

MAPAS DE DISTRIBUIÇÃO DE RADIANCIA E LUMINANCIA PARA DIAS DE CÉU LIMPO

Elton Gimenez Rossini

Laboratório de Energia Solar. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Rua Sarmiento Leite, 425, CEP 90050-170 Porto Alegre - RS - Brasil
rossini@mecanica.ufrgs.br

Arno Krenzinger

Laboratório de Energia Solar. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Rua Sarmiento Leite, 425, CEP 90050-170 Porto Alegre - RS - Brasil
arno@mecanica.ufrgs.br

Resumo. Este trabalho tem por objetivo fornecer mapas da distribuição de radiancia e luminancia, destacando as principais características desta distribuição em dias de céu limpo. Apresenta-se uma metodologia, desenvolvida com a finalidade de estabelecer uma maneira simples e econômica de estimar a distribuição de radiancia e luminancia, aproveitando todas as vantagens fornecidas pelas câmeras CCD. As imagens adquiridas são convertidas em matrizes, onde cada elemento representa um pixel da imagem ou uma direção do hemisfério celeste, e onde os valores numéricos destes elementos representam os tons de cinza ou a diferente níveis de radiancia e luminancia. Os mapas de distribuição de radiancia e luminancia são obtidos pela redução de tons de cinza da imagem original. Demonstra-se que as imagens resultantes concordam com as principais características de uma distribuição de intensidade da radiação difusa na condição de céu limpo. As imagens analisadas mostram que, nesta condição, a distribuição de intensidade tem grande dependência com a posição solar.

Palavras-chave: Energia solar, radiação solar, irradiância difusa, distribuição de radiancia, distribuição de luminancia.

1. Introdução

O hemisfério celeste pode ser pensado como uma fonte de luz extensa e não uniforme, capaz de redistribuir a radiação solar refratada e refletida pela atmosfera terrestre. Desta forma, podem ser estabelecidos padrões de distribuição angular de intensidade da radiação difusa no hemisfério celeste, para diferentes condições atmosféricas. Nos textos meteorológicos é comum designar a intensidade específica por radiancia e a distribuição angular de intensidade da radiação difusa celeste por distribuição de radiancia celeste (Iqbal, 1983; Siala et al., 1990).

Além disso, existe um interesse recíproco entre as considerações energéticas e fotométricas. Tanto a radiancia quanto luminancia têm origem nos processos de espalhamento da radiação solar, de modo que suas distribuições angulares são quase idênticas (Kittler, 1994). O conhecimento da distribuição de radiancia difusa celeste permite estimar a irradiância difusa em superfícies inclinadas (Olmo et al., 1999), otimizar a construção de concentradores solares (Miñano, 1985), etc. Por sua vez, a determinação da distribuição de luminancia tem como uma das principais aplicações o aproveitamento da iluminação natural como forma de minimizar a utilização de energia elétrica em edificações (Karayel, et al., 1983; Li e Lam, 2001).

Diversas pesquisas têm sido realizadas com a finalidade de desenvolver modelos capazes de prever as distribuições radiancia e de luminancia no hemisfério celeste. A consideração de uma distribuição isotrópica representa a maneira mais simples de se obter uma rápida estimativa da mínima energia ou iluminação disponível. Modelos mais sofisticados são desenvolvidos para resolver as equações de transferência radiativa em atmosferas plano paralelas através de técnicas analíticas (Chandrasekhar, 1960) ou através de técnicas numéricas (Dave, 1977; Dave, 1978). Normalmente, as análises puramente teóricas apresentam hipóteses simplificadoras que permitem descrever, de forma adequada, o complicado fenômeno do espalhamento e da distribuição direcional da radiação difusa. Por outro lado, muitas pesquisas têm por finalidade desenvolver modelos semi-empíricos baseados na análise de grandes conjuntos de dados medidos. Tais modelos permitem caracterizar a distribuição anisotrópica de radiancia (Rosen, 1992; Brunger e Hooper, 1993 (a), (b)) ou de luminancia (Kittler, 1985; Harrison, 1991; Perez et al., 1993). A construção de modelos semi-empíricos serviu de estímulo para o desenvolvimento de diferentes técnicas experimentais (Coombes e Harrison, 1982; McArthur e Hay, 1981 (a), entre outros).

Até a década de 80, a técnica usual para determinar a distribuição de radiancia consistia na realização de uma série de medidas actinométricas com pequenos ângulos de visão, nas diferentes regiões do hemisfério celeste (Kondratiev, 1969). A desvantagem deste procedimento está associada ao tempo de resposta para uma varredura completa, muitas vezes, limitando os resultados para condição de céu limpo. Posteriormente, foram confeccionados radiômetros de varredura, construídos para permitir medidas automáticas nas diferentes regiões do hemisfério celeste, em bandas bem definidas de comprimentos de onda (Coombes e Harrison, 1982; Coombes e Harrison, 1988 e Harrison, e Coombes, 1988.). Entretanto, a construção destes equipamentos de medida pode ter um custo total elevado.

A utilização de imagens fotográficas foi empregada como uma alternativa à técnica usual, tornando-se capaz de minimizar tempo de resposta das medidas actinométricas e o custo, proporcionando um mapeamento da distribuição da radiação difusa no hemisfério celeste. Normalmente as imagens fotográficas vêm acompanhadas poucas medidas actinométricas (McArthr e Hay, 1981 (a)). O processo fotográfico produz amostras numa banda espectral que corresponde a menos de 10% do espectro solar. Em resumo, a utilização de fotografias está baseada na possibilidade de relacionar a energia amostrada nesta porção restrita do espectro com a energia de todo o espectro solar (McArthr e Hay, 1981 (b)). Isso é possível devido a boa concordância entre as distribuições energética e fotométrica (Kondratiev, 1969, Kittler., 1994). Entretanto, a utilização de fotografias requer cuidados relativos às características do filme e ao seu tempo de exposição, além de exigir um processo de calibração que permita relacionar os valores de densidade relativa da imagem digitalizada com as medidas de radiância. McArthr e Hay, 1981 (a, b))

A utilização de sensores *CCD* como técnica de mapeamento da radiância difusa celeste apresenta, no mínimo, as mesmas vantagens do processo fotográfico. A boa concordância entre as distribuições energética e fotométrica também justifica a utilização de tais dispositivos, cuja sensibilidade é restrita a uma banda dentro do espectro solar que, mesmo não sendo total, é muito maior que a do processo fotográfico. Além disso, os sensores *CCD* têm uma linearidade muito maior do que a produzida por qualquer processo fotográfico. As câmeras *CCD* mais simples têm farta disponibilidade comercial e baixo custo, sendo apropriadas para a processamento de imagens em microcomputadores. A digitalização permite transformar qualquer imagem numa matriz numérica que pode ser manipulada matematicamente num processo de análise, ampliando as qualidades do sensor *CCD*. Finalmente, o armazenamento disponibiliza uma grande quantidade de dados para futura recuperação e exibição de resultados.

2. Metodologia

Este trabalho visa estabelecer uma maneira simples e econômica de avaliar a distribuição de radiância e luminância, empregando uma metodologia capaz de aproveitar todas as vantagens fornecidas pelos sensores *CCD* e pelo processamento digital de imagens. O principal objetivo é obter mapas de distribuição de radiância ou luminância, em condições de céu limpo, através de imagens monocromáticas do hemisfério celeste, adquiridas por uma câmera *CCD* com lente grande angular. Os resultados são apresentados na forma de mapas de distribuição relativa, onde o nível de radiância ou luminância na região do zênite é igual a 1. Para uma primeira aproximação considera-se que as distribuições de radiância e luminância são qualitativamente coincidentes, especialmente em condições de céu limpo (Kondratiev, 1969, Kittler, 1994), produzindo mapas de contorno idênticos. Entretanto é importante observar que a literatura também registra a observação de diferenças quantitativas entre estas distribuições, para certas condições de nebulosidade (Kondratiev, 1969). Alguns dos resultados que serão apresentados neste artigo fazem parte de uma pesquisa mais abrangente, que foi desenvolvida na Universidade Federal do Rio Grande do Sul (Rossini, 2002).

2.1. Processamento das Imagens

De acordo com a literatura (Facon, J., 1993; Marques Filho e Vieira Neto, 1999) uma imagem digital monocromática é definida pela transformação de uma função contínua em uma função de valores discretos, ou seja, na transformação de um sinal analógico num sinal digital. Para isso são necessárias duas discretizações: uma espacial e outra em amplitude. A discretização espacial, também chamada de amostragem, consiste em converter o sinal analógico numa matriz G , onde a posição de cada elemento corresponde à posição de cada pixel formador da imagem. A discretização em amplitude, também chamada quantização, está relacionada aos valores que podem ser atribuídos a cada um dos elementos da matriz para representar os diferentes tons de cinza. Genericamente, qualquer imagem digital monocromática pode ser representada por uma matriz $G_{m \times p}$, isto é,

$$G = \begin{bmatrix} g(0,0) & g(0,1) & \dots & g(0,y-1) & g(0,y) \\ g(1,0) & g(1,1) & \dots & g(1,y-1) & g(1,y) \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ g(x-1,0) & g(x-1,1) & \dots & g(x-1,y-1) & g(x-1,y) \\ g(x,0) & g(x,1) & \dots & g(x,y-1) & g(x,y) \end{bmatrix} \quad (1)$$

onde cada elemento da matriz representa um pixel, numa posição (x,y) , e onde o valor numérico de cada elemento corresponde a um determinado tom ou nível de cinza.

Neste trabalho, cada imagem é representada por uma matriz com 512 linhas e 768 colunas. Os valores dos elementos da matriz, ou seja, os tons de cinza que podem estar presentes nas imagens, estão compreendidos no intervalo $0 \leq g(x,y) \leq 255$, onde $g(x,y) \in \mathbf{Z}$. Portanto existem 256 níveis de cinza, onde $g_{min} = 0$ corresponde ao preto e $g_{max} = 255$ corresponde ao branco. As imagens digitalizadas foram primeiramente armazenadas no formato *TIFF (Target File Format) uncompressed*. A primeira estrutura de dados encontrada neste formato é o cabeçalho, *IFH (Image File Header)* que contém informações para interpretação do restante do arquivo, sendo a única parte do arquivo *TIFF* que tem posição fixa. Inicialmente, todas imagens passam por uma etapa de pré-processamento para adequar e padronizar o

conjunto de imagens a serem analisadas. Para isso, as matrizes das imagens, armazenadas no formato *TIFF uncompressed*, são extraídas e servem como dados de entrada para a sub-rotina de um programa computacional, que atribui o valor de $g(x,y) = 0$ para todo *pixel* que tenha $g(x,y) < C_0$, onde C_0 é o nível de cinza da região mais escura.

Concluídas as fases de aquisição, digitalização e pré-processamento, fica disponível para análise um amplo conjunto de imagens padronizadas do hemisfério celeste, as quais podem ser agrupadas para caracterizar a distribuição de intensidade sob diferentes condições de nebulosidade. Com este propósito desenvolveu-se um programa computacional para converter os 256 níveis de cinza da imagem adquirida em apenas 16 níveis, mantendo-se a resolução espacial constante. Na maioria das aplicações, a redução de níveis de cinza introduz uma imperfeição na imagem, conhecida como falso contorno. Entretanto, este procedimento aplicado às imagens do hemisfério celeste, conforme a metodologia proposta neste trabalho, permite obter mapas de tons de cinza que representam a distribuição de intensidade.

No processo de redução de níveis de cinza, cada elemento, $g(x,y)$, da Eq. (1) têm seu valor convertido, resultando numa nova matriz, $G_{m \times p}$, ou seja, numa nova imagem, cujos elementos, $g(x,y)$, têm valores que representam o menor índice de cada intervalo de 16 tons de cinza. Para permitir a visualização dos resultados, cada nível de cinza da imagem analisada foi associado a um tom de cinza, representado por um índice do modelo de cores *RGB*. Assim, o novo tom de cinza de cada *pixel* é estabelecido a partir do tom de cinza da imagem adquirida, fazendo-se,

$$g(x, y) = 16n \quad \text{com} \quad 0 \leq g(x, y) \leq 255 \quad \text{para} \quad n = \text{Int} \left[\frac{g(x, y)}{16} \right] \quad (2)$$

onde $n \in \mathbb{Z}$, com $1 \leq n \leq 16$ e Int é uma função que retorna a parte inteira de um número. A aplicação da Eq. (2), nas imagens do hemisfério celeste, define o número máximo de níveis de cinza ou de regiões de mesma intensidade que uma imagem pode apresentar. Este número máximo de níveis de cinza serve como um parâmetro de avaliação das distribuições de intensidade que, uma vez estabelecido, deve permanecer constante. Desta forma, a quantidade de níveis de cinza que é observada, mantendo-se um mesmo parâmetro, esta relacionada com a anisotropia da condição de nebulosidade. No tratamento das imagens observou-se que os tons de cinza das imagens analisadas, compreendidos no intervalo [16, 32] sempre representam regiões de sombra que estão fora do hemisfério celeste, isto é, nas bordas internas da câmera ou na região do anel de sombra. Por outro lado, nas partes mais claras das imagens adquiridas, a representação dos tons de cinza pode ter uma menor precisão. De fato, sob essas condições, isto é, para $g(x,y) > 240$ o sensor *CCD* pode não ter uma resposta linear com a radiação incidente.

2.2. Sensores CCD

Normalmente, quando se utiliza uma câmera *CCD* como medidor fotométrico recorre-se a um processo de calibração do sensor *CCD* que permita relacionar o nível de cinza a uma magnitude fotométrica ou radiométrica (Fuentes, 1999 e Shields et al., 1999). Desta forma, cada nível de cinza representa um valor de intensidade, válido para qualquer condição de medida.

Neste trabalho, para cada imagem, é estabelecida uma graduação de tons de cinza, que se relaciona a uma escala de intensidades. Assim, o tom de cinza mais claro corresponde ao maior valor de intensidade, enquanto o tom mais escuro representa o menor valor. O mesmo tom de cinza, em diferentes imagens, não representa um mesmo valor de intensidade. Finalmente, os resultados são obtidos pela comparação entre os tons de cinza das regiões do céu, presentes em cada imagem. Isso é possibilitado pela facilidade com que se pode determinar um sistema de processamento digital para analisar as imagens hemisféricas a partir de câmeras *CCD*.

2.3. Apresentação dos Resultados

As imagens hemisféricas têm como principal vantagem propiciar o estudo de uma vasta área do hemisfério celeste. Por este motivo, são largamente empregadas, para diversos estudos meteorológicos (Syrjäsuo, 1996), tecnologia agrícola (Wagner, 1998), mas especialmente nas pesquisas que tratam da distribuição de radiação e luminância (Rossini e Krenzinger, 2000). Os mapas de contorno são a forma mais comum de apresentar os resultados da distribuição de radiação (Harrison e Coombes, 1988, McArthur e Hay, 1981 (a, b)), independente da técnica de medida. Em muitas aplicações, as imagens hemisféricas fornecem uma visão da abóbada celeste, dirigida no sentido de baixo para cima. Em consequência, observa-se que o diagrama pode apresentar uma inversão entre as direções Norte e Sul, ou entre as direções Leste e Oeste. Nesta pesquisa, optou-se por posicionar a câmera *CCD* e trabalhar com as imagens, de modo a manter a coerência com o deslocamento solar horário. Obviamente, um adequado tratamento de imagens através de rotações permitiria alterar o diagrama. A Figura 1 mostra, como exemplo, uma imagem do hemisfério celeste com a orientação escolhida e com identificação das respectivas direções. A aquisição desta imagem foi realizada no dia 18 de dezembro de 2000, às 12h e 30 min, 2000:12:18:12:30. Observa-se o anel de sombra, como uma faixa negra que atravessa toda a extensão do hemisfério celeste; a posição solar é facilmente identificada como uma região branca, localizada na região próxima do centro da imagem. Esta imagem também destaca a presença de cirros.

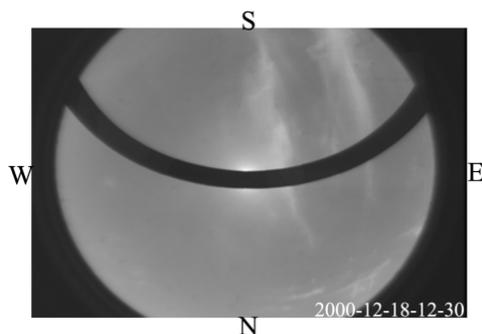


Figura 1. Orientação das imagens hemisféricas.

3. Instrumentação

Os equipamentos de medida estão instalados no terraço do Laboratório de Energia Solar da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, na cidade de Porto Alegre, na latitude 30°3' Sul, longitude 51°2' Oeste e altitude de 10 m. A Figura 2 mostra uma fotografia do sistema experimental. Cada medida é composta pelos dados instantâneos de irradiância solar e pela respectiva imagem do hemisfério celeste.



Figura 2. Fotografia da instalação dos equipamentos de medida.

A aquisição das imagens é realizada por uma câmera, *Fujitsu General* modelo *TCZ-230EA*, ajustada para produzir um sinal de vídeo linear à intensidade da luz incidente. Este equipamento foi doado à *UFRGS* através de um convênio de pesquisa com a *Universidad Politécnica de Madrid*. Para compor o sistema óptico emprega-se uma lente grande angular *Pentax Cosmicar - CCTV*, modelo *TS213*. O ângulo de visão do conjunto lente / câmera é de 130°, sendo reduzido para 120° durante a fase de pré-processamento das imagens. Uma caixa, que permanece fixa ao suporte da câmera, é empregada para proteger o corpo da câmera de intempéries e da radiação direta. Uma abertura na parte inferior e uma tampa na face Sul, que é retirada durante as medições, evitam que a câmera opere em condições de temperatura inadequada. Um eixo fixo ao suporte permite a regulagem e o ajuste vertical da câmera.

As medidas de irradiância solar global são realizadas com um piranômetro *Eppley*, modelo *PSP*, com fator de calibração de $9,93 \mu\text{V} / \text{W.m}^2$. As medidas de irradiância difusa são realizadas com um piranômetro *Kipp and Zonen* modelo *CM11*, com um fator de calibração de $4,75 \mu\text{V/W.m}^2$.

Para ajustar os ângulos de visão do piranômetro e da câmera *CCD*, são empregados dois suportes com anel de sombra. A técnica de sombreado por anel é amplamente empregada nas medidas da irradiância difusa (Le Baron et al., 1980; Painter, 1981; Ineichen et al., 1984; Kudish e Ianetz, 1993; Batlles et al., 1995). O piranômetro é acompanhado de um suporte modelo *CM121*, especialmente concebido para os piranômetros *Kipp and Zonen*. Este modelo é muito versátil, podendo ser utilizado em qualquer latitude e para qualquer inclinação de superfície. O suporte para sustentação da câmera tem características semelhantes ao modelo *CM121*. Ambos anéis de sombra têm 0,050 m de largura e 0,56 m de diâmetro. Desta forma, realiza-se o bloqueio da radiação direta e da radiação difusa incidente na região que corresponde ao caminho do Sol. Além do anel de sombreado emprega-se um pequeno aro, colocado num plano horizontal, acima do sensor do piranômetro. Desta forma, a irradiância difusa é medida num ângulo de visão de 120°, igual ao das imagens analisadas. Portanto, ângulo de zênite das imagens varia de 0° a 60°. Num próximo trabalho, os valores de irradiância difusa serão associados a cada arquivo de imagem, para estimar a distribuição de radiação.

4. Resultados

O primeiro teste para avaliar a metodologia proposta nesta pesquisa, é verificar se as imagens analisadas são capazes de reproduzir as principais características da distribuição de radiância e luminância em diferentes condições de nebulosidade. As peculiaridades das distribuições de radiância e luminância, na condição de céu limpo, são bem conhecidas e documentadas na literatura, servindo como parâmetro para avaliar os resultados de muitas pesquisas que tratam da distribuição de radiância e luminância (Siala et al., 1990).

A condição de céu limpo é caracterizada por uma região de máxima intensidade, observada nas proximidades do disco solar, isto é, na região circunsolar. A forte dependência com a posição solar também é evidenciada pela formação de uma série de contornos fechados ao redor do disco solar. Por outro lado, a mínima intensidade é observada a, uma distância angular de, aproximadamente 90° do zênite solar. O céu limpo também é caracterizado pela simetria azimutal.

Os resultados qualitativos são avaliados diretamente, pela comparação das imagens de 16 tons de cinza, com as principais características de distribuição de radiância e luminância observadas na condição de céu limpo. Os resultados quantitativos mostram a distribuição angular de intensidade relativa (Kondratyev, 1969), onde a intensidade da radiação difusa na região do zênite é empregada como referência. Neste caso, os valores de intensidade são obtidos a partir dos valores dos elementos da matriz da imagem analisada, pela razão entre o valor de RGB de uma determinada região da imagem e o valor de RGB da região do zênite, ou seja

$$I_r = \frac{1}{C_z} \begin{bmatrix} g(0,0) & g(0,1) & \dots & g(0, y-1) & g(0, y) \\ g(1,0) & g(1,1) & \dots & g(1, y-1) & g(1, y) \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ g(x-1,0) & g(x-1,1) & \dots & g(x-1, y-1) & g(x-1, y) \\ g(x,0) & g(x,1) & \dots & g(x, y-1) & g(x, y) \end{bmatrix} \quad (3)$$

onde C_z representa o tom de cinza, ou o valor de RGB, na região do zênite

Para representar algumas situações, características dos céus limpos, foram selecionados seis resultados, cujas medidas foram realizadas nos dias 18 de dezembro de 2000 e 24 de maio de 2001. A Tabela (1) apresenta os dados de irradiância difusa e global das imagens adquiridas.

Tabela 1. Imagens em condições de céu parcialmente nublado

Nome do Arquivo (ano:mês:dia:hora:minuto)	Irradiância - ângulo de visão 120° (W.m ⁻²)	Irradiância global (W.m ⁻²)
2000:12:18:11:30	50	940
2000:12:18:15:00	40	960
2000:12:18:16:00	40	830
2001:05:24:15:00	20	390
2001:05:24:15:30	30	310
2001:05:24:16:00	20	280

As Figuras 3 (a - f) mostram as imagens analisadas, apresentadas na forma de mapas de tons de cinza, e as respectivas regiões que têm o mesmo tom de cinza observado no zênite. Inicialmente, observa-se uma grande diferença entre as posições do anel de sombra, de acordo com as datas escolhidas. Próximo ao solstício de inverno (21 / 22 de junho), o anel de sombra aparece na posição inferior da imagem, que corresponde ao Norte geográfico. Por outro lado, próximo ao solstício de verão (21 / 22 de dezembro) o anel de sombra localiza-se na região central da imagem, próximo do zênite. Na condição de céu limpo observa-se um maior número de níveis de cinza, ou seja, uma grande quantidade de regiões de mesma intensidade, revelando a anisotropia que caracteriza esta condição atmosférica. Todas as imagens analisadas concordam com o padrão típico dos céus limpos. Observa-se que a distribuição de intensidade é caracterizada por uma forte dependência com a posição solar.

As Figuras 3 (a - c) mostram as três imagens adquiridas no dia 18 de novembro. A imagem 2000:12:18:11:30, adquirida próximo do meio dia solar, apresenta o menor número de níveis de cinza ou de regiões de mesma intensidade. A forma irregular de algumas regiões e a observação de pequenas zonas claras indica a presença turbidez ou de nebulosidade, pouco perceptível numa primeira inspeção. De fato, algumas imagens realizadas neste dia, mostraram céu nublado em pequenas regiões, por cirros e por cirrocúmulos. As imagens 2000:12:18:15:00 e 2000:12:18:16:00, adquiridas com o disco solar mais próximo dos limites da câmera, apresentam um maior número de regiões.

As Figuras 3 (d - f) apresentam as medidas realizadas no dia 24 de maio, com o disco solar bem mais próximo dos limites das imagens. A posição solar pode ser identificada, mas devido ao ângulo de visão do sistema óptico, não se observam regiões fechadas ao redor do disco solar. Por outro lado, estas imagens mostram a formação de grandes regiões de mínima intensidade, localizadas a uma distância angular de, aproximadamente, 90° da posição solar. Nestes casos, as regiões escuras estão localizações na região do zênite. Estas imagens apresentam uma grande quantidade de níveis de cinza.

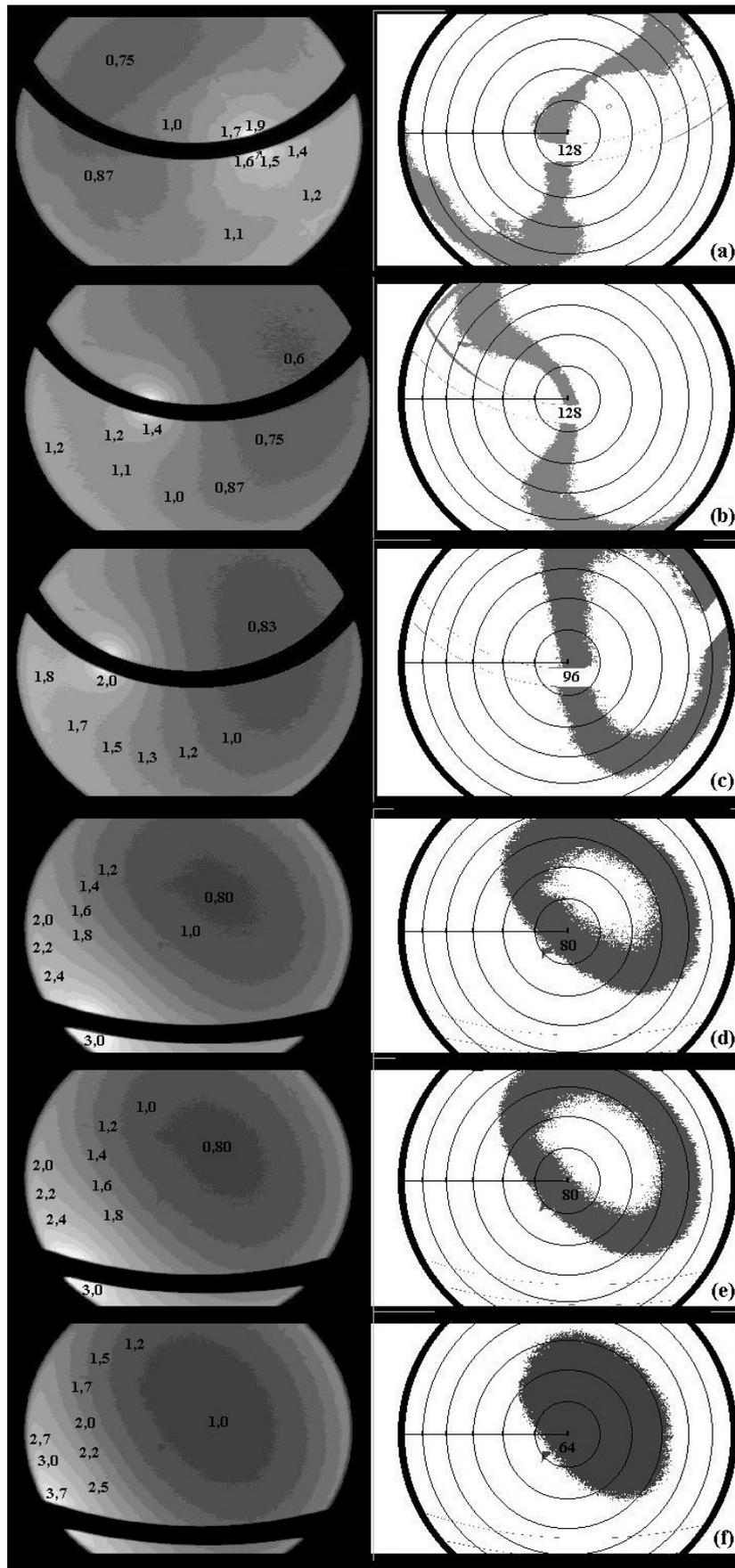


Figura 3. Mapas de radiância e luminância, em condições de céu limpo, com destaque para a região que compreende o Zênite: (a) 2000:12:18:11:30; (b) 2000:12:18:15:00; (c) 2000:12:18:16:00; (d) 2001:05:24:15:00; (e) 2001:05:24:15:30; (f) 2001:05:24:16:00.

Finalmente, apresenta-se, como exemplo, uma comparação qualitativa, realizada através de uma imagem simulada a partir do modelo proposto pela CIE (*Commission Internationale de l'Éclairage*), conhecido como modelo CIE *Standard General Sky*, conforme Darula e Kittler, 2002.

Este modelo CIE foi desenvolvido para caracterizar a distribuição de luminância num amplo conjunto de condições atmosféricas, de céus limpos a encobertos. Os diferentes tipos de céu são caracterizados pela variação de cinco coeficientes: a , b , c , d e e . A razão entre a luminância de um elemento do céu e a luminância do zênite é calculada pela fórmula

$$\frac{L_{sky}}{L_z} = \frac{f(\mathbf{c}) \cdot \mathbf{j}(Z_{sky})}{f(\mathbf{q}_z) \cdot \mathbf{j}(0^\circ)} \quad (4)$$

onde \mathbf{c} é a distância angular entre o elemento do céu e o Sol, Z_{sky} é o ângulo de zênite do elemento do céu, \mathbf{q}_z é ângulo de zênite solar, f representa a função indicatriz e \mathbf{j} representa a função de gradação de luminância.

As indicatrizes, determinadas para relacionar a luminância relativa do elemento do céu com a distância angular do Sol e para determinar o seu valor no zênite, são calculadas, respectivamente pelas equações

$$f(\mathbf{c}) = 1 + c \left(e^{dc} - e^{\frac{dP}{2}} \right) + e \cos^2(\mathbf{c}) \quad (5)$$

$$f(\mathbf{q}_z) = 1 + c \left(e^{dq_z} - e^{\frac{dP}{2}} \right) + e \cos^2(\mathbf{q}_z) \quad (6)$$

As funções de gradação de luminância são calculadas para o elemento de céu por

$$\mathbf{j}(Z_{sky}) = 1 + ae^{(b/\cos Z_{sky})} \quad (7)$$

quando $0 \leq Z_{sky} \leq \pi/2$ e no Zênite por

$$\mathbf{j}(0^\circ) = 1 + ae^b \quad (8)$$

Para simular as condições, de céu limpo semelhantes às Fig. 3 (d - f), foram escolhidos os seguintes valores para os coeficientes: $a = -1$; $b = -0,55$; $c = 10$; $d = -3,0$; $e = 0,45$. A Figura 4 (a) mostra o resultado da simulação do modelo CIE, onde os valores de luminância relativa foram multiplicados por uma constante para permitir a visualização. A Figura 4 (b) apresenta o resultado das mesmas condições de simulação, onde os níveis de cinza foram atribuídos aos diferentes intervalos de luminância relativa. De acordo com as condições de simulação, esta imagem mostra a formação de grandes regiões de mínima intensidade, localizadas a uma distância angular de, aproximadamente, 90° do disco solar. Nestes casos, as regiões escuras estão localizadas na região do zênite. Estas imagens apresentam uma grande quantidade de níveis de cinza. Futuramente, pretende-se aprofundar esta análise, incluindo resultados quantitativos.

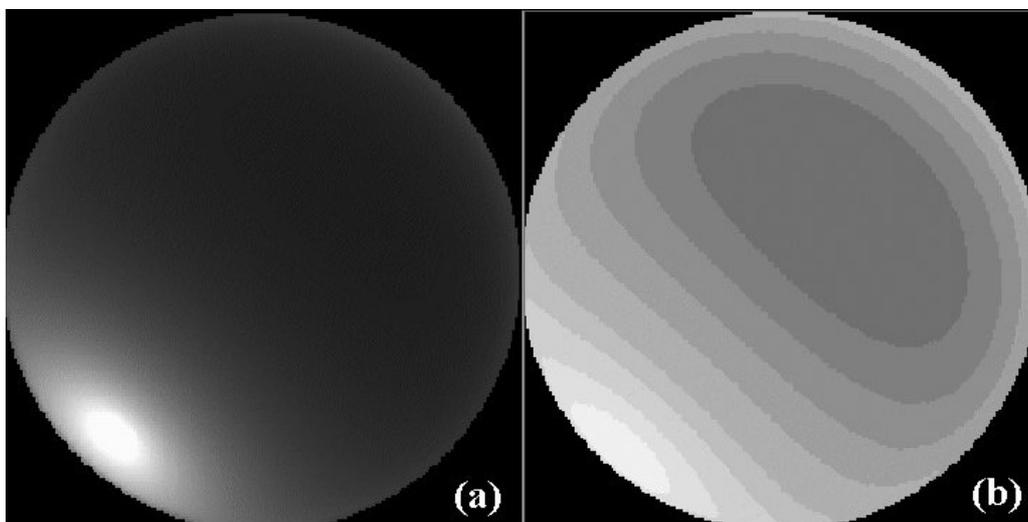


Figura 4. Simulação de resultados para o modelo CIE: (a) céu limpo; (b) seu respectivo mapa de tons de cinza.

5. Conclusões

Neste artigo caracterizou-se a distribuição angular de intensidade da radiação solar difusa em dias de céu limpo, através de mapas de tons de cinza, obtidos pela técnica de redução de níveis de cinza, aplicada a imagens monocromáticas de uma ampla região do hemisfério celeste. A aquisição das imagens realizou-se por meio de um sistema experimental que emprega uma câmera CCD monocromática, com lente grande angular.

Demonstrou-se que a metodologia proposta pode ser empregada no processamento e análise das imagens digitais monocromáticas, para caracterizar qualitativamente a distribuição de intensidade em condições de céu limpo. Os resultados quantitativos foram obtidos pelos valores da distribuição angular de intensidade relativa, calculada, neste caso, pela razão entre os valores de RGB de uma determinada região do hemisfério celeste e o valor de RGB do zênite. Para representar algumas situações, características dos céus limpos, foram apresentados diversos mapas de tons de cinza com os respectivos valores da distribuição de intensidade relativa. Todos os resultados concordam com as peculiaridades da distribuição de intensidade observadas em céus limpos. As imagens analisadas mostram que, nesta condição, a distribuição de intensidade tem grande dependência com a posição solar. Finalmente, apresentou-se, como exemplo, uma comparação qualitativa, entre as imagens deste trabalho e uma simulação realizada a partir do modelo *CIE Standard General Sky*.

Como extensão destes resultados, num próximo trabalho, será demonstrado que os valores medidos de irradiância difusa podem ser associados aos respectivos arquivos de imagem, para estimar a distribuição de radiância. Como proposta e perspectiva para futuras pesquisas pretende-se aprofundar a comparação entre estes resultados e os diferentes modelos de distribuição de radiância / luminância, incluindo resultados quantitativos.

6. Referências

- Batlles, F.J., Olmo, F. J. e Alados, A. L., 1995. "On Analyses of Shadowband Correction Methods for Diffuse Irradiance Measurements", *Solar Energy*, Vol. 54, pp. 105-114.
- Brunger, A. P. e Hooper (a), F. C., 1993. "Anisotropic Sky Radiance Model Based On Narrow Field of View Measurements of Shortwave Radiance", *Solar Energy*, Vol 51, pp. 53-64.
- Brunger, A. P. and Hooper (b), F. C., 1993. "Erratum to Anisotropic Sky Radiance Model Based On Narrow Field of View Measurements of Shortwave Radiance" *Solar Energy*, Vol. 51, n° 6, p. 523.
- Chandrasekhar, S., 1960 "Radiative Transfer", Dover Publications, Inc. New York, 393 p
- Coombes, C. A. e Harrison, A.W., 1982. "An Automatic All Sky Scanning Radiometer", *Canadian J. of Phys.*, Vol 60, pp. 919-925.
- Coombes, C. A. e Harrison, A.W, 1988. "Angular Distribution of Overcast Sky Short wavelength Radiance", *Solar Energy*, Vol. 40, n° 2, pp. 161-166.
- Darula, S. e Kittler, R., 2002. "CIE General Sky Standard Luminance Distributions", *The Canadian conference on building energy simulation – proceedings of eSim 2002*.
- Dave, J. V., 1977. "Validity of Isotropic-Distribution Approximation in Solar Energy Estimations", *Solar Energy*, Vol 19, p. 331-333.
- Dave, J. V., 1978. "Extensive Datasets of the Diffuse Radiation in Realistic Atmospheric Models with Aerosols and Common Absorbing Gases", *Solar Energy*, Vol 21, p. 361-369.
- Facon, J., 1993. "Processamento de Imagens", Centro Federal de Educação Tecnológica do Paraná, VI Escola Brasileiro - Argentina de Informática, 1993.
- Fuentes, L. M., 1999. "Construcción de un Fotómetro de Imagen Digital. Calibración Detallada y Aplicaciones", Tesis para optar al grado de Doctor en Ciencias – Edición Revisada Universidad de Valladolid – Facultad de Ciencias, Departamento de Óptica y Física Aplicada, 128p.
- Harrison, A. W., 1991. "Directional Sky Luminance Versus Cloud Cover and Solar Position", *Solar Energy*, Vol. 46, n° 1, pp. 13-19.
- Harrison, A. W. e Coombes, C. A., 1988. "Angular Distribution of Clear Sky Short Wavelength Radiance", *Solar Energy*, Vol. 40, n° 1, pp. 57-63.
- Ineichen, P., Gremaud, J. M., Guisan, O. and Mermoud, A., 1984. "Study of the Corrective Factor Involved When Measuring the Diffuse Solar Radiation by Use of the Ring Method", *Solar Energy*, Vol. 32, n° 5, pp. 585-590.
- Iqbal, M, 1983. "An Introduction to Solar Radiation", Academic Press, Toronto, 390 p.
- Karayel, M.; Navvab, M.; Neweman, E. e Selkowitz, S., 1983, "Zenith Luminance and Sky Luminance Distributions for Daylighting Calculations", *Energy and Buildings*, Vol. 6, n° 3, p. 511-516.
- Kittler, R. e Valko, P., 1993 "Radiance Distributions on Densely Overcast Skies: Comparisons With CIE Luminance Standard", *Solar Energy*, Vol. 51, n° 5, pp. 349-355.
- Kittler, R., 1985, "Luminance distribution characteristics of homogeneous skies: a measurement and prediction strategy", *Lighting Research & Technology*, Vol 17. No. 4, pp183-188.
- Kittler, R., 1994 "Some Qualities of Scattering Functions Defining Sky Radiance Distributions", *Solar Energy*, Vol. 53, n° 6, pp. 511-516.
- Kondratyev K. YA., 1969. "Radiation in the Atmosphere", A. Press, New York, 912 p.

- Kudish, A. I. e Ianetz, A., 1993. "Analyses of Diffuse Radiation Data for Beer Sheva: Measured (Shadow Ring) Versus Calculated (Global-Horizontal Beam) Values", *Solar Energy*, Vol. 51, pp. 495-503.
- Li, D. H. W. e Lam, J. C., 2001, "Evaluation of Lighting Performance in Office Buildings With Daylighting Controls", *Energy and Buildings*, Vol. 33, n° 8, p. 793-803.
- LeBaron, B. A., Peterson, W. A., e Dirmhirn, I., 1980, "Corrections for Diffuse Irradiance Measured with Shadowbands", *Solar Energy*, Vol. 25, pp. 1-17.
- Marques Filho, O. e Vieira Neto, H., 1999. "Processamento Digital de Imagens", Brasport Livros e Multimídia Ltda., Rio de Janeiro, 406 p.
- McArthr, J. B. e Hay, J. E., 1981(a). "An Assessment of the Techniques for Determining the Distribution of Diffuse Solar Radiance for the Sky Hemisphere", *Solar Energy*, Technical Note, Vol. 25, pp. 573-574.
- McArthr, J. B. e Hay, J. E., 1981(b). "A Technique for Mapping the Distribution of Diffuse Solar Radiation over the Sky Hemisphere", *J. Appl. Meteorol.*, 20(4), pp. 421-429.
- Miñano, J. C. D., 1985, "Aspectos Relativos a la Sintesis de Concentradores Para Fuentes Solares Extensas", Universidade Politécnica de Madrid – Tesis Doctoral, Madrid, 265 p.
- Olmo, F. J.; Vida, J.; Foyo, I.; Castro-Diez, Y. e Alados-Arboledas, L., 1999. "Prediction of Global Irradiance on Inclined Surfaces from Horizontal Global Irradiance", *Energy*, Vol. 24, pp. 689 – 704
- Painter, H. E., 1981. "The Shade Ring Correction for Diffuse Irradiance Measurements", *Solar Energy*, Vol. 26, pp. 361-363.
- Perez, R., Seals, R. e Michalsky, J., 1993. "All Weather Model for Sky Luminance Distribution", *Solar Energy*, Vol. 50, n° 3, p. 235 – 245.
- Rosen, M. A., 1992. "Investigation of the Validity of the TDR Model for the Distribution Diffuse Sky Radiance", *Solar Energy*, Vol 48, n° 2, pp. 123 – 131.
- Rossini, E. G. e Krenzinger, A., 2000. "Metodologia para Caracterização da Radiação Solar Difusa", *Nutau 2000*, pp. 823 – 829.
- Rossini, E. G., 2002. "Caracterização da Distribuição de Intensidade da Radiação Solar Difusa", Tese – Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica – PROMEC, UFRGS, 175 p.
- Shields, J.; Karr, M. E., Tooman, T. P., Sowle, D. H., Moore, S. T., 1999 "The Whole Sky Imager – a year of progress. http://mpl.ucsd.edu/people/jshields/shields_98.pdf.
- Siala, F. M. F., Rosen M. A., Hooper, F. C., 1990. "Models For Directional Distribution of the Diffuse Sky Radiance", *ASME*, Vol 112, pp. 102-108.
- Syrjäsuo, M., 1996. "All-Sky Camera", Master Thesis – Helsinki University of Technology – Faculty of Electrical Engineering, 68 p.
- Wagner, S., 1998. "Calibration of Gray Values of Hemispherical Photographs for Image Analysis", *Agricultural and Forest Meteorology*, Vol. 90, p. 103 – 117.

7. Agradecimentos

"O presente trabalho foi realizado com o apoio do Conselho de Desenvolvimento Científico e Tecnológico – CNPq - Brasil".

MAPS OF SKY RADIANCE AND LUMINANCE DISTRIBUTIONS UNDER CLEAR SKY CONDITIONS

Elton G. Rossini

Laboratório de Energia Solar. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Rua Sarmiento Leite, 425, CEP:90050-170 Porto Alegre - RS – Brasil
rossini@mecanica.ufrgs.br

Arno Krenzinger

Laboratório de Energia Solar. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Rua Sarmiento Leite, 425, CEP:90050-170 Porto Alegre - RS – Brasil
arno@mecanica.ufrgs.br

Abstract *The purpose of this work is to characterize the distribution of radiance and luminance, through sky images acquired using a monochromatic CCD wide angle lens camera. The analysis emphasizes the characteristics present in the clear skies. The proposed methodology is based on the reduction of the grayscale levels from the original image, in order to sharpen the different regions in the sky hemisphere, yielding low levels gray scale maps. In these maps each gray level is related to an intensity level and each pixel is associated to a sky direction. An experimental system that is able to simultaneously supply images from the sky and solar irradiance data was developed. The angular distribution of the relative solar radiation intensity for different clear sky conditions was also determined. The results agree with the experimental observations of qualitative characteristics of the angular distributions of diffuse sky intensity. Quantitative results was obtained as sky distribution of relative intensity.*

Keywords: solar energy, solar radiation, diffuse solar irradiance, radiance distribution, luminance distribution