

## RADIÔMETRO ESPECTRAL UTILIZANDO DIODOS EMISSORES DE LUZ (LEDs) COMO SENSORES SELETIVOS DE RADIAÇÃO

R. Haag, A. Krenzinger.

Laboratório de Energia Solar - PROMEC, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Rua Sarmento Leite, 425, Porto Alegre, 90050-170, Rio Grande do Sul, Brasil.

Tel. 051-3316-6841, Fax. 051-3316-6841

[rafael.haag@ufrgs.br](mailto:rafael.haag@ufrgs.br), [arno@mecanica.ufrgs.br](mailto:arno@mecanica.ufrgs.br)

**RESUMO:** Este trabalho apresenta o desenvolvimento de um radiômetro espectral com anel de sombra rotativo capaz de realizar medidas das componentes global-horizontal, difusa-horizontal e direta-normal da irradiância solar. Utilizam-se diodos emissores de luz (LEDs) como sensores espectrais seletivos em substituição aos filtros de interferência acoplados a fotodiodos. Projetado para atuar como emissor de luz, o LED pode desempenhar o papel de dispositivo semicondutor sensível à radiação luminosa em um comprimento de onda e largura espectral próxima da sua faixa de emissão. A resposta angular do detector foi verificada experimentalmente para cada canal do dispositivo. Os efeitos da variação térmica sobre os sensores podem ser compensados através da medida da temperatura por um sensor eletrônico instalado junto ao detector. Os resultados obtidos pelos vários canais do radiômetro espectral possibilitam determinar os seguintes parâmetros atmosféricos: espessura da camada de ozônio, água precipitável, coeficientes  $\alpha$  e  $\beta$  de Ångström. Estes dados são utilizados para caracterizar o espectro solar através de um modelo paramétrico de irradiância solar abrangendo o segmento de 300 nm até 4000 nm.

**Palavras-chave:** radiômetro espectral, LED, irradiância solar.

### INTRODUÇÃO

O conhecimento sobre as características da radiação solar que atinge a superfície da Terra é importante para as aplicações em energia solar e outras áreas como: meteorologia, agronomia, medicina, etc. A disponibilidade destes dados é muito limitada, principalmente devido ao alto custo dos equipamentos destinados ao monitoramento da radiação solar. Há vários modelos empíricos que buscam fornecer dados sobre a radiação solar a partir de informações sobre a cobertura de nuvens, tipos de nuvens e horas de insolação. Comparando com os dados obtidos por instrumentos dedicados à medida da radiação solar, estes modelos proporcionam resultados imprecisos pois os parâmetros que são utilizados apresentam pouca confiabilidade e além disso, estes modelos adotam variáveis que são dependentes das características climáticas da região de interesse (Gueymard et al, 1995).

Este trabalho apresenta o desenvolvimento de um radiômetro espectral de baixo custo destinado à medida da radiação solar em regiões do ultravioleta, visível e infravermelho próximo. A figura 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 detectora 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°.

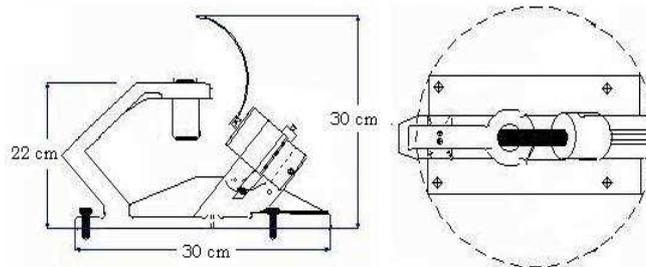


Figura 1: Vista do radiômetro espectral. Observa-se a unidade detectora com o difusor de *teflon* no centro e o anel de sombra rotativo comandado por um motor e caixa de redução

A baixa velocidade de rotação do anel de sombra permite que seja efetuada uma amostragem de sinal em cada sensor com um tempo de integração da ordem de vários milissegundos. 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 componente direta-normal é calculada a partir da diferença dos valores das duas outras componentes e do valor da elevação solar. 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.

Alguns modelos demonstram que um desvio próximo de  $10^\circ$  em relação ao disco solar (Wesely, 1982) para o anel de sombra, possibilita aferir com maior precisão o erro causado pelo excesso de céu bloqueado. O método de anel de sombra rotativo para análise das componentes da irradiância solar (Wesely, 1982) apresenta várias vantagens em relação aos métodos que adotam dois detectores (um fixo para medida da irradiância global-horizontal e outro móvel com pequeno campo de visão para medida da componente direta). Além de ser mais simples, possuem um custo menor e geralmente são mais robustos. Também a calibração é facilitada pela medida das três componentes da irradiância por um mesmo sistema detector.

Este radiômetro espectral diferencia-se dos demais (Harrison et al., 1994) 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. LEDs 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. Há instrumentos destinados ao monitoramento da radiação solar que utilizam LEDs como sensores de radiação que apresentaram um erro no valor medido da radiação solar extraterrestre (através do método de extrapolação de Langley) na faixa de sensibilidade do LED da ordem de 1% após uma década de funcionamento (Morys et al., 2001). Estas características oferecidas pelos LEDs são fundamentais, principalmente para construção de instrumentos destinados ao monitoramento da radiação solar durante um longo período de tempo e/ou em locais onde uma rotina freqüente de calibração torna-se inviável. A figura 2 mostra o radiômetro espectral.



Figura 2: Fotografia do radiômetro espectral desenvolvido no Laboratório de Energia Solar da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

## UTILIZAÇÃO DO LED COMO SENSOR SELETIVO DE RADIAÇÃO

O LED é um dispositivo semicondutor com a capacidade de emitir radiação desde o infravermelho até o ultravioleta, quando é aplicada sobre seus terminais uma diferença de potencial elétrico adequada. Essencialmente, o LED é composto por uma junção P-N, onde estas regiões P e N podem ser compostas por materiais iguais ou diferentes. A cor emitida pelo LED é determinada pela energia dos fótons emitidos na junção P-N, e esta energia está relacionada com a diferença de energia entre as bandas de valência e de condução do material semicondutor. Semicondutores do tipo GaAs, GaP, AlGaAs, InGaP, SiC são exemplos de materiais utilizados na construção de LEDs. Tipicamente a região semicondutora do LED possui uma área de  $250 \times 250 \mu\text{m}$ , e está montada sobre um dos terminais do dispositivo. O encapsulamento do LED é feito a partir de uma resina *epoxi* transparente ou colorida. Esta resina atua como lente para colimar a radiação emitida e também pode desempenhar o papel de filtro espectral quando for colorida. Embora o LED tenha sido projetado para funcionar como uma fonte de radiação quase monocromática, ele também pode servir como detector, apresentando uma resposta espectral muito próxima da sua faixa de emissão (Mims, 1992). O LED também possui uma resposta muito rápida às variações de intensidade luminosa (Reid, 1997).

## EFEITO FOTOVOLTAICO NO LED

Pode-se demonstrar o funcionamento do LED como detector fotovoltaico, comparando-o a um diodo sob iluminação. Um detector fotovoltaico irá produzir uma tensão ou corrente quando houver incidência de fótons com energia igual ou maior que a existente na faixa de energia proibida ou *gap* de energia. Na figura 3 temos a representação esquemática do perfil das bandas de energias em uma junção P-N.

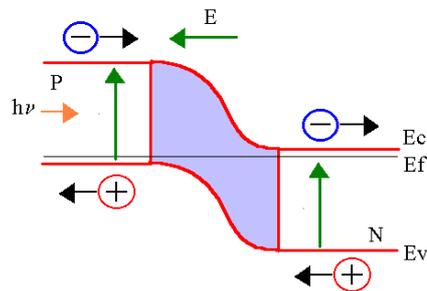


Figura 3: Junção P-N, onde  $E$  representa o campo elétrico na junção,  $E_c$  e  $E_v$  são as energias das bandas de condução e valência,  $E_f$  a energia de Fermi e  $h\nu$  a energia incidente na junção.

A corrente gerada pelo fluxo de fótons incidentes pode ser descrita pela equação 1 (Dereniak e Boreman, 1996):

$$i_g = \eta \phi q \quad (1)$$

onde  $\eta$  é uma grandeza adimensional e representa a eficiência quântica do dispositivo, ou seja, a capacidade de converter fótons da luz incidente em elétrons livres que cruzam a junção P-N,  $\phi$  é o fluxo de fótons incidentes na superfície do material [fótons/s] e  $q$  a carga do elétron,  $1,6 \times 10^{-19}$  coulombs. É importante realçar que a eficiência do LED na conversão de energia luminosa em energia elétrica é muito baixa ( $\eta \ll 1$ ), isto deve-se principalmente às perdas devido as reflexões na superfície do LED, pela absorção incompleta dos fótons disponíveis da radiação incidente, entre outras causas.

A curva característica de um diodo sob iluminação, mostrada na figura 4 é dada pela equação 2.

$$i = i_0 (e^{qV / \beta kT} - 1) - i_g \quad (2)$$

onde,

$i_0$  = corrente de saturação reversa [A]

$V$  = tensão sobre o diodo [V]

$T$  = temperatura [K]

$k$  = constante de Stefan-Boltzmann,  $1,38 \times 10^{-23}$  JK<sup>-1</sup>

$\beta$  = fator com valor entre 1 e 2.

A curva característica I-V de um LED assemelha-se à curva de uma célula fotovoltaica de silício. Na figura 4 são apresentados os valores de corrente e tensão em função da intensidade da radiação recebida pelo sensor.

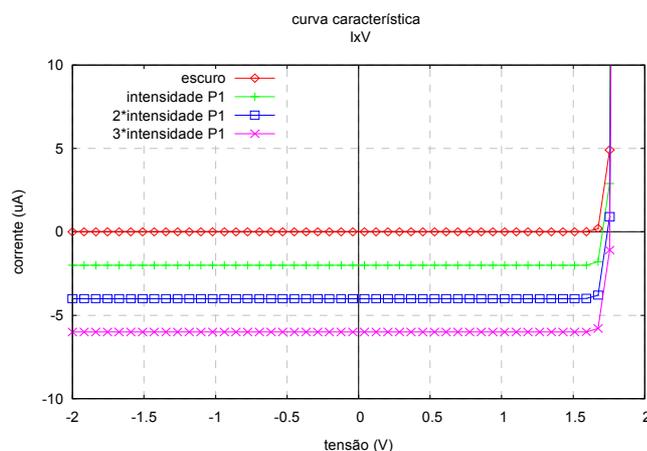


Figura 4: Simulação da curva característica I-V para um LED sem iluminação e quando exposto à radiações com intensidades proporcionais.

Observa-se que há um aumento na corrente de curto circuito proporcional à intensidade de radiação incidente. A tensão de circuito aberto praticamente permanece constante, exceto quando os valores de irradiância são muito pequenos, pois sua variação é logarítmica com a radiação. Como quase sempre se deseja que a resposta do sensor utilizado seja linear em função da variação da radiação incidente, é aconselhável que o LED opere na região próxima de curto circuito. Cada sensor do radiômetro espectral desenvolvido possui um resistor *shunt* que permite que os LEDs e o fotodiodo de silício operem na região próxima de curto circuito. O valor desta resistência *shunt* foi determinado experimentalmente e com os sensores já instalados na seção detectora com o difusor de *teflon*.

## RESPOSTA ESPECTRAL DOS SENSORES

Cada canal seletivo do radiômetro é composto por um LED cuja a resposta espectral já foi determinada experimentalmente por vários autores (Mims, 2002; Brooks e Mims, 2001; Mims, 1990; Rosete-Aguilar et al., 2003; Miyazaki et al., 1998). 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 figura 5 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 (Mims, 2001). Estes modelos de LEDs utilizados no radiômetro são encontrados com facilidade no comércio especializado com baixo custo. O radiômetro possui também um fotodiodo de silício com sensibilidade espectral entre 300 nm e 1100 nm..

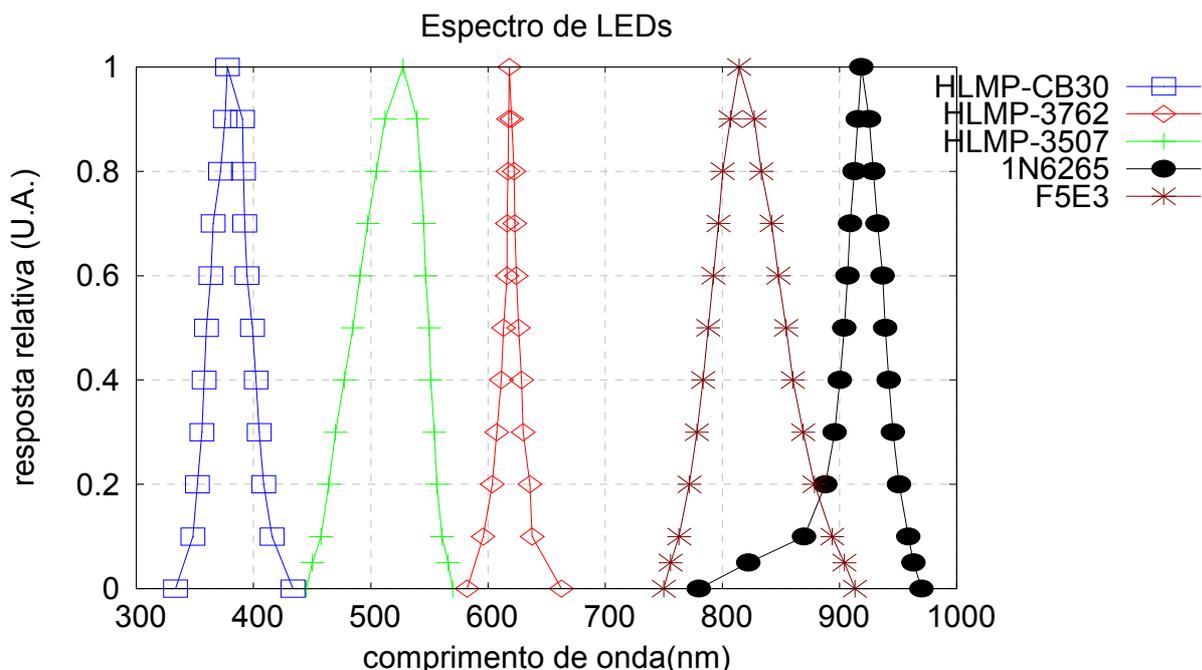


Figura 5: Curva de resposta espectral dos LEDs adotados no radiômetro.

## EFEITO DA TEMPERATURA

Sabe-se que da mesma forma que um fotodiodo ou um outro dispositivo semiconductor qualquer, o LED apresenta uma variação no seu comportamento em função da temperatura. Diante de um aumento da temperatura, a sensibilidade do LED é aumentada, e há um deslocamento do seu pico de sensibilidade. O valor médio do deslocamento espectral para os LEDs utilizados no radiômetro é da ordem 7 nm para uma variação de 20 graus Celsius (Sromovsky, 2001). A unidade detectora possui um sensor térmico (LM-35) que fornece o valor da temperatura na região onde estão instalados os sensores. Conhecendo o comportamento de cada sensor frente à variação de temperatura, pode-se determinar uma função de correção que será aplicada posteriormente à medida em cada canal.

## RESPOSTA COSSENO

A resposta cosseno para cada canal do radiômetro foi determinada experimentalmente fazendo uso de uma bancada de testes desenvolvida para esta finalidade. A fonte de luz é composta por uma lâmpada halógena de 250 W encapsulada em um gabinete com superfície refletora. Esta luz é conduzida por um tubo corrugado preto com 10 cm de diâmetro e 50 cm de comprimento até uma mesa redonda e rotativa, graduada em passos de  $1^\circ$ . Todo o conjunto é coberto por um tecido preto fosco para assegurar que não haja a interferência de fontes luminosas externas. A tensão sobre a lâmpada é monitorada e repete-se a leitura para cada canal várias vezes para evitar erros causados principalmente pela flutuação luminosa da lâmpada. Efetuaram-se para cada canal do radiômetro medidas entre  $-90^\circ$  e  $+90^\circ$  (com respeito ao eixo normal do detector) em passos de  $1^\circ$ , e ao longo de dois planos ortogonais correspondentes as orientações “leste-oeste” e “norte-sul”. Estas medidas em duas orientações azimutais independentes tornam aparente qualquer irregularidade azimutal presente no detector. A figura 6 apresenta como exemplo a resposta cosseno normalizada para o sensor seletivo em 920 nm e para o fotodiodo. A diferença percentual entre as respostas destes dois sensores em relação ao valor cosseno esperado pode ser visualizada com maior detalhe na figura 7. O erro de resposta cosseno nos vários canais do radiômetro solar é reduzido através de uma função de correção que é aplicada no programa computacional que analisa os dados coletados.

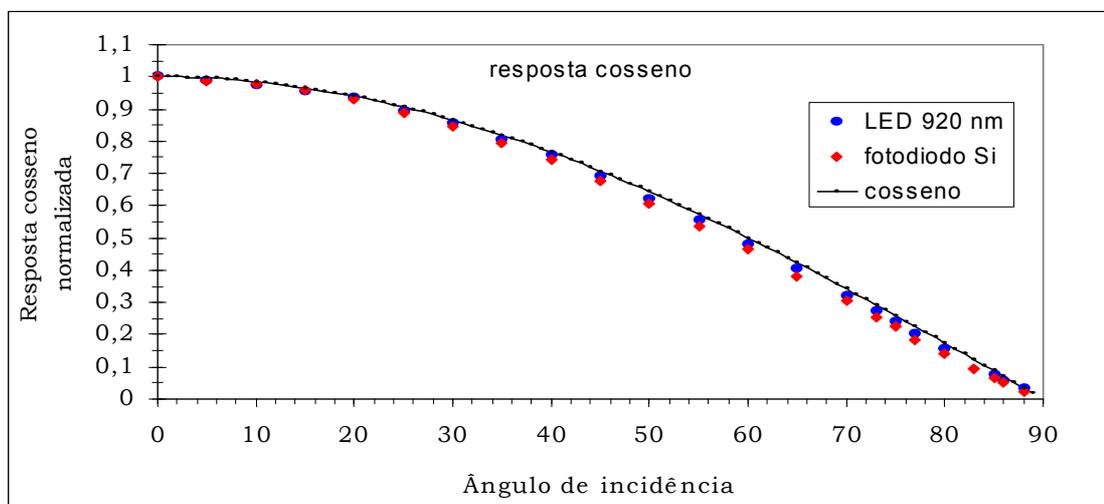


Figura 6: Resposta cosseno normalizada para o sensor seletivo em 920 nm e o fotodiodo.

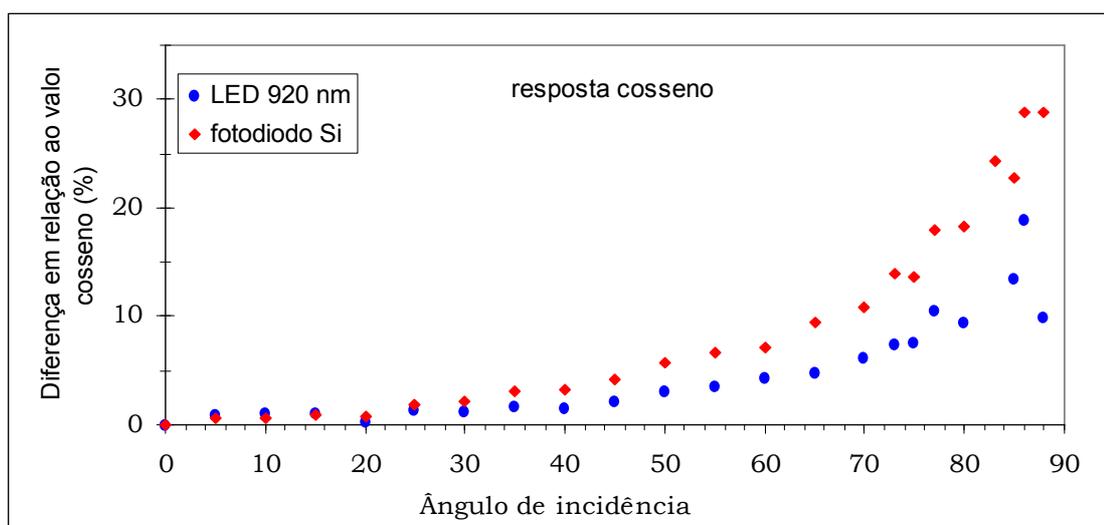


Figura 7: Diferença em relação ao valor cosseno esperado para o sensor seletivo em 920 nm e o fotodiodo de silício.

## DETERMINAÇÃO DO ESPECTRO SOLAR

Através de um programa computacional de irradiação de banda larga para uma atmosfera sem nuvens, desenvolvido a partir do modelo de Bird-Iqbal (Gueymard, 2003a; Gueymard, 2003b), foram selecionados alguns parâmetros que possuem grande influência na transmitância espectral do ar atmosférico. Estes parâmetros são: vapor de água; espessura ótica de aerossóis; coeficiente de turbidez e expoente de Ångström e espessura da camada de ozônio. Há na literatura vários trabalhos (Brooks e Mims, 2001; Mims, 2002; Mims, 1992; Sromovsky et al., 2001; Limaye, 2001) que descrevem com detalhes os procedimentos para a determinação destes parâmetros atmosféricos utilizados no modelo paramétrico de irradiação solar. A figura 8 apresenta como exemplo a resposta espectral do LED 1N6265, utilizado como sensor seletivo para determinação da transmitância do vapor de água. Este LED possui uma resposta que está muito próxima da região de grande absorção de vapor de água, tornando-se um excelente sensor para determinação da transmitância deste constituinte atmosférico.

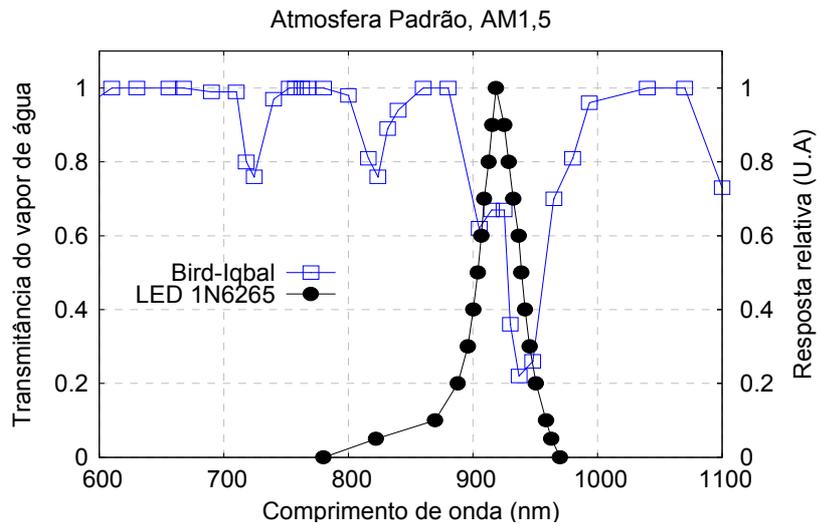


Figura 8: Transmitância do vapor de água segundo o modelo de Bird-Iqbal para uma atmosfera padrão e a resposta espectral do LED 1N6265.

Deste modo, os dados obtidos pelos canais seletivos do radiômetro aplicados ao modelo computacional possibilitam caracterizar o espectro solar para uma atmosfera sem nuvens. A figura 9 revela o espectro solar obtido às 15 horas (hora local) no dia 9 de junho de 2006 através dos dados fornecidos pelo radiômetro espectral e aplicados no modelo computacional. Neste dia o céu apresentava-se limpo e sem a presença de nuvens.

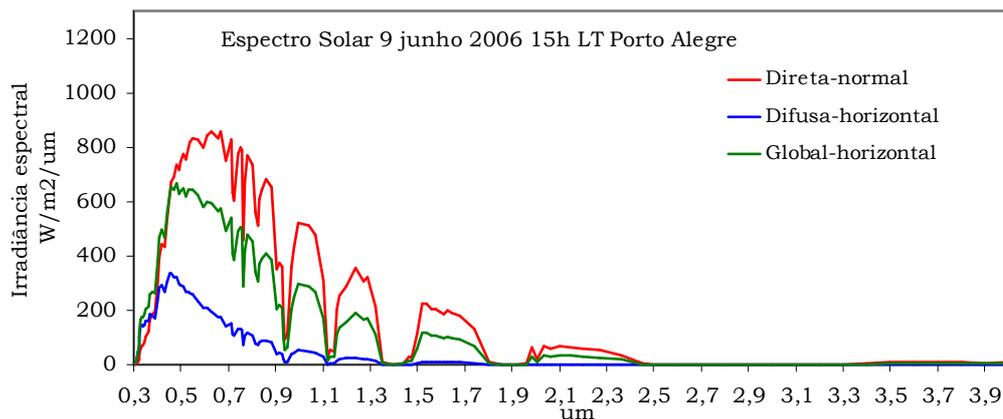


Figura 9: Espectro solar obtido através do modelo computacional utilizando os dados medidos pelo radiômetro espectral no dia 9 de junho de 2006 às 15 horas (tempo local) em Porto Alegre, Brasil (latitude 30°S)

## CONCLUSÕES

O radiômetro espectral desenvolvido pode ser utilizado para análise espectral da radiação solar e suas componentes direta-normal, difusa-horizontal e global-horizontal aplicando os dados obtidos pelo instrumento ao programa paramétrico de irradiância solar. A medida destas componentes utilizando o mesmo sensor possibilita uma maior precisão em relação às medidas que adotam dois sistemas detectores distintos, um na sombra e outro no sol. O emprego de LEDs como sensores seletivos possibilita a construção de um sistema detector de baixo custo com grande estabilidade eletrônica e óptica.

## REFERÊNCIAS

- 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.
- Dereniak E. L., Boreman G. D. (1996). *Infrared Detectors and Systems*, John Wiley & Sons, New York.
- Gueymard C. A., Jindra P., Estrada-Cajigal. V. (1995). A Critical Look at Recent Interpretations of the Ångström Approach and its Future in Global Solar Radiation Prediction. *Solar Energy* 54, 357-363.
- Gueymard C. A. (2003a). Direct solar transmittance and irradiance predictions with broadband models. Part I: detailed theoretical performance assessment. *Solar Energy* 74, 355-379.
- Gueymard C. A. (2003b). Direct solar transmittance and irradiance predictions with broadband models. Part II: validation with high-quality measurements. *Solar Energy* 74, 381-395.
- Harrison L., Michalsky J., Berndt J. (1994). Automated multi-filter rotating shadowband radiometer: an instrument for optical depth and radiation measurements. *Applied Optics* 33, 22, 5118-5125.
- Mims F. M. III. (1992). Sun photometer with light-emitting diodes as spectrally selective detectors. *Applied Optics* 31, 33, 6965-6967.
- 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* 29, 13, 20-24.
- Miyazaki E., Itami S., Araki T. (1998). Using a light-emitting diode as a high-speed, wavelength selective photodetector. *Review of Scientific Instruments* 69, 11, 3751-3754.
- Morys M., Mims F. M. III., Hagerup S., Anderson S. E., Baker A., Kia J., Walkup T. (2001). Design, calibration, and performance of MICROTUPS II handheld ozone monitor and Sun photometer. *Journal of Geophysical Research* 106, D13, 14573-14582.
- Reid D. T., Padgett M., McGowan C., Sleat W. E., Sibbett W. (1997). Light-emitting diodes as measurement devices for femtosecond laser pulses. *Optics Letters* 22, 4, 233-235.
- Rosete-Aguilar M., Ruiz-Mercado I., Reygadas F., Velasco-Segura R., Trejo Z., Erantzcani L. (2003). Caracterización espectral, angular y térmica de diodos emisores de luz como detectores ópticos. *Proceedings of XLVI Congreso Nacional SMF / XVI Reunión Anual AMO, México, 10V03-1-10V03-10*.
- Sromovsky L. A., Limaye S. S., Fry P. M., Knuteson R. O., Osborne B., Revercomb H. E., Tamanachi R., Tobin D. C. (2001). Calibration of a candidate GIFTS/GLOBE water vapor Sun photometer by intercomparison with microwave observations during the 2000 water vapor IOP. *Proceedings of eleventh ARM science team meeting, March 19-23, Atlanta, 1-8*.
- Wesely M. L. (1982). Simplified techniques to study components of solar radiation under haze and clouds. *Journal of Applied Meteorology* 21, 373-383.

## ABSTRACT

This article presents the development of a spectral rotating shadowband radiometer for measuring the direct-normal, global-horizontal and diffuse-horizontal irradiance. The system uses light-emitting diodes (LEDs) as spectrally selective detectors in place of optical interference filters and photodiodes. Although LEDs are designed to emit quasi-monochromatic light, they can also detect a relatively narrow spectral band of wavelengths near the emission peak. The instrument uses five commercially available LEDs with response peaks at 375 nm, 525 nm, 625 nm, 815 nm and 920 nm, and a broadband silicon photodiode with sensitive wavelength range of 350-1000 nm. The cosine responses of five LED sensors and photodiode were measured. A temperature sensor was installed within the sensor housing so that the temperature error can be corrected. Results from sensors provide information on atmospheric parameters as follows: ozone optical depth, precipitable water,  $\alpha$  and  $\beta$  Ångström coefficients. These parameters are input data on parameterized transmittance model to predict solar spectral irradiance.

**Keywords:** spectral radiometer, LED, solar irradiance.