

RADIÔMETRO DE LEDs

Jéssica Guerreiro Santos Ramalho – jessicaguel@ibest.com.br

Denis Gilbert Francis David - denisgfd@ufba.br

Antônio Érico B. A. Soares - antonioericobas@yahoo.com.br

Universidade Federal da Bahia, LaPO – Laboratório de Propriedades Ópticas

Thierry J. Lemaire – tlemaire@uefs.br

Universidade Estadual de Feira de Santana

4.1 Construção e Calibração de Sensores

Resumo. O foco deste trabalho está na confecção e estudo das propriedades do radiômetro de LEDs. Verifica-se que um LED (diodo emissor de luz) pode ser um bom detector de radiação e sua resposta está associada à faixa de frequência que ele emite, ou seja, a faixa espectral de detecção de um LED é estreita. Este radiômetro apresenta cinco LEDs: Azul, Verde, Amarelo, Vermelho de alto brilho e Próximo infravermelho. Exibiremos aqui as principais características dos sensores, suas respostas espectrais e sua sensibilidade em função do ângulo de incidência, e detalhes de sua fabricação: invólucro, eletrônica e programa de aquisição dos sinais. O uso deste radiômetro combinado com o programa de cálculo de transmitância solar Spctral2 e um algoritmo de inversão desenvolvido no laboratório permitirá o estudo de concentrações de vapor d'água, ozônio e aerossóis presentes na atmosfera.

Palavras-chave: Radiação Solar, Radiômetro Espectral, Diodos Emissores de Luz

1. INTRODUÇÃO

Os sensores de resposta espectral estreita podem contribuir bastante para o monitoramento da atmosfera, permitindo medir de maneira precisa a qualidade do ar e determinar suas poluições. Na agricultura, podem controlar a intensidade de radiação que atinge as culturas, medir a insolação, ou ainda a nebulosidade, oferecendo a possibilidade de administrar a produção em função das condições atmosféricas. A eficiência da conversão direta da radiação solar em energia elétrica depende em alto grau do conhecimento das características espectrais da radiação incidente. Essa conversão representa um passo importante na redução do consumo de combustíveis fósseis (carvão, petróleo e gás), além de favorecer o desenvolvimento econômico de regiões castigadas pelo sol e pela seca.

Normalmente, a caracterização espectral da irradiância solar é efetuada por espectroradiômetros, esses aparelhos decompõem a radiação solar em suas várias frequências, posteriormente, suas intensidades são medidas pelos sensores. O radiômetro de LEDs possui uma resposta espectral muito seleta, determinada pelos LEDs que o constituem, por isso, pode ser construído especificamente para um objetivo de forma mais econômica e simples.

A atmosfera é composta por diversos gases tais como ozônio (O₃), dióxido de enxofre (SO₂), dióxido de nitrogênio (NO₂), além de vapor d'água e aerossóis. Cada um desses elementos atenua a medida de uma faixa da radiação solar incidente devido aos espalhamentos que produzem. Este radiômetro foi construído de forma que a resposta espectral estreita de seus LEDs coincida com a faixa de radiação solar espalhada por alguns gases. Assim, a resposta do LED Próximo Infravermelho é particularmente adequada para a medida da concentração de vapor d'água naquela região, enquanto os LEDs no visível permitem uma boa discriminação dos aerossóis e do ozônio.

2. RADIÔMETRO DE LEDs

2.1 Diodos emissores de luz funcionando como sensores

Um dispositivo fotovoltaico é composto por um material semicondutor. Quando uma impureza é adicionada a um semicondutor intrínseco (tipicamente silício, germânio ou arseneto de gálio), esse material torna-se um semicondutor dopado. Se tais impurezas forem pentavalentes (como fósforo, arsênio ou antimônio), esse semicondutor com excesso de elétrons é denominado de semicondutor tipo N. Se são adicionadas à estrutura cristalina impurezas trivalentes, como alumínio, boro ou índio, criam-se lacunas em excesso nesta estrutura, esse semicondutor é chamado de tipo P. Quando um semicondutor tipo P é intimamente unido a um tipo N, temos uma junção chamada junção P-N.

A junção P-N pode ser polarizada de forma direta ou reversa. A Figura 1 mostra uma polarização direta, o potencial positivo da fonte externa é ligado ao ânodo (material tipo P) e o potencial negativo é ligado ao cátodo (material tipo N). O potencial negativo repele os elétrons do material tipo N, onde, se a tensão da fonte de alimentação for maior do que a barreira de potencial, os elétrons atravessam a junção P-N e são atraídos pelo potencial positivo da fonte, portanto, temos corrente elétrica. Ao passar pela junção, alguns elétrons se recombinam com as lacunas, podendo

emitir fótons. A intensidade e a frequência desses fótons dependem do semiconductor e do material dopante. Dessa forma, temos diodos (junções P-N) emissores de luz, os LEDs [Schubert, 2003].

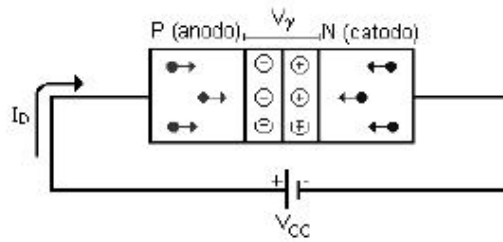


Figura 1. Polarização direta da Junção P-N.

Na polarização reversa, figura 2, o potencial positivo da fonte é ligado ao cátodo (material tipo N) e o potencial negativo da fonte é ligado ao ânodo (material tipo P). A incidência de uma radiação luminosa com energia capaz de remover elétrons de ligação nas proximidades da junção P-N provoca um contínuo movimento dos elétrons e lacunas em excesso, ocasionando o surgimento de uma corrente elétrica reversa. Operando próximo ao curto circuito, a corrente gerada é diretamente proporcional à intensidade da radiação incidente [Nascimento, 1999]. A frequência da radiação capaz de dissociar elétron-lacuna depende dos materiais que constituem a junção. Assim, um LED polarizado reversamente funciona como um sensor fotovoltaico e apresenta uma resposta espectral muito próxima da sua faixa de emissão [Mims, 1992].

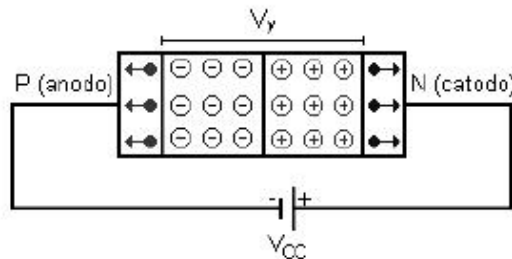


Figura 2. Polarização reversa da Junção P-N.

Sensores fotovoltaicos apresentam algumas vantagens em relação aos demais tipos de sensores. Entre elas, o baixo custo, tempo de resposta rápido (cerca de 10 μ s), proporcionalidade entre a corrente de saída e a radiação incidente, baixa degradação ao longo do tempo e resposta espectral seletiva [Haag, 2007].

2.2 Sensores do Radiômetro

O radiômetro apresentado aqui é formado por cinco LEDs: Próximo infravermelho, Vermelho de alto brilho, Amarelo, Verde, Azul. Um sexto canal pode ser acrescido, como um fotodiodo ou foto-transistor de silício, de espectro largo indo até 1 μ m, ou um fotodiodo ou foto-transistor de germânio de espectro largo indo até 1,5 μ m. A tabela seguinte dá as principais características desses LEDs.

Tabela 1: Comprimento de onda de resposta máxima ($\lambda_{\max}$) e largura da banda de resposta ($\Delta\lambda$)

LED	$\lambda_{\max}$ (nm)	$\Delta\lambda$ (nm)
Próximo IV	920	90
Vermelho	780	90 (centrado em 760nm)
Amarelo	570	90 (centrado em 560nm)
Verde	550	60
Azul	425	80

A figura 3 a seguir mostra a resposta espectral dos fotodetectores utilizados. Esses espectros foram feitos com o espectrômetro visível-infravermelho do Laboratório de Propriedades Ópticas (LaPO), no Instituto de Física da UFBA.

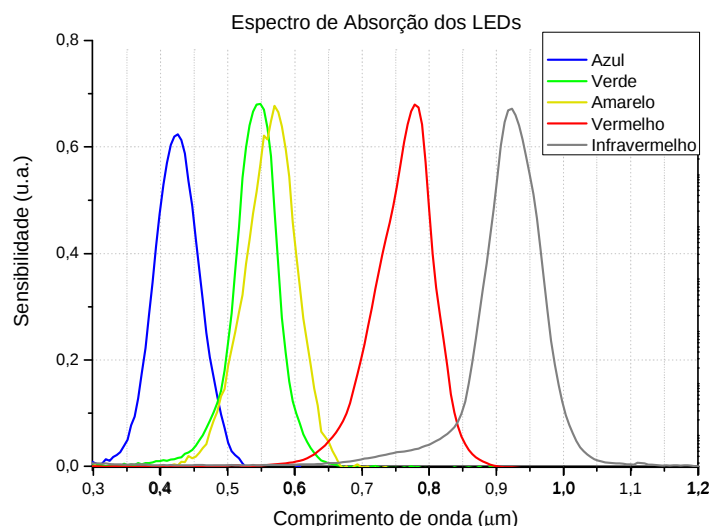


Figura 3. Resposta espectral dos LEDs funcionando como sensores.

Diretividade dos LEDs. Depois de fabricado, o chip de diodo semiconductor é montado em um “copo” refletor que está conectado ao cátodo do LED, um fino fio de ouro liga a superfície de contato superior do chip ao ânodo. Veja figura 5. O conjunto inteiro é então englobado por uma redoma feita de resina epóxi que, além de proteger o chip, atua como uma lente, restringindo o cone de luz emitido pelo LED. Essa redoma de epóxi pode ser transparente ou fosca, colorida (para indicar a cor da luz emitida) ou não.

A radiação emitida pelo LED tem seu padrão angular definido pelas variáveis na fabricação e acondicionamento do chip, tais como: forma do copo refletor, tamanho e critérios de design do chip semiconductor, distância entre o chip e a lente e geometria da lente. Os chips de LEDs típicos, como os semi-esféricos de 5mm, normalmente emitem luz por uma pequena região lateral (cerca de 50 μm) e com um padrão angular complexo e não simétrico. A fim de concentrar e colimar esse padrão de luz, o chip é alojado no “copo” refletor e envolvido pela redoma de epóxi. Se esse encapsulamento for fosco, difuso, a luz emitida pelo chip será mais dispersa em todo o corpo de LED. Já se o encapsulamento for transparente, a luz será mais intensa, mas terá um cone de escape estreito [ZEISS, 2010].

O encapsulamento colorido atua também como um filtro quando o LED está operando como sensor.

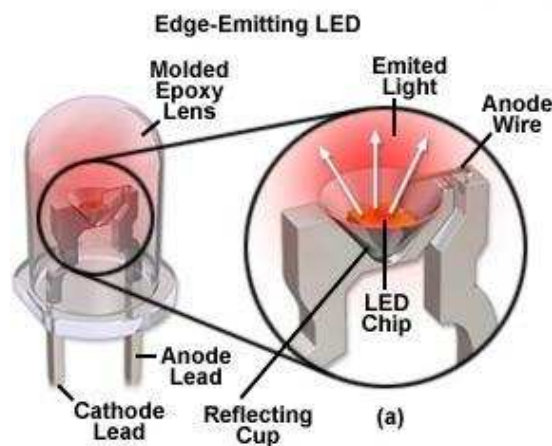


Figura 5. Típico LED de encapsulamento semi-esférico de $\varnothing$ 5 mm. Fonte: Adaptado de ZEISS [2010].

A resposta em função do ângulo de incidência para cada LED utilizado no radiômetro foi determinada experimentalmente fazendo uso de uma bancada provisória. A fonte de luz foi constituída por uma lâmpada halógena de 60 W alimentada por uma fonte de tensão regulada de 12V. Para colimar a luz, tornando seus feixes aproximadamente paralelos como os da luz solar que incidem no solo terrestre, a lâmpada foi colocada no foco de uma lente biconvexa. Esta luz foi conduzida até o suporte onde se encontrava o LED, e este estava sobre uma base graduada em passos de 1° . Todo o conjunto foi coberto por um material emborrachado, preto e fosco para assegurar que não houvesse interferência de fontes luminosas externas. Para cada LED a leitura foi feita duas vezes para diminuir erros causados principalmente pela imprecisão angular. Em passos de 1° , foram efetuadas medidas entre -90° e $+90^\circ$, sendo 0° o eixo normal ao

detector e o plano rotacionado aquele que contém os dois pinos de contato dos LEDs. A Figura 4 apresenta as respostas dos sensores usados neste radiômetro.

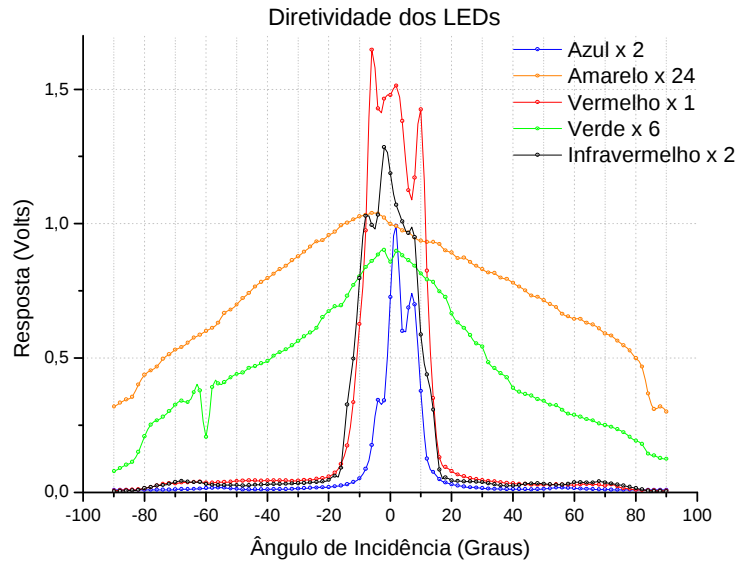


Figura 4. Diretividade dos LEDs. LEDs Verde e Amarelo: $\varnothing$ 5 mm, foscos; LEDs Azul e Infravermelho: $\varnothing$ 5 mm, transparentes e LED Vermelho: $\varnothing$ 10 mm, transparente.

Os LEDs Verde e Amarelo têm uma curva mais alargada e o LED Vermelho é destacadamente o mais intenso. Verifica-se, então, uma coerência com a teoria do padrão angular de emissão dos LEDs.

2.3 Circuito Eletrônico

Para amplificar a corrente gerada pelos sensores e convertê-las em tensão foram utilizados seis Amplificadores Operacionais (Amp. Op.), modelo TL082CP, na configuração de transimpedância. Levando em conta o fato de que o Amp. Op. tem uma impedância de entrada elevada e impedância de saída quase nula, adotou-se o conceito de “terra virtual” [Clayton, 2003], que implica em admitir que as entradas inversoras e não inversoras do Amp. Op. têm o mesmo potencial ($V_- = V_+ = 0$). Diretamente do circuito de transimpedância (Figura 5, exceto o capacitor) temos:

$$I_{in} = I_R = \frac{V_- - V_s}{R},$$

mas, por definição, $V_s = A(V_- - V_+)$ e idealmente $A \rightarrow \infty$.

$$\text{Como } V_+ = 0, \text{ teremos } V_- = \frac{V_s}{A} \rightarrow 0.$$

$$\text{Portanto } I = \frac{-V_s}{R} \text{ e, finalmente, } V_s = -RI_{in}.$$

A tensão de saída é então linearmente proporcional a corrente de entrada, portanto, proporcional a intensidade da radiação incidente, já que fizemos os LEDs operarem próximo a região de curto circuito.

A fotocorrente gerada pelos LEDs segue a equação [Ricaud, 1997]:

$$I = \eta \phi q$$

Onde ϕ é o fluxo de fótons incidentes, q é a carga do elétron e η é a eficiência quântica de conversão entre radiação incidente e elétrons livres. Como parte da radiação incidente é refletida pela superfície dos LEDs e a junção P-N converte em corrente uma faixa estreita de comprimento de onda da energia que absorve, essa eficiência η é muito baixa.

Para compensar a variação de η entre os LEDs e da fotocorrente gerada, os resistores vão de 220 k Ω para o infravermelho a 30 M Ω para o azul.

Um capacitor foi acrescentado, em paralelo ao resistor, para aumentar o ganho do sinal a baixas frequências e minimizar o ganho dos ruídos de alta frequência, formando assim um filtro passa-baixa, de constante de tempo RC [Clayton, 2003], Figura 5.

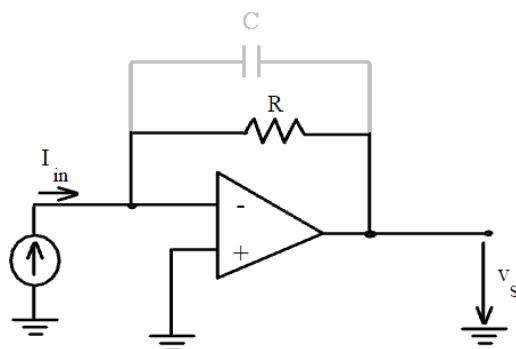


Figura 5. Conversor corrente - tensão.

2.4 Estrutura do Radiômetro

Os sensores ficaram fixos no circuito que foi armazenado dentro de uma caixa de alumínio retangular (4 cm x 9 cm x 5 cm) com uma janela de teflon de 6,5cm x 3,5cm, que atua também como difusor. Verificamos que assim a diretividade do radiômetro se aproximou da lei de Lambert (lei em cosseno). A placa do circuito está a uma distância de 2 cm da base da caixa. Esse espaço acomoda o cabo que alimenta os amplificadores e conduz os cinco sinais analógicos à placa de aquisição. Como o radiômetro estará exposto a sol e chuva, sofrendo dilatações e contrações, a vedação é um ponto que merece atenção. Por isso, foi utilizada borracha de silicone para realizar a vedação e o difusor de luz foi estendido para que ele também abrigasse da chuva os micro-orifícios despercebidos. O difusor, além de evitar erros causados pelo acúmulo de poeira e água sobre os sensores, reduz suas sensibilidades para ligeiras variações na posição angular do feixe incidente.



Figura 6. Radiômetro de LEDs.

Futuramente, será acrescentado ao radiômetro um anel de sombreamento rotativo que irá sombrear periodicamente os sensores permitindo medidas da radiação solar total e difusa, e, a partir dessas, obteremos a radiação solar direta.

2.5 Placa e programa de Aquisição

A fim de gravar os sinais em um computador para realizar um futuro tratamento numérico, o sinal analógico dos sensores precisa ser convertido em sinal digital. O conversor analógico-digital escolhido é o TLC1542, de 14 canais e

10 bits. A interface entre a placa de aquisição e o computador é realizada pela porta paralela destinada normalmente à impressora. Veja o esquema na Figura 7.

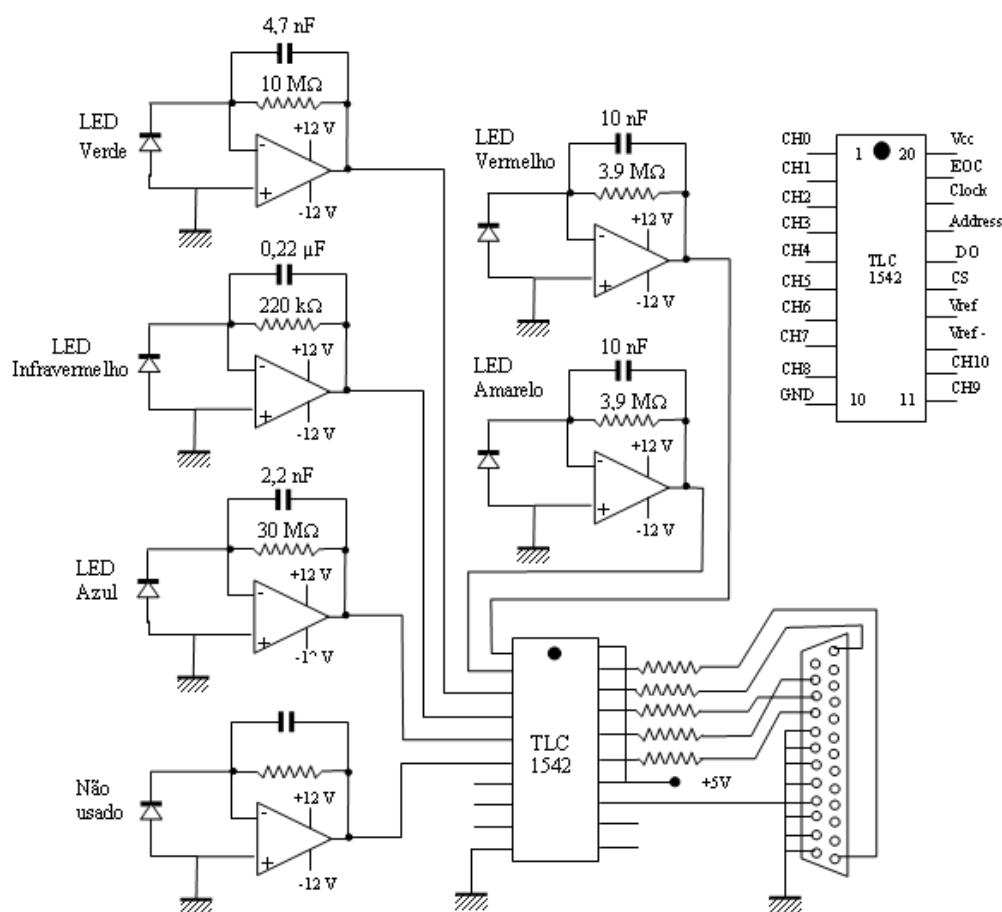


Figura 7. Conexões entre Sensores, ADC e Porta Paralela.

O programa de aquisição, desenvolvido em Visual Basic, controla a placa de aquisição através da porta paralela do computador, visualiza na tela o resultado da conversão dos cinco canais e salva os resultados em um arquivo. Em uma versão mais recente, o controle é feito através de uma porta USB, trazendo assim mais flexibilidade. Como geralmente o computador de aquisição está afastado do laboratório, a transmissão dos dados é feita diariamente através da Internet pela emissão de um arquivo contendo os dados do dia corrido. Além dos dados do radiômetro de LEDS, são assim transmitidos dados de um piranômetro, de uma célula fotovoltaica de silício e de um sensor UV.

2.6 Localização do Radiômetro e da Placa de aquisição

Este radiômetro de LEDs compõe uma estação radiométrica cuja proposta é medir a radiação incidente usando quatro sensores complementares: dois sensores de banda espectral larga - um radiômetro térmico e um fotodetector de silício; e outros dois sensores de banda espectral estreita - um sensor UV e o radiômetro de LEDs.

No último andar do Instituto de Física da UFBA, abrigamos a placa de aquisição, que é comum a todos os sensores, e o computador com o programa de aquisição. No ponto mais alto do prédio, sobre este andar, estão todos os detectores de radiação solar. Esta localização oferece aos sensores um horizonte de 360° livre de bloqueios durante todo o ano.

3. Resultados e Conclusões

Os LEDs, atuando como sensores, mostraram-se excelentes substitutos para os fotodiodos acoplados com filtros de interferência, além de mais estáveis e baratos.

O Radiômetro de LEDs desenvolvido no LaPO apresentou resultados satisfatórios e está em uso juntamente com os outros sensores que compõem a Estação Radiométrica do Instituto de Física da UFBA. A figura seguinte é um exemplo da irradiância espectral obtida com o Radiômetro de LEDs.

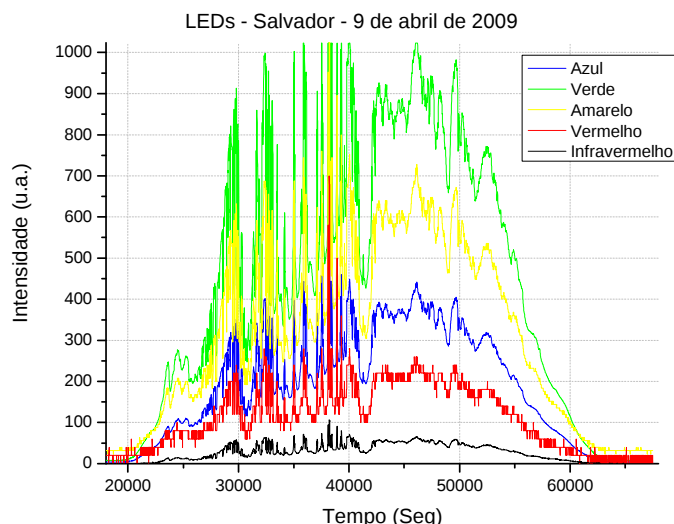


Figura 8. Irradiância espectral obtida com o Radiômetro de LEDs (de 5h30min às 18h).

O próximo objetivo é obter as concentrações atmosféricas responsáveis pela absorção da radiação solar que atinge a Terra. Para tal, será necessário acoplar um anel de sombra rotativo ao radiômetro. Com o anel de sombra será possível obter, com um único conjunto de sensores, a intensidade de radiação direta a partir da medida da radiação total e difusa.

Na etapa que se segue, os espectros obtidos serão combinados como o programa de cálculo de emitância solar Spectral2 de R. Bird, and C. Riordan e um algoritmo de inversão em tempo real desenvolvido no laboratório [Soares, 2010]. Para o funcionamento desse algoritmo, a calibração absoluta dos sensores do radiômetro é necessária e será feita com uma bancada de calibração de sensores ainda em fase de montagem. Esse estudo permitirá determinar concentrações de vapor d'água, ozônio e aerossóis presentes na atmosfera.

Agradecimentos

Os agradecimentos vão à CNPq pelo apoio financeiro.

REFERÊNCIAS

- Clayton G., Winder S., 2003. Operational amplifiers. Newnes Press, 5 ed.
- Haag R., 2007. Desenvolvimento De Um Radiômetro Espectral e Metodologia para Caracterização do Espectro Solar. Dissertação de Mestrado, PROMEC, UFRGS, Porto Alegre.
- Mims F. M. III., 1992. Sun Photometer With Light-Emitting-Diodes as Spectrally Selective Detectors. Applied Optics, vol. 31, nº 33, pp. 6965-6967.
- Ricaud A., 1997. Photopiles Solaires. Presses Polytechniques et Universitaires Romandes
- Schubert E. F., 2003. Light-Emitting Diodes. Cambridge University Press
- ZEISS. Education in Microscopy and Digital Imaging – Light Emitting Diodes. Disponível em: < <http://zeiss-campus.magnet.fsu.edu/articles/lightsources/leds.html> >. Acesso em: 17/ abr. /2010.
- Bird R. E., 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.
- Nascimento A. R. Z. et al, 1999. Circuitos Amplificadores de Transimpedância Integrados a Fotodiodos. Telecomunicações, vol. 02, nº 02, pp 32-39.
- Soares A. É. B. A. et al, 2010. III CBENS. Belém

LED RADIOMETER

Abstract. *The focus of this work is the preparation and the study of the properties of a LED radiometer. The LED (light emitting diode) may be a good radiation detector and its response is associated with the frequency range that it emits, in other words, the spectral range of detection of a LED is narrow. The radiometer built by us has five LEDs: Blue, Green, Yellow, high brightness Red and Near Infrared. We will present the main features of the sensors, as their spectral response and sensitivity as a function of incidence angle, and details of its manufacture: sheath, electronics and signal acquisition program. Its use, combined with the solar emittance model Spctral2 developed by R. Bird, and C. Riordan and an inversion algorithm developed in the laboratory, will allow the study of concentrations of water vapor, ozone and aerosols in the atmosphere.*

Key words: *Solar Radiation, Spectral Radiometer, Light Emitting Diodes*