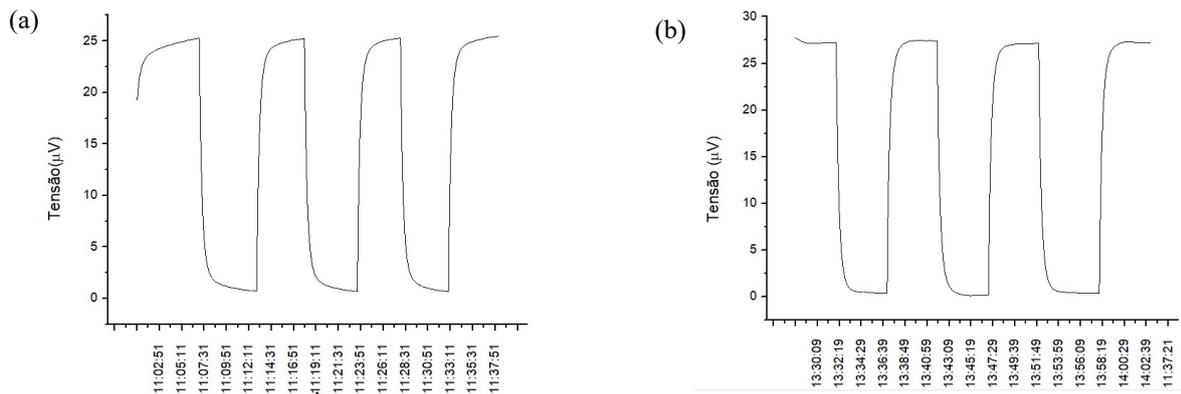


Figura 6 – Gráfico de tensão ao longo do tempo nos ensaios de tempo de resposta do piranômetro protótipo. (a) Das 10h58min até às 11h38min os ensaios foram realizados dentro da caixa colimadora. (b) Das 13h33min até às 14h, os ensaios foram realizados com o piranômetro fora da caixa.

O valor máximo do tempo de resposta de um equipamento de 2ª classe é de 60s, como pode ser visto na Tab. 1. Nas medições fora da caixa colimadora, o tempo de resposta estaria dentro dos limites de classificação do instrumento como de 2ª classe. O valor do tempo de resposta do CMP-11 da Kipp&Zonnen vem estipulado em seu manual como sendo de 5s. O valor obtido através dos ensaios na caixa colimadora foi de aproximadamente 3 s.

4.2 Análise da resposta angular

Análise da resposta angular de um piranômetro padrão secundário

De modo a aferir o dispositivo colimador e testar a metodologia utilizada na caracterização da resposta angular, foi realizado um ensaio utilizando um piranômetro padrão secundário Kipp&Zonnen modelo CMP-11. A fim de ilustrar o comportamento dos dados, o gráfico da Fig. 7 mostra os valores de tensão medidos ao longo do tempo. Os degraus correspondem às diferenças entre as medidas com ângulo normal e no ângulo de inclinação.

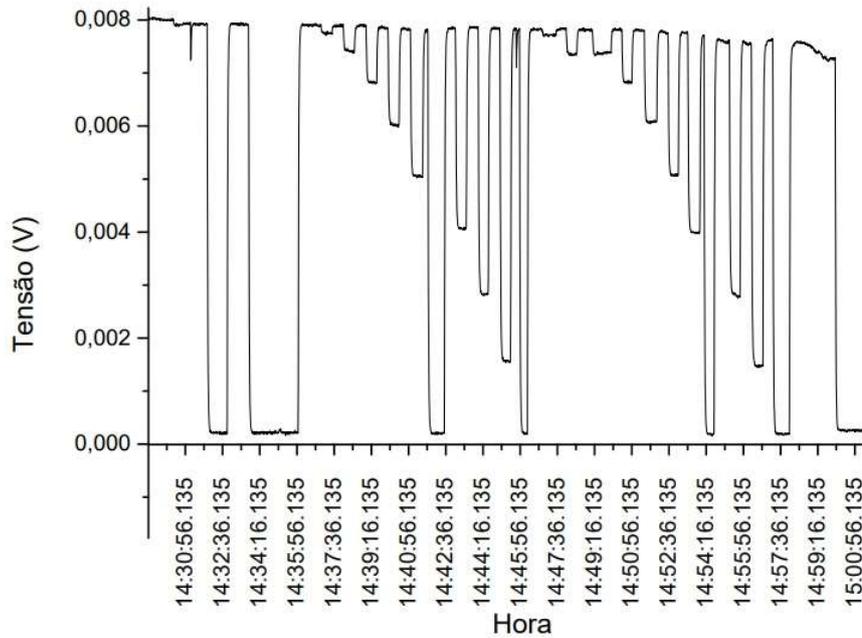


Figura 7 – Gráfico de tensão ao longo do tempo de um piranômetro padrão secundário. Os valores próximos a zero são com a radiação bloqueada. Os valores próximos ao máximo são com radiação direta normal, e os valores intermediários correspondem aos diferentes ângulos de incidência. Na primeira sequência foram medidas as respostas angulares a leste (14h35min até 14h47min) e na segunda sequência as medidas a oeste.

Para a caracterização da resposta angular é necessário um intervalo de tempo onde a irradiância seja a mais estável possível. Para este propósito foi utilizado um piranômetro fotovoltaico, que possui um tempo de resposta quase instantâneo e uma tensão de saída proporcional à irradiância. Analisando os dados do mesmo, de forma visual através de um gráfico, foi possível verificar se houve uma variação significativa e calcular a variação. Foi adotado como parâmetro uma variação menor que 1% na irradiância entre a medida normal antes e após a medida angular.

A Tab. 5 mostra os resultados dos erros a leste e a oeste do piranômetro CMP-11. Os resultados mostram que com o dispositivo colimador de radiação solar natural e a metodologia utilizada é possível a medida da resposta angular de maneira satisfatória, estando as medidas essencialmente dentro da tolerância que o fabricante informa no manual. Alguns valores estão ligeiramente acima do esperado, e estas variações são atribuídas às incertezas associadas à determinação da resposta angular com radiação natural, que precisa ser feita em dia de céu muito limpo para terem resultados satisfatórios.

Tabela 5 –Dados referentes à resposta angular do piranômetro CMP-11

Θ (°)	eL (erro a leste)	eO (erro a oeste)
10	-0,41%	-0,02%
20	-0,30%	-0,20%
30	-0,49%	0,53%
40	-0,96%	1,01%
50	-1,35%	-0,10%
60	0,38%	0,95%
70	-0,76%	2,15%
80	0,58%	-3,41%

Análise da resposta angular do piranômetro protótipo

De forma a visualizar os resultados, os dados das medições de tensão de saída dos piranômetros foram aplicados nas equações (3), (4), (5), (6) e (7), respectivamente, e seus valores aplicados então nas equações (8) e (9), sendo a eq. (8) referente à resposta angular na direção leste e a eq. (9) à resposta angular na direção oeste. A compilação dos resultados da resposta angular do piranômetro protótipo pode ser vistos na Tab. 4.

Tabela 4 – Aplicação dos dados do piranômetro protótipo nas equações para 2 min de exposição

Θ (°)	$\bar{X}_{0^{\circ}Tot'}$ (mV)	$\bar{X}_{0^{\circ}Tot''}$ (mV)	\bar{X}_C (mV)	R'	R''	eL (%)	eO (%)
10	26,00	26,17	1,18	0,99	1,04	0,91	5,87
20	25,85	26,09	1,26	0,98	1,04	4,38	10,80
30	25,59	25,76	1,19	0,93	0,98	7,08	13,07
40	23,26	23,39	0,88	0,83	0,89	8,67	15,69
50	24,84	24,98	0,99	0,71	0,74	11,38	15,79
60	24,59	24,58	0,95	0,53	0,56	5,74	11,74
70	24,14	24,14	0,90	0,39	0,39	13,00	13,78

Também foi realizada uma medição, utilizando as mesmas metodologias e cálculos, para um θ de 60° com 3 minutos de exposição, resultando num $eL=3,67\%$ e $eO=10,19\%$, valores menores do que os medidos para 2 min de exposição e para a medida a leste, inferior ao admitido para um piranômetro de segunda classe, como apresentado na Tab. 1. O valor a oeste ficou relativamente elevado, indicando problemas geométricos na cúpula de vidro de baixo custo.

5 CONCLUSÕES

O desenvolvimento do dispositivo colimador permitiu um resultado satisfatório para a medição com radiação solar natural da resposta angular e temporal tanto de um piranômetro padrão secundário como do protótipo desenvolvido. O trabalho desenvolvido contribui para a difusão da tecnologia de medição de radiação solar e oferece uma opção de dispositivo de calibração acessível.

Os resultados obtidos na análise dos parâmetros de um piranômetro protótipo são promissores, mostrando que, com alguns ajustes, é possível criar um equipamento de bom nível a um preço competitivo, o que, juntamente com a eficácia comprovada da caixa colimadora, pode significar uma ampliação na gama de usos no mercado de equipamentos solarimétricos, que hoje se mostra restrito devido aos altos valores. Além dos aspectos comerciais para um futuro desenvolvimento, os equipamentos estudados também apresentam um grande potencial acadêmico, seja na apresentação de conceitos relacionados à energia solar ou na formação de recursos humanos e tecnológicos.

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

- Duffie, J. A., Beckman, W. A., 1991. Solar Engineering of Thermal Processes, John Wiley & Sons.
- Guimarães, Patricia L.O; Santana, Marco Antonio A.; Vilela, Waldeir; Paes, Thiago; Berni, Luis A.; Silva, Luiz F., 2013; Avaliação metrológica de um sistema de calibração indoor para piranômetros baseado em um simulador solar – Revista Brasileira de Energia Solar, volume IV, n.1. pp. 19-24
- EPE – Empresa de Pesquisa Energética, 2014. EXPANSÃO DA GERAÇÃO - EMPREENDIMENTOS FOTOVOLTAICOS - Instruções para Solicitação de Cadastramento e Habilitação Técnica com vistas à participação nos Leilões de Energia Elétrica No. EPE-DEE-RE-065/2013-r1 Data: 05 de fevereiro de 2014.
- 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, nº 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, nº 1.
- International Organization for Standardization – ISO 9060:1990. Solar energy -- Specification and classification of instruments for measuring hemispherical solar and direct solar radiation.
- Kipp & Zonen. Instruction Manual CMP series Pyranometer - CMA series Albedometer. Manual document number: V1610 Publication date: 1st October 2016.
- MME - Ministério de Minas e Energia. Portaria nº 21 de 18 de Janeiro de 2008. Disponível em <http://www.mme.gov.br/documents/10584/1288750/Portaria+21+de+18-01-2008+Publicado+no+DOU+21-01-2008/9602bdac-1041-4c84-a21c-30fbf5321687?version=1.0>
- Pinho, J.T., Galdino, M. A., 2014. Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos. CEPTEL – CRESESB

CHARACTERIZATION OF RESPONSE TIME AND COSINE ERROR OF A PYRANOMETER WITH SOLAR RADIATION

Abstract. *Harnessing solar energy in both thermal and photovoltaic applications is fundamental to reducing emissions and diversifying the Brazilian energy matrix. The survey of available solar radiation is an important step in increasing the use of solar energy, and the thermopile pyranometer is the instrument for measuring global hemispheric solar radiation required for this terrestrial survey of solar radiation. In this work, a collimator device was developed to perform angular response tests of direct solar radiation pyranometers. A prototype pyranometer based on a peltier plate as sensor element was constructed and its response time and angular response were determined. The collimating device was tested with the angular response test of a secondary standard pyranometer and found to be satisfactory. The developed prototype met ISO 9060-1990 parameters for a second class instrument in response time and for 60 ° angular response in one (east) direction. In the other direction (west) the error was greater than the limit of the norm, caused by the geometric inaccuracy of the low cost glass dome used. The work contributed to the development of human resources at the State University of Rio Grande do Sul, besides enabling new advances in the national development of solar radiation measuring instruments and test methodology.*

Key words: *Solar Radiation, Pyranometer, Cosine response*