

INFLUÊNCIA DA VARIAÇÃO ESPECTRAL NA RESPOSTA DE RADIÔMETROS FOTOVOLTAICOS

Celso Israel Fornari – celso@las.inpe.br

Waldeir Amaral Vilela – waldeir@las.inpe.br

Antonio Fernando Beloto – beloto@las.inpe.br

Luiz Angelo Berni – berni@las.inpe.br

Dalmo Geraldo Pasin – dalmo@las.inpe.br

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, Laboratório Associado de Sensores e Materiais- LAS
Avenida dos Astronautas, 1758, Jardim da Granja – São José dos Campos/SP 12227-010

Resumo. *A radiação solar que atinge uma determinada região da superfície terrestre está intimamente relacionada às condições climáticas do local, pois alteram o espectro solar incidente. A variação do perfil espectral da radiação eletromagnética proveniente do sol pode ocasionar erros significativos em medidas de irradiância realizadas por sensores fotovoltaicos de silício. O perfil espectral muda em função das variações ambientais, presença de aerossóis, espessura da camada de massa de ar entre outros. O objetivo deste trabalho é analisar o impacto da variação espectral em medidas realizadas com sensores fotovoltaicos e analisar a influência das variações ambientais em medidas realizadas com radiômetros fotovoltaicos. Os dados utilizados neste estudo foram coletados por duas Unidades de Monitoramento Ambiental. O espectro solar foi coletado por um espectrômetro com faixa de operação entre o ultravioleta e o infravermelho próximo. A análise dos dados se baseou na variação do perfil espectral em função da hora do dia e durante o período de coleta. O estudo do descasamento espectral mostrou que este fator pode ser responsável por grande parte de erros de medidas em radiômetros fotovoltaicos que utilizam elemento sensor de silício. O erro médio estimado através da análise do espectro solar para um radiômetro fotovoltaico devido ao descasamento espectral, dentro da sua faixa de operação, foi de 2,5 %. A análise dos dados registrados para irradiância no mesmo período e horário de coleta dos espectros mostram que a diferença média foi de 3,3 % entre radiômetros fotovoltaicos e radiômetros de termopilha, considerado como padrão de referência.*

Palavras-chave: *Espectro solar, radiação solar, radiômetros, irradiância;*

1. INTRODUÇÃO

O conhecimento da radiação solar que atinge a atmosfera e a superfície terrestre tem uma vasta aplicação em diversas áreas do conhecimento humano e é uma variável ambiental de fundamental importância no estudo do clima e dos fenômenos meteorológicos. No Brasil, devido a questões econômicas e culturais, existe uma grande carência de dados de radiação solar, em virtude do reduzido número de estações solarimétricas e da grande extensão territorial do país (Guimarães, 2003). Com objetivo de diminuir esta carência, o INPE tem realizado, nos últimos anos, atividades de pesquisa e desenvolvimento de produtos com aplicação direta ou indireta nesta área (Vilela, 2010).

O ideal para dimensionar um sistema fotovoltaico de captação de energia solar para uma determinada área é que sejam feitos estudos do local através de medidas sistemáticas de radiação solar e das variações ambientais por determinado período de tempo. A radiação solar em determinado ponto da superfície terrestre está intimamente relacionada às condições climáticas da região, pois as condições locais alteram o espectro solar incidente (Valley, 1965). Portanto, estações solarimétricas e meteorológicas são de fundamental importância para o estudo destas regiões. Por outro lado, modelos matemáticos que estimam a radiação solar incidente na superfície terrestre precisam ser validados para diversas regiões do país, e para isto, necessitam de dados coletados na superfície terrestre (Guimarães, 2003), como é o caso do espectro padrão ASTM G173-03 que foi gerado através do modelo SMARTS2 e de dados atmosféricos de algumas cidades norte-americanas (Haag, 2012).

Uma Unidade de Monitoramento Ambiental ou Plataforma de Coleta de Dados pode ser definida como uma estação meteorológica na qual as observações são feitas e transmitidas de forma automática (WMO, 2008). Ela é constituída por um sistema de aquisição e armazenamento de dados, sensores de monitoramento ambiental, sistema de suprimento de energia e transmissão de dados via cabo ou sem fio e ajuda a suprir a demanda de dados ambientais confiáveis em território nacional. A Unidade de Monitoramento Ambiental possui, geralmente, sensores de temperatura e umidade relativa do ar, direção linear típica entre 300 e 3000 nm (Zhou, et al., 1995). Qualquer mudança ocorrida no espectro devido à presença de vapor d'água, por exemplo, que acontecem para comprimentos de onda entre 750 e 3000 nm (McCartney, 1983) podem não ser percebidos por elementos sensores baseados em silício. Como 97% da radiação incidente na superfície terrestre está confinada entre 290 e 3000 nm (Würfel, 2005), a resposta de um sensor de silício pode gerar dados com um erro inerente devido ao descasamento espectral e faixa restrita de operação.

O objetivo deste trabalho é analisar o impacto da variação espectral e também estudar a influência das variações das grandezas ambientais em medidas realizadas com sensores fotovoltaicos de silício. Para o estudo da correlação entre

dados de radiação obtidos por diversos dispositivos e variáveis ambientais foi utilizado um banco de dados do espectro solar, irradiância solar, temperatura e umidade relativa do ar, precipitação e pressão atmosférica.

2. MATERIAL E MÉTODOS

Neste trabalho, foram utilizados dados de duas Unidades de Monitoramento Ambiental instaladas no Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) em São José dos Campos - SP. A coleta dos dados ambientais e de radiação solar foi realizada na Unidade 1 (Fig. 1a), enquanto que o espectro solar foi coletado na Unidade 2 (Fig. 1b).

2.1 Unidades de Monitoramento Ambiental

As duas unidades possuem sistemas de transmissão de dados via rádio, sistemas de aquisição de dados de 16 bits com vários canais e alimentação de energia autônoma obtida através de painéis fotovoltaicos. A Fig. 1 mostra as unidades em operação.

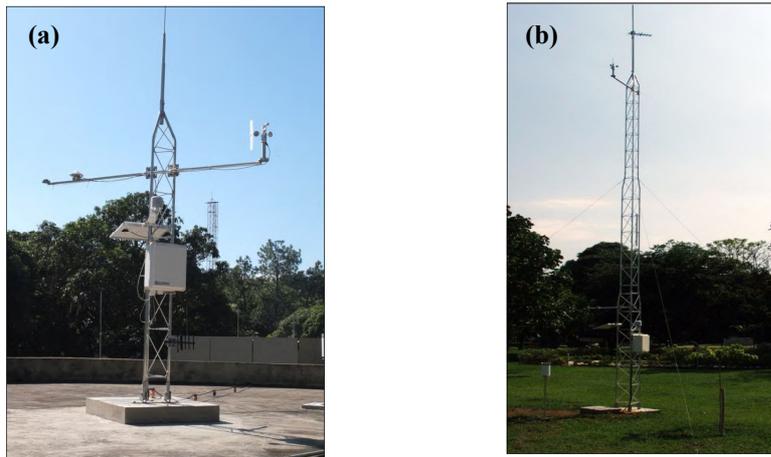


Figura 1 - Estações de coleta de dados instaladas no campus do INPE em São José dos Campos.

A Unidade 1 possui 3 metros de altura e está instalada na latitude $-23^{\circ} 12' 41''$ e longitude $-45^{\circ} 51' 32''$. A Unidade 2 possui 10 metros de altura e está instalada na latitude $-23^{\circ} 12' 27''$ e longitude $-45^{\circ} 51' 42''$. As especificações dos sensores instalados nestas unidades estão descritas na Tab. 1.

Tabela 1 - Especificações dos sensores utilizados no estudo.

SENSOR	FABRICANTE	FAIXA DE OPERAÇÃO
Radiômetro Fotovoltaico	Kipp & Zonen	400 a 1100 nm
Radiômetro Térmico	Kipp & Zonen	310 a 2800 nm
Temperatura	Rotronic	-40 a $+85$ °C
Umidade relativa	Rotronic	0 a 100 %
Pressão atmosférica	Setra	800 a 1100 hPa
Velocidade do vento	MetOne	0 a 50 m/s
Precipitação	Squitter	0 a 500 mm/h
Espectrômetro	GetSpec	200 a 1100 nm

Os espectros do sol foram coletados entre os dias 03/10/2012 e 22/11/2012, das 06h00 às 18h00, com um intervalo de 1 hora. Os dados meteorológicos utilizados foram coletados a cada 10 segundos, sendo armazenada a média dos dados a cada 5 minutos. A Figura 2 mostra gráficos dos valores médios de temperatura, umidade relativa, pressão atmosférica e velocidade do vento coletados no intervalo de um ano, de 02/09/2012 à 01/09/2013. O cálculo dos valores médios foi realizado através de uma média aritmética a cada 24 horas, contemplando ao total 288 pontos entre a zero hora até as 23h55.

Observou-se certa tendência de valores altos no gráfico da temperatura média entre os meses de novembro de 2012 até março de 2013, condizente com o verão na região sudeste e valores menores entre os meses de junho e julho de 2013, condizente com o período de inverno. A temperatura máxima das médias diárias registrada durante o período de medida foi de $27,6$ °C e a mínima das médias diárias foi de $9,6$ °C, tendo uma temperatura média anual em torno de 21 °C.

A velocidade média do vento apresentou valores mais baixos entre os meses de junho e julho, tendo valor máximo de aproximadamente $6,2$ km/h. Já a umidade relativa apresentou valores mínimos próximo dos meses de setembro de 2012 e setembro de 2013. O período mais úmido registrado ocorreu entre os meses de fevereiro a maio de 2013. A

umidade média anual registrada foi de 80 % tendo mínima de 37 %. A pressão atmosférica foi a variável que apresentou maior dispersão. O valor médio diário máximo registrado foi de 954 mbar e o valor médio mínimo diário foi de 936 mbar.

A Figura 3 mostra a precipitação acumulada entre os meses de setembro de 2012 e agosto de 2013. Dentro do período amostrado o mês de dezembro de 2012 apresentou o maior acumulo, 240 mm. São José dos Campos possui clima subtropical (Kotttek et al, 2006), com precipitação acumulada entre 1000 e 1500 mm por ano. No período amostrado a precipitação acumulada foi de 1350 mm.

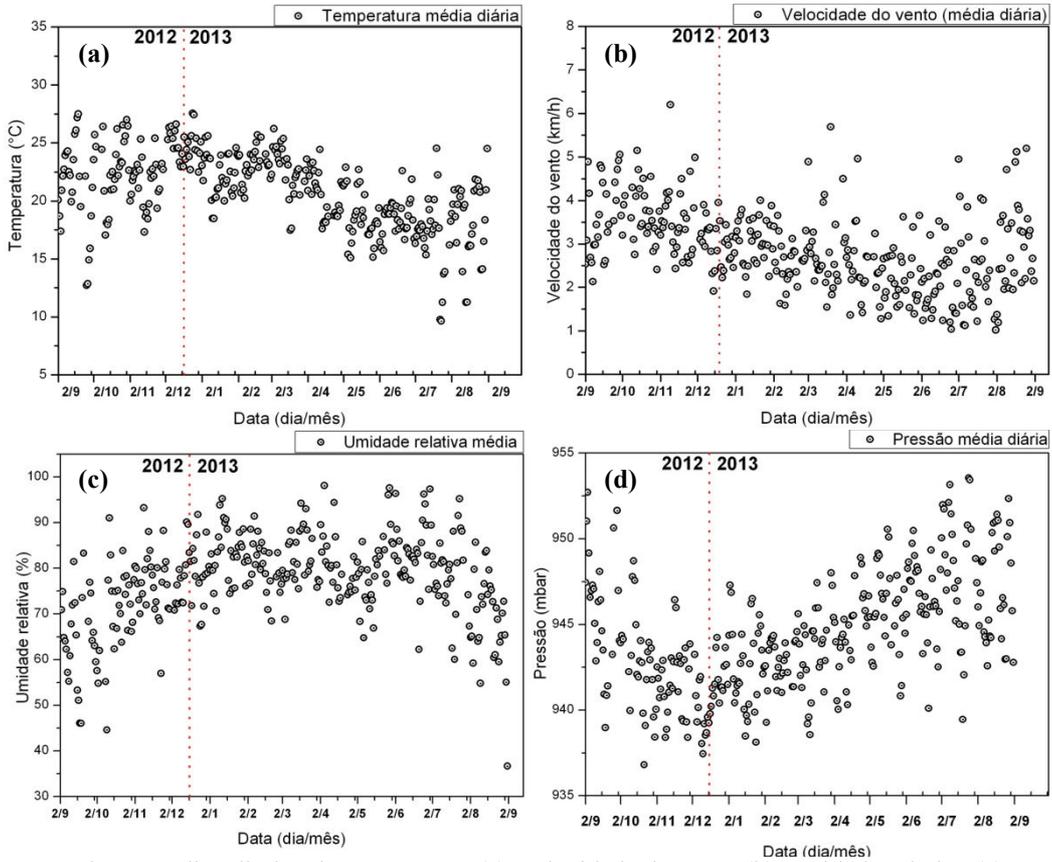


Figura 2 - Valores médios diários de temperatura (a), velocidade do vento (b), umidade relativa (c) e pressão atmosférica (d) registrados no período de estudo.

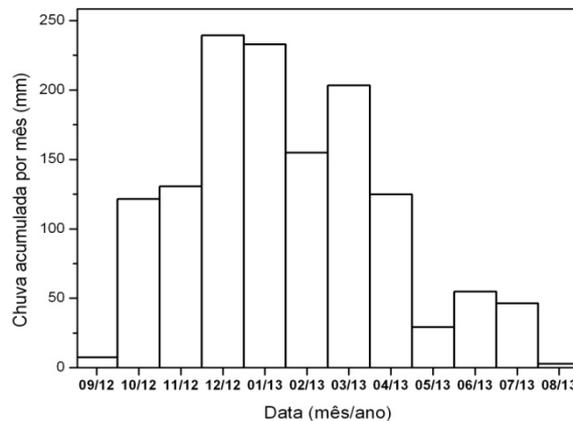


Figura 3 - Precipitação acumulada entre setembro/2012 e agosto/2013.

2.2 Métodos

O perfil e a intensidade do espectro solar incidente na superfície terrestre variam constantemente. As condições atmosféricas, como umidade relativa, presença de nuvens, concentração de gases, temperatura e até a densidade de aerossóis variam ao longo do dia e do ano e alteram o perfil e intensidade do espectro em regiões distintas. Um elemento sensor baseado em silício possui uma resposta espectral não linear típica entre 400 e 1100 nm. Para avaliar o impacto do descasamento espectral neste sensor em medidas de irradiância solar, utilizou-se o método descrito abaixo.

A curva do espectro solar é descrita pela potência por unidade de área incidente em função do comprimento de onda da radiação, onde a integral desta função representa a irradiância incidente, ou seja, a potência por unidade de área. Seja $P(\lambda)$ a função do espectro solar e $R(\lambda)$ a resposta espectral de um dispositivo. A porção espectral perceptível para um dispositivo será dada pela Eq. (1):

$$\varphi(\lambda) = P(\lambda) \cdot R(\lambda) \quad (1)$$

As funções $P(\lambda)$ e $R(\lambda)$ foram normalizadas para que o perfil fosse analisado, sem que a intensidade total interferisse na análise. A Figura 4a mostra a curva de uma resposta espectral típica de um elemento sensor de silício, onde o eixo das abscissas corresponde ao comprimento de onda da radiação incidente em nanômetros e o eixo das ordenadas corresponde à intensidade do sinal de resposta. Na Figura 4b é apresentado um gráfico da região espectral às 07h00 e ao meio dia, mostrando a variação do perfil de um dia típico sem nebulosidade.

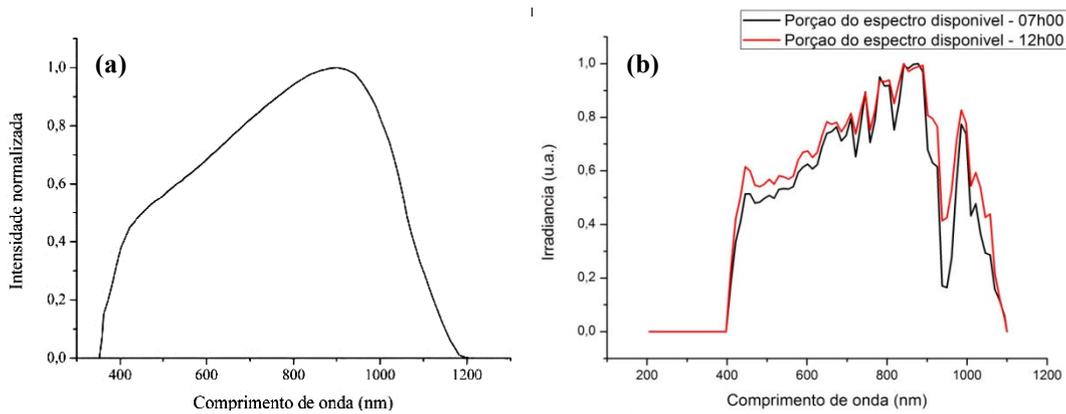


Figura 4 - Resposta espectral típica de um sensor de silício (a) e região espectral disponível (b).

Desta forma é possível analisar a variação do perfil espectral independente do horário do dia. A potência total percebida pelo dispositivo será a integral da função $\varphi(\lambda)$, representada pela Eq. (2):

$$\Phi = \int_{\lambda_o}^{\lambda_f} \varphi(\lambda) d\lambda \quad (2)$$

Para analisar a variação do perfil espectral e avaliar os erros ocasionados por esta limitação de sensibilidade é necessário definir um fluxo padrão, chamado de Φ_{CAL} , onde o sub índice indica calibração. Este Φ_{CAL} pode ser obtido do espectro ($P_{CAL}(\lambda)$) ao qual o dispositivo fotovoltaico foi exposto durante a calibração ou pode ser obtido do espectro padrão, definido pela ASTM. A potência aproveitada, Φ_{CAL} , pelo dispositivo quando exposto a um espectro de calibração é obtida pela Eq. (3):

$$\Phi_{CAL} = \int_{\lambda_o}^{\lambda_f} P_{CAL}(\lambda) R(\lambda) d\lambda = \int_{\lambda_o}^{\lambda_f} \varphi_{CAL}(\lambda) d\lambda \quad (3)$$

Assim, o fator de descasamento espectral pode ser definido como T_{ij} , calculado através da Eq. (4), onde os índices ij representam a data e hora da coleta respectivamente.

$$T_{ij} = \frac{\Phi_{ij}}{\Phi_{CAL}} \quad \therefore \quad \begin{cases} i = \text{data} \\ j = \text{hora} \end{cases} \quad (4)$$

Os resultados da Eq. (4) podem ser organizados em uma matriz, facilitando sua análise e interpretação. Radiômetros solares que utilizam elementos sensores de silício em geral não possuem problemas de linearidade em relação à variação da intensidade da radiação incidente (Fornari, 2013). Isto significa que, se não houver variação do perfil espectral dentro da faixa de resposta de um elemento sensor de silício, não haverá erros significativos nas. Desta forma, este método permite analisar o erro devido ao descasamento espectral dentro da faixa de operação de um elemento sensor de silício. Além do descasamento espectral, há outros erros devido à dependência com a temperatura, lei dos cossenos e outros que não serão analisados neste trabalho.

3. RESULTADOS

Analisou-se a variação do descasamento espectral em função da hora do dia e do período de coleta dos espectros. A Figura 5 mostra a diferença no fator de descasamento espectral em função da hora de coleta do espectro, ou seja, a média das colunas da matriz T_{ij} . Cada ponto no gráfico representa a média de 48 pontos e a barra de erro o desvio em torno do valor médio.

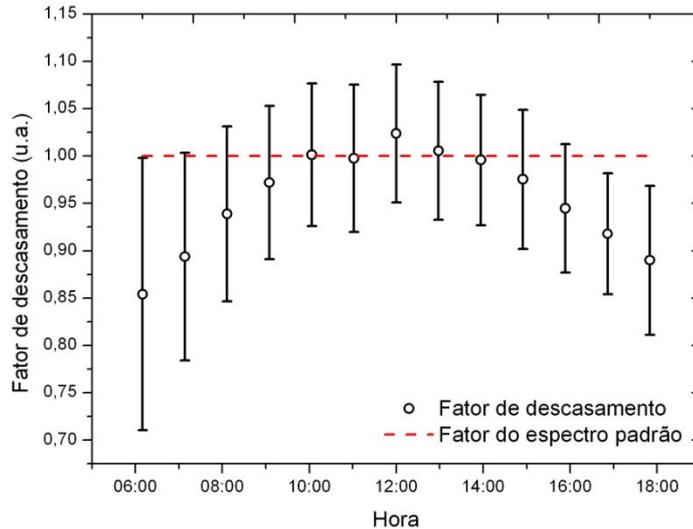


Figura 5 - Descasamento espectral medido em função da hora do dia.

O gráfico da Figura 5 mostra que as maiores diferenças se acumulam no começo e no final do dia, antes das 09h00 e após as 16h00. Dentro do período analisado os fatores de descasamento espectral que mais se aproximaram do fator do espectro padrão foram registrados entre as 10h00 e 15h00. Se comparado com o fator do espectro padrão, um radiômetro que utilizasse um elemento sensor de silício teria apresentado um erro médio de 2,5 % no intervalo de dados coletados devido à variação do perfil espectral dentro da sua faixa de operação (400 a 1100 nm).

O gráfico da Figura 6 mostra os erros nas medidas do radiômetro fotovoltaico junto com a diferença calculada devido ao fator do descasamento espectral, ambos em módulo. A diferença nas medidas do radiômetro fotovoltaico foi obtida quando comparadas as medidas de irradiância do radiômetro fotovoltaico modelo SP-Lite com o radiômetro de termopilha padrão de referência, modelo CM-11. A comparação foi feita para os mesmos dias, horários e local em que foi realizada a coleta do espectro solar. Desta forma é possível analisar o impacto do descasamento espectral nas medidas realizadas por radiômetros fotovoltaicos.

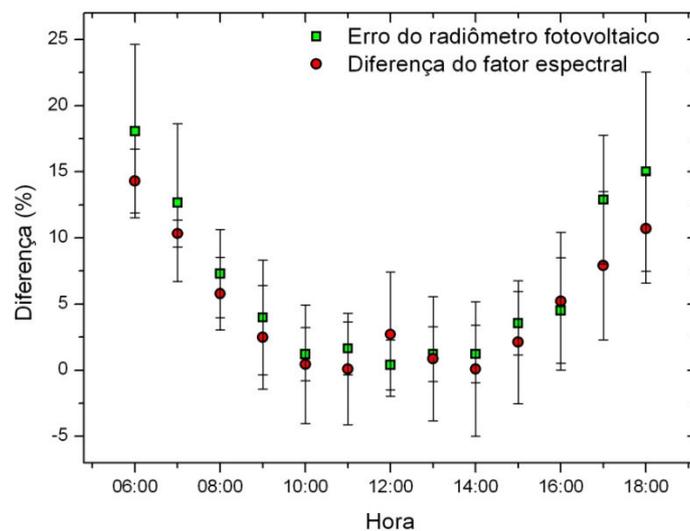


Figura 6 - Comparação do erro de descasamento e da diferença medida.

A análise do descasamento espectral dentro da faixa de operação de um radiômetro que utiliza um elemento sensor de silício revelou uma diferença média de aproximadamente 2,5 %. Para o mesmo período de análise espectral as diferenças nos valores de irradiância mostraram um valor médio de aproximadamente 3,3 %. Este resultado indica que grande parte do erro do radiômetro analisado pode ser devido ao descasamento espectral. As respostas espectrais de

dispositivos com elemento sensor de silício são semelhantes. Portanto pode-se expandir este resultado e afirmar que grande parte dos erros nas medidas dos radiômetros fotovoltaicos pode ocorrer devido ao descasamento espectral.

Na Figura 7 o fator descasamento espectral é analisado em função da data de coleta do espectro, ou seja, a média das linhas da matriz T_{ij} . Cada ponto representa a média diária do fator descasamento e a barra de erros representa a dispersão em torno do valor médio. A linha tracejada indica o fator descasamento espectral do espectro padrão.

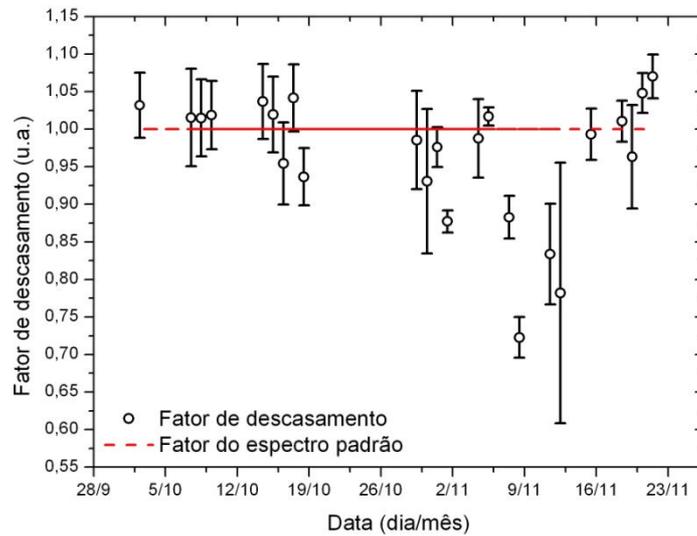


Figura 7 – Fator de descasamento espectral em função da data.

Através do gráfico da Figura 7 é possível perceber que o menor valor médio diário do fator de potência aproveitada pelo radiômetro ocorreu em 9 de novembro de 2012. Neste dia, o céu estava totalmente encoberto, com chuva na maior parte do tempo. O índice pluviométrico total registrado pela Unidade 1 foi de 52,25 mm. A temperatura diária média foi de 21 °C, com mínima de 19,8 °C e máxima de 23,1 °C. A umidade relativa média registrada foi de 92 % UR com mínima de 85 % UR e máxima de 99 % UR. Este dia foi atípico durante o período utilizado na análise, com temperaturas baixas e praticamente constantes ao longo do dia, um alto índice de umidade relativa e o menor índice de irradiação registrado no período de coleta.

De acordo com os resultados apresentados, grande parte dos erros nas medidas de irradiância solar pode ser atribuída à variação do perfil espectral que é ocasionada pelas mudanças das condições atmosféricas.

Dentre as variáveis analisadas da Figura 2, as que apresentaram maior correlação foram: temperatura do ar e pressão atmosférica. O coeficiente de Pearson calculado foi de -0,74, indicando boa correlação inversa entre as duas variáveis. A correlação entre umidade relativa do ar e temperatura foi de -0,34. A maior correlação positiva encontrada foi de 0,18 entre a temperatura do ar e velocidade do vento.

4. CONCLUSÃO

O estudo do descasamento espectral mostrou que este fator pode ser responsável por grande parte de erros de medidas em radiômetros fotovoltaicos que utilizam elemento sensor de silício. O erro médio estimado através da análise do espectro solar para um radiômetro fotovoltaico devido ao descasamento espectral foi de 2,5 %. A análise dos dados registrados na Unidade 1 para irradiância no mesmo período de coleta dos espectros mostram que a diferença média foi de 3,3 % entre radiômetros fotovoltaicos em comparação com radiômetros de termopilha, considerados como padrão de referência. O valor médio previsto para o erro do descasamento espectral está contido dentro do erro das medidas realizadas em campo, o que indica que o descasamento espectral é um dos fatores responsáveis por erros na medida da irradiância solar por radiômetros fotovoltaicos.

Agradecimentos

Ao CNPq pelo financiado do projeto, processo 554887/2010-0 (Desenvolvimento de sistema para monitoramento ambiental remoto).

REFERÊNCIAS

- Fornari C. I. Unidade de monitoramento ambiental para o estudo da irradiância solar e sensores. Dissertação de mestrado, INPE, São José dos Campos, 2013.
- Guimarães A. P. C. Estimativa de parâmetros da camada atmosférica para cálculo da irradiação solar incidente na superfície terrestre. 2003. Tese de doutorado, UFRJ, Rio de Janeiro, 2003.

- Haag R. Estimativa da distribuição espectral da radiação solar sobre o território brasileiro através de análise multiinstrumental. 2012. Tese de doutorado, UFRGS, Porto Alegre, 2012.
- Kottek M., Grieser J., Beck C., Rudolf B., Rubel F. World map of the Köppen-Geiger climate classification updated, Meteorologische Zeitschrift, Vol. 15, No. 3, 259-263, 2006.
- McCartney E. J. Absorption and emission by atmospheric gases. John Wiley & Sons, 1983.
- Valley, S. L. Handbook of geophysics and space environments. United States Air Force, Cambridge, 1965.
- Vilela W. A. Estudo, desenvolvimento e caracterização de radiômetros para medidas da radiação solar. Tese de doutorado, INPE, São José dos Campos, 2010.
- Würfel, P. Physics of solar cells, Wiley, 2005.
- Zhou, C.; Michalsky, J.; Harrison, L. Comparison of irradiance measurements made with the multi-filter rotating shadow band radiometer and first-class thermopile radiometers, Solar Energy, v. 2, p. 487-491, 1995.

INFLUENCE OF CHANGES IN SPECTRAL RESPONSE OF PHOTOVOLTAIC PYRANOMETERS

Abstract. *The solar radiation that reaches the Earth's surface is closely related to the climatic conditions of the place. The variation of the spectral profile of the electromagnetic radiation can cause significant errors in irradiance measurements made by photovoltaic silicon sensors. The spectral profile changes due to environmental variations like the presence of aerosols, thickness of the air mass between and others. The main objective of this work is to analyze the impact of the spectral variation in measurements performed with photovoltaic sensors and analyze the influence of environmental variations. The data used in this study were collected by two Environmental Monitoring Units. The solar spectrum was collected by a spectrometer operating between ultraviolet and near infrared. Data analysis was based on the variation of the spectral profile as a function of time of day during the collection period. The study of the spectral mismatch showed that this factor may be responsible for much of the measurement errors in photovoltaic radiometers using photovoltaic silicon sensor element. The average error estimated by analysis of the solar spectrum for photovoltaic radiometer due to spectral mismatch was 2.5 %. The analysis of the irradiance data recorded for the same period and time of collection of the spectra showed that the average difference was 3.3 % between PV and thermopile radiometer.*

Key words: Solar spectrum, solar radiation, radiometers, irradiance;