

## **4. Medição de Irradiância**

### **4.1 Introdução**

Das grandezas radiométricas definidas no capítulo 1, os instrumentos convencionais utilizados em estudos envolvendo processos radiativos na atmosfera foram desenvolvidos para medir irradiâncias, seja em incidência normal ou sobre uma superfície horizontal, proveniente de todo um hemisfério. Em geral, tais instrumentos registram valores em intervalos espectrais definidos, em bandas largas ou estreitas. Em alguns instrumentos, é possível adaptar um colimador de forma que o campo de visão (ou ângulo sólido) seja pequeno o suficiente para que a grandeza medida possa ser convertida em radiância. Neste capítulo serão estudados os princípios físicos de funcionamento dos principais instrumentos utilizados para medição de irradiância. Tais instrumentos são denominados genericamente de radiômetros e como será visto, um radiômetro apresenta um nome mais específico dependendo da região espectral. A partir da irradiância medida em vários níveis, desde a superfície até o topo da atmosfera, vários aspectos do sistema Terra-atmosfera podem ser estudados, tais como:

- Estudo da transformação de energia dentro do sistema Terra-Atmosfera e de sua variação no espaço e no tempo;
- Análise das propriedades e distribuição espaço-temporal de constituintes da atmosfera, tais como partículas de aerossol, nuvens, gases, como O<sub>3</sub>, CO<sub>2</sub>, vapor d água;
- Obtenção de propriedades físicas da superfície (albedo, emissividade).
- Avaliação do balanço de radiação na superfície e ao longo da atmosfera;
- Monitoramento do sistema Terra-atmosfera via sensoriamento remoto a bordo de satélites artificiais;
- Verificação de medições de radiação realizadas a bordo de satélites artificiais e seus algoritmos.

## 4.2 Principais Grandezas Medidas

### 4.2.1 Radiação solar (0,3 a 4,0 $\mu\text{m}$ )

A medição de radiação solar, abrangendo todo ou grande parte do espectro de onda curta é em geral realizada por meio da irradiância global incidente sobre uma superfície plana horizontal (orientada para o zênite). O termo global indica que a radiação provém de um hemisfério. A radiação solar que atinge a superfície pode ser decomposta em dois termos:

- a) Radiação solar direta, cuja transmissão decresce com o aumento da distância zenital (aumento do caminho óptico) e particularmente quando a concentração de constituintes atmosféricos aumenta (gases, partículas de aerossol, nuvens, cristais de gelo, etc).
- b) Radiação solar difusa proveniente de todo céu, que é resultante do espalhamento de radiação solar pelas moléculas de gases, partículas de aerossol, nuvens. Exclui-se a região do disco solar, mas inclui-se a contribuição da reflexão da superfície que é novamente espalhada pela atmosfera, ou por outras superfícies vizinhas.

A distribuição espectral dos dois componentes é diferente. A radiação difusa é mais rica em onda curta do que o componente direto, devido à forte dependência espectral do espalhamento molecular, que remove de forma mais eficaz radiação do feixe solar direto com comprimento de onda menor.

A irradiância solar global  $\epsilon_g$  é, portanto, igual à soma da irradiância solar direta  $\epsilon_s$  com a difusa  $\epsilon_d$ :

$$\epsilon_g = \epsilon_s + \epsilon_d \quad (4.1)$$

onde

$$\epsilon_s = \epsilon_o t_D \quad (4.2)$$

e  $t_D$  é a transmitância direta ou fração do feixe incidente que não sofreu interação com o meio que atravessa.

Para radiação monocromática, fora de regiões espectrais com absorção gasosa muito intensa, e uma atmosfera não refratária plano-paralela, a transmitância espectral direta é obtida como:

$$t_D(\lambda) = e^{-\tau(\lambda)/\cos \zeta_0} \quad (4.3)$$

onde  $\tau(\lambda)$  é a profundidade óptica de extinção da atmosfera no comprimento de onda correspondente e  $\zeta_0$  é a distância zenital solar. Esta lei de atenuação exponencial é conhecida como Lei de Beer-Bouguer-Lambert.

Ao nível da superfície, o instrumento para medir irradiância solar global pode ser apontado para cima, permitindo-se a medição da irradiância global incidente à superfície ou para baixo, medindo-se a irradiância global solar refletida pela superfície. Todos os três componentes da radiação solar são mensuráveis, requerendo instrumentos específicos para cada componente, como será visto mais adiante ainda neste capítulo.

#### **4.2.2 Radiação de onda longa ou radiação terrestre (4 a 100 $\mu\text{m}$ )**

Conforme discutido em capítulo anterior, a radiação emitida pelo sistema Terra-atmosfera, devido à temperatura predominantemente abaixo de 300K, concentra-se na região espectral cujo comprimento de onda é maior que da ordem de 4 $\mu\text{m}$ . Pode-se considerar emissão isotrópica e as medições se limitam à irradiância emitida pela superfície e atmosfera. Dessa forma, instalam-se instrumentos apontando para cima e para baixo.

#### **4.2.3 – Radiação total**

Por definição a radiação total é a soma da radiação solar com a radiação terrestre e, portanto, cobre todo o intervalo espectral, desde 0,3 a aproximadamente 100  $\mu\text{m}$ . Apontando-se radiômetros para cima e para baixo, é possível, por exemplo, obter diretamente o saldo de radiação total à superfície, que é basicamente a diferença entre a quantidade incidente (seja solar ou emitida pela atmosfera) da quantidade total de radiação emergente (seja por reflexão de radiação solar ou emissão de radiação terrestre).

#### **4.2.4 – Medidas em bandas espectrais (filtros)**

A utilização de filtros ou detectores seletivos em regiões espectrais mais estreitas tem finalidade específica. Dentre as várias finalidades, pode-se citar a caracterização espectral do sistema Terra-atmosfera. Analisando-se as medições apontando-se o instrumento para baixo, na região espectral de onda curta pode-se, por exemplo, obter a refletância espectral da superfície. Já em onda longa, pode-se determinar a sua

emissividade. Outras aplicações incluem a determinação da concentração dos constituintes atmosféricos que interagem com a radiação nessas regiões espectrais. Exemplo: O<sub>3</sub>, no UV, vapor d'água ao redor de 940nm. Em aplicações na área de Agrometeorologia é fundamental a medição de irradiância na região espectral fotossinteticamente ativa. Já a região espectral do ultravioleta é importante em estudos de impacto ambiental, de poluição atmosférica e devido aos seus efeitos biológicos.

#### **4.2.5 – Medidas orientadas em ângulos sólidos pequenos**

Conforme discutido anteriormente, restringindo-se o ângulo sólido de um radiômetro com o auxílio de um colimador, pode-se obter valores de radiâncias oriundas de diferentes orientações. Uma das aplicações é determinar a transmitância direta da atmosfera, direcionando o sensor para o disco solar. Ao medir a radiância difusa do céu, pode-se estudar o espalhamento de radiação pelos constituintes atmosféricos e apontando-se para superfície pode-se estudar a distribuição angular da radiância refletida, cujos processos em geral não são isotrópicos.

### ***4.3 Princípios Físicos***

Os radiômetros mais utilizados nas ciências atmosféricas podem ser genericamente classificados em detectores térmicos e detectores fotoelétricos, cujos princípios físicos são discutidos a seguir.

#### **4.3.1 – Detectores térmicos**

Sua operação é baseada na transformação de energia radiante em energia térmica, com conseqüente aumento da temperatura. Como tais detectores apresentam resposta à energia total absorvida, em geral eles são não seletivos espectralmente. Entretanto, devido às limitações dos materiais absorventes (em geral, corpos não negros), esta característica não seletiva é difícil de ser obtida completamente em operação. Os principais tipos de detectores térmicos são: calorímetros, termopares ou termopilhas e bolômetros.

- Nos calorímetros a quantidade de energia radiante absorvida é determinada por medidas de mudanças de temperatura do material. Embora apresente a vantagem de ser um detector simples, apresenta baixa sensibilidade e resposta muito lenta.

- Nos detectores constituídos por termopares e termopilhas, há uma diferença de temperatura entre uma junção de dois metais diferentes e uma junção de referência (termopar) causada pela absorção de radiação. Essa diferença de temperatura gera uma força eletromotriz (fem) que é a grandeza medida. A quantidade de força eletromotriz depende dos tipos de metais. Como a utilização de um único termopar resulta em baixa sensibilidade, é comum utilizar-se termopares em série (termopilhas), aumentando a sensibilidade do detector. Esse tipo de detector é pouco seletivo espectralmente e monitorar a tensão de saída é um procedimento muito simples.

- O detector tipo bolômetro é o mais sensível dentre os detectores de radiação não seletivo. Sua operação é baseada na variação da resistência de um metal ou semicondutor com a temperatura. Em geral é constituído por um fio fino, conectado a um circuito elétrico. Quando a radiação incide sobre o fio, este sofre um aquecimento, aumentando sua resistência. A configuração mais comumente encontrada é apresentada na Figura 4.1. Os dois elementos de resistência A e B constituem os braços de uma ponte de Wheatstone. O resistor A é exposto à radiação, enquanto o resistor B é mantido à sombra. A diferença de temperatura relativa que é gerada entre eles resulta em um desequilíbrio na ponte. A diferença em condutividade é proporcional à irradiância incidente. Apresenta resposta rápida [Coulson, 1975].

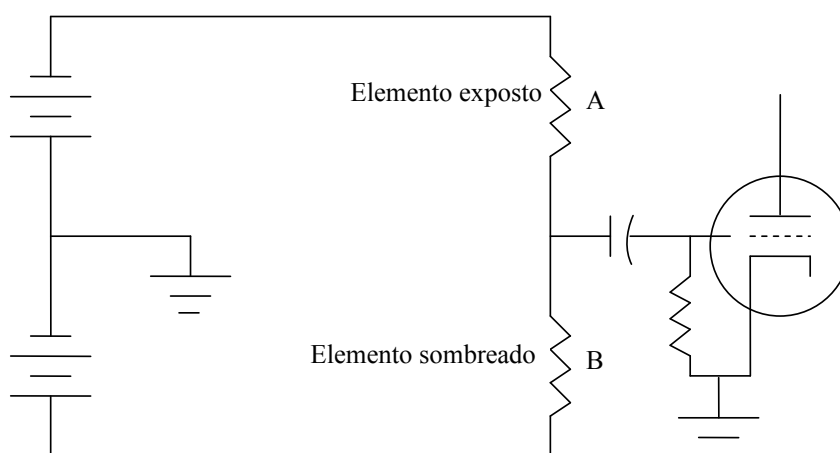


Figura 4.1 – As conexões elétricas de um bolômetro.

### **4.3.2 – Fotodetectores**

No caso destes detectores, o sensor é ativado por eventos discretos de fótons que incidem sobre o material. Por esse motivo, tais detectores apresentam respostas mais rápidas e maior sensibilidade. Por se basear em princípios da Física Quântica, podem apresentar seletividade espectral. Os principais tipos são os fotovoltaicos, fotocondutores e células foto-emissivas.

- Nos sensores fotovoltaicos, quando iluminados por radiação visível ou do ultravioleta próximo, a tensão gerada é mensurável sem a necessidade de fontes externas. Ao ser exposto à radiação, o sensor produz uma corrente elétrica, sendo por isso o mais simples dentre a categoria dos fotodetectores.

- A condutividade elétrica do material varia com o fluxo de radiação incidente nos fotocondutores. É eficiente na região espectral do infravermelho. Sua desvantagem se deve ao fato de, em geral, requerer resfriamento.

- Os detectores foto-emissivos apresentam como princípio físico a ejeção de elétrons do material quando uma onda eletromagnética incide sobre ele, de acordo com o efeito fotoelétrico (efeito cascata). É sensível nas regiões espectrais do ultravioleta, visível e infravermelho próximo.

## **4.4 Calibração**

A calibração consiste na conversão das grandezas medidas pelos instrumentos (tensão, corrente, diferença de temperatura) para a grandeza radiométrica de interesse, seja esta irradiância ou radiância, espectral ou não. Para tanto, é necessária a utilização de fontes cuja grandeza radiométrica seja conhecida com precisão e exatidão. As fontes de radiação podem ser: sol, fontes incandescentes, cavidades de corpo negro de alta e baixa temperaturas:

a) A radiação solar é utilizada como fonte de calibração, sob condição de atmosfera limpa e estável, em geral obtida no topo de montanhas.

b) Fontes incandescentes: lâmpadas padrão para determinação de energia absoluta. Existem lâmpadas padrão específicas para calibração de radiômetros em unidades de radiância espectral, irradiância espectral e irradiância total.

c) Cavidade de corpo negro de alta temperatura: cone, cilindro ou esfera “negros” com uma abertura e aquecido a temperaturas entre 1000 a 3000 K.

d) Cavidade de corpo negro de baixa temperatura: cone, cilindro ou esfera “negros” com uma abertura e com temperaturas variando entre  $-100^{\circ}\text{C}$  a  $+70^{\circ}\text{C}$ .

A verificação periódica das constantes de calibração se faz necessária para avaliar o efeito do envelhecimento dos componentes sensíveis, possíveis efeitos causados por variação de temperatura.

#### **4.5 Algumas Aplicações**

Inúmeras são as aplicações resultantes das medições de radiação eletromagnética no sistema Terra-atmosfera. Serão discutidas brevemente nesta seção algumas das aplicações, ilustrando sua importância no contexto das mudanças climáticas globais, em escala sinótica e em micro escala, abrangendo todas as áreas da Meteorologia.

No que diz respeito a alterações climáticas do planeta, é importante, por exemplo, monitorar em escalas de tempo maiores que um ano o seu equilíbrio radiativo, isto é, se, em média, sobre um tempo suficientemente grande, a quantidade de radiação incidente é igual à quantidade de radiação emergente:

$$\epsilon_{in} = \epsilon_{out}$$

onde  $\epsilon_{in}$  é a irradiância solar incidente no topo da atmosfera e  $\epsilon_{out}$  é a irradiância solar refletida tanto pela superfície quanto pela atmosfera somada à irradiância de onda longa emitida pela superfície e atmosfera.

A partir de medições da irradiância solar incidente e refletida ao nível da superfície, é possível determinar o albedo da superfície, que é a razão entre a irradiância refletida pela superfície e a irradiância incidente:

$$\alpha = \frac{\epsilon_r}{\epsilon_{inc}} \quad (4.4)$$

Outras aplicações com medições à superfície incluem o balanço de energia à superfície e a determinação dos fluxos de calor latente e sensível. Neste caso medem-se a irradiância solar global incidente, a refletida pela superfície, a irradiância emitida pela atmosfera em direção à superfície e a irradiância emitida pela superfície. É possível

estender o estudo ao ciclo de carbono, determinando-se os fluxos de CO<sub>2</sub> sobre uma determinada cobertura vegetal, assim como avaliar a produtividade de culturas agrícolas.

Dependendo da região espectral, pode-se determinar quantidades relacionadas aos constituintes atmosféricos integrados na coluna vertical como o vapor d'água, aerossol, ozônio, cobertura de nuvens, etc.

Toda a tecnologia do sensoriamento remoto do sistema Terra-atmosfera é baseada em medições de grandezas radiométricas. As aplicações variam, em particular, de acordo com a região e resolução espectral, a varredura angular do sensor e a resolução espacial.

**Exercício 4.1:** Em que outras situações é importante medir a radiação solar e/ou terrestre?

#### **4.6 Instrumentos Convencionais**

- Piranômetro: Irradiância solar global incidente e refletida sobre uma superfície plana horizontal. Em geral, o intervalo espectral de um piranômetro se encontra entre 0,2 a 2,8  $\mu\text{m}$ . Com o auxílio de um disco ou anel de sombreamento é possível medir o componente difuso da irradiância solar.

- Piranômetro espectral: Mede os componentes global, difuso ou refletido da irradiância solar em bandas espectrais largas, em geral com o auxílio de filtros.

- Net piranômetro: irradiância solar global líquida. Em geral é constituído por dois sensores, um apontando para cima e medindo a irradiância solar incidente e outro apontando para baixo, medindo a irradiância solar refletida pela superfície.

- Pireliômetro: Irradiância solar direta em incidência normal. O pireliômetro é constituído por um colimador com pequeno campo de visão (ângulo sólido), de forma a minimizar a contribuição da radiação difusa gerada por espalhamento na direção frontal; em geral é acoplado a um sistema automático de rastreamento do sol.

- Pireliômetro espectral: Mede a irradiância solar direta em bandas espectrais largas.

- Fotômetro solar: Mede a irradiância solar direta em bandas espectrais estreitas (a largura à meia altura da banda pode variar entre 2 a 10 nm na maioria dos fotômetros).

- Pirgeômetro: Irradiância na região do infravermelho térmico proveniente de um hemisfério sobre superfície plana e horizontal. Mede-se a irradiância emitida por camadas



da atmosfera e pela superfície. É projetado para medir irradiância no intervalo entre 4 a 50  $\mu\text{m}$ , aproximadamente.

- Pirradiômetro – Mede a irradiância total (solar global incidente e de onda longa emitida pela atmosfera, se apontado para cima, solar global refletida e de onda longa emitida pela superfície, se apontado para baixo).

- Net pirradiômetro – Irradiância total líquida.