

I CBENS - I CONGRESSO BRASILEIRO DE ENERGIA SOLAR

DETERMINAÇÃO DO ESPECTRO SOLAR ATRAVÉS DE UM RADIÔMETRO ESPECTRAL UTILIZANDO DIODOS EMISSORES DE LUZ (LEDs) COMO SENSORES SELETIVOS

Rafael Haag – rafael.haag@ufrgs.br

Arno Krenzinger – arno@mecanica.ufrgs.br

Universidade Federal do Rio Grande do Sul, PROMEC - Laboratório de Energia Solar.

4.1 Construção e Calibração de Radiômetros

Resumo. A caracterização do espectro solar na superfície terrestre normalmente é efetuada através de espectrômetros de elevado custo e delicado manuseio. Este trabalho propõe uma nova metodologia para a caracterização do espectro solar que está baseada na medida da transmitância atmosférica em determinadas regiões do espectro visível e infravermelho por meio de um radiômetro espectral portátil e de baixo custo. Este radiômetro espectral utiliza diodos emissores de luz (LEDs) como sensores seletivos de radiação. LEDs são dispositivos semicondutores projetados para emissão quase monocromática de radiação, no entanto, também podem ser utilizados como sensores de radiação, apresentando uma resposta espectral próxima à faixa de emissão e possuem excelente estabilidade eletrônica e óptica. Foram selecionados LEDs que apresentam resposta espectral relacionada com a faixa de absorção e espalhamento dos seguintes parâmetros atmosféricos; água precipitável, ozônio, espessura óptica de aerossóis e coeficientes α e β de Ångström. Estes parâmetros são os principais responsáveis pelo processo de extinção da radiação solar que atinge a superfície terrestre em uma atmosfera sem nuvens. Os dados coletados pelo radiômetro são enviados a um microcomputador, e com a ajuda de um programa computacional desenvolvido a partir de modelos paramétricos de irradiância, se obtém como resultado o espectro solar no segmento de 300 a 4000 nm.

Palavras-chave: Radiação solar, Irradiância solar espectral, Radiômetro espectral, Diodos emissores de luz.

1. INTRODUÇÃO

O conhecimento sobre distribuição espectral da energia proveniente do Sol que atinge a superfície terrestre é importante em inúmeras aplicações. A eficiência de módulos fotovoltaicos para conversão de energia luminosa em eletricidade depende das características espectrais da radiação solar recebida. A produção de biomassa e a agricultura estão vinculadas a determinadas regiões do espectro onde a radiação solar é capaz de interagir e realizar a fotossíntese. O estudo sobre as mudanças globais no clima também exige informações sobre as características espectrais da radiação solar. A distribuição espectral da irradiância solar depende de vários parâmetros atmosféricos e de algumas propriedades locais como o albedo, umidade e pressão atmosférica.

O foco deste trabalho está no emprego de um radiômetro espectral que adota LEDs (diodos emissores de luz) como sensores seletivos para determinação de alguns parâmetros atmosféricos, dentre eles: quantidade de água precipitável, quantidade total de ozônio, espessura óptica de aerossóis e coeficientes α e β de Ångström. Estes parâmetros são utilizados para a caracterização da irra-

diância solar através de um programa computacional que modela os complexos processos de absorção e espalhamento da radiação solar que atinge a atmosfera terrestre.

2. RADIÔMETRO ESPECTRAL

A caracterização espectral da irradiância solar pode ser efetuada através do uso de espectrorradiômetros que são constituídos basicamente por um prisma ou rede de difração e um arranjo de sensores ópticos sensíveis. Além de possuírem um custo muito elevado, os espectrorradiômetros apresentam um sistema óptico extremamente delicado e necessitam um freqüente processo de calibração. Os radiômetros espectrais, instrumentos que geralmente possuem apenas uns poucos canais seletivos, apesar de não fornecerem diretamente informação sobre a distribuição espectral, possuem uma maior estabilidade óptica e um custo reduzido em relação aos espectrorradiômetros. Realizando a medida da transmitância atmosférica em comprimentos de ondas convenientes, um radiômetro espectral pode ser usado para a obtenção de parâmetros atmosféricos que determinam a irradiância espectral solar na superfície terrestre.

A Fig. 1 mostra a geometria básica do radiômetro espectral desenvolvido no Laboratório de Energia Solar da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Observa-se a unidade óptica com o difusor de *teflon* no centro do instrumento, neste setor estão instalados os sensores e o circuito medidor de temperatura. O anel de sombra rotativo é comandado por um pequeno motor de corrente alternada acoplado a um mecanismo redutor de velocidade, apresentando uma rotação de aproximadamente 0,5 RPM. Este anel de sombra é constituído por uma fita de alumínio com formato de uma seção de arco circular ao longo de um meridiano celeste (a face da unidade detectora situa-se no centro deste arco). Esta faixa de sombra bloqueia o campo de visão do detector em uma região do céu com um ângulo de aproximadamente 5° .

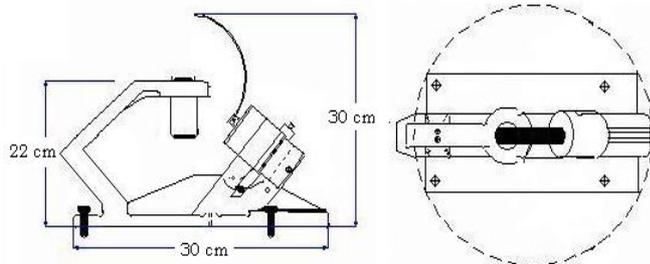


Figura 1 - Diagrama e foto do radiômetro espectral. Observa-se a unidade óptica com o difusor de *teflon* no centro e o anel de sombra rotativo comandado por um motor e caixa de redução.

O conjunto composto pelo anel de sombra e o motor está preso na base do radiômetro em um trilho e pode ser ajustado para uma ampla faixa de latitudes. O anel de sombra rotativo permite que seja realizada a medida da irradiância solar global-horizontal quando o anel de sombra estiver voltado para o nadir (abaixo do detector) e difusa-horizontal quando o detector é sombreado pelo anel rotativo. A medida obtida em posições pouco distantes do bloqueio do disco solar pelo anel de sombra permite que seja calculada uma correção para o excesso de céu bloqueado pela faixa de sombra na realização da medida da componente difusa da irradiância solar.

Este radiômetro espectral diferencia-se dos demais pelo fato de adotar LEDs como sensores espectrais seletivos. Estes componentes são uma excelente alternativa ao uso de fotodiodos de silício acoplados a filtros de interferência e podem ser adquiridos com facilidade e baixo custo para vários segmentos do espectro visível, infravermelho e ultravioleta, além disto, possuem propriedades ópticas e eletrônicas extremamente estáveis. Estas características oferecidas pelos LEDs são fundamentais, principalmente para a construção de instrumentos destinados ao monitoramento da radiação solar durante um longo período de tempo e/ou em locais onde uma rotina frequente de calibração torna-se inviável.

Cada canal seletivo do radiômetro é composto por um LED cuja resposta espectral já foi determinada experimentalmente por vários autores (Mims, 2002; Brooks e Mims, 2001). A análise da resposta espectral de outros LEDs pode ser aferida experimentalmente, mas envolve o uso de espectrógrafos de boa resolução e uma fonte de calibração luminosa com alta estabilidade. A Fig. 2 mostra a resposta espectral dos LEDs utilizados no radiômetro. Estes LEDs possuem uma máxima resposta nos seguintes comprimentos de onda: 375 nm (HLMP-CB30), 525 nm (HLMP-3507), 625 nm (HLMP-3762), 815 nm (F5E3) e 920 nm (1N6265), e largura de banda de 38 nm, 80 nm, 10 nm, 80 nm e 50 nm, respectivamente. Esta resposta espectral foi medida experimentalmente para vários lotes de LEDs do mesmo fabricante e a diferença de resposta entre os LEDs foi extremamente pequena, aproximando-se dos erros existentes no sistema de medida (Brooks e Mims, 2001). Cada LED é operado no modo fotovoltaico, possuindo um resistor de *shunt* cujo valor foi determinado experimentalmente para garantir a operação próxima da região de curto circuito. O radiômetro possui também um fotodiodo de silício com sensibilidade espectral entre 300 nm e 1100 nm.

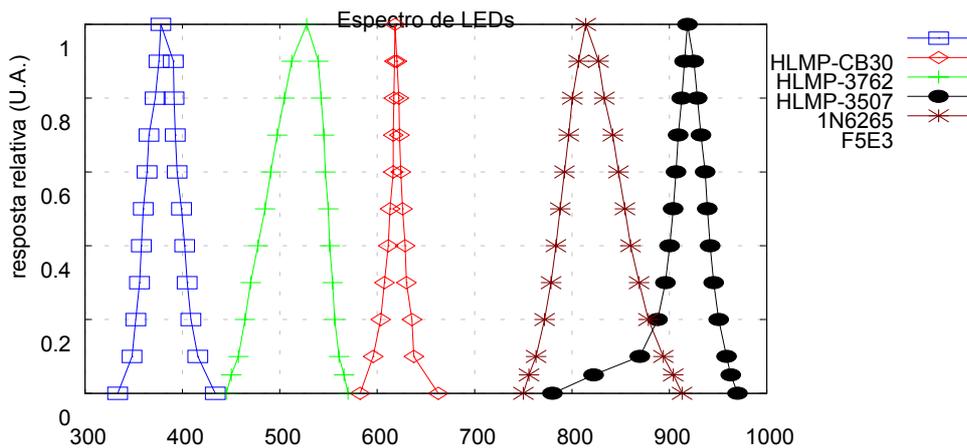


Figura 2 - Resposta espectral dos LEDs utilizados como sensores seletivos no radiômetro espectral

3. MODELOS ESPECTRAIS DE IRRADIÂNCIA SOLAR

Há basicamente dois métodos utilizados para modelar os processos de absorção molecular em segmentos discretos do espectro (H_2O , O_2 , CO_2 e O_3 , etc.) e o espalhamento causado por aerossóis e moléculas: O primeiro baseia-se no cálculo da transmitância atmosférica e assume que a atmosfera terrestre é composta por uma única camada que através de vários processos de absorção e espalhamento atenua a irradiância solar (Justus and Paris 1985). Estes modelos são baseados no trabalho pioneiro de Leckner (1978), que formulou um conjunto de equações para descrever os processos de extinção da radiação solar devido aos diversos gases que constituem a atmosfera terrestre. O segundo método, denominado de transferência radiativa, leva em conta a não-homogeneidade vertical da atmosfera terrestre e divide a atmosfera em várias camadas para calcular os processos de absorção e espalhamento. O primeiro modelo de transferência radiativa denominado de LOWTRAN, foi originado na década de 70 e foi substituído por uma nova versão, chamada de MODTRAN (Kneizys *et*

al. 1980). Estes nomes referem-se à resolução dos modelos: LOWTRAN para uma baixa resolução e MODTRAN para resolução moderada (0.5 e 0.05 nm respectivamente para o comprimento de onda de 500 nm). Pelo fato de utilizar propriedades físico-químicas fundamentais dos gases, os métodos de transferência radiativa são denominados de “modelos rigorosos”. Para fornecerem resultados com grande exatidão, os “modelos rigorosos” de transferência radiativa necessitam de dados de entrada extremamente precisos e complexos, como o perfil vertical de distribuição de ozônio e vapor d’água, perfil de densidade atmosférica e a distribuição vertical e tamanho de aerossóis com suas características de albedo e fator de assimetria ou função de fase. Devido à dificuldade de se obter estes dados de entrada, nem sempre estes modelos de transferência radiativa podem ser aplicados para a caracterização do espectro solar. Os modelos de transmitância atmosférica simples, por outro lado, fazem uso de uma pequena quantidade de dados que são obtidos com facilidade, e podem ser implementados em pequenos programas computacionais.

Existem disponíveis vários programas computacionais destinados à modelagem da irradiância espectral solar na superfície terrestre baseados no método de transmitância atmosférica simples. Pode-se citar o programa SPECTRAL2 (Bird and Riordan, 1986) e o programa ESPECTRO (<http://www.solar.ufrgs.br>), originado no modelo de Iqbal (1983). Há ainda o programa SMARTS2 (Gueymard, 2003a,b), que difere dos demais modelos, pois utiliza equações de transmitância propostas por Leckner (1978) associadas a resultados obtidos previamente por modelos de transferência radiativa (LOWTRAN e MODTRAN) onde são escolhidas dez atmosferas padrões adotadas como referências para a caracterização da distribuição espectral. O programa SMARTS2 apresenta uma resolução espectral de 1 nm no intervalo entre 280 e 1700 nm e 5 nm entre 1705 e 4000 nm. Os modelos SPECTRAL2 e ESPECTRO, trabalham com resoluções entre 5 nm no segmento visível e 10 nm no infravermelho. Neste trabalho foi adotado um modelo de transmitância atmosférica simples desenvolvido numa planilha de cálculos (*Microsoft Excel*) e construído a partir do programa SPECTRAL2.

4. TRANSMITÂNCIA ATMOSFÉRICA

A partir dos modelos propostos por Leckner (1978) e Bird e Riordan (1986) a irradiância espectral solar direta normal na superfície terrestre é definida por:

$$I_{d\lambda} = H_{0\lambda} D T_{r\lambda} T_{o\lambda} T_{a\lambda} T_{w\lambda} T_{g\lambda} \quad (1)$$

onde $I_{d\lambda}$ representa a irradiância espectral normal, $H_{0\lambda}$ é a irradiância espectral normal extraterrestre, D é o fator de correção para a variação da distância Terra-Sol (Spencer, 1971):

$$D = 1.00011 + 0,034221 \cos(A_d) + 0,00128 \sin(A_d) + 0,000719 \cos(2A_d) + 0,000077 \sin(2A_d). \quad (2)$$

A variável A_d é chamada de dia angular e definida por:

$$A_d = (J_d - 1) \frac{2\pi}{365}, \quad (3)$$

onde J_d é o dia Juliano do ano (1 até 365).

As demais variáveis existentes na Eq.(1) representam as transmitâncias para os diferentes processos de extinção considerados: espalhamento de Rayleigh, absorção por ozônio, extinção por aerossóis, absorção devido ao vapor de água e absorção por mistura uniforme de gases respectivamente. As transmitâncias atmosféricas são obtidas assumindo-se válida a lei de atenuação de Bouguer.

4.1 Espalhamento Rayleigh

O espalhamento causado pelos gases atmosféricos puros e secos geralmente é denominado de espalhamento de Rayleigh ou espalhamento molecular. A eficiência deste espalhamento depende de λ^{-4} , logo os comprimentos de onda menores são mais afetados. Deste modo, a radiação solar com $\lambda > 1000$ nm praticamente atravessa a atmosfera terrestre sem interagir com as moléculas de ar seco. A expressão utilizada para descrever o espalhamento Rayleigh no modelo SPECTRAL2 é dada por:

$$T_{r\lambda} = \exp\left(-M \cdot \frac{P}{\lambda^4 (115,6406 - 1,335 / \lambda^2)}\right), \quad (4)$$

onde $T_{r\lambda}$ representa a transmitância Rayleigh para um comprimento de onda λ (nm), P é a pressão atmosférica corrigida e dada por $P = p/p_0$ sendo p a pressão atmosférica local em milibares e $p_0 = 1013.25$ mb, M é a massa de ar óptica descrita por Kasten e Young (1989) como:

$$M = \left[\cos Z + 0,15(93,885 - Z)^{-1,253} \right]^{-1}, \quad (5)$$

sendo Z o ângulo zenital solar aparente.

4.2 Absorção por gases uniformes

Alguns gases constituintes atmosféricos (principalmente O_2 e CO_2) conhecidos como gases uniformes, possuem uma concentração decrescente com a altitude e uma significativa absorção no infravermelho (Gueymard, 2003a). A mesma expressão utilizada por Leckner (1978) para definir a transmitância da mistura uniforme de gases foi empregada:

$$T_{g\lambda} = \exp\left[-1,41a_{u\lambda}M(p/p_0)/(1 + 118,93a_{u\lambda}M(p/p_0)^{0,45})\right], \quad (6)$$

onde $a_{u\lambda}$ representa o coeficiente de absorção espectral (Bird e Riordan, 1986) para a mistura uniforme de gases presentes na atmosfera.

4.3 Absorção por vapor d'água

Na região do infravermelho próximo, o vapor d'água é o principal absorvedor da radiação solar. Foi adotada a expressão proposta por Leckner (1978) para o cálculo da transmitância devido a presença de vapor d'água na atmosfera:

$$T_{w\lambda} = \exp\left[-0,2385a_{w\lambda}WM/(1 + 20,07a_{w\lambda}WM)^{0,45}\right], \quad (7)$$

onde $a_{w\lambda}$ é o coeficiente espectral de absorção do vapor d'água e tabulado por Bird e Riordan (1986), W representa a quantidade de água precipitável (cm).

4.4 Absorção por ozônio

A absorção da radiação solar pelo ozônio presente na atmosfera terrestre dá-se principalmente no ultravioleta e fracamente no visível e infravermelho. A expressão para a transmitância do ozônio adotada no modelo é dada por:

$$T_{o\lambda} = \exp(-a_{o\lambda}u_oM_o), \quad (8)$$

onde $a_{o\lambda}$ representa o coeficiente espectral de absorção do ozônio proposto por Leckner (1978), u_o é a quantidade de ozônio presente da atmosfera (atm-cm) e M_o é a massa óptica relativa de ozônio definida como:

$$M_o = (1 + h_o / 6370) / [\cos^2(Z) + 2h_o / 6370]^{0.5}, \quad (9)$$

sendo h_o a altura de máxima concentração de ozônio, que situa-se aproximadamente a 22 km de altura. Esta altura possui uma dependência com a latitude e época do ano (Morys *et al.*, 2001) podendo ser aproximada por:

$$h_o = 26 - 0,1 \cdot latitude, \quad (10)$$

sendo h_o dado em quilômetros e a latitude em graus.

4.5 Extinção por aerossóis

Aerossóis são partículas microscópicas sólidas ou líquidas, permanentemente suspensas no ar e de origem natural ou antropogênica. A expressão para a determinação da transmitância devido à presença de aerossóis na atmosfera é definida por Leckner (1978):

$$T_{a\lambda} = \exp(-\beta\lambda^{-\alpha} M), \quad (11)$$

Na expressão descrita na Eq.(11), β e α representam o coeficiente de turbidez e o expoente de turbidez de Ångström respectivamente.

5. DETERMINAÇÃO DOS PARÂMETROS ATMOSFÉRICOS

Através da medida da transmitância atmosférica realizada pelo radiômetro espectral, pode-se determinar os parâmetros atmosféricos (coeficientes β e α de Ångström, quantidade de água precipitável e quantidade de ozônio) necessários para a caracterização da irradiância solar. Há vários trabalhos que descrevem os procedimentos necessários para a aquisição destes parâmetros (Brooks e Mims, 2001; Mims, 2002;).

5.1 Coeficientes β e α de Ångström

Os parâmetros β e α de Ångström podem ser simultaneamente determinados pelo radiômetro espectral realizando-se a medida da irradiância solar direta $I_{\lambda 1}$ e $I_{\lambda 2}$ nos comprimentos de onda λ_1 e λ_2 onde a absorção molecular seja inexistente ou fraca. Efetuando as medidas em $\lambda_1 = 375$ nm e $\lambda_2 = 525$ nm, obtemos o seguinte sistema de equações:

$$I_{d\lambda 1} = H_{0\lambda 1} DT_{R\lambda 1} \exp(-\beta\lambda_1^{-\alpha} M)$$

e

$$I_{d\lambda 2} = H_{0\lambda 2} DT_{R\lambda 2} \exp(-\beta\lambda_2^{-\alpha} M). \quad (12)$$

Conseqüentemente, β e α podem ser obtidos resolvendo o sistema da Eq.(12).

5.2 Quantidade de água precipitável

Realizando medidas diárias da quantidade de água precipitável ao longo de uma década através de um radiômetro solar que utiliza um par LEDs infravermelhos como sensores, Mims (2002) formulou a seguinte expressão:

$$W = [17,627 + (-30,719)I_{920nm} / I_{815nm}] / M, \quad (13)$$

onde I_{920nm} e I_{815nm} são os valores de tensão obtidos sobre os resistores *shunt* nos LEDs utilizados como sensores no radiômetro.

5.3 Quantidade de ozônio

A expressão teórica para derivar a quantidade de ozônio (Morys et al., 2001) é descrita por:

$$u_o = \frac{1000[\ln(I_{0\lambda_1} / I_{0\lambda_2}) - \ln(I_{\lambda_1} / I_{\lambda_2}) - (b_{\lambda_1} - b_{\lambda_2})M_o]}{(a_{\lambda_1} - a_{\lambda_2})\mu}, \quad (14)$$

onde $I_{0\lambda_1}$ e $I_{0\lambda_2}$ representam os valores de irradiância extraterrestre para $\lambda_1 = 525$ nm e $\lambda_2 = 625$ nm, I_{λ_1} e I_{λ_2} são os valores medidos pelo radiômetro para os dois canais utilizados, b_{λ_1} e b_{λ_2} são definidos por:

$$\beta(\lambda) = (16,407 - 0,085284\lambda + 0,00011522\lambda^2). \quad (15)$$

Os parâmetros a_{λ_1} e a_{λ_2} são calculados por:

$$a(\lambda) = (2,1349 \times 10^{19}) \exp(-0,14052\lambda), \quad (16)$$

onde λ é dado em nanômetros. A variável μ na Eq.(14) representa um fator de correção para a distribuição não homogênea da quantidade de ozônio na atmosfera e é descrita como:

$$\mu = \frac{R + h_o}{[(R + h_o)^2 - (R + r)^2 \sin^2(Z)]^{1/2}}, \quad (17)$$

sendo R o raio médio da Terra (6371 km), r a altura local em relação ao nível do mar (km).

6. RESULTADOS EXPERIMENTAIS

Os sinais fornecidos pelos cinco canais seletivos e pelo fotodiodo de silício do radiômetro espectral são coletados por um sistema de aquisição de dados automático da marca Agilent modelo HP 34970 A, com resolução de 5 ½ dígitos e placa multiplexadora interna. Estes sinais, como mostrados na Fig. 3, são enviados para um microcomputador que determina os parâmetros atmosféricos que serão utilizados para caracterizar a irradiância espectral solar através do programa de transmissão atmosférica.

Observa-se na Fig. 4 o efeito da passagem do anel de sombra sobre o sensor. Neste momento é obtido o valor para a radiação difusa-horizontal. A radiação direta-normal é obtida indiretamente através dos valores das componentes da radiação global-horizontal, difusa-horizontal e do ângulo solar em relação ao zênite;

$$I_{global-horizontal} = I_{difusa-horizontal} + \cos(\theta)I_{direta-normal} \quad (18)$$

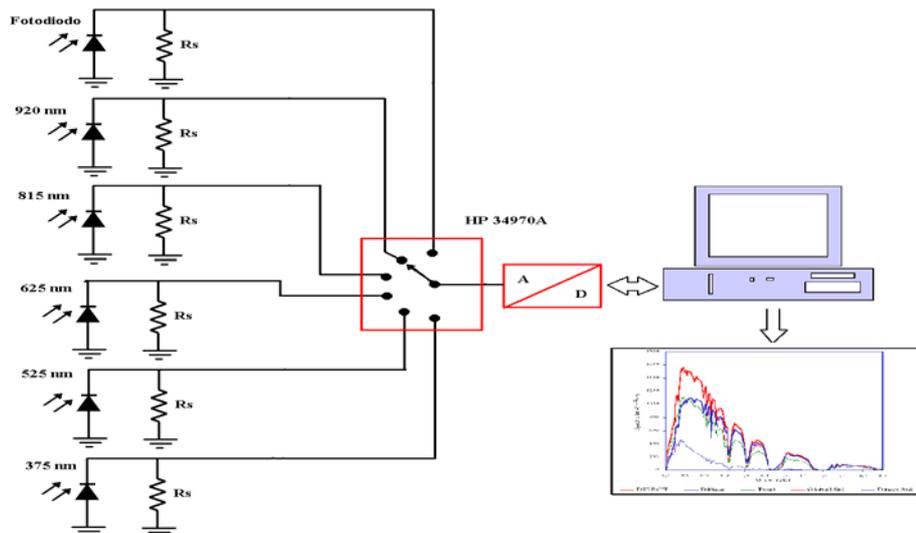


Figura 3 – Diagrama operacional do sistema utilizado para caracterizar a irradiância espectral solar. Observam-se os LEDs com os resistores de *shunt* que estão instalados dentro do bloco óptico do radiômetro. Os sinais analógicos coletados são multiplexados e convertidos em sinais digitais e enviados ao microcomputador.

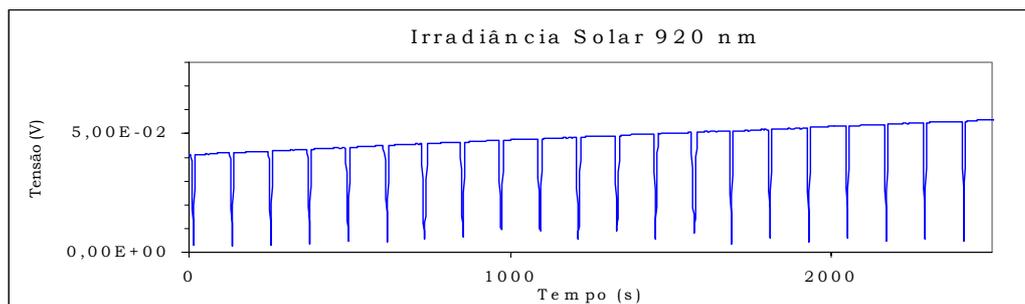


Figura 4 - Irradiância solar em 920 nm obtida por um dos canais seletivos do radiômetro espectral. O eixo horizontal indica o tempo decorrido desde o início da coleta de dados (8h05min LT). No eixo vertical é visualizada a tensão fornecida pelo sensor. As medidas foram efetuadas em 4 de setembro de 2006 na cidade de Porto Alegre, Brasil (30°S, 50°W).

Na Fig. 5 é demonstrado a relação entre o logaritmo da irradiância direta-normal e a massa óptica de ar para o canal de 525 nm obtida na manhã do dia 4 de setembro de 2006. Esta relação (denominada de regressão de Langley) é utilizada para a obtenção do valor da constante extraterrestre da radiação solar (massa óptica de ar = 0) para cada canal do radiômetro, mediante extrapolação dos valores obtidos para várias massas ópticas de ar em um dia de céu limpo. Observa-se uma adequada linearidade apenas durante as primeiras horas da manhã (massa óptica de ar maior que 2,25), período no qual não era detectável a presença de nuvens.

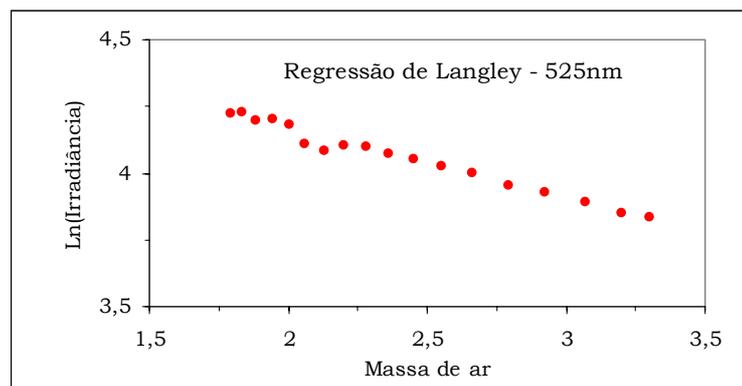


Figura 5 – Relação entre Irradiância direta-normal e massa de ar em 525 nm.

O modelo computacional utilizado faz uso também de outras informações, como: latitude e longitude do local de observação, albedo local, umidade relativa, pressão atmosférica, data e hora local. Usando o conjunto de dados coletados durante as primeiras horas da manhã do dia 4 de setembro de 2006 (período onde o céu permaneceu limpo e sem nuvens), foi modelado o espectro mostrado na Fig. 6.

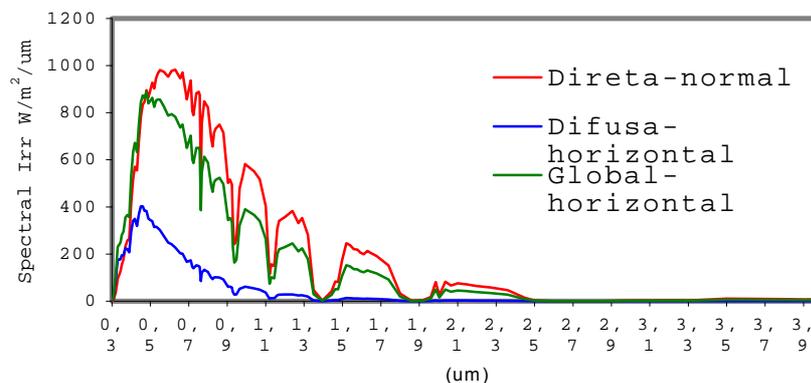


Figura 6 - Irradiância espectral solar calculada a partir dos dados obtidos pelo radiômetro espectral no dia 4 de setembro de 2006 às 9h00 hora local.

7 CONCLUSÕES

A caracterização da distribuição espectral da irradiância solar na superfície terrestre através da metodologia proposta neste trabalho, pode ser efetuada sem o uso de espectrorradiômetros de elevado custo. Empregando um radiômetro espectral com apenas cinco canais seletivos, é possível determinar os parâmetros atmosféricos básicos que contribuem para o processo de extinção da radiação solar. A substituição dos fotodiodos acoplados a filtros de interferência por LEDs, permite a construção de um radiômetro espectral de baixo custo e grande estabilidade óptica e eletrônica. O modelo de transmitância atmosférica simples utilizado proporciona uma resolução espectral adequada para a maioria das aplicações na área de energia. Em um trabalho futuro serão discutidos os resultados obtidos pela metodologia apresentada e dados espectrais medidos através de um espectrorradiômetro calibrado.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao CNPq o apoio financeiro.

REFERÊNCIAS

- Bird, R. E., and Riordan, C., 1986. Simple solar spectral model for direct and diffuse irradiance on horizontal and tilted planes at the earth's surface for cloudless atmospheres. *Journal of Climate and Applied Meteorology*, vol.25, pp. 87-97.
- Brooks D. R., Mims F. M. III., 2001. Development of an inexpensive handheld LED-based Sun photometer for the GLOBE program. *Journal of Geophysical Research* 106, D5, pp. 4733-4740.
- Gueymard C. A., 2003a. Direct solar transmittance and irradiance predictions with broadband models. Part I: detailed theoretical performance assessment. *Solar Energy*, vol. 74, pp. 355-379.
- Gueymard C. A., 2003b, Direct solar transmittance and irradiance predictions with broadband models. Part II: validation with high-quality measurements. *Solar Energy*, vol. 74, pp. 381-395.
- Iqbal, M., 1983. *An Introduction to Solar Radiation*. Academic Press.
- Justus, C. G., and M. V., Paris, 1985. A model for solar spectral irradiance at the bottom and top of a cloudless atmosphere, *Journal. of Climate and Applied Meteorology*, vol. 24, n. 3, pp.193-205
- Kasten, F., and Young, A. T., 1989. Revised optical air mass tables and approximation formula. *Applied Optics*, vol. 28, pp. 4735-4738.
- Kneizys, F. X., E. P. Shettle, W. O. Gallery, J. H. Chetwynd, Jr., L. W. Abrea, J. E. A. Selby, R. W. Fenn, and R. W. McClatchey, 1980. *Atmospheric Transmittance/Radiance: Computer Code LOWTRAN5*, Tech. Rep. AFGL-TR-800067, Bedford, MA: U.S. Air Force Geophysics Laboratory.
- Leckner, B., 1978. The spectral distribution of solar radiation at earth's surface—Element of a model. *Solar Energy*, vol. 20, pp.143–150.
- Mims F. M. III., 2002. An inexpensive and stable LED Sun photometer for measuring the water vapor column over South Texas from 1990 to 2001. *Geophysical Research Letters*, vol. 29, n. 13, pp. 20-24.
- Morys M., Mims F. M. III., Hagerup S., Anderson S. E., Baker A., Kia J., Walkup T., 2001. Design, calibration, and performance of MICROTOPS II handheld ozone monitor and Sun photometer. *Journal of Geophysical Research*, vol. 106, D13, pp. 14573-14582.
- Spencer, J. W., 1971. "Fourier Series Representation of the Position of the Sun," *Search*, vol. 2, p. 172.

SOLAR SPECTRAL DETERMINATION FROM SPECTRAL RADIOMETER USING LIGHT-EMITTING DIODES (LEDS) AS SELECTIVE DETECTORS

Abstract. *Conventional methods to characterize the solar spectral irradiance normally employ an expensive and fragile spectroradiometer. The purpose of this paper is to use a portatil, low cost spectral radiometer to characterize the solar spectral irradiance, computing the optical transmittance at visual and infrared regions. This spectral radiometer use light-emitting diodes (LEDs) as spectrally selective detectors. Although light-emitting diodes are designed to emit quasi-monochromatic light, they can also detect a relatively narrow spectrum near of emission wavelengths and have a long-term optical and electronics stability. The radiometer use a selection of LEDs that respond in the wavelength related to the absorption and scattering bands of the following atmospheric parameters: precipitable water, ozone, aerosol optical depth and α and β Ångström coefficients. These parameters have significantly effects in the atmospheric extinction processes of the solar radiation under cloudless skies. The collected data are transferred to a personal computer making it possible to calculate the solar spectral irradiance over the entire 300-4000 nm range using a simple transmittance model.*

Key words: Solar radiation, Solar spectral irradiance, Spectral radiometer, Light-emitting diode.