CONSTRUÇÃO DE UM ESPECTRO-RADIÔMETRO PARA A ANÁLISE DA RADIAÇÃO SOLAR

Denis Gilbert Francis David – denis.david@uol.com.br
Victor Mancir da Silva Santana – vmancirss@hotmail.com
Universidade Federal da Bahia, Instituto de Fisica

Resumo. *Este trabalho apresenta a descrição de um espectro-radiômetro desenvolvido para a análise da radiação solar na faixa de 0,4 µm a 1,55 µm. Com esse instrumento, será possível investigar a influência dos diversos constituintes da atmosfera sobre a intensidade da radiação solar alcançando o solo. Isso é muito importante na medida em que o desempenho de um sistema de conversão de energia solar (conversão fotovoltaica ou conversão térmica) depende diretamente da composição espectral da radiação solar.*

Palavras-chave: *Energia Solar, Espectroscopia, Radiometria, Instrumentação*

1. INTRODUÇÃO

O Sol, a estrela mais próxima da Terra, fornece luz e calor para o nosso planeta. A emissão desta energia, produzida pela fusão termonuclear dos elementos que o constitui (basicamente hidrogênio e hélio), tem o comportamento típico de um corpo negro à temperatura de 5760 K (Cometta 1978). A Figura 1 (segundo Palz 1981) ilustra o espectro da luz solar que chega à superfície da Terra (curva superior).

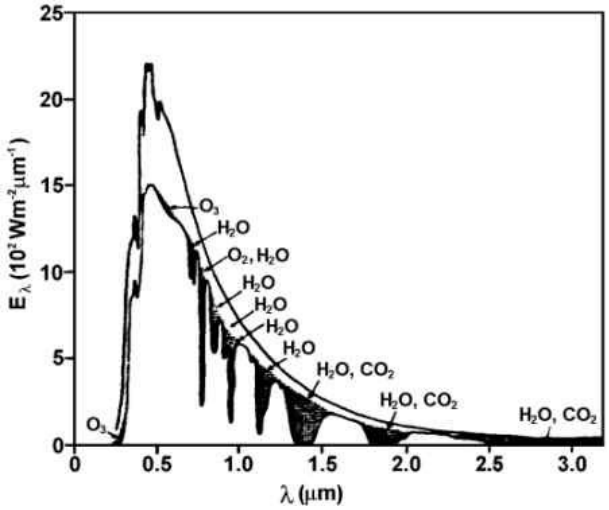

Figura 1 - Espectro da radiação solar na superfície da Terra

Por causa da absorção da luz pelos gases compondo a atmosfera como a água, o anidrido carbônico, o oxigênio, o ozônio e o óxido nitroso, entre outros, o espectro da radiação solar chegando ao solo fica atenuado em certas regiões espectrais (curva inferior).

A Figura 2 mostra esses coeficientes de absorção na faixa do ultravioleta até o infravermelho para essas componentes. Comparando o espectro solar fora a atmosfera (Figura 1) que se estende de 0,3 µm até 2,5 µm com os espectros de absorção das componentes atmosféricas (Figura 2), observa-se o impacto desprezível do óxido nitroso, e reduzido do oxigênio, do ozônio e do gás carbônico no infravermelho próximo, que é dominado pela absorção pela água. No visível, os principais absorvedores são o oxigênio e o ozônio.

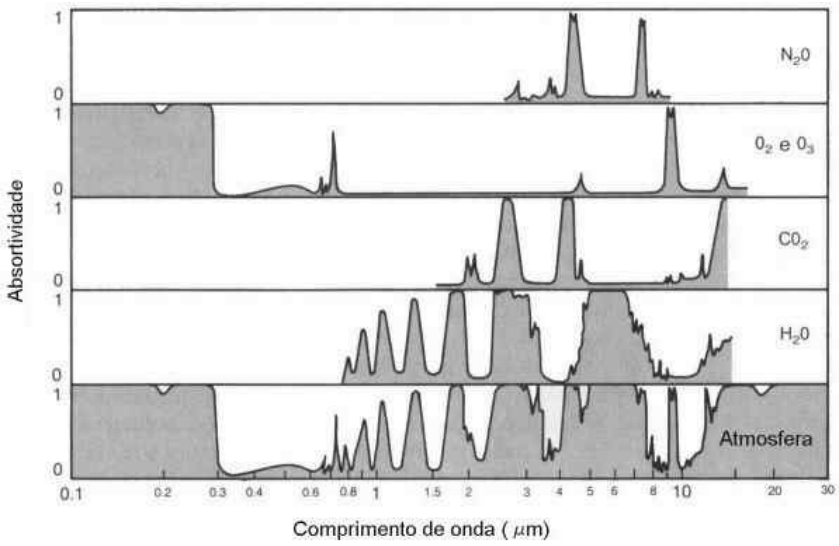

Figura 2 - Absorção da radiação incidente na Terra por alguns gases da atmosfera

Além da absorção pelos gases, existe também um espalhamento seja pelas moléculas (oxigênio e ou nitrogênio), ou pelos aerossóis, ou ainda pelas nuvens. O espalhamento molecular, chamado de difusão de Rayleigh, acontece principalmente no azul que segue uma lei em $1/\lambda^4$ (Ricaud 1997). O espalhamento pelos aerossóis depende da natureza dos aerossóis, particularmente do tamanho dessas partículas, e obedece à lei de Mie (Equer 1993). Enfim, as nuvens são responsáveis por uma forte reflexão que se caracteriza por um albedo muito elevado.

Com sua faixa de sensibilidade indo de 0,4 µm até 1,55 µm, o espectro-radiômetro desenvolvido nesse trabalho é particularmente bem adaptado para detectar a influência de cada uma das componentes atmosféricas mais importantes. As perspectivas oferecidas pelo uso do espectro-radiômetro são grandes. Em primeiro lugar, é de ter acesso a um melhor conhecimento da composição da atmosfera (vapor de água, aerossóis, etc.). Em segundo lugar, é de caracterizar melhor a radiação solar incidente de maneira a otimizar os sistemas de conversão térmica ou fotovoltaica. Outra possibilidade é de realizar a calibração de radiômetros espectrais mais baratos e mais práticos que são os radiômetros de LEDs. Compostos tipicamente por quatro LEDs, um azul, um verde, um vermelho e um no próximo infravermelho, esses instrumentos poderiam generalizar a análise multi-espectral da radiação solar por um custo razoável. Com a utilização do espectro-radiômetro, o desenvolvimento desse tipo de radiômetro será bastante facilitado.

2. DESENVOLVIMENTO DO ESPECTRO-RADIÔMETRO

2.1. Especificações Gerais

O primeiro ponto que orientou o projeto foi a escolha do detector. Como a radiação solar se encontra principalmente na faixa de 0,3 µm a 2,5 µm, o detector ideal deveria ter essa faixa de sensibilidade espectral. Dentre os sensores conhecidos, têm o silício que detecta até 1,1 µm e o germânio que detecta até 1,8 µm (Fraden 1996). Existem detectores de banda espectral maior como o InGaAs (até 2 µm) ou o PbS (1 a 3,2 µm), mas eles são de custo maior e precisam eventualmente de resfriamento (Hamamatsu 2001). Com sua sensibilidade até 1,8 µm, o germânio tem finalmente uma resposta bem interessante na medida em que ele oferece uma boa detectividade do visível (detecção da difusão pelas moléculas e pelos aerossóis) até o próximo infravermelho (detecção da absorção pela água). Finalmente, identificou-se a possibilidade de realizar esse detector com transistores antigos de germânio, como o OC74 que, graças a seu invólucro de plástico transparente, pode ser transformado em um sensor retirando a camada de pintura preta que o protege da radiação.

O segundo ponto considerado foi o da resolução espectral do monocromador. Uma resolução da ordem de 20 nm parece ser muito suficiente para evidenciar as bandas de absorção da água que tem uma largura característica de 50 a 100 nm. Com isso, é importante escolher um elemento dispersor que favorece a captação da maior quantidade de luz possível. Para isso, foi escolhida a solução de uma rede de difração de 5x5cm² com 600 traços/mm.

O terceiro ponto foi o da determinação do campo óptico do instrumento. Por enquanto, a idéia é de analisar a luz espalhada ou, em outras palavras, a radiação indireta. A solução escolhida foi acoplar o braço colimador de entrada do monocromador a um espelho plano inclinável que permite definir a direção de observação da radiação. O ângulo de abertura desse campo óptico é da ordem de 15 mrd.

O quarto ponto diz respeito à possibilidade de varrer de maneira periódica o espectro. Para isso, é necessário controlar através de uma lei rigorosa o ângulo de rotação da rede de difração. Após o estudo de várias soluções mecânicas, foi escolhida a solução de um parafuso girado por um motor de passo, e agindo sobre um braço solidário da base da rede. Com essa solução, é possível orientar a rede com precisão e de maneira reprodutível.

O último ponto é relacionado ao processo de controle do instrumento e de armazenamento das medidas. A opção escolhida foi utilizar um computador de tipo PC para controlar tanto o motor de passo, quanto o conversor analógico digital através da porta paralela.

2.2. Montagem Óptica

A montagem óptica é dada pela Figura 3:

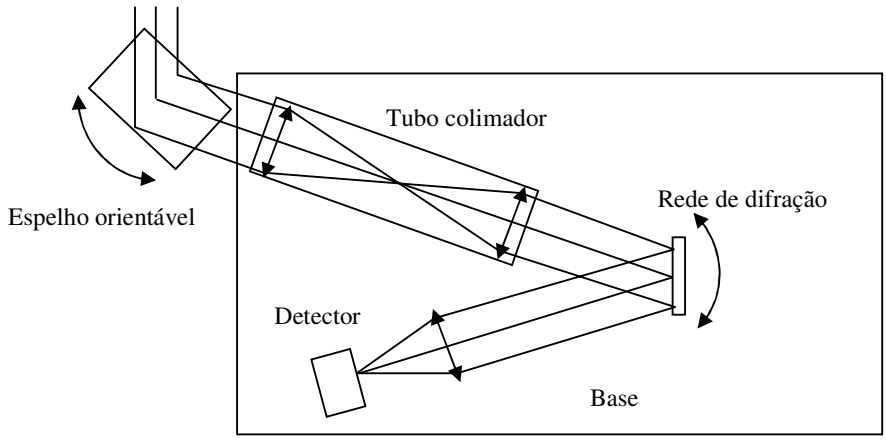

Figura 3 – Montagem óptica

A radiação solar, ao atingir a rede, é difratada e separada em suas componentes. A relação entre o ângulo da rede e o comprimento de onda é:

$$\delta.\sin\theta \approx k.\lambda \qquad (1)$$

onde δ (m) é o passo de gravação da rede, θ (rd) o ângulo de incidência da luz sobre a rede, k a ordem de difração considerada e λ (m) o comprimento de onda. A resolução do monocromador $\delta\lambda$ pode ser avaliada a partir da lei de dispersão da rede de difração:

$$\frac{d\lambda}{d\theta} \approx \frac{\delta}{k} \qquad (2)$$

Mas, como o ângulo mínimo com que a rede é vista é dado pela razão da largura dx da área sensível do detector (m) e da distância focal da lente (m):

$$d\theta = \frac{dx}{f_0} \qquad (3)$$

acha-se a resolução:

$$d\lambda = \frac{\delta}{k}.\frac{dx}{f_0} \qquad (4)$$

Com δ = 1 / 600 mm, dx = 1 mm e f_0 = 70 mm, acha-se:

$$d\lambda = \delta.dx / f_0 \approx 25 \text{ nm} \qquad (5)$$

Praticamente, a lente é uma associação de duas lentes plano-convexas formando uma abertura de 60 mm de diâmetro, compatível com as dimensões da rede. A altura do eixo óptico é de 57,0 mm acima da base do espectro-radiômetro. O alinhamento fino do feixe no detector (convergência, altura e largura) se faz ao nível do detector que possui três graus de liberdade.

2.3. Montagem mecânica

O papel principal da mecânica é garantir a rotação precisa e reprodutível da rede de difração. A rede de difração é fixada em uma base girante quadrada, de 58 mm de lado, montada em um eixo vertical composto de dois rolamentos. Muito cuidado foi tomado para garantir que o eixo de rotação coincidisse com a mediana do plano da rede. Essa base girante se prolonga por um braço de 19 mm atravessado, na sua extremidade livre, por um parafuso horizontal (ver Figura 4). Esse parafuso é acoplado a um motor de passo.

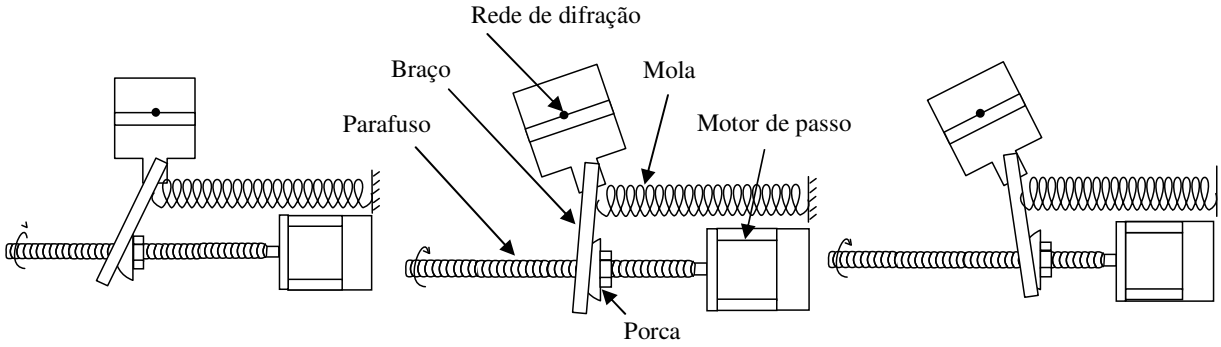

Figura 4 - Movimento do parafuso que provoca o arraste do braço

O acoplamento é feito através de uma porca de perfil semi-cilíndrico de maneira a poder compensar a lei em seno que a extremidade livre do braço segue, relativamente ao parafuso. Além da porca semi-cilíndrica, uma abertura oblonga foi feita no braço e uma mola mantém sempre o contato entre a porca e o braço, de maneira a anular a folga.

Existe então uma relação entre o número de passos do motor e o ângulo de orientação da rede:

$$x = P.(N_{passo} / N_{motor}) = d.sen(\alpha) \quad (6)$$

onde x (m) é a posição da porca no parafuso, P o passo do parafuso, N_{passo} o número de passo efetuado pelo motor, N_{motor} o número de passo do motor por giro, d (m) a distância do eixo de rotação da rede até o parafuso e α (rd) o ângulo da rede. Existe também uma relação entre o comprimento de onda selecionado pela rede e sua orientação:

$$k.\lambda = 2.\delta.\sin(\alpha).\cos(\alpha_0) \quad (7)$$

onde k é a ordem do espectro considerado (geralmente, k = 1), λ (m) o comprimento de onda, δ (m) a distância entre dois traços da rede e α_0 o ângulo constante entre os eixos ópticos definidos pelas lentes. Deduz-se uma relação linear entre o número de passos do motor e o comprimento de onda:

$$k.\lambda = 2.(\delta/d).\ P.(N_{passo}/N_{motor}).\cos(\alpha_0) \quad (8)$$

Na montagem realizada, δ é igual a 1/600 mm, d é igual a 50 mm, P é igual a 0,75 mm, N_{motor} é igual a 24 e α_0 é igual a 30°. Obtém-se então a relação entre $k.\lambda$ e N_{passo}:

$$k.\lambda = 1{,}8.N_{passo} \text{ (em nm)} \quad (9)$$

É exatamente a relação desejada. Com mil passos será possível fazer um espectro completo até 1,8 µm na ordem 1.

2.4. Eletrônica

A eletrônica tem um papel importante na automação do instrumento. Ela permite controlar o motor de passo, adaptar o sinal fotoelétrico do sensor e transformar esse sinal analógico em um sinal digital. Finalmente, obtém-se um interfaceamento completo com um computador de tipo PC, através da porta paralela (Zelenovsky 2000).

O motor de passo é controlado por um PC via porta paralela por meio de uma interface de transistores. O circuito utilizado é mostrado na Figura 5.

Cada pólo do motor de passo é alimentado de maneira cíclica através da comutação de cada transistor pelo programa descrito mais adiante. Os quatro pólos, alimentados sucessivamente, provocam a rotação do motor.

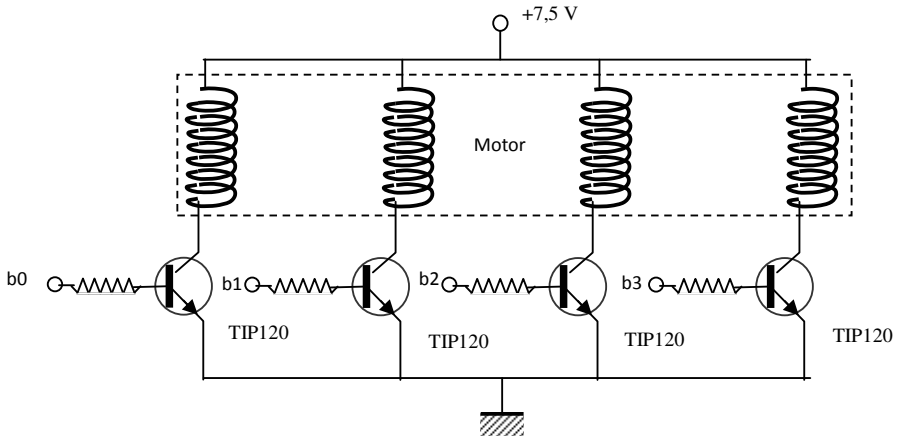

Figura 5 - Circuito de controle do motor de passo

A corrente fotoelétrica gerada pela radiação solar no foto-transistor de germânio precisa ser amplificada. É necessário também compensar uma tensão de offset devida à corrente de fuga do transistor (Horowitz 1989). Essa amplificação de corrente e compensação de offset são realizadas pela montagem descrita na Figura 6.

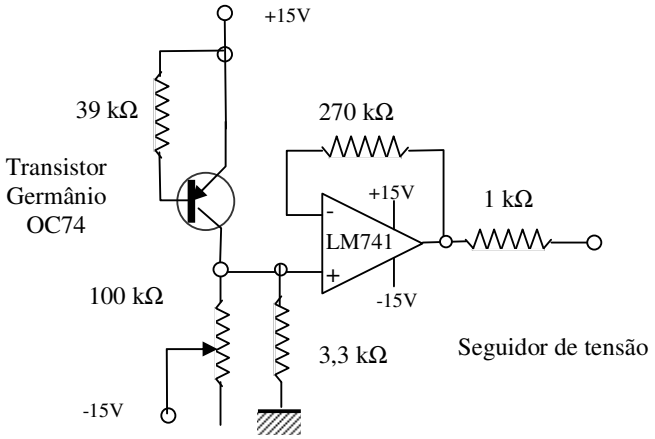

Figura 6 - Pré-amplificador para foto-transistor de germânio

O sinal do detector é finalmente convertido em um sinal digital através de um conversor analógico-digital serial de 8 bits, interfaceado também com o PC através da porta paralela (ver Figura 7).

2.5. Controle da varredura e aquisição de espectros

O esquema seguinte na Figura 7 descreve a organização geral do interfaceamento obtido. Ela segue os conceitos expostos por Axelson (1996).

O programa do espectro-radiômetro que foi desenvolvido permite o controle da varredura do espectro através do comando do motor de passo e a aquisição da intensidade solar através do controle do ADC. Além disso, o programa visualiza os espectros na tela do computador e salva os dados no disco rígido.

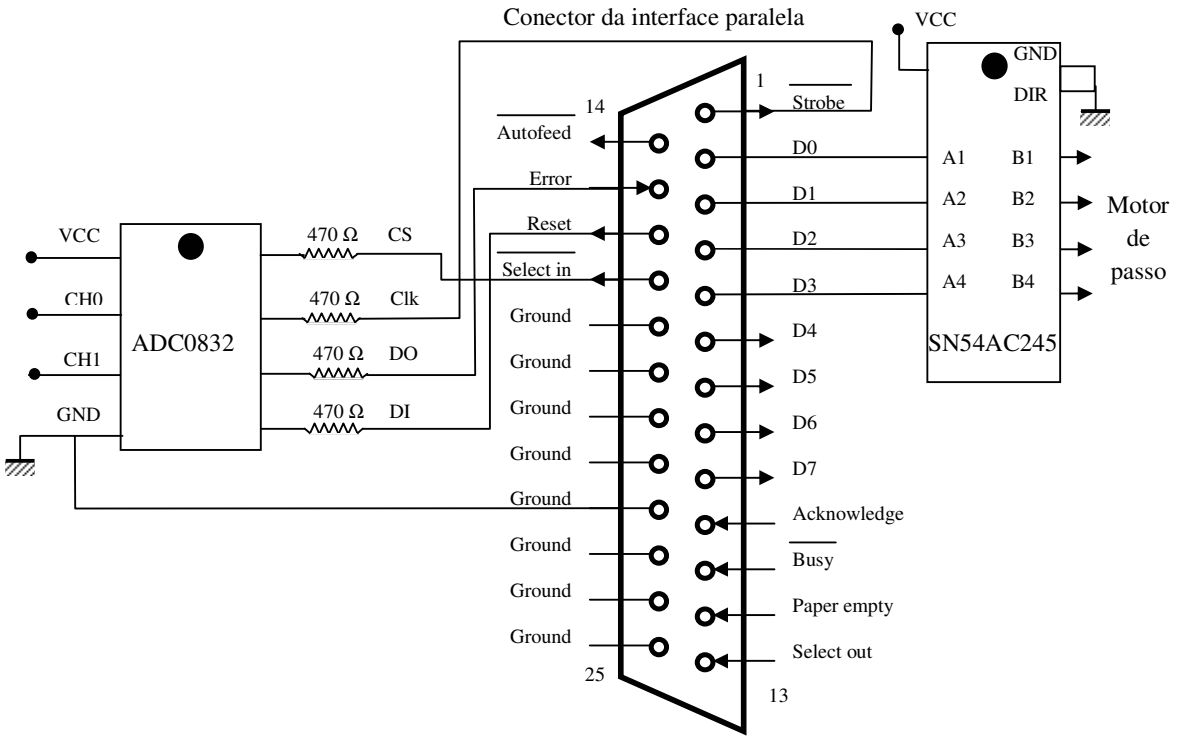

Figura 7 – Interfaceamento com a porta paralela

A determinação do comprimento de onda se faz utilizando a relação que existe entre o ângulo da rede de difração e o comprimento de onda (ver 2.3. Montagem mecânica). Esse ângulo é controlado pelo número de passos executados pelo motor de passo e a rotação do parafuso deslocando o braço da rede. O ciclo elementar para o motor de passo é composto de quatro passos que alimentam sucessivamente as bobinas.

A fim de adquirir espectros durante o dia inteiro, o programa repete essa varredura entre 0,4 µm e 1,8 µm de maneira cíclica. O tempo típico de uma varredura é de 1 minuto.

O ADC é controlado a cada passo de leitura do espectro, através do envio de um clock composto 20 pulsos que permitem a conversão do sinal analógico em um sinal digital de 8 bits (256 níveis). É prevista a substituição desse ADC por um modelo de maior resolução (12 bits). Atualmente cada espectro é composto de 1000 pontos, ou seja, 1 kbyte.

3. RESULTADOS

O espectro-radiômetro ainda não foi testado em campo, mas já foi testado extensivamente no laboratório. A sensibilidade do espectro-radiômetro foi avaliada a partir da intensidade irradiada pela lâmpada incandescente de 200 W, colocada a 1,5 m do colimador do espectro-radiômetro (intensidade incidente total ≈ 7 W/m²). Um espectro típico é dado na Figura 8. Observa-se que a faixa de sensibilidade útil do sensor se estende de 0,4 µm a 1,55 µm, valor abaixo do limite previsto de 1,8 µm. A temperatura de filamento da lâmpada foi avaliada a partir da posição do máximo de intensidade no espectro (0,8 µm) em 3500 K.

A intensidade espectral da lâmpada foi obtida assumindo a lei de emissão de Planck-Einstein a T = 3500 K. A sensibilidade espectral do espectro-radiômetro foi obtida dividindo o sinal medido por essa intensidade espectral. O resultado aparece na Figura 8. Encontrou-se a variação esperada, com um crescimento da sensibilidade de 0,3 µm a 1,25 µm, seguido por uma queda quase exponencial até 1,8 µm (Fraden 1996). O comportamento irregular de 0,8 a 1,25 µm é o resultado da forte variação da eficiência da rede por causa dos efeitos de polarização, formando um pico em 1,25 µm (Palmer 2005). Enfim, a sensibilidade em 1,8 µm não tende para zero, em conseqüência da aparição da segunda ordem nessa região (pico em 0,8 µm).

A sensibilidade média é de 0,5 V.m².µm/W, o que atende à proposta de medida da radiação difusa. O ruído gerado pelo sensor (100 mV em 0,8 µm) determina a incerteza sobre essa medida. Ela é da ordem de 0,15 W/m²/µm.

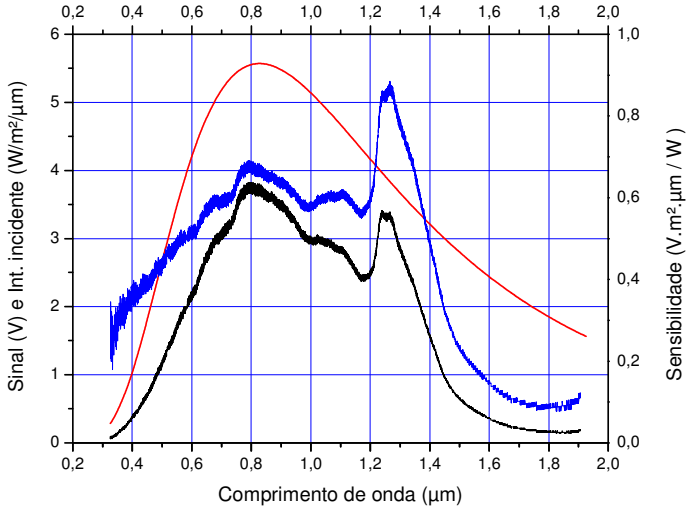

Figura 8 – Espectro de uma lâmpada incandescente (preto)
Intensidade incidente (vermelho) e Sensibilidade espectral (azul)

Espectros da mesma fonte foram também realizados colocando filtros interferenciais na frente do sensor. Assim, foi possível verificar a linearidade e a resolução oferecidas pelo instrumento. Esses filtros interferenciais têm uma largura média de 10 nm e vão de 0,5 µm a 1,6 µm. Espectros foram feitos, em intervalos de 0,2 µm, de maneira a poder-se medir com precisão a posição de cada linha e o seu alargamento pelo espectro-radiômetro. Além disso, foi medida a amplitude do sinal e procurado o aparecimento eventual de uma segunda ordem. Precauções foram tomadas para posicionar com a maior precisão possível a ordem zero da rede com a origem do comprimento de onda. A Tabela 1 dá a síntese dos resultados da calibração.

Tabela 1. Resultado da calibração em comprimento de onda do espectro-radiômetro.

λ filtro (nm)	**λ espectro (nm)**	**Largura (nm)**	**Amplitude (ua*)**
500	518	27	15,0
546	563	26	19,1
580	598	30	28,3
620	636	28	32,6
694	712	30	50,7
800	823	29	48,5
905	932	26	41,3
1064	1094	28	47,0
1200	1232	28	38,2
1400	1432	25	12,8
1500	1537	22	25,5
1600	1639	26	8,5

* ua = unidade arbitrária

Foi verificada a linearidade entre o comprimento de onda dos filtros e o comprimento de onda fornecido pelo programa de controle do espectro-radiômetro. O ajuste de uma reta aos pontos de comprimento de onda resultou em:

$$\lambda_{espectro} = \lambda_{filtro} \times 1{,}024 + 1 \qquad (10)$$

o que mostra que o programa do espectro-radiômetro superestima o comprimento de onda de 2,4% e que ainda existe uma pequena defasagem de 1 nm. A Figura 9 mostra que a resolução do espectro-radiômetro varia de 25 a 30 nm.

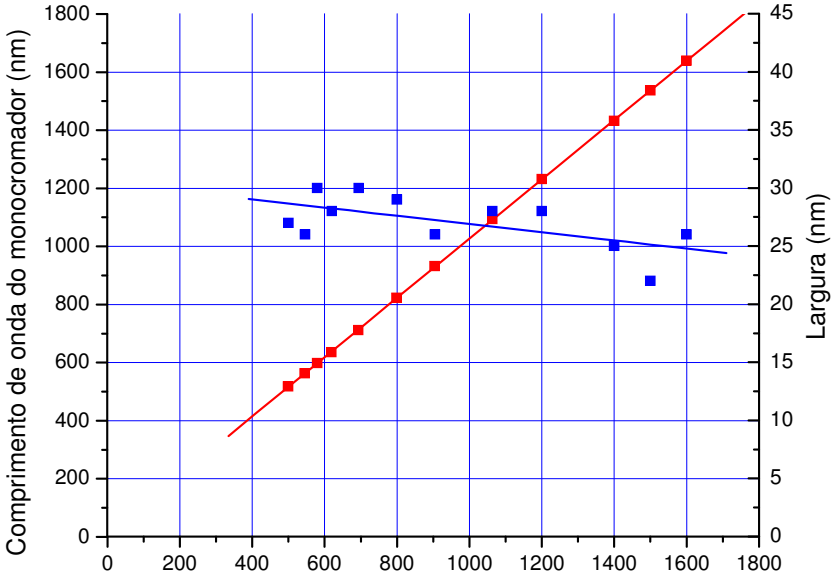

Figura 9 – Calibração em comprimento de onda do espectro-radiômetro
(em azul: largura; em vermelho: comprimento de onda)

4. CONCLUSÃO

Um espectro-radiômetro foi construído e testado no laboratório. Até agora, todas as dificuldades foram superadas. Esse aparelho foi construído por um custo razoável, utilizando basicamente os recursos próprios do Laboratório de Propriedades Ópticas, no Instituto de Física da UFBa. O sensor foi desenvolvido a partir de um transistor de germânio, oferecendo uma sensibilidade na faixa de 0,4 µm a 1,55 µm, suficiente para medir as concentrações de aerossóis e de vapor de água. A rede de difração de 600 traços/mm é uma rede padrão. A realização da eletrônica, do interfaceamento e da programação foi facilitada pela experiência adquirida no laboratório em termo de desenvolvimento de dispositivos de aquisição.

Evidentemente, a colocação do instrumento em campo é uma fase muita esperada que vá ser realizada a partir de agora. Com efeito, uma plataforma de medidas radiométricas está sendo construída no topo do prédio do Instituto de Física. Essa nova plataforma virá se adicionar à plataforma de medidas radiométricas desenvolvida pela mesma equipe no Laboratório de Energia Solar da UEFS (Soares 2007).

Agradecimentos

Esse trabalho foi parcialmente financiado pela Fundação de Apoio à Pesquisa do Estado da Bahia (FAPESB) através de uma bolsa de iniciação científica e do programa de infra-estrutura da FAPESB 2005.

REFERENCIAS

Axelson, J. **Parallel port complete: Programming, interfacing and using the PC's parallel printer port -** Madison, Lakeview Research, 1996.

Cometta, E. **Energia solar -** Hemus-Livraria Editora Ltda, 1978.

Equer, B. **Energie solaire photovoltaïque – Volume 1 -** Paris, Ellipses, 1993.

Fraden, J. **Handbook of modern sensors - Physics, Design and Applications -** 2nd edition, New-York, Springer Verlag, 1996.

Solid State Division, Hamamatsu. **Compound Semiconductor Photosensor -** Japan, 2001.

Horowitz, P. e Hill, W. **The art of electronics -** 2nd. edition., New York, Cambridge University Press, 1989.

Palmer, C. e Loewen, E. **Diffraction Grating Handbook -** 6th edition, Rochester, Newport Corporation, 2005

Palz, W. **Energia solar e fontes alternativas -** Hemus-Livraria Editora Ltda, 1981.

Ricaud, A. **Photopiles solaires -** Lauzanne, Presses polytechniques et universitaires romandes, 1997.

Soares, A. E. B. A., Guedes, G. P. e David, D. G. F. **Medida da Intensidade Solar durante 3 anos em Feira de Santana -** Fortaleza, I Congresso Brasileiro de Energia Solar, 2007

Zelenovsky, R. e Mendoça, A. **PC: um guia prático de hardware e de interfaceamento -** Rio de Janeiro, MZ Editora limitada, 2000.

Abstract. *This work presents a description of a spectral-radiometer developed for the analysis of the solar radiation in the range of 0.4 µm to 1.55 µm. With this instrument, it will be possible to investigate the influence of the various components of the atmosphere on the solar radiation yielding the ground. This is very important because the performances of solar systems, converting radiation into heat or into current, depend directly on the spectral composition of the incident solar radiation.*

Key words*: Solar Energy, Spectroscopy, Radiometry, Instrumentation*