

Goniômetro para medições de BRDF e emissividade de materiais de interesse em SR

Ruy Morgado de Castro^{1,2}
Jefferson Fernandes Teixeira Junior^{1,3}
Leidiane L. Andrade¹
Henrique T Rubiatti^{1,2}
Marcos C Melo⁴
Rodrigo S Marinho¹
Paola B Lauria^{1,2}
Beatriz N M C Buarque^{1,2}
Murilo M Silva^{1,2}
Kelly C M Marques^{1,5}
André B Garagorry^{1,5}
Edson A Barros¹
Beatriz A Silva¹

¹ Instituto de Estudos Avançados – IEAv
Caixa Postal 6044– 12228-001– São José dos Campos – SP, Brasil
{rmcastro, leidiane, rodrigom}@ieav.cta.br

² Universidade de Taubaté - UNITAU
Av Marechal Deodoro, 605 – 12080-000 - Taubaté - SP, Brasil
rmcastro@unitau.br

³ Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE
Caixa Postal 515 - 12227-010 - São José dos Campos - SP, Brasil
jefferson.teixeira@inpe.br

⁴ Instituto de Fomento e Coordenação Industrial – IFI
CEP 12228-901 – São José dos Campos – SP, Brasil
{marcosmcm}@ifi.cta.br

⁵ Universidade Federal de São Paulo – UNIFESP
Caixa Postal – 12247-014 – São José dos Campos – SP, Brasil

Abstract. In this paper, we present the goniometer by LaRaC (Laboratório de Radiometria e Caracterização de Sensores Eletroópticos), which is a device capable to measure the spectral Bidirectional Reflection Distribution function (BRDF) and the emissivity of usual materials in remote sensing researches. The goniometer was projected to be used with a light source and a spectroradiometer, consisting in a electro mechanic assemble. The device structure is subdivided in: a sensor arc; a light source-supporting arc; a ring and a sample holder, each one attached to automated motors. In a default setup, the distances from the sample, with 30 cm maximum diameter, to the sensor and the light source are 100 cm and 120 cm, respectively. Radiometric data, necessary to estimate the BRDF, may be collected either in automatic mode, by the automated control of the motors, or in manual mode by an operator. In automatic mode, a typical BRDF data collection, concerning to 15 degrees of resolution in the angular positioning of all structures, takes approximately 60 hours involving all possible geometries. We also present the first characterization of a surface, using a reference panel, with the objective to verify the azimuthal and zenithal angular configurations in which construction issues would induce shadow casting on the sample.

Palavras-chave: Goniometer, bidirectional reflection distribution function (BRDF), emissivity.

1. Introdução

Os dados obtidos por sensores remotos imageadores que operam na região de comprimentos de onda entre 0,3 e 2,5 μm do espectro eletromagnético (região óptica), geralmente correspondem ao registro da parcela da radiação solar que é refletida após incidir nos objetos na superfície. Por esse motivo, a análise destes dados é feita em função de fatores de reflectância, obtidos a partir das medições de radiância pelo sensor. A reflectância é uma propriedade dos objetos que, por definição, é determinada pela razão entre o fluxo de radiação refletida e o fluxo de radiação incidente. Deste modo, é possível extrair, por meio dessa relação, informações a respeito de propriedades biofísicas dos objetos. Entretanto, a maioria dos objetos na superfície terrestre reflete a radiação em direções preferenciais, característica esta conhecida como anisotropia. Para um objeto com esta característica, a reflectância de sua superfície é uma grandeza física que depende das geometrias de iluminação e de observação.

Nesse sentido, muitos estudos têm se desenvolvido com foco na caracterização de superfícies em termos do comportamento anisotrópico da reflectância, o qual pode ser descrito pela função de distribuição da reflectância bidirecional (BRDF, do termo em inglês). De sua definição proposta por Nicodemus et al. (1977), tal função não pode ser medida diretamente, embora seja possível estimá-la por meio de quantidades mensuráveis de radiância.

Com o intuito de estimar a BRDF de superfícies de interesse, diversos equipamentos conhecidos como goniômetros têm sido desenvolvidos, permitindo a aquisição de dados radiométricos em variadas combinações de ângulos de iluminação e de observação, necessárias para modelar a BRDF.

Assim, para suprir os conhecimentos a respeito da anisotropia da reflectância de alvos de interesse, um goniômetro foi projetado, construído e instalado no Laboratório de Radiometria e Caracterização de Sensores Eletroópticos – LaRaC, do Instituto de Estudos Avançados – IEAv, por meio do Projeto Assinaturas Espectrais, Processo: 560228/2010-4 do Edital MCT/CNPq/AEB nº 33/2010, a fim de atender às necessidades do LaRaC e de outras Instituições.

Portanto, este trabalho tem por objetivo apresentar: os requisitos técnicos utilizados na elaboração do projeto, destacando as principais características necessárias para o funcionamento adequado; os detalhes mais importantes na construção do arranjo experimental; algumas funcionalidades; e os primeiros resultados obtidos com o goniômetro.

2. BRDF

A caracterização espectral de superfícies na região do espectro refletido geralmente se faz em termos da reflectância espectral, propriedade do alvo que indica a parcela da radiação que foi refletida após incidir em sua superfície em função do comprimento de onda. No entanto, devido às dificuldades técnicas de se determinar a reflectância espectral, determinamos em seu lugar uma grandeza equivalente denominada fator de reflectância espectral (FR).

Deste modo, a metodologia comumente adotada para a determinação do FR envolve medições da radiância espectral refletida por um alvo de interesse (dL_r) e da radiância espectral refletida por uma placa de Spectralon (dL_{ref}), sob as mesmas condições de iluminação e observação, conforme a equação 1.

$$FR(\theta_i, \varphi_i; \theta_r, \varphi_r; \lambda) = \left[\frac{dL_r(\theta_i, \varphi_i; \theta_r, \varphi_r; \lambda)}{dL_{ref}(\theta_i, \varphi_i; \theta_r, \varphi_r; \lambda)} \right] \times R_{ref}(\theta_i, \varphi_i; \theta_r, \varphi_r; \lambda) \quad (1)$$

em que: θ e φ denotam os ângulos zenitais e azimutais; os índices i e r dos ângulos se referem ao sentido de incidência e de reflexão; λ é o comprimento de onda; e R_{ref} é um coeficiente de calibração determinado para o painel de referência espectral.

A caracterização do comportamento das superfícies quanto à maneira como a radiação é refletida por elas, em termos direcionais, pode ser realizada por meio da BRDF, a qual, embora seja um conceito fundamental teórico, não pode ser medida diretamente, pois considera ângulos sólidos infinitesimais que não incluem quantidades mensuráveis de fluxo radiante (NICODEMUS et al., 1977). No entanto, algumas estimativas podem ser feitas por meio do *FR* obtido em algumas geometrias hemisféricas e/ou cônicas.

Nesse sentido, para assegurar maior acurácia e precisão das medições nessas geometrias, são utilizados goniômetros, desenvolvidos para práticas de campo ou de laboratório, aos quais é acoplado um ou mais sensores espectrorradiômetros. Aos goniômetros que operam no espectro refletido em laboratório é necessário acoplar uma fonte luminosa com características conhecidas, como radiância espectral emitida e ângulo de iluminação.

3. Goniômetros

Goniômetros têm sido desenvolvidos e utilizados em diversos institutos de pesquisa com o objetivo de melhor compreender os efeitos da BRDF na caracterização de alvos comumente estudados em sensoriamento remoto. Dentre esses equipamentos, podemos citar alguns que operam em laboratório, como o CLabSpeG (Compact Laboratory Spectro-Goniometer) da Universidade Católica de Leuvenna Bélgica (BILIOURIS et al, 2007) e o EGO (European Goniometric Facility)(KOECHLER et al., 1994); os que operam em campo, como o SFG (Sandmeier Field Goniometer) (TURNER e BROWN, 2000); e aqueles projetados para operar tanto em laboratório como em campo, como o goniômetro da ONERA (Office National d'Etudes et de Recherches Aéropatiales) (BOUCHER et al, 1999) e o FIGOS (Swiss Field Goniometer System) da Universidade de Zurique (SANDMEIER e ITTEN, 1999).

As premissas básicas utilizadas na elaboração do projeto do goniômetro do LaRaC eram de que o equipamento deveria operar em laboratório e ser capaz de servir de arranjo experimental na determinação da refletância e emissividade de superfícies de interesse, permitindo medições automáticas e manuais, com precisão na reprodutibilidade das geometrias de aquisição dos dados. Isto definiu algumas das suas características, dentre as quais podemos citar: a) ser “robusto” para operar espectrorradiômetros¹ (um por vez) de diferentes modelos e fabricantes, com massa, dimensão e outras características distintas e b) ter dimensões apropriadas, de acordo com o espaço disponível no laboratório.

Dentre os modelos utilizados em laboratório, o CLabSpeG, apresenta características muito semelhantes às premissas estabelecidas. Assim, o CLabSpeG foi utilizado como modelo para a elaboração do goniômetro do LaRaC.

Este modelo é constituído basicamente por: a) Arco fonte: arco semicircular para sustentação e movimento (para estabelecer o ângulo zenital, θ_i , ver Figura 1) de uma fonte luminosa (lâmpada halógena em um iluminador); b) Arco Sensor: arco semicircular para sustentação e movimento (ângulo zenital, θ_r) de um espectrorradiômetro; c) Anel: anel circular para a sustentação e movimento do Arco fonte (para estabelecer, juntamente com o suporte da amostra, o ângulo azimutal, φ_i); e d) Suporte da Amostra: suporte giratório para a sustentação e movimento da amostra, ou seja, da superfície em estudo (e, conseqüentemente, estabelecer o ângulo azimutal, φ_r). Com isso o goniômetro possuiria quatro movimentos, realizados por meio da utilização de motores.

3.1 Especificações

A partir das características gerais, foi então elaborado o Projeto Básico (CASTRO et al, 2013) para construção do Goniômetro do LaRaC, que deveria ser constituído conforme as

¹Em especial podemos citar: o espectrorradiômetro FieldSpec da ASD e a câmera termal SC 5600 da FLIR SYSTEM.

especificações a seguir: a) Uma mesa metálica com dimensões aproximadas de 1,5 x 1,5 m e 0,8 m de altura, com uma placa metálica, denominada “Base”, instalada sobre a mesa, capaz de suportar uma massa de 100 kg sem que houvesse deformações na sua planicidade; b) Um aro metálico, denominado “Anel”, montado na horizontal, com diâmetro interno de aproximadamente 1,2 m; c) Um arco, denominado “Arco Fonte”, montado sobre o Anel, com a finalidade de suportar e guiar o movimento de uma fonte luminosa. Os diâmetros, interno e externo, são aproximadamente de 1,2 e 1,3 m, respectivamente; d) Um arco, denominado “Arco sensor”, posicionado na vertical, fixado sobre a mesa metálica (Base), a fim de suportar o movimento zenital de um sensor óptico. O arco, semicircular, com abertura de 180° e diâmetros interno e externo com dimensões de aproximadamente 1,0 e 1,1 m, respectivamente; e) Um suporte circular plano, denominado “Suporte das amostras”, posicionado no centro da base, onde estariam dispostas as amostras experimentais. O suporte deveria possuir diâmetro de 300 mm e rotacionar perfazendo um curso de 360°. Além disso, deveria possuir ajuste de altura de aproximadamente 0,1 m, para o correto posicionamento das amostras no plano formado pelo ângulo zero dos arcos; f) Dois mecanismos (chamados de “carrinhos”), cada um apropriado para sustentação e movimento da fonte de iluminação e do sensor, que podem ser visualizados na Figura 1. Estes mecanismos podem percorrer todo a extensão dos arcos, perfazendo um curso de 180°. O movimento dos carrinhos deveria ser efetuado por meio de motores controlados automaticamente por microcomputador.

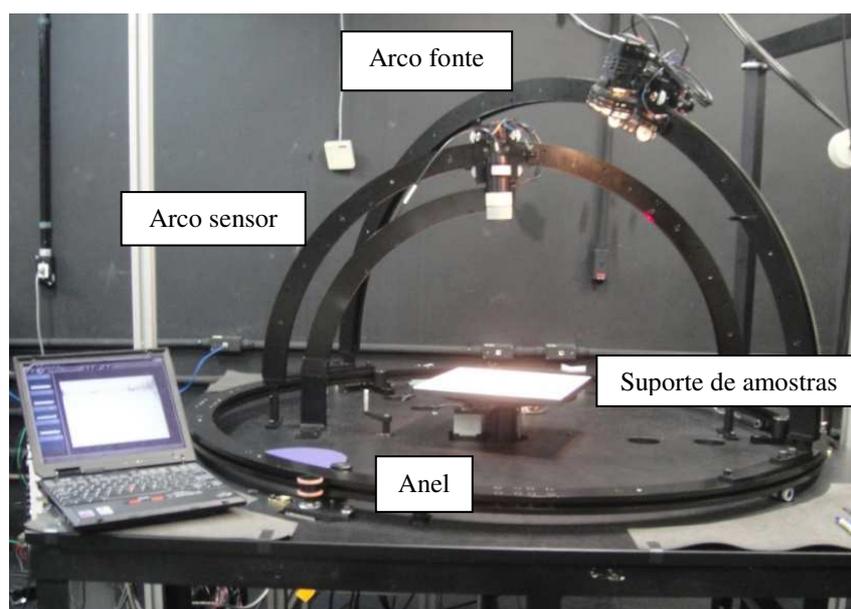


Figura 1. Goniômetro do LaRaC e suas principais estruturas constituintes.

O Anel, o Arco Sensor, o Arco Fonte e o Suporte das amostras deveriam ser capazes de sustentar massas de até 50, 10, 20 e 10 kg, respectivamente, sem apresentar deformações em suas estruturas. Além disso, os Arcos deveriam ter seus eixos de simetria deslocados por uma distância de 100 mm em relação ao centro do anel horizontal para possibilitar os apontamentos da fonte e do sensor centrados no alvo. A fixação dos arcos, sobre a mesa (Arco sensor) e sobre o anel (Arco fonte), deveriam ser efetuada com o auxílio de interfaces mecânicas que permitissem o ajuste e correto alinhamento do sistema bem como a eventual desmontagem do aparato.

Ao longo de suas superfícies curvas externas, o Arco Sensor e o Arco Fonte deveriam ser providos de correias que favorecessem a aderência às engrenagens dos motores e, portanto, tração adequada, de modo a fornecer precisão no posicionamento do mecanismo de sustentação do detector e da fonte de iluminação, respectivamente.

Para assegurar o correto posicionamento do goniômetro, o Anel, o Arco Fonte e o Arco Sensor deveriam possuir demarcações separadas a 15° , que pudessem ser utilizadas como referência durante o movimento automático, contando com o auxílio de *lasers* e sensores de luz usados para detectar tais demarcações, ou até mesmo para a movimentação manual do equipamento.

As demarcações foram determinadas a partir da estimativa de tempo de uma medição (e a seguinte) e do número total de medições para determinação completa da estimativa da BDRF de uma amostra/superfície, em medições automáticas. O tempo entre uma medição e a seguinte é de aproximadamente 10 s, sendo: 5 s, em média, para a movimentação do arranjo; 2 s para a realização da medição de reflectância; outros 2 s para a medição de parâmetros ambientais e de posicionamento; e 1 s para a gravação dos dados. O número de medições necessárias para compor um ciclo completo envolvendo todas as geometrias na escala de 15° é de 20736, compreendendo: 24 posições do ângulo azimutal da Fonte; 24 posições do ângulo azimutal do Sensor; 6 posições do ângulo zenital da Fonte; 6 posições do ângulo zenital do sensor. Com isto, são necessárias aproximadamente 60 h de medição para realizar a determinação completa da estimativa da BDRF de uma amostra.

Mesmo eliminando milhares de medições (por efeito de sombras, etc.), obteríamos um tempo de aquisição de 50 h, que continua sendo um tempo elevado para realização das medições, visto que os parâmetros ambientais (temperatura, umidade, concentração de gases, etc.), a tensão da rede elétrica, etc., podem variar significativamente, mesmo em ambientes controlados, ao longo do tempo. Portanto, marcações com intervalos menores que 15° aumentariam exponencialmente o tempo de medição, prejudicando a precisão das medições. Já marcações com intervalos superiores a 15° poderiam comprometer, por baixa amostragem, a qualidade da determinação da reflectância.

É conveniente destacar que a geometria do equipamento não está limitada a medições apenas nestas marcações. As medições podem ser realizadas com intervalos angulares menores, ou maiores, a critério do experimentador. Entretanto a precisão do posicionamento nestas marcações adotadas é maior.

Além destas características, as peças do equipamento possuem acabamento e tratamento superficial na cor preta fosca, com baixos níveis de brilho quando exposto à luz intensa, apresentando textura lisa e com espessura homogênea, o que diminui eventuais reflexões indesejadas, por parte das estruturas, sobre a amostra de interesse.

3.2 Construção e testes

A partir destas especificações foi realizada uma tomada de preços para a construção da parte mecânica do goniômetro em várias empresas da região. Baseado no preço oferecido bem como nas qualificações técnicas apresentadas, a Empresa Metalcard foi selecionada para construção.

Assim, na primeira fase da construção foram elaborados, em conjunto com os técnicos da empresa, os desenhos técnicos do arranjo experimental, bem como da escolha dos materiais a serem utilizados na construção do goniômetro. Na segunda fase foi efetuada a usinagem das diversas peças, a pintura e a montagem do arranjo. Na terceira etapa foram realizados alguns testes para a verificação da geometria e movimentação do arranjo experimental. Em seguida, foram realizados pequenos ajustes para permitir melhor desempenho do arranjo.

Com os desenhos técnicos e a definição dos materiais foi possível fazer uma estimativa dos requisitos para a especificação dos motores e drivers necessários para a movimentação do goniômetro. Mesmo que alguns dos motores, utilizados nos quatro movimentos a serem realizados no goniômetro, possuíssem especificações diferentes, optou-se por utilizar 6 motores de passo idênticos, com resolução superior a $0,1$ grau por passo, velocidade angular de até 250 rpm, torques entre 35 e 45 kgf-cm e massa de 1,5 kg. Isto também permitiu a

especificação dos demais itens necessários para a automatização e controle do arranjo experimental.

Após a montagem da parte mecânica do arranjo e dos demais equipamentos, foi efetuada a etapa de integração e testes do goniômetro, bem como do desenvolvimento do sistema de automação e controle.

3.3 Automação e controle

Desde a etapa inicial de estudos sobre goniômetros, ficou evidente a necessidade da realização automática de medições, visto que, para uma análise da BRDF, seria necessário um número elevado de medições. Para isso, foi desenvolvido um sistema de controle do equipamento, que envolve: todos os motores e seus respectivos movimentos; os sensores envolvidos (acelerômetros, temperatura umidade, fim de curso, etc.); e a aquisição de dados.

A configuração do sistema de automação e controle atual consiste de: um microcontrolador; motores e *drivers*; sensores; e plataforma (*software*) para controle das medições. Na Figura 2 é apresentado o diagrama esquemático deste sistema.

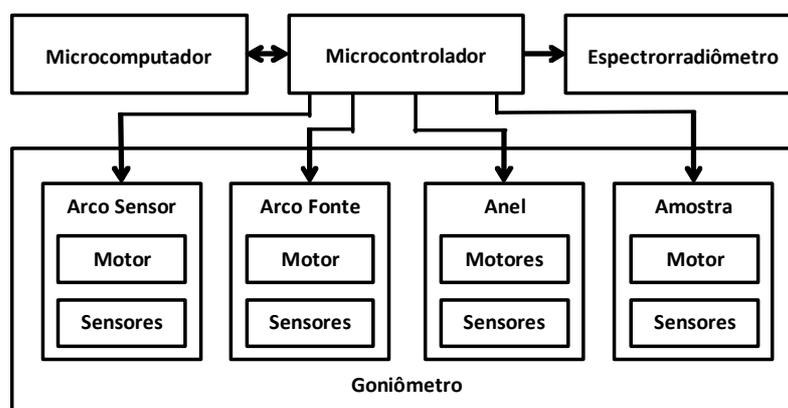


Figura 2. Diagrama esquemático do sistema de Automação e Controle.

O microcontrolador consiste em uma placa de aquisição de dados (DAQ) e controle, NI6343 (NI 6343, 2015), da National Instruments, com os quatro canais com “trem de pulsos” superior a 5 kHz, suficientes para realizar a movimentação dos elementos do goniômetro em 5 s, sem apresentar distorções significativas no sinal; 48 vias bidirecionais (entrada e saída) de dados digitais; 32 vias para aquisição de dados analógicos; e compatibilidade com a plataforma LabVIEW.

Para controlar: a) os movimentos dos motores de passo; b) os sensores envolvidos (acelerômetros, temperatura umidade, fim de curso, etc.); e c) a aquisição de dados, é utilizado o software LabVIEW, uma plataforma gráfica de desenvolvimento e aquisição de dados desenvolvida pela National Instruments. Sua principal aplicação reside na robustez da automatização. Além disso, o LabVIEW está integrado para comunicação com diversos hardwares, como o Arduino e com interfaces GPIB e USB. A compatibilidade do LabVIEW com a placa de aquisição e controle, NI 6343, ambos da National Instruments, facilitou a integração entre sensores, motores e *drivers*, etc.

No projeto, também foi necessário desenvolver uma interface USB para comunicação entre a placa de aquisição/controla e o microcomputador acoplado ao espectrorradiômetro. Esta interface teve por objetivo fazer a sincronização da movimentação do Goniômetro com as medições do espectrorradiômetro, que ocorriam de maneira independente.

Como mencionado anteriormente, as medições com o Goniômetro podem se estender por mais de 40 horas. Assim, para ter maior controle durante as medições que são realizadas, tem sido desenvolvida uma estação de monitoramento das condições ambientais do laboratório.

Na Figura 3 é apresentada a imagem da Tela da janela de configuração do *software* desenvolvido para a automação, controle das medições e aquisição de dados.

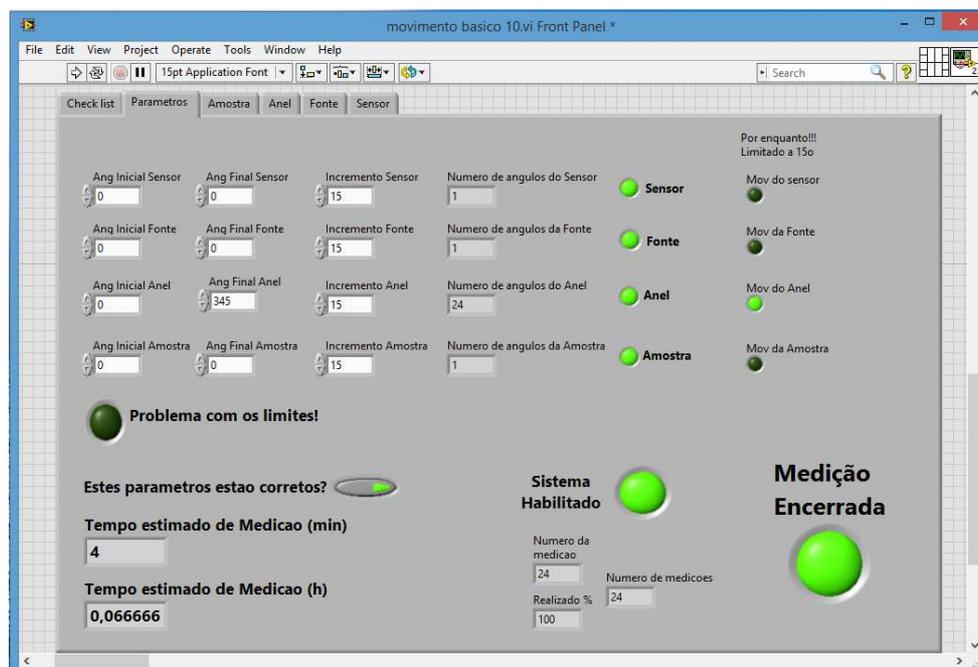


Figura 3. Imagem da janela do *software* de controle do Goniômetro, desenvolvido na Plataforma LabVIEW.

4. Resultados

A partir de outubro de 2015 o Goniômetro estava apto a realizar medições da reflectância de superfícies de interesse. Com isto, a primeira tarefa foi verificar as eventuais geometrias, ou seja, as configurações de ângulos azimutais e zenitais, que acarretavam sombras da estrutura do Goniômetro sobre a amostra. A partir desta informação, os dados obtidos nestas geometrias não devem ser levados em consideração.

Em seguida, foram obtidos dados da reflectância e radiância de uma placa de Spectralon fabricada pela Labsphere, para todas as geometrias. Entretanto, para que isto fosse possível, a medição foi dividida em vários dias, perfazendo no total, duas semanas. O resultado obtido para variação dos ângulos, zenital e azimutal, da fonte, mantendo-se fixos os ângulos, zenital (em 30°) e azimutal (em 0°), do sensor para um comprimento de onda de 900nm pode observado na Figura 4.

No gráfico, as regiões em preto compreendem as regiões de sombra geradas pela estrutura e componentes do goniômetro, embora essas delimitações não sejam exatas, tendo em vista possíveis reflexões, ainda que mínimas, por parte do entorno e da própria estrutura e considerando que a fonte luminosa não emite um feixe luminoso cilíndrico, condições estas que permitem melhor definição das regiões de sombra.

Outra importante observação diz respeito à variação do fator de reflectância da placa de Spectralon. Em ângulos zenitais de iluminação maiores, o *FR* da placa tende a diminuir. Uma análise mais precisa deve levar em consideração as incertezas das medições, o que tem sido parte dos objetivos de trabalhos recentes realizados com o goniômetro.

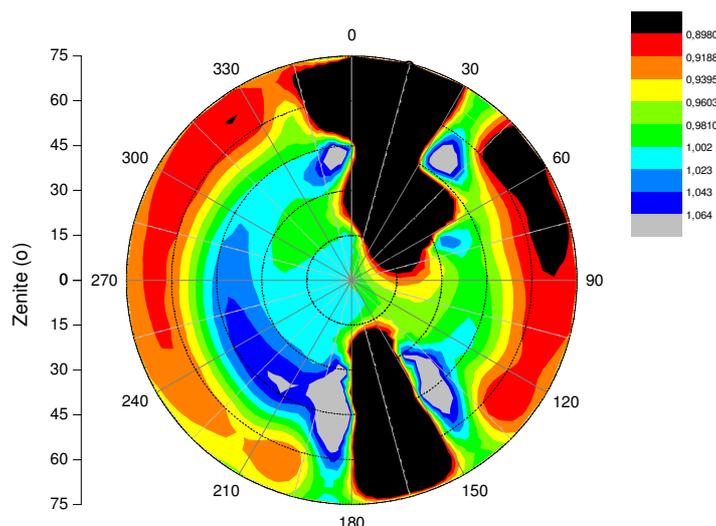


Figura 4: Estimativa da BRDF de uma placa de Spectralon.

4. Conclusão

Neste trabalho foram apresentadas as etapas efetuadas para a construção de um goniômetro a ser utilizado na determinação da BRDF e da emissividade de superfícies de interesse em laboratório. No período mais intenso de atividades, de aproximadamente 2 anos, o arranjo foi planejado, construído e testado.

Agradecimentos

Os autores agradecem a Agência Espacial Brasileira – AEB, pela concessão do Projeto “Assinaturas espectrais”, Processo: 560228/2010-4 do Edital MCT/CNPq/AEB nº 33/2010.

Referências Bibliográficas

- Biliouris, D.; Verstraeten, W. W.; Dutré, P.; Van Aardt, J. A.; Muys, B.; Coppin, P. A. Compact laboratory spectro-goniometer (CLabSpeG) to assess the BRDF of materials. Presentation, calibration and implementation on *Fagussylvatica L.* leaves. **Sensors**, v. 7, n. 9, p. 1846-1870, 2007.
- Boucher, Y; Cosnefroy, H; Petit, A. D.; Serrot, G.; Briottet, X. Comparison of measured and modeled BRDF of natural targets. In: Annual International Symposium Aerosense, 13, 1999, Florida. **Proceedings...** Orlando: SPIE, 1999. p. 16-26.
- CASTRO, R. M; Teixeira Jr, J. F.; Andrade, L. L.; Melo, M. C.; Barros, E. A. Goniômetro: Especificações Gerais, Comunicação privada, 2013.
- Koehler, C.; Hosgood, B.; Andreoli, G.; Schmuck, G.; Verdebout, J.; Pegoraro, A.; Hill J.; Mehl W.; Roberts D.; Smith, M. The European optical goniometric facility: Technical description and first experiments on spectral unmixing. In: Geoscience and Remote Sensing Symposium, 4.,1994, Pasadena. **Proceedings...** Pasadena: IEEE, 1994. p. 2375-2377.
- Nicodemus, F. E.; Richmond, J. C.; Hsia, J. J.; Ginsberg, I. W. **Geometrical considerations and nomenclature for reflectance**. Washington, DC: National Bureau of Standards, US Department of Commerce, 1977. 52 p. (MBS Monograph, 160)
- Sandmeier, S. R.; Itten, K. I.A field goniometer system (FIGOS) for acquisition of hyperspectral BRDF data. **Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on**, v. 37, n. 2, p. 978-986, 1999.
- Turner, M; Brown, J. The Sandmeier Field Goniometer: A measurement tool for bi-directional reflectance. In: Aerospace Mechanisms Symposium, 34., 2000, Maryland. **Proceedings...**Greenbelt: NASA, 2000. p. 167-174.