

## Caracterização espectral parcial do sensor SISIMI

Cibele Teixeira Pinto<sup>1,2</sup>

Milena Lyra Silva<sup>1,2</sup>

Marcos Cavalcante de Melo<sup>1</sup>

Leidiane do Livramento Andrade<sup>1</sup>

Ruy Morgado de Castro<sup>1,2</sup>

{cibele, milena, cavalcante, leidiane.andrade, rmcastro}@ieav.cta.br

<sup>1</sup> Instituto de Estudos Avançados - IEAv/CTA, Caixa Postal 6044 - CEP 12231-970,  
São José dos Campos - SP, Brasil

<sup>2</sup> Universidade de Taubaté - UNITAU, Av. Marechal Deodoro, 605 - Jardim Sta. Clara –  
Cep: 12080-000, Taubaté - SP, Brasil

**Abstract:** The aim of this work was to develop a methodology to determine the Spectral Response Function (FRE) of electrooptical sensors. In this process, the FRE can be obtained identifying the sensor's sensibility to a flux of monochromatic light. To test the procedure a non-operational airborne sensor, the Thermal Infrared Imaging System (SISIMI), has been used in laboratory. This sensor is composed basically by an optical unity with: four faces rotating prism, a set of mirrors and a telescope, and a thermal infrared detector. The experimental arrangement included a Globar, as a source of thermal infrared radiation, a monochromator, a chopper, a lock-in amplifier and an oscilloscope. The procedure to determine the FRE consisted in changing gradually the wavelength of the projected beam, in the range of 4 to 15  $\mu\text{m}$ , with the modulated beam. Initially, the FRE of the detector of the SISIMI was obtained comparing its response with another detector, which has a well known FRE. Afterwards, due to its complexity, the FRE of some components of the optical system was characterized. Finally, the relative FRE of the sensor SISIMI was determined making the convolution and a normalization of the FRE's of the sensor detector and of part of the optical system. The result represents, essentially, the spectral response of the sensor detector.

**Palavras-chave:** spectral response function, thermal sensor, remote sensing, Função de Resposta Espectral, Sensor Termal, Sensoriamento Remoto

### 1. Introdução

Este trabalho teve como objetivo estudar e desenvolver uma metodologia para determinar a Função de Resposta Espectral (FRE) de sensores eletroópticos. Para testar esta metodologia foi utilizado como plataforma de testes um sensor imageador aerotransportado do Instituto de Estudos Avançados (IEAv), o SISIMI (SISTema IMageador Infravermelho terma), que não está operacional.

A FRE de um sistema sensor é de extrema importância para que as suas imagens sejam utilizadas quantitativamente, de forma a possibilitar a inferência de propriedades radiométricas do objeto de estudo. Mais especificamente, é da FRE que são obtidos os parâmetros de posicionamento e largura de cada banda do sensor, e para a sua determinação deve-se identificar a intensidade da resposta do sensor a um fluxo radiante, utilizando a técnica de varredura espectral com um feixe de radiação monocromática (obtida com o uso de um monocromador) projetado sobre a abertura do sensor.

O SISIMI foi desenvolvido no IEAv a partir de 1987 e trabalha na faixa espectral da região do infravermelho termal, compreendida entre 5 e 13  $\mu\text{m}$ . A unidade óptica, apresentada na Figura 1a, é composta basicamente por um prisma giratório de quatro faces, um conjunto de espelhos e um telescópio, cujo objetivo é focalizar a radiação eletromagnética em um detector de HgCdTe, Lucca e Bastos (2001). Mesmo tendo sido construído e estudado no passado o SISIMI não foi caracterizado espectralmente.

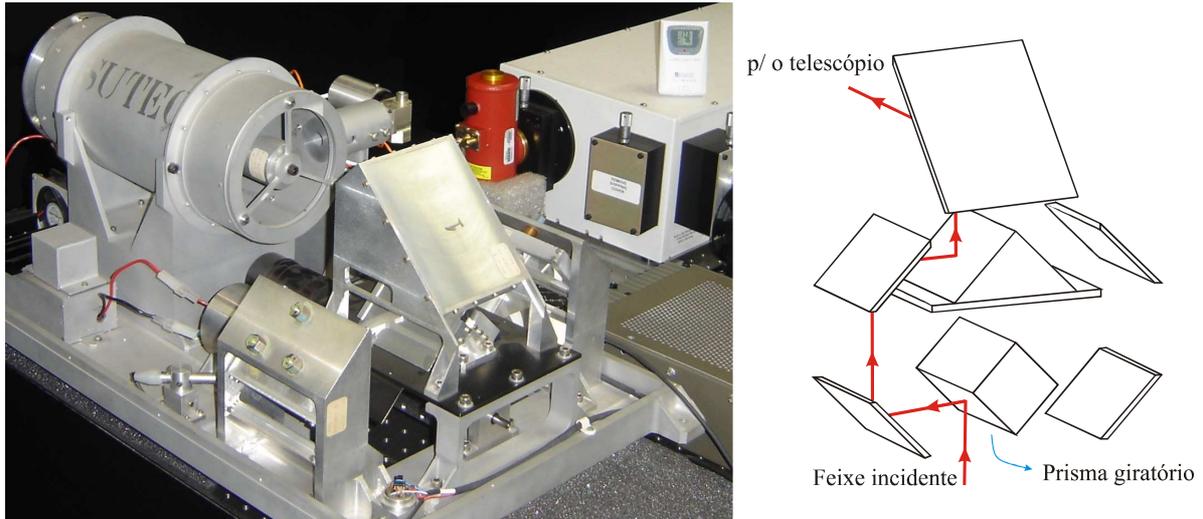


Figura 1: a) Sensor SISIMI próximo ao arranjo experimental e b) esquema da unidade óptica, com o feixe de radiação que incide na abertura do sensor focalizado em somente uma face do prisma.

## 2. Resposta de um Sensor

De uma maneira geral a resposta de um sensor pode ser descrita como a composição das respostas espectrais dos diversos componentes do sistema de medição, e das condições em que o experimento foi realizado. Assim, de forma simplificada, temos que o resultado de uma medição de um corpo à temperatura,  $T$ , é dado por:

$$Med(\lambda, T) = CN(\lambda, T) \cdot \varepsilon(\lambda, T) \cdot FRE_{Sist}(\lambda) \cdot FRE_{opt}(\lambda) \cdot FRE_{det}(\lambda) \cdot FRE_{CA}(\lambda, H, T_{Amb}, C_{gases}) \quad (1)$$

onde:  $Med(\lambda, T)$  corresponde ao valor medido de tensão, de um sistema em um determinado comprimento de onda,  $\lambda$ ;  $CN(\lambda, T)$  é a emissão espectral de um corpo negro a temperatura  $T$ ;  $\varepsilon(\lambda, T)$  é a emissividade do objeto, utilizado como fonte irradiante;  $FRE_{Sist}(\lambda, T)$  é a função de resposta espectral do sistema de medição;  $FRE_{opt}(\lambda)$  é a FRE do sistema óptico do Sensor;  $FRE_{det}(\lambda, T)$  é a FRE do detector utilizado; e finalmente  $FRE_{CA}(\lambda, H, T_{Amb}, C_{gases})$  é função de resposta espectral das condições em que o experimento foi realizado, dependendo principalmente da umidade relativa do ar,  $H$ , da temperatura ambiental,  $T_{Amb}$ , e da composição da atmosfera, particularmente influenciada pela concentração de determinados gases,  $C_{gases}$ , etc.

A FRE do detector de um Sensor é geralmente obtida a partir da curva de resposta fornecida pelo fabricante. Entretanto, como o detector do sensor SISIMI possui quase uma década de utilização, optou-se por determinar a sua resposta espectral por meio da comparação com um detector de referência, Judson (2007), cuja FRE fosse recente e melhor conhecida.

Portanto, realizando medições nas mesmas condições e utilizando o mesmo sistema de medição, podemos calcular a razão entre estas medições, obtendo a FRE do detector do SISIMI (relativa ao detector de referência), por:

$$FRE_{det\ SISIMI}(\lambda) = \frac{Med_{det\ SISIMI}(\lambda, T)}{Med_{det\ REF}(\lambda, T)} FRE_{det\ REF}(\lambda) \quad (2)$$

onde:  $FRE_{det\ SISIMI}$  é a FRE do detector do Sensor SISIMI;  $Med_{det\ SISIMI}(\lambda)$  e  $Med_{det\ REF}(\lambda)$  correspondem às medições realizadas com os detector do SISIMI e com o de referência, respectivamente; e  $FRE_{det\ REF}$  é a FRE do detector de referência.

Para uma melhor interpretação dos dados, a  $FRE_{det\ SISIMI}$  foi normalizada, possibilitando a comparação com a FRE fornecida pelo fabricante.

Uma vez caracterizado o detector, aproveitando o arranjo experimental, pôde-se realizar medições com o detector fora do sistema, posicionado na abertura de entrada do Sensor, e em sua posição original (passando pelo sistema óptico), de forma a obter o sinal de detecção com a sem a influência da óptica coletora. Em seguida, calculando-se a razão entre esses sinais, obteve-se a influência do sistema óptico do Sensor:

$$FRE_{opt}(\lambda) = \frac{Med_{det\ SISIMI\ original}(\lambda, T)}{Med_{det\ SISIMI\ abertura}(\lambda, T)} \quad (3)$$

onde:  $FRE_{opt}(\lambda)$  é a função de resposta espectral do sistema óptico;  $Med_{det\ SISIMI\ original}(\lambda, T)$  e  $Med_{det\ SISIMI\ abertura}(\lambda, T)$  correspondem, respectivamente, às medições realizadas com o detector do Sensor SISIMI na posição original, e deslocado para a abertura do Sensor, respectivamente.

Finalmente, procedendo à convolução da resposta do detector com a influência do sistema óptico do sensor, e a uma posterior normalização, obteve-se a FRE do sensor SISIMI,  $FRE_{Sensor\ SISIMI}(\lambda)$ :

$$FRE_{Sensor\ SISIMI}(\lambda) = FRE_{det\ SISIMI}(\lambda) \cdot FRE_{opt}(\lambda) \quad (4)$$

### 3. Descrição Experimental

O experimento foi realizado no Laboratório de Radiometria e Caracterização de Sensores Eletroópticos (LaRaC) do IEAv e pode ser dividido em duas partes. Primeiro, para comparar a resposta obtida com o detector do sensor SISIMI, numa faixa espectral de 4 a 15  $\mu\text{m}$ , com a resposta de um detector cuja FRE seja conhecida, foi utilizado o arranjo experimental de acordo com o esquema apresentado na Figura 2. Posteriormente, para estabelecermos a influência do sistema óptico do Sensor, o arranjo experimental sofreu pequenas modificações, onde o sensor SISIMI foi incluído no esquema em substituição ao par detector-amplificador.

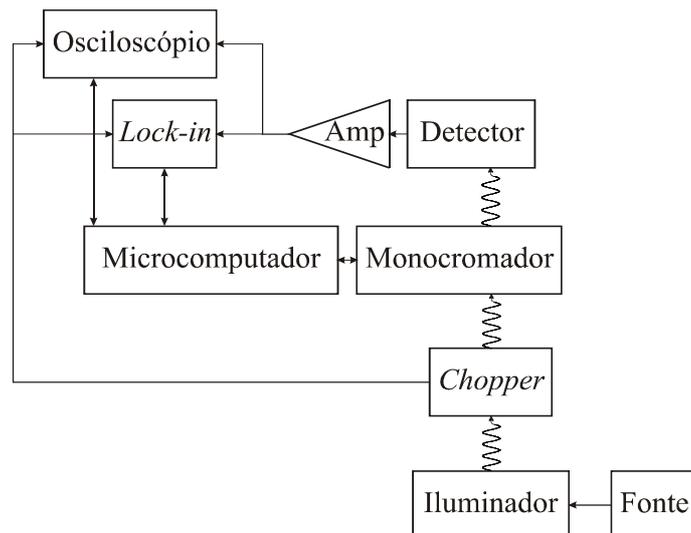


Figura 2: Diagrama esquemático do Arranjo Experimental. Neste arranjo, a radiação eletromagnética proveniente do corpo negro, posicionado dentro de um iluminador, é modulada em um *chopper* e incide no monocromador, que “seleciona” e projeta a radiação de um determinado comprimento de onda sobre o detector. Nas medições com Sensor, o detector e o amplificador são substituídos pelo SISIMI.

O arranjo experimental envolveu a utilização conjunta de: uma fonte de radiação, no caso uma “lâmpada” Global da Oriel (um tipo de barra incandescente, que fornece um sinal em uma ampla faixa espectral), alimentada por uma fonte de tensão Modelo 69931 da Spectra Physics, e colocada em um iluminador modelo 7040 da Oriel; um monocromador Spectra Pro 2500i da Acton Research, controlado por meio de uma interface USB; um *chopper* SR540 da Stanford Research Systems (SR); um amplificador *lock-in* SR510, também da SR, controlado por meio de uma interface GPIB; e um osciloscópio TDS2012 da Tektronix, também controlado por meio de uma interface GPIB. O detector de referência foi um J15D16 da Judson Technologies, Judson (2000).

Como os equipamentos utilizados no arranjo possuem funcionamento independente, foi preciso efetuar a integração destes por meio de um programa elaborado em LabVIEW por Pinto et al (2006). O programa realiza o controle automático da varredura do feixe monocromático do monocromador, dentro de um intervalo espectral pré-determinado pelo usuário, e solicita que sejam realizadas medições da tensão do sensor pelo amplificador *lock-in* e pelo osciloscópio. O programa apresenta graficamente o resultado da medição e registra em um arquivo os comprimentos de onda da radiação eletromagnética emergente do monocromador além das médias obtidas em medições de tensão realizadas pelo amplificador *lock-in* e pelo osciloscópio, para cada comprimento de onda.

Em todas as medições realizadas, o monocromador foi inicialmente ajustado para que fornecesse uma radiação eletromagnética de comprimento de onda de aproximadamente 7,5  $\mu\text{m}$ , correspondente ao valor de reposta máxima do detector do Sensor SISIMI associado à curva de emissão da “lâmpada” Global. No *chopper* foi selecionada uma frequência de 500 Hz e o sistema foi alinhado geometricamente para que fosse obtida a maior resposta no detector do SISIMI. Com isto, as configurações do osciloscópio e do *lock-in* foram ajustadas, de modo que não houvesse extrapolação dos valores nas medições.

Nas medições envolvendo o Sensor optou-se por realizar uma caracterização parcial do conjunto óptico, devido à complexidade do sistema óptico do Sensor, ver Figuras 1a e 1b. Assim, o motor do prisma giratório foi desabilitado, deixando o prisma estático durante as medições. Com isto o feixe de radiação que incide na abertura do sensor foi focalizado em somente uma face do prisma. Devido a este fato, somente alguns espelhos estavam no caminho óptico percorrido pela radiação eletromagnética até atingir o detector, em sua posição original. Para fins de alinhamento dos espelhos, principalmente o do prisma giratório, os ajustes foram realizados com um feixe de radiação eletromagnética na região do espectro visível. Já o ajuste fino foi realizado com a radiação na faixa do infravermelho termal, onde o espelho giratório foi posicionado para que o sinal obtido no detector fosse máximo.

#### 4. Resultados e discussão

A FRE do detector do SISIMI foi determinada a partir dos dados obtidos com as medições, utilizando-se a equação (1), e posteriormente normalizada para que o resultado pudesse ser comparado como a curva fornecida pelo fabricante, EG&G Optoelectronics (1999). O resultado obtido pode ser observado na Figura 3, com a qual observam-se tendências diretamente relacionadas entre a FRE medida neste trabalho e a fornecida pelo fabricante, mas comportamentos espectrais significativamente diferentes.

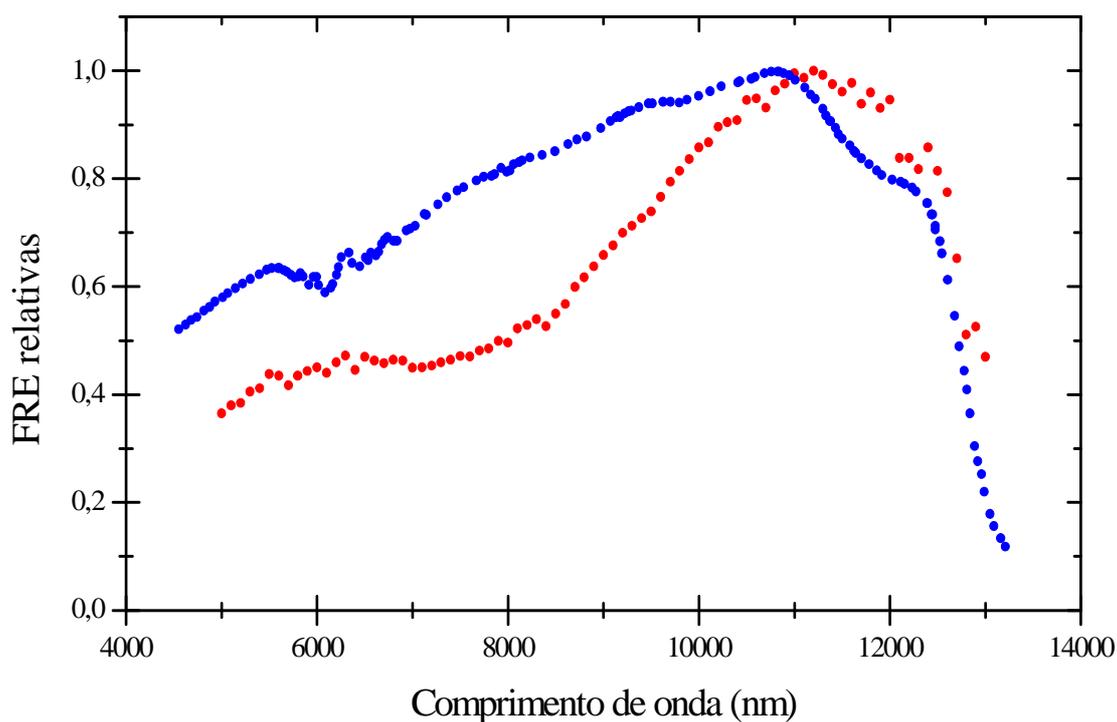


Figura 3: Gráfico das Funções de Resposta Espectral, normalizadas, do detector do Sensor SISIMI. Em azul curva fornecida pelo fabricante, EG&G Optoeletronics (1999) e em vermelho a FRE (relativa a um detector de referência) obtida.

Entre as hipóteses levantadas para explicar os desvios entre as duas FRE podem ser cogitadas:

- a) as condições Ambientais no LaRaC - as medições foram realizadas em atmosfera “aberta”, na qual as condições experimentais podiam variar (principalmente de um dia para outro). Mesmo havendo um controle de temperatura (por meio de um ar condicionado) e da umidade do ar (por meio de um desumidificador), este pode ter sido insuficiente para evitar flutuações significativas nos resultados;
- b) falta de informação nos certificados fornecidos pelos fabricantes dos detectores - nos documentos da EG&G Optoeletronics (1999) e da Judson (2007) não são descritas as condições em que as FREs dos detectores foram obtidas e nem o procedimento utilizado. Acredita-se que, em um procedimento rigoroso de caracterização, as medições tenham sido realizadas em uma “atmosfera” de nitrogênio, na qual não seriam observadas absorções devidas ao vapor d’água ou a outros gases presentes no ar.

Em seguida o feixe que incide na abertura do sensor foi determinado espectralmente, utilizando o próprio detector do Sensor SISIMI. Depois, com o detector do Sensor SISIMI na sua posição original (no interior do sensor), foi realizada uma nova medição. A resposta obtida com o detector do SISIMI na posição original (no interior do sensor) foi espectralmente semelhante à obtida com o detector na abertura do sensor. Entretanto, como o sinal é atenuado ao passar por todo o conjunto óptico, a sua amplitude foi significativamente menor. Na Figura 4 pode ser observada a curva obtida para a medição com o detector do sensor SISIMI na sua posição original.

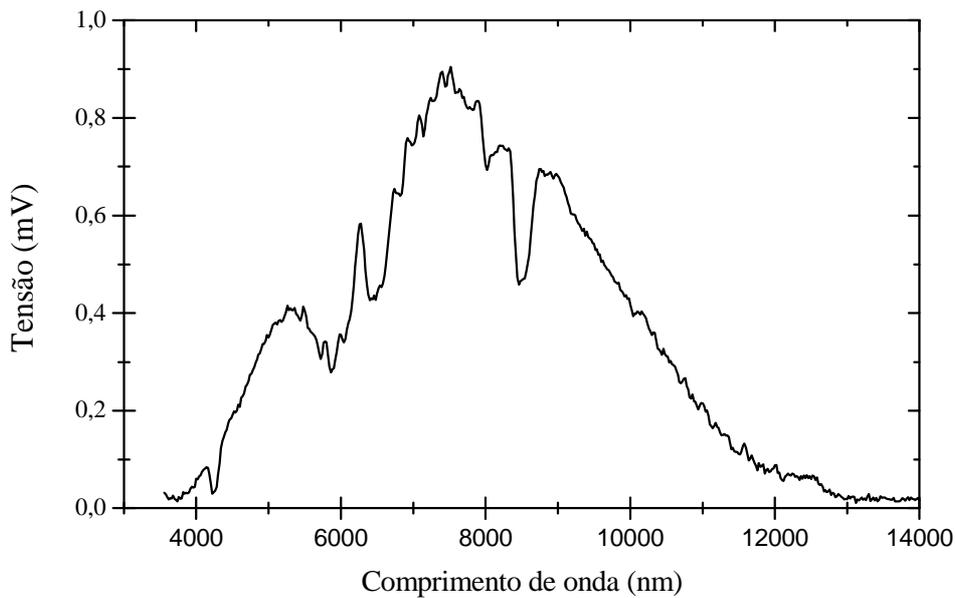


Figura 4: Resultado das medições realizadas com o detector do Sensor SISIMI na sua posição original, ou seja, quando o feixe passa pelo conjunto óptico do sensor.

Calculando a razão, por meio da equação (3), entre as medições realizadas com o detector do Sensor SISIMI na posição original e na abertura do Sensor obtêm-se a resposta da influência do sistema óptico,  $FRE_{opt}(\lambda)$ , ver Figura 5, que corresponde a combinação das características espectrais dos espelhos do sistema óptico do Sensor e de fatores geométricos e atmosféricos. Entretanto esta última contribuição deve possuir uma baixa influência devido ao curto caminho óptico no interior do sensor.

Como podemos perceber a razão entre estas duas curvas é aproximadamente constante ao longo de toda a faixa espectral. A influência de fatores geométricos nas medições, que deve ser igual em todos os comprimentos de onda, alterando somente o valor absoluto da razão, não é significativo nesta avaliação, pois o resultado final é normalizado.

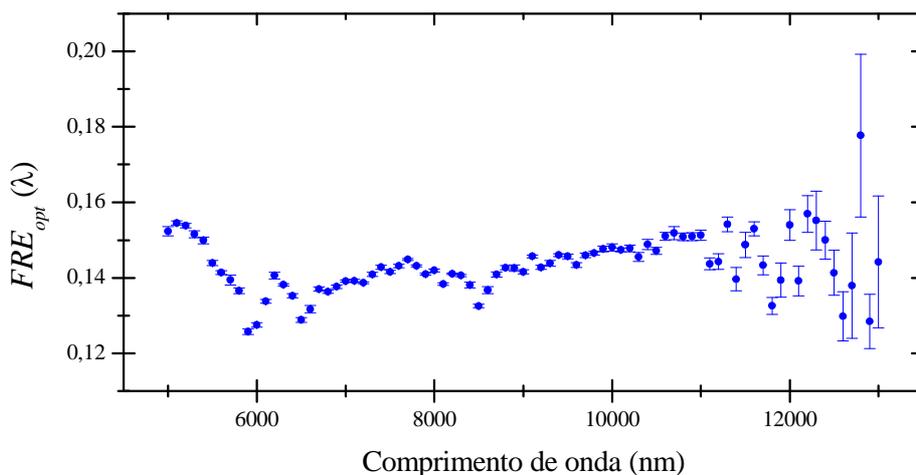


Figura 5: Resposta da influência do sistema óptico do Sensor SISIMI.

Por fim, determinada a FRE do detector do Sensor SISIMI e a resposta da influência do sistema óptico isoladamente, pôde-se obter a FRE parcial do SISIMI através da convolução entre elas, utilizando-se a equação (4), resultado apresentado na Figura 6.

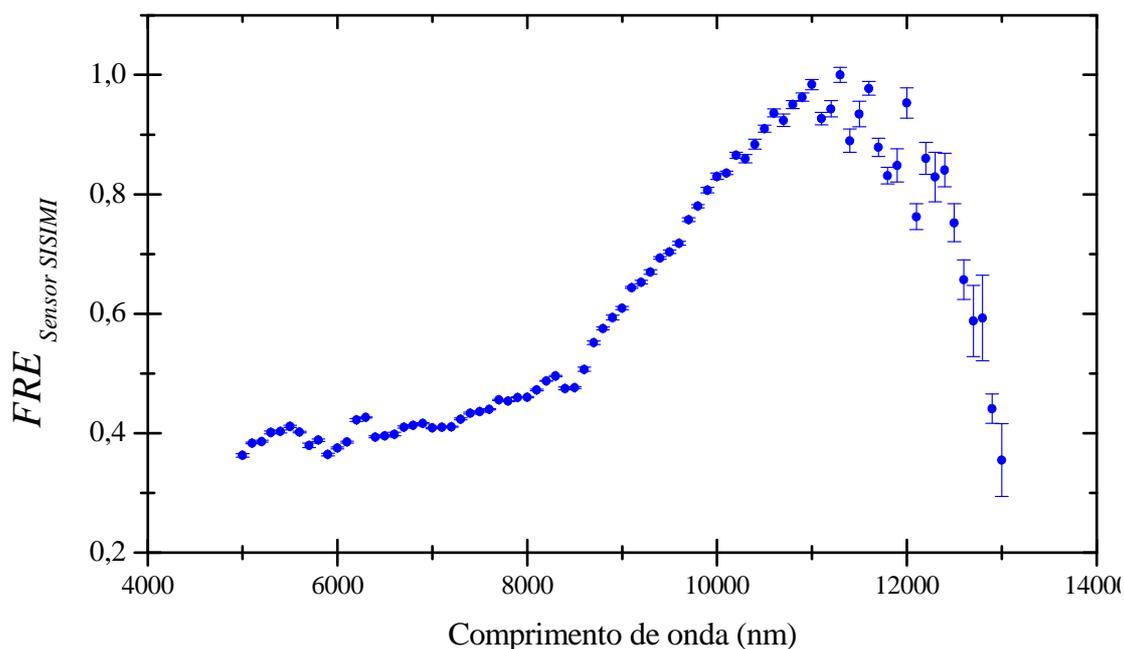


Figura 6: Função de Resposta Espectral preliminar do Sensor SISIMI.

## 5. Conclusão

A utilização quantitativa de dados de sensores é de fundamental importância para o desenvolvimento do sensoriamento remoto. Entretanto para que isto ocorra é necessário que estes sensores estejam devidamente caracterizados. Neste trabalho foi iniciado o desenvolvimento de uma metodologia para a caracterização espectral de sensores eletroópticos.

Para testar a metodologia foi empregado o Sensor SISIMI, que é um sensor imageador aerotransportado na região do espectro infravermelho termal, que foi desativado, mas que vem sendo utilizado para testes de laboratório. Com isto, para a determinação da FRE do Sensor, foi necessário caracterizar o seu detector e o seu sistema óptico.

Muito embora os resultados tenham mostrado que a FRE obtida para o detector do Sensor SISIMI tenha um comportamento semelhante ao do fornecido pelo fabricante, os resultados absolutos são significativamente diferentes, provavelmente devido às condições em que o experimento foi realizado, sugerindo que sejam adotados requisitos mais rigorosos para as condições ambientais nas caracterizações.

O resultado obtido para a caracterização FRE corresponde somente à parte do arranjo do Sensor SIMIMI, pois apenas um dos espelhos do prisma giratório e parte dos espelhos do sistema óptico foram avaliados. . Deste modo nas próximas etapas dos trabalhos com a metodologia de caracterização espectral, pretende-se realizar medições para os demais espelhos do prisma óptico. Além disso, também devem ser realizadas medições com o motor ligado e, conseqüentemente, com o prisma girando e incluindo todos os espelhos do sensor.

## Agradecimentos

Os autores agradecem ao IEAv pela bolsa da Sra. Cibele T. Pinto e ao CNPq pela bolsa de Iniciação Científica do Sra. Milena L Silva. Também agradecemos ao Dr Gustavo S Vieira pelo empréstimo do detector Judson J15D16 e ao Sr. Ho W Cheng pela colaboração na manutenção do Sensor SISIMI.

## Referências

EG&G Optoelectronics, **Test results for five element photoconductive mercury cadmium telluride detector: certificate of compliance, 1999**. Citado em: Maurício Derenne, **Caracterização de um Sistema Imageador Infravermelho Termal Através de suas Resoluções Espacial e Radiométrica**. (INPE-9695-TDI/855) Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos. 2002. Disponível em: [http://www.obt.inpe.br/pgsere/2002-Derenne\\_M/publicacao.pdf](http://www.obt.inpe.br/pgsere/2002-Derenne_M/publicacao.pdf). Acesso em: 13. nov. 2008.

Judson Technologies, **J15D Series - HgCdTe Detectors**, 2000, Disponível em: <http://www.judsontechnologies.com/PB%20PDFs/PB212.pdf>. Acesso em 01.out.2008.

Judson Technologies, J15D16 S/N: 07-05-31974 Relative Response, 2007, Comunicação privada.

Lucca, E.V.D.; Bastos, A. F. Sistema imageador infravermelho termal: características, descrição e resultados. In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 12. (SBSR), 16-21 abr. 2001, Foz do Iguaçu. **Anais...** São José dos Campos: INPE, 2001. Artigos. CD-ROM, on-line. Disponível em: <http://www.dsr.inpe.br/sbsr2001/oral/279.pdf>. Acesso em: 13. nov. 2008.

Pinto, C. T. et al. Caracterização espectral de sensores eletroópticos. In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, (SBSR), 2007, Florianópolis. **Anais...**, São José dos Campos: INPE, 2007, p. 6383-6385, 21-26 abril 2007. Disponível em: <http://mar.te.dpi.inpe.br/col/dpi.inpe.br/sbsr%4080/2006/11.15.18.55.23/doc/6383-6385.pdf>. Acesso em: 13. nov. 2008.