

ALGORITMO DE INVERSÃO PARA A DETERMINAÇÃO DA CONCENTRAÇÃO DE ABSORVENTES E AEROSSÓIS NA ATMOSFERA A PARTIR DE UM RADIÔMETRO DE LEDs.

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

Denis Gilbert Francis David - denisgfd@ufba.br

Jéssica Guerreiro Santos Ramalho - jessicaguel@ibest.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. *Esse trabalho consiste no desenvolvimento de um algoritmo de inversão permitindo determinar as concentrações de vapor d'água, ozônio e aerossóis presentes na atmosfera, a partir dos sinais de um radiômetro de LEDs. Esse algoritmo é baseado no uso do modelo de emitância solar Spectral2 de R. Bird e C. Riordan. Ele usa os sinais oriundos de quatro LEDs funcionando como fotodiodo, com sensibilidades centradas em comprimentos de onda diferentes. A precisão do algoritmo e sua dependência com os comprimentos de onda escolhidos são discutidas. Conclui-se que um conjunto de LEDs disponíveis comercialmente, com sensibilidade no azul, no verde, no vermelho e no próximo infravermelho, pode constituir um instrumento eficiente e barato.*

Palavras-chave: *Radiação Solar, Espalhamento, Absorção, Espectroscopia, Diodos Emissores de Luz*

1. INTRODUÇÃO

O estudo da radiação solar chegando ao nível do solo é de primeira importância para sua utilização como fonte de energia, tanto como aquecedor quanto como gerador de corrente, mas também para a agricultura, ou ainda a proteção ambiental. No caso da conversão energética, a resposta espectral tem importância por causa da procura de dispositivos mais eficientes. Para aplicações térmicas, a priori todo o espectro solar pode ser aproveitado e o problema então é de realizar placas absorvedoras com superfícies absorvedoras com a maior eficiência do ultravioleta até o próximo infravermelho até 2 μm . No caso dessa aplicação, todas as fontes de absorção vão ter um impacto direto sobre o rendimento do painel, em particular as bandas de absorção da água situadas no próximo infravermelho vão ter uma influência grande. No caso da aplicação fotovoltaica, o impacto da absorção atmosférica varia de uma tecnologia para outra porque a célula fotovoltaica tem uma faixa de conversão dependendo do gap do material fotovoltaico, além de problemas mais complexos como o perfil de absorção no material ou ainda o coeficiente de reflexão do dispositivo. Desta forma a absorção atmosférica terá um impacto diferente do que na conversão térmica. Além disso, com a aparição de vários materiais fotovoltaicos (Si cristalino, Si amorfo, CdSe, CIS, etc.), esse impacto vai depender de cada tecnologia. No caso da agricultura, considerações similares podem ser feitas; há também preocupações como o conhecimento da umidade da atmosfera. No caso do meio ambiente, uma boa determinação do espectro da radiação solar incidindo no solo informa de maneira quantitativa sobre as concentrações de certas moléculas (ozônio, oxigênio, H_2O) e de aerossóis.

Para realizar a medida do espectro da radiação solar, o espectro-radiômetro parece ser o instrumento mais adequado. Mas como foi observado por Haag (2007), esse instrumento é caro e frágil. Poderia também acrescentar que sua utilização é relativamente complexa. A possibilidade de substituir esse instrumento por um sensor mais simples, robusto e barato foi estudada com sucesso por Mims em 1992. Ele aproveitou da aparição de diodos emissores de luz (Light Emitting Diode ou LED), emitindo em diferentes comprimentos de onda, para realizar um sensor de múltipla resposta espectral, se baseando no fato de que um LED pode

funcionar também como detector. O fato interessante é que, apesar de realizar somente um número limitado de medida, tipicamente quatro comprimentos de onda, é possível determinar a concentração dos principais absorvedores na atmosfera, se baseando com um modelo da absorção atmosférica desenvolvido por Bird e Riordan (1986), modelo suficientemente exato e ao mesmo tempo simples para rodar em um computador pessoal. No seu trabalho, Haag utilizou fórmulas de inversão dando as concentrações de água e de ozônio e os coeficientes α e β característicos de aerossóis, para LEDs de comprimentos de onda definidos (HLMP-CB30, HLMP-3762, HLMP-3507, 1N6265 e F5E3). Nesse mesmo período, os autores desse trabalho (Soares, 2007) tinham terminado a análise de 3 anos de medida da intensidade solar em Feira de Santana com um piranômetro, mostrando a importância da influência do vapor de água nas curvas de intensidade durante o dia. Surgiu então a idéia de desenvolver um sensor espectral similar para confirmar o papel da água no sinal medido pelo piranômetro e abrir o leque de caracterização da atmosfera com um radiômetro de LEDs desenvolvido no laboratório (Guerreiro, 2010). Nesse desenvolvimento surgiu a dificuldade de achar exatamente os mesmos LEDs e aconteceu que isso não foi possível apesar das tentativas através de fornecedores conhecidos (Farnell-Newark in one, Radiospares, Selectronics, etc.). O caminho foi então comprar e testar cada diodo, revelando um espectro de características diferentes do esperado, e prever a resposta do sensor realizado através de um modelo adhoc.

Desde o trabalho de Bird e Riordan, inúmeros esforços foram feitos no intuito de melhorar a precisão dos modelos de balanço radiativo na atmosfera, utilizando dados espectroscópicos mais precisos sobre as moléculas compondo a atmosfera, um melhor conhecimento da repartição dessas moléculas na atmosfera (concentrações parciais, pressão e temperatura), como também códigos muito mais precisos aproveitando da maior capacidade de processamento dos computadores (ver Anderson, G.P., 1995, LOWTRAN/ MODTRAN/ FASCODE: Past/Present/Future, por exemplo). No caso desse trabalho, que consiste em utilizar dados de baixa resolução oriundos de LEDs utilizados como sensores, não é desejável usar esses modelos, na medida em que é procurado também um tratamento em tempo real da informação dentro o radiômetro. Por essa razão, foi preferido usar o modelo de Bird e Riordan que, apesar de ter sido elaborado nos anos oitenta, foi testado em vários casos de atmosfera e tem uma resolução compatível com a resolução dos LEDs (10 nm para o modelo e 50 a 100 nm para os LEDs). O último ponto importante foi o seu formalismo que permite uma inversão matemática razoavelmente cômoda.

Esse trabalho apresenta então um algoritmo de inversão dos sinais oriundos de um radiômetro de LEDs desenvolvido no laboratório baseado no modelo SPCTRAL2 de Bird e Riordan. As fórmulas de inversão achadas são similares com as anteriormente publicadas, mas podem ser ajustadas a qualquer comprimento de onda. Como essas fórmulas não são lineares, o algoritmo de inversão usa procedimentos repetidos até convergência. A propagação de erros foi estudada através da variação do desvio do sinal de cada LED relativo a um LED idealmente calibrado (isto é dando o valor exato da radiação). A influência da largura espectral de cada LED também foi investigada. Finalmente, as conseqüências sobre a especificação de um radiômetro de LED são indicadas.

2. CÁLCULO DA RADIAÇÃO DIRETA PELO MODELO DE R. BIRD E C. RIORDAN.

O ponto de partida do algoritmo é o modelo SPCTRAL2. Nesse modelo, a expressão da intensidade solar direta é:

$$I_d(\lambda) = H_0(\lambda) \cdot D \cdot T_r(\lambda) \cdot T_o(\lambda) \cdot T_a(\lambda) \cdot T_w(\lambda) \cdot T_u(\lambda) \quad (1)$$

Onde o parâmetro $H_{0\lambda}$ é a irradiância extraterrestre para a distância média terra-sol para o comprimento de onda λ ; D é o fator de correção para a distância terra-sol; e $T_r(\lambda)$, $T_o(\lambda)$, $T_a(\lambda)$, $T_w(\lambda)$ e $T_u(\lambda)$ são as funções de transmitância da atmosfera no comprimento de onda λ , respectivamente para a difusão molecular (Rayleigh), a absorção pelo ozônio, a atenuação pelos aerossóis, a absorção pelo vapor de água, e a absorção pelos gases uniformemente misturados. A irradiância direta sobre uma superfície horizontal é obtida multiplicando a Eq. 1 por $\cos Z$, onde Z é o ângulo zenital solar.

A irradiância extraterrestre espectral utilizada aqui foi obtida por Fröhlich e Wehrli (1981) do Centro de Radiação Mundial. O segmento mais importante desse espectro que é de interesse aqui foi retirado do espectro revisado de Neckel e Labs (1981). Uma versão desse espectro, com uma resolução de 10 nm, com 122 comprimentos de onda, é utilizada nesse modelo.

O fator de distância terra-sol dado por Spencer (1971) é:

$$D = 1.00011 + 0.034221 \cdot \cos \varphi + 0.00128 \cdot \sin \varphi + 0.000719 \cdot \cos 2\varphi + 0.000077 \cdot \sin 2\varphi \quad (2)$$

O ângulo diário φ em radianos é representado por:

$$\varphi = 2 \cdot \pi \cdot (d - 1) / 365 \quad (3)$$

onde d é o número do dia no ano (1-365).

2.1 Difusão de Rayleigh

A expressão que foi usada para transmitância atmosférica resultando da difusão de Rayleigh é devida a Kneizys et al. (1980):

$$T_r(\lambda) = \exp\left\{-M' / (\lambda^4 \cdot (115.8406 - 1.335/\lambda^2))\right\} \quad (4)$$

onde M' é a massa de ar corrigida pela pressão. A massa de ar relativa dada por Kasten (1989) é:

$$M = [\cos Z + 0.15 \cdot (93.885 - Z)^{-1.253}]^{-1} \quad (5)$$

onde Z é o ângulo zenital solar aparente. A massa de ar corrigida pela pressão é $M' = M \cdot p/p_0$, onde $p_0 = 1013$ mb e p é a pressão na superfície medida em mb.

2.2 Absorção e difusão pelos aerossóis

Foi utilizado uma expressão da transmitância pelos aerossóis da forma:

$$T_a(\lambda) = \exp\left(-\beta_n(\lambda)^{-\alpha_n(\lambda)}\right) \quad (6)$$

Valores de β e α foram derivados a partir de um modelo de aerossóis rurais. Dois valores de α foram utilizados para esse modelo de aerossóis: $\alpha_1 = 1,0274$ para comprimentos de onda $< 0,5 \mu\text{m}$, e $\alpha_2 = 1,2060$ para comprimentos de onda $\geq 0,5 \mu\text{m}$. O valor de β_n foi escolhido apropriadamente para cada intervalo de comprimento de onda para produzir valores precisos da opacidade (espessura ótica de aerossóis segundo um caminho vertical) para o comprimento de onda de $0,5 \mu\text{m}$. A opacidade na Eq. 6 é representada pela fórmula de Angström (1961), isto é,

$$\tau_a(\lambda) = \beta_n \cdot \lambda^{-\alpha} \quad (7)$$

Quando um único valor de α é utilizado para representar o modelo de aerossóis rurais, o valor de α deveria ser 1,140.

2.3 Absorção pelo vapor de água

Foi adotada a expressão da transmitância no vapor de água de Leckner (1978), que tem a forma:

$$T_w(\lambda) = \exp\left[-0.2385 \cdot a_w(\lambda) \cdot W \cdot M / (1 + 20.07 \cdot a_w(\lambda) \cdot W \cdot M)^{0.45}\right] \quad (8)$$

onde W é a quantidade de vapor de água precipitável (cm) em um caminho vertical e $a_w(\lambda)$ é o coeficiente de absorção do vapor de água em função do comprimento de onda. A quantidade de vapor de água W não é corrigida pela temperatura nem pela pressão porque isso foi levado em conta na forma da Eq. 8.

2.4 Absorção pelo ozônio e pelos gases uniformemente misturados

A equação de Leckner utilizada para a transmitância pelo ozônio é:

$$T_o(\lambda) = \exp(-a_o(\lambda) \cdot O_3 \cdot M_o) \quad (9)$$

onde $a_o(\lambda)$ é o coeficiente de absorção pelo ozônio, O_3 é a concentração de ozônio (atm.cm), e M_o é a massa de ozônio. A expressão da massa de ozônio de Robinson na forma dada por Iqbal (1983) foi adotada. A massa de ozônio é dada por:

$$M_o = (1 + h_o/6370) / (\cos^2 Z + 2 \cdot h_o/6370)^{0.5} \quad (10)$$

O parâmetro h_o é a altitude da concentração máxima de ozônio, que é de aproximadamente 22 km.

A expressão de Leckner para a transmitância dos gases uniformemente misturados é utilizada, e se expressa da maneira seguinte:

$$T_u(\lambda) = \exp\left[-1.41 \cdot a_u(\lambda) \cdot M' / (1 + 118.3 \cdot a_u(\lambda) \cdot M')^{0.45}\right] \quad (11)$$

onde $a_u(\lambda)$ é uma combinação de um coeficiente de absorção e de uma quantidade de gás.

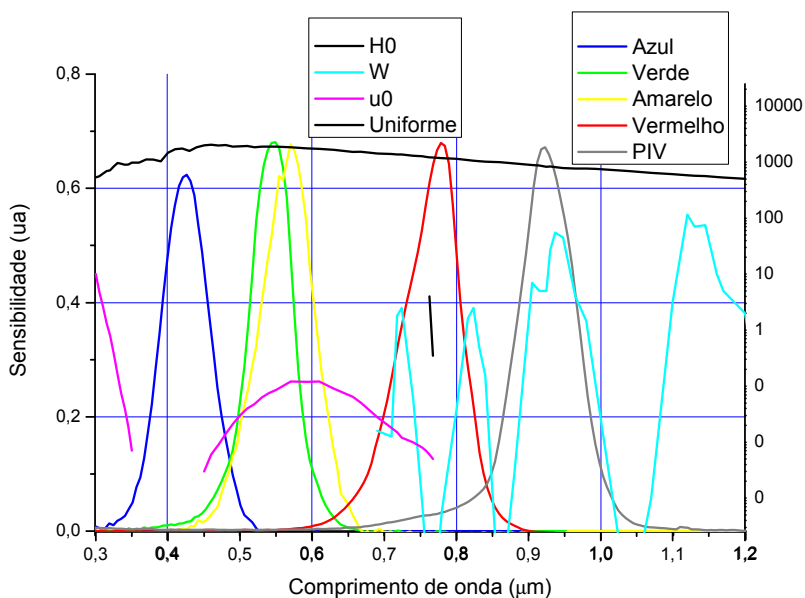


Fig. 1: Espectros da radiação solar extraterrestre (H_0), dos coeficientes de absorção (O_3 , O_2 , H_2O) e da sensibilidades dos LEDs

2.5 Expressão completa da intensidade solar direta

A expressão completa da intensidade solar direta é dada por:

$$I_d(\lambda) = H_0(\lambda) \cdot D \cdot e^{-\frac{M \cdot \frac{p}{p_0}}{\lambda^4 \cdot \left(115,6406 - \frac{1,335}{\lambda^2}\right)}} \cdot e^{-a_o(\lambda) \cdot u_o \cdot M_o} \cdot e^{-\beta \cdot \lambda^{-\alpha} \cdot M} \cdot e^{-\frac{0,2385 \cdot a_w(\lambda) \cdot W \cdot M}{(1+20,07 \cdot a_w(\lambda) \cdot W \cdot M)^{0,45}}} \cdot e^{-\frac{1,41 \cdot a_u(\lambda) \cdot M \cdot \frac{p}{p_0}}{\left(1+118,93 \cdot a_u(\lambda) \cdot M \cdot \frac{p}{p_0}\right)^{0,45}}} \quad (12)$$

$$= H_0(\lambda) \cdot D \cdot e^{-\left\{ \frac{M \cdot \frac{p}{p_0}}{\lambda^4 \cdot \left(115,6406 - \frac{1,335}{\lambda^2}\right)} + a_o(\lambda) \cdot u_o \cdot M_o + \beta \cdot \lambda^{-\alpha} \cdot M + \frac{0,2385 \cdot a_w(\lambda) \cdot W \cdot M}{(1+20,07 \cdot a_w(\lambda) \cdot W \cdot M)^{0,45}} + \frac{1,41 \cdot a_u(\lambda) \cdot M \cdot \frac{p}{p_0}}{\left(1+118,93 \cdot a_u(\lambda) \cdot M \cdot \frac{p}{p_0}\right)^{0,45}} \right\}} \quad (12')$$

Aplicando o logaritmo dessa quantidade:

$$\text{Log} \left(\frac{H_0(\lambda) \cdot D}{I_d(\lambda)} \right) = \frac{M \cdot \frac{p}{p_0}}{\lambda^4 \cdot \left(115,6406 - \frac{1,335}{\lambda^2}\right)} + a_o(\lambda) \cdot u_o \cdot M_o + \beta \cdot \lambda^{-\alpha} \cdot M + \frac{0,2385 \cdot a_w(\lambda) \cdot W \cdot M}{(1+20,07 \cdot a_w(\lambda) \cdot W \cdot M)^{0,45}} + \frac{1,41 \cdot a_u(\lambda) \cdot M \cdot \frac{p}{p_0}}{\left(1+118,93 \cdot a_u(\lambda) \cdot M \cdot \frac{p}{p_0}\right)^{0,45}} \quad (13)$$

$$= M \left[\beta \cdot \lambda^{-\alpha} + \frac{p}{p_0} \left(\frac{1}{\lambda^4 \cdot \left(115,6406 - \frac{1,335}{\lambda^2}\right)} + \frac{1,41 \cdot a_u(\lambda)}{\left(1+118,93 \cdot a_u(\lambda) \cdot M \cdot \frac{p}{p_0}\right)^{0,45}} \right) + \frac{0,2385 \cdot a_w(\lambda) \cdot W}{(1+20,07 \cdot a_w(\lambda) \cdot W \cdot M)^{0,45}} + a_o(\lambda) \cdot u_o \cdot M_o \right] \quad (13')$$

Seja, finalmente:

$$\frac{1}{M} \cdot \text{Log} \left(\frac{H_0(\lambda) \cdot D}{I_d(\lambda)} \right) - \frac{p}{p_0} \cdot \left(\frac{1}{\lambda^4 \cdot \left(115,6406 - \frac{1,335}{\lambda^2}\right)} + \frac{1,41 \cdot a_u(\lambda)}{\left(1+118,93 \cdot a_u(\lambda) \cdot M \cdot \frac{p}{p_0}\right)^{0,45}} \right) = \beta \cdot \lambda^{-\alpha} + \frac{0,2385 \cdot a_w(\lambda) \cdot W}{(1+20,07 \cdot a_w(\lambda) \cdot W \cdot M)^{0,45}} + a_o(\lambda) \cdot u_o \cdot \frac{M_o}{M}$$

(14)

)

3. ALGORITMO DE INVERSÃO

Essa última expressão é muito interessante porque temos, à esquerda, termos que dependem somente de parâmetros conhecidos e/ou medidos e, à direita, as incógnitas do problema (quatro): α e β (aerossóis), W (água) e u_0 (ozônio). Além disso, elas aparecem sobre uma forma quase linear.

Observamos que M e M_0 são determinados pela hora e o dia no ano, D é determinado pelo dia no ano, $H_0(\lambda)$ é conhecido e tabulado, p_0 é uma constante e p pode ser medido. Quanto aos diversos coeficientes de absorção e de difusão, eles são conhecidos e tabulados.

Para melhor compreensão separaremos a expressão acima em constantes:

$$C_{1(\lambda)} = \frac{P}{P_0} \left[\frac{1}{\lambda^4 \left(115,6406 - \frac{1,335}{\lambda^2} \right)} + \frac{1,41a_{u(\lambda)}}{\left(1 + 118,93a_{u(\lambda)}M \frac{P}{P_0} \right)^{0,45}} \right] \quad (15)$$

$$C_{2(\lambda)} = 0,2385a_{w(\lambda)} \quad (16)$$

$$C_{3(\lambda)} = 20,07a_{w(\lambda)} \quad (17)$$

$$C_{4(\lambda)} = \frac{M}{M_0} a_{0(\lambda)} \quad (18)$$

E reescrevemos a Eq. 14 na sua forma geral como:

$$\frac{1}{M} \text{Ln} \left(\frac{H_0(\lambda)D}{I_d(\lambda)} \right) - C_{1(\lambda,M,P)} = \beta \lambda^{-\alpha} + \frac{C_{2(\lambda)}W}{(1 + C_{3(\lambda)}WM)^{0,45}} + C_{4(\lambda,M)}u_0 \quad (19)$$

Para facilitar os cálculos, definimos:

$$C_{5(\lambda)} = \frac{1}{M} \text{Ln} \left(\frac{H_0(\lambda)D}{I_d(\lambda)} \right) \quad (20)$$

$$C_{6(\lambda)} = C_{5(\lambda)} - C_{1(\lambda)} \quad (21)$$

Reescrevendo a Eq. 19 com auxílio de 20 e 21:

$$C_{6(\lambda)} = \beta \lambda^{-\alpha} + \frac{C_{2(\lambda)}W}{(1 + C_{3(\lambda)}WM)^{0,45}} + C_{4(\lambda,M)}u_0 \quad (22)$$

É importante lembrar que β é ligado ao parâmetro experimental $\tau_{0,5}$, medida da atenuação pelos aerossóis em $\lambda = 0,5 \mu\text{m}$, pela relação:

$$\beta = \frac{\tau_{0,5}}{0,5^{-\alpha}} \quad (23)$$

A Eq. 22 mostra que, para determinar os quatro parâmetros α , β , u_0 e W , precisa realizar quatro medidas de intensidade direta em comprimentos de onda distintos. Para obter um sistema de equações não degenerado, é importante escolher esses quatro comprimentos de onda nas regiões de absorção onde cada um dos parâmetros varia bastante. Assim, foram escolhidos um LED azul, mais sensível à difusão de Rayleigh, um LED verde mais sensível à absorção pelo ozônio, um LED vermelho mais sensível à absorção pelos aerossóis e enfim um LED no próximo infravermelho mais sensível ao vapor de água.

A tabela abaixo apresenta os valores de comprimento de onda dado pelos picos dos LEDs e as constantes correspondentes. Ela mostra que α , $\tau_{0,5}$ e u_0 são basicamente ligados pelos 3 primeiros coeficientes C_1 e C_4 , enquanto W é ligado aos outros unicamente através de C_1 , C_2 e C_3 .

Tabela 1: Comprimentos de onda, coeficientes de absorção, intensidade solar direta e coeficientes C_i

LED	$\lambda(\mu\text{m})$	a_w	a_0	a_u	H_0	C_1	C_2	C_3	C_4
Azul	0,430	0,0	0,000	0,0	1587,2	0,270	0,00	0,00	0,000
Verde	0,540	0,0	0,075	0,0	1898,0	0,106	0,00	0,00	0,075
Vermelho	0,610	0,0	0,120	0,0	1728,0	0,064	0,00	0,00	0,120
Próximo infravermelho	0,925	55,0	0,000	0,0	814,0	0,011	13,12	1103,85	0,000

Rescrevendo Eq. 22 para cada comprimento de onda e levando em conta o fato de que certos termos ficam nulos ou desprezíveis, obtém-se o sistema seguinte:

$$C_{6(\lambda_1)} = \tau_{0,5} \cdot (2\lambda_1)^{-\alpha} \quad (24)$$

$$C_{6(\lambda_2)} = \tau_{0,5} (2\lambda_2)^{-\alpha} + C_{4(\lambda_2)} u_0 \quad (25)$$

$$C_{6(\lambda_3)} = \tau_{0,5} (2\lambda_3)^{-\alpha} + C_{4(\lambda_3)} u_0 \quad (26)$$

$$C_{6(\lambda_4)} = \tau_{0,5} (2\lambda_4)^{-\alpha} + \frac{C_{2(\lambda_4)} \cdot W}{(1 + C_{3(\lambda_4)} W \cdot M)^{0,45}} \quad (27)$$

Então é possível solucionar as equações e encontrar os valores de α , $\tau_{0,5}$, u_0 e W . Isolando $\tau_{0,5}$ na Eq. 24 e substituindo em 25:

$$\tau_{0,5} = (2\lambda_1)^\alpha \cdot C_{6(\lambda_1)} \quad (28)$$

$$C_{6(\lambda_2)} = (2\lambda_1)^\alpha \cdot C_{6(\lambda_1)} \cdot (2\lambda_2)^{-\alpha} + C_{4(\lambda_2)} u_0$$

$$\frac{C_{6(\lambda_2)} - C_{4(\lambda_2)} u_0}{C_{6(\lambda_1)}} = \left(\frac{\lambda_1}{\lambda_2} \right)^\alpha \quad (29)$$

Aplicando o logaritmo neperiano na Eq. 29, obtém-se:

$$\alpha \cdot \text{Ln} \left(\frac{\lambda_1}{\lambda_2} \right) = \text{Ln} \left(\frac{C_{6(\lambda_2)} - C_{4(\lambda_2)} u_0}{C_{6(\lambda_1)}} \right) \quad (30)$$

Seja:

$$\alpha = \frac{\text{Ln}(C_{6(\lambda_2)} - C_{4(\lambda_2)}u_0) - \text{Ln}(C_{6(\lambda_1)})}{\text{Ln}(\lambda_1) - \text{Ln}(\lambda_2)} \quad (30')$$

Substituindo o valor de α na Eq. 28 temos o valor de $\tau_{0,5}$:

$$\tau_{0,5} = C_{6(\lambda_1)} \cdot 2(\lambda_1) \frac{\text{Ln}(C_{6(\lambda_2)} - C_{4(\lambda_2)}u_0) - \text{Ln}(C_{6(\lambda_1)})}{\text{Ln}(\lambda_1) - \text{Ln}(\lambda_2)} \quad (31)$$

É possível agora determinar u_0 . Multiplica-se a Eq. 25 por $-\left(\frac{\lambda_3}{\lambda_2}\right)^{-\alpha}$, assim:

$$-\left(\frac{\lambda_3}{\lambda_2}\right)^{-\alpha} \cdot C_{6(\lambda_2)} = -\left(\frac{\lambda_3}{\lambda_2}\right)^{-\alpha} \cdot \beta' \cdot (2\lambda_2)^{-\alpha} - \left(\frac{\lambda_3}{\lambda_2}\right)^{-\alpha} \cdot C_{4(\lambda_2)}u_0 \quad (32)$$

Seja:

$$-\left(\frac{\lambda_3}{\lambda_2}\right)^{-\alpha} \cdot C_{6(\lambda_2)} = -\beta' \cdot (2\lambda_3)^{-\alpha} - \left(\frac{\lambda_3}{\lambda_2}\right)^{-\alpha} \cdot C_{4(\lambda_2)}u_0 \quad (32')$$

Somando as equações. 32' e 26, os termos dependendo dos aerossóis saem e assim é possível determinar u_0 :

$$\begin{aligned} -\left(\frac{\lambda_3}{\lambda_2}\right)^{-\alpha} \cdot C_{6(\lambda_2)} + C_{6(\lambda_3)} &= C_{4(\lambda_3)}u_0 - \left(\frac{\lambda_3}{\lambda_2}\right)^{-\alpha} \cdot C_{4(\lambda_2)}u_0 \\ -\left(\frac{\lambda_2}{\lambda_3}\right)^{\alpha} \cdot C_{6(\lambda_2)} + C_{6(\lambda_3)} &= \left(C_{4(\lambda_3)} - \left(\frac{\lambda_2}{\lambda_3}\right)^{\alpha} \cdot C_{4(\lambda_2)} \right) \cdot u_0 \\ u_0 &= \frac{C_{6(\lambda_3)} - \left(\frac{\lambda_2}{\lambda_3}\right)^{\alpha} \cdot C_{6(\lambda_2)}}{\left(C_{4(\lambda_3)} - \left(\frac{\lambda_2}{\lambda_3}\right)^{\alpha} \cdot C_{4(\lambda_2)} \right)} \quad (33) \end{aligned}$$

Para o cálculo no programa, admite-se que o termo em ozônio é inicialmente nulo, e assim pode-se calcular o valor aproximado de α e $\tau_{0,5}$ (Eq. 30 e 31). Com os valores aproximados, calcula-se o primeiro valor de u_0 , com a Eq. 33 e se retorna as Eq. 30 e 31 para o cálculo mais preciso de α e $\tau_{0,5}$. Repete-se esse procedimento até se obter a convergência.

Uma vez tendo os valores de u_0 , α e $\tau_{0,5}$ utiliza-se as Eq. 27 e 28 para o cálculo da concentração de água (W). Substituindo $\tau_{0,5}$ na Eq. 27 por seu valor dado pela Eq. 28:

$$C_{6(\lambda_4)} = (2\lambda_1)^{\alpha} \cdot C_{6(\lambda_1)} \cdot (2\lambda_4)^{-\alpha} + \frac{C_{2(\lambda_4)} \cdot W}{(1 + C_{3(\lambda_4)} W \cdot M)^{0,45}} \quad (34)$$

$$C_{6(\lambda_4)} = C_{6(\lambda_1)} \cdot \left(\frac{\lambda_1}{\lambda_4} \right)^\alpha + \frac{C_{2(\lambda_4)} \cdot W}{(1 + C_{3(\lambda_4)} W \cdot M)^{0,45}} \quad (34')$$

$$\frac{C_{2(\lambda_4)} \cdot W}{(1 + C_{3(\lambda_4)} W \cdot M)^{0,45}} = C_{6(\lambda_4)} - C_{6(\lambda_1)} \cdot \left(\frac{\lambda_1}{\lambda_4} \right)^\alpha \quad (34'')$$

A Eq. 34'' não é uma função simples de W por causa do denominador do membro de esquerda. Para solucionar isso, no programa, usa-se um laço variando W de zero até o seu valor máximo ($W = 10$ cm), até que melhor satisfaça a Eq. 34''.

4. RESULTADOS E CONCLUSÃO

Uma vez desenvolvido o algoritmo de inversão, com suas equações, e implementado num programa computacional, é necessário testar sua eficácia. Os testes passam por verificar se o algoritmo é capaz de reencontrar valores de W , u_0 , α e $\tau_{0,5}$ previamente conhecidos, determinar sua sensibilidade a erros adicionados em sinais teóricos e enfim verificar seu comportamento com sinais de LEDs reais.

Comprovada a eficácia do algoritmo e a funcionalidade do programa passa-se a etapa da determinação do melhor conjunto de LEDs para a construção de um radiômetro que apresente a melhor exatidão com a menor sensibilidade a erros.

O primeiro passo foi simular sensores ideais, onde a radiação dada pelo LED é exatamente o valor da radiação direta dada pelo modelo Spectral2 no comprimento de onda do pico de LED para dados valores de W , u_0 , α e $\tau_{0,5}$. Nesta etapa foi verificado que o programa conseguiu reencontrar os valores dos parâmetros iniciais com exatidão. Isto indica que o algoritmo de inversão é correto e sua implementação foi bem sucedida.

O segundo passo foi inserir propositalmente erros nos valores de radiação direta fornecidos ao algoritmo de inversão e, a partir daí, verificar os erros nos valores dos parâmetros calculados (W , u_0 , α e $\tau_{0,5}$). Essa prática é necessária para mensurar a sensibilidade do algoritmo a erros nos valores de entrada.

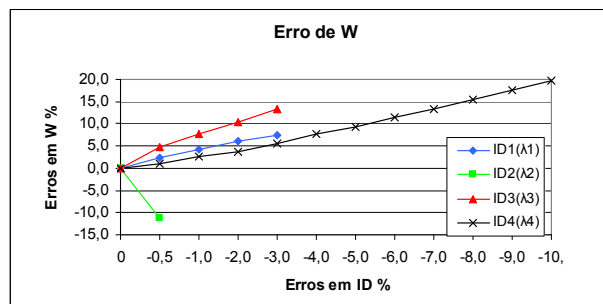
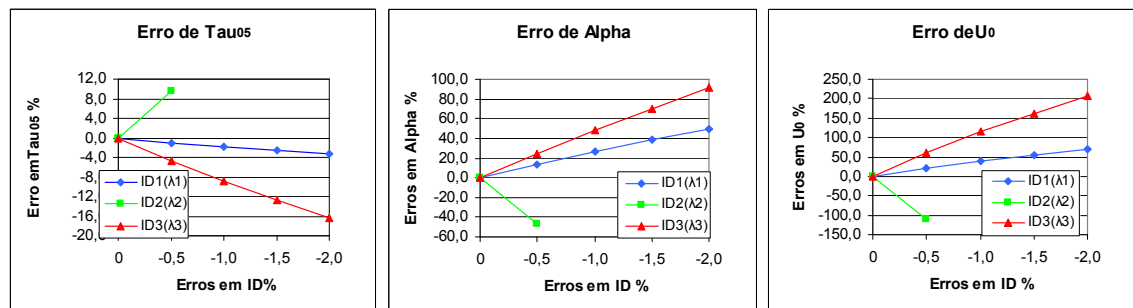


Fig. 2 : Evolução dos erros na determinação dos parâmetros em função do erro de cada LED

Na Fig. 2, encontram-se os gráficos das curvas de erros para os parâmetros calculados em função do erro inserido separadamente para cada um dos valores de radiação direta Id_1 , Id_2 , Id_3 e Id_4 referentes aos

comprimentos de onda λ_1 , λ_2 , λ_3 e λ_4 , respectivamente. Para a confecção destes gráficos, variou-se o erro em cada uma das radiações diretas mantendo as demais com erro nulo. Desta forma, avalia-se o impacto do erro de cada radiação direta em separado sobre os parâmetros calculados.

Os gráficos acima mostram que quando os valores de I_{d1} , I_{d2} , I_{d3} e I_{d4} apresentam erros evoluindo independentemente o reflexo nos erros de W , u_0 , α e $\tau_{0,5}$ são muito altos. Em (b) observa-se que um erro de 0,5% em I_{d1} ou em I_{d2} ou em I_{d3} o erro em α é de aproximadamente 14%, 25% e -45%, respectivamente. Em (c) o erro chega a -100% para o mesmo erro de I_{d2} .

Quando os erros dos LEDs, particularmente I_{d1} , I_{d2} e I_{d3} , são da mesma ordem, acontece uma diminuição da sensibilidade do algoritmo a estes erros. O gráfico seguinte ilustra esse fato. Neste, os erros das radiações diretas são iguais, variando de 0% até 10%. Neste caso, os erros de W , u_0 , α e $\tau_{0,5}$. Ficam da mesma ordem do que os erros nas intensidades. Para erros de, por exemplo, 3,0% nas radiações, os erros de W , U_0 , α e $\tau_{0,5}$ são respectivamente em torno de 3,0%, 12%, 8,0 e 12% respectivamente.

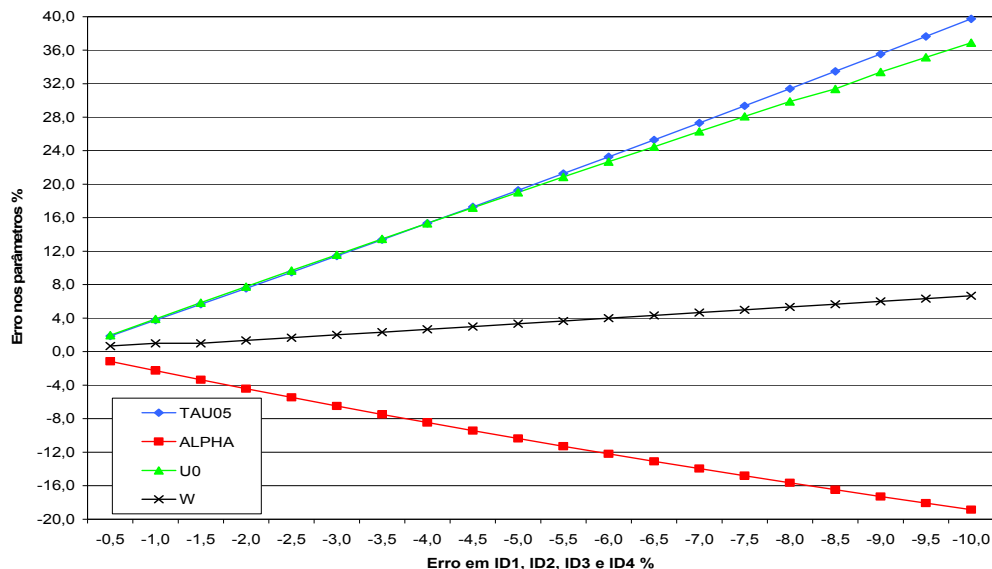


Fig. 3 : Evolução dos erros na determinação dos parâmetros em função de erros idênticos para os 4 LEDs

Após os testes descritos acima, o programa foi testado com espectros de LEDs reais. Foram usados dois conjuntos de LEDs (conjunto n°1 e n°2) compostos cada um de LEDs azul, vermelho, verde e infravermelho (o n°2 possui também um quinto LED amarelo, mas esse não foi levado em conta por ser muito próximo do verde e do vermelho) e uma mistura dos dois (n°3). O espectro de cada LED é lido e convoluido (integrado após ter sido multiplicado pelo espectro solar de radiação direta) e, após ser dividido pela sua sensibilidade (integral do espectro do LED), fornece o sinal de radiação direta usado na inversão.

Cada sinal calculado com o espectro de um LED é comparado com o sinal dado por um sensor ideal, (o mesmo considerado nos testes acima) e os erros são estimados, como mostra a tabela abaixo

Tabela 2: Avaliação dos erros com os LEDs reais

	λ (nm)	Sensor Ideal (W/m ²)	n°1		n°2		n°3		Entra da	n°3		
			(W/m ²)	Erro (%)	(W/m ²)	Erro (%)	(W/m ²)	Erro (%)		Saida	Erro (%)	
Id1	430	925	1002	8,32%	868	-6,16%	868	-6,16%	TAU05	0,250	0,257	2,80%
Id2	540	1374	1334	-2,91%	1284	-6,55%	1334	-2,91%	ALPHA	1,300	2,4	84,62%
Id3	610	1327	1284	-3,24%	1003	-24,42%	1284	-3,24%	U0	0,344	0,902	162,21%
Id4	925	577	701	21,49%	575	-0,35%	575	-0,35%	W	3,000	4,23	41,00%

Verifica-se então, que nos três arranjos de LEDs, apesar do erro no sinal de entrada em comparação com os LEDs ideais não ser muito elevado (geralmente menores que 10%), o erro no cálculo de W , u_0 , α e $\tau_{0,5}$ é bastante alto, chegando até 162% (ozônio). Este fato pode ser explicado pelos testes anteriores: os erros nos dados de saída da inversão serão altos caso os erros nos dados de entrada divergirem, mesmo que estes erros sejam pequenos.

Observou-se que o LED azul centrado em 430 nm está situado numa queda brusca nos valores de radiação extraterrestre (H_0). Esse fato faz com que o sinal do LED azul seria o único a apresentar um erro positivo, ou seja, pelo fato do espectro do LED ter uma certa largura, ele leva em conta as contribuições dos comprimentos de onda próximos que estão mais intensas que no valor do pico, centrado num mínimo local. Desta forma, foi concluído que seria interessante substituí-lo por um LED azul centrado em 440 nm.

Com estes resultados, conclui-se que os conjuntos de LEDs disponíveis não atendem perfeitamente as condições de precisão necessárias para a inversão. Novos LEDs poderão ser propostos para atender as necessidades.

No intuito de investigar o melhor conjunto de LEDs para a utilização do algoritmo de inversão, novas funcionalidades foram propostas. O programa passou a contar com a possibilidade de simular espectros de LEDs reais com o uso de uma função gaussiana. Este procedimento é totalmente válido já que o sinal de um LED real se aproxima muito bem deste tipo de curva. Com isso, ganhou-se a possibilidade de testar vários possíveis LEDs de pico e largura diferentes dos utilizados até o momento. Foram idealizados três conjuntos de LEDs modelizados, cujos comprimentos de onda são do conjunto $n^{\circ}3$, salvo o LED azul que foi colocado em 440 nm pela razão indicada acima. Diminui-se progressivamente a largura espectral dos LEDs, o terceiro conjunto sendo o mais seletivo.

A tabela 3 mostra como a precisão dos LEDs melhora quando a largura diminui, com a exceção do LED infravermelho que mesmo com largura maior fica bem ajustado a banda de absorção da água.

Tabela 3 – Avaliação dos erros dos LEDs modelizados comparado a um sensor ideal

	λ (nm)	Sensor Ideal (W/m ²)	Modelizados 1			Modelizados 2			Modelizados 3		
			Largura (nm)	Inten. (W/m ²)	Erro (%)	Largura (nm)	Inten. (W/m ²)	Erro (%)	Largura (nm)	Inten. (W/m ²)	Erro (%)
Id1	440	1108	70	1077	-2,80%	54	1095	-1,17%	10	1105	-0,27%
Id2	540	1374	80	1342	-2,33%	41	1357	-1,24%	17	1371	-0,22%
Id3	610	1327	100	1298	-2,19%	57	1311	-1,21%	18	1324	-0,23%
Id4	925	577	90	575	-0,35%	87	571	-1,04%	90	575	-0,35%

A Tabela 4 mostra como com a utilização de LEDs mais seletivos é possível reduzir de maneira significativa o erro do algoritmo de inversão.

Tabela 4 – Avaliação dos erros da inversão com os LEDs modelizados

	Entrada	Modelizados 1		Modelizados 2		Modelizados 3	
		Saída	Erro (%)	Saída	Erro (%)	Saída	Erro (%)
TAU05	0,250	0,273	9,20%	0,261	4,40%	0,252	0,80%
ALPHA	1,300	1,313	1,00%	1,265	-2,69%	1,297	-0,23%
U0	0,344	0,378	9,88%	0,359	4,36%	0,348	1,16%
W	3,000	2,87	-4,33%	3,050	1,67%	3,030	1,00%

Essa análise mostra algumas exigências de construção de um radiômetro de LEDs:

(1) A necessidade de um sistema de colocação periódica de um anel de sombreamento de maneira a tirar as intensidades de radiação direta a partir da medida da radiação total menos a radiação difusa.

(2) A necessidade de conhecer a resposta absoluta dos sensores, isto é de determinar o coeficiente de proporcionalidade entre o sinal elétrico medido e a intensidade de radiação incidente na faixa de comprimento de onda de sensibilidade do sensor.

(3) A necessidade de escolher os comprimentos de onda e largura de maneira a reduzir a propagação de erro. No entanto, foi verificado que é possível tolerar erros similares em todos os LEDs.

Em conclusão, a propagação de erros de um algoritmo de inversão de sinais oriundos de um radiômetro de LEDs foi estudada através da variação do desvio do sinal de cada LED relativo a um LED idealmente calibrado (isto é dando o valor exato da radiação). A influência da largura espectral de cada LED também foi investigada. Finalmente, as conseqüências sobre a especificação de um radiômetro de LEDs são indicadas. Conclui-se que um conjunto de LEDs disponíveis comercialmente, com sensibilidade no azul, no verde, no vermelho e no próximo infravermelho, pode constituir um instrumento eficiente e barato.

REFRÊNCIAS

- Anderson, G.P., Kneizys, F.X., Chetwynd, J.H., Wang, J., Hoke, M.L., Rothman, L.S., Kimball, L.M., McClatchey, R.A., Shettle, E.P., Clough, S.A., Gallery, W.O., Abreu, L.W., Selby, J.E.A., 1995, FASCODE / MODTRAN / LOWTRAN: Past / Present / Future, 18th Annual Review Conference on Atmospheric Transmission Models.
- Angstrom, A., 1961, "Technique of Determining the Turbidity of the Atmosphere," Tellus, Vol. 13, pp. 214-231.
- 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.
- Fröhlich, C., and C. Wehrli, 1981, World Radiation Center, Davos, Switzerland, magnetic tape received by personal communication.
- Guerreiro J. S. R., David D. G. F., Soares A. E. B. A., Lemaire T. J., 2010. Radiômetro de LEDs, aceito no III CBENS
- Haag R., Krenzinger A., 2007. Determinação do espectro solar através de um radiômetro espectral utilizando diodos emissores de luz (LEDs) como sensores seletivos, 1^o Congresso Brasileiro de Energia Solar, Fortaleza.
- Iqbal, M., 1983. An Introduction to Solar Radiation. Academic Press.
- 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., 1992. Sun Photometer With Light-Emitting-Diodes as Spectrally Selective Detectors. Applied Optics, vol. 31, no 33, pp. 6965-6967.
- Neckel, H., and D. Labs, 1981, "Improved Data of Solar Spectral Irradiance from 0.33 to 1.25 μm ," Solar Phys., Vol. 74, pp. 231-249.
- Soares A. E. B. A., Guedes G. P., David D. G. F., 2007. Medida da intensidade solar durante 3 anos em Feira de Santana, 1^o Congresso Brasileiro de Energia Solar, Fortaleza.
- Spencer, J. W., 1971. "Fourier Series Representation of the Position of the Sun," Search, vol. 2, p. 172.

INVERSION ALGORITHM FOR THE DETERMINATION OF THE CONCENTRATION OF ABSORVENTS AND AEROSOLS IN THE ATMOSPHERE FROM A LED RADIOMETER

Abstract. *This work consists in the study of an inversion algorithm for the determination of the concentrations of water vapor, ozone and aerosols present in the atmosphere from the signals of a LED radiometer. This algorithm is based on the use of the solar emittance model Spectral2 by R. Bird e C. Riordan. It uses the signals produced by four LEDs working as photodiodes, with sensitivities centered at different wavelengths. The accuracy of the algorithm and its dependence on the chosen wavelengths are discussed. It is shown that a set of commercial LEDs, with sensitivity in the blue, green, red and near-infrared, can constitute a cheap and efficient instrument.*

Key words: *Solar Radiation, Molecular and Aerosol Scattering, Absorption, Spectroscopy, Light Emitting Diodes*