

# Primeira estação de medição de iluminação natural em território brasileiro: análise dos dados dos dois primeiros anos de funcionamento

*First daylight measurement station in the Brazilian territory: analysis of the first two years of data collection*

Roberta Vieira Gonçalves de Souza  
Fernando Oscar Ruttkay Pereira

## Resumo

**D**esde dezembro de 2001 encontra-se em operação a primeira estação de medição de iluminação natural brasileira, localizada em Florianópolis, SC. São apresentados aqui os resultados dos dois primeiros anos de operação dessa estação. A EMIN Floripa é uma estação de Classe Geral, estabelecida de acordo com as normas do Programa Internacional de Medição de Iluminação Natural (IDMP, *International Daylighting Measurement Programme*). São descritos os equipamentos de medição, o tratamento de dados adotado e a forma de apresentação de dados diários, mensais e anuais, com níveis de iluminância difusa e global e frequência de ocorrência de tipos de céu. Esta compilação de dados é usada na geração de modelos matemáticos para a caracterização da disponibilidade de luz natural no Brasil. Espera-se que a apresentação deste trabalho encoraje e ajude outras instituições e grupos de pesquisa que trabalham com iluminação natural a estabelecer novas estações.

**Palavras-chave:** medição de iluminação natural, iluminâncias externas, frequência de ocorrência de tipos de céu, IDMP.

## Abstract

*Since December 2001, the first daylighting Measurement Station in Brazil, named EMIN Floripa, has been operating in Florianópolis, state of Santa Catarina. This paper presents the results obtained in the first two years of operation. The EMIN Floripa is a General Class station, established according to the standards of the International Daylighting Measurement Programme (IDMP). The paper describes the measurement equipment, data processing procedures and the daily, monthly and annual graphs that present global and diffuse illuminance levels and the frequency of occurrence of sky types. This data compilation is used to generate mathematical models for charactering the daylight availability in Brazil. It is expected that the presentation of this work will encourage and help other institutions and research groups that work with daylighting to establish other IDMP stations.*

**Keywords:** *daylight measurement, external illuminances, frequency of occurrence of sky types, IDMP*

**Roberta Vieira Gonçalves de Souza**

Departamento de Tecnologia da  
Arquitetura e do Urbanismo  
Universidade Federal de Minas  
Gerais  
R. Paraíba, 697 - Sala 319  
Funcionários -  
CEP 30130140 - Belo Horizonte  
MG -Brasil  
Tel.: (31) 3269-1823  
E-mail: roberta@arq.ufmg.br

**Fernando Oscar Ruttkay Pereira**

Departamento de Arquitetura,  
Centro Tecnológico -  
Universidade Federal de Santa  
Catarina,  
Campus Universitário, Trindade  
CEP 88040-900 - Florianópolis, SC  
- Brasil  
Tel.: (48) 3317-080  
E-mail: feco@arq.ufsc.br

Recebido em 13/05/04

Aceito em 14/10/04

## Introdução

A iluminação natural é uma das mais interessantes fontes de energia para uso em edificações. É uma fonte limpa, sem ônus direto e de grande disponibilidade em território brasileiro, ao longo de todo o ano. Existe cada vez mais, no Brasil, a consciência de que seu uso nos traz não só benefícios de ordem psicológica, um agradável contato com o ambiente externo, uma distribuição dinâmica e agradável de luz, mas também benefícios de ordem econômica, quer pela economia de energia elétrica que pode proporcionar, quer pela melhoria de produtividade e diminuição de absenteísmo no trabalho.

Existem vários métodos e ferramentas para avaliar a disponibilidade de luz natural em um ambiente interno e que são usados de forma a melhorar o desempenho de sistemas de iluminação natural. A maioria desses métodos e ferramentas se baseia no conhecimento dos níveis externos de iluminação para obter os níveis internos. Os dados externos são obtidos por meio de modelos matemáticos desenvolvidos para esse fim; e para que sua utilização seja mais efetiva, são necessários dados de base sobre sua disponibilidade e forma de ocorrência.

São relativamente recentes os esforços para quantificar de forma adequada a disponibilidade de luz natural através do mundo. O projeto IDMP (*International Daylight Measurement Programme*) para medição de iluminação natural foi lançado em 1991 na Europa, pouco mais de uma década atrás. Apenas em 1996, foi lançado o primeiro Atlas Europeu de Iluminação Natural.

No Brasil, apenas a partir de dezembro de 2001, iniciou-se a medição sistemática de níveis de iluminação natural externa pela Estação de Medição de Iluminação Natural de Florianópolis/SC – EMIN Floripa – de acordo com a norma internacional *Guide to Recommended Practice of Daylight Measurement* – Guia de Recomendações para a Prática de Medições de Iluminação Natural (CIE, 1994), havendo uma segunda estação, localizada em Belo Horizonte/MG, em operação desde 2003.

Este trabalho traz um resumo sobre a estrutura desse tipo de estação e uma compilação dos dados obtidos nos dois primeiros anos de operação da EMIN Floripa: 2002 e 2003.

## Medição de iluminação natural e aproveitamento em ambientes internos

A avaliação da eficácia dos sistemas de iluminação natural usualmente propostos para uma edificação quanto à sua capacidade de atender às necessidades visuais do usuário, de fornecer níveis adequados de iluminação e de ser energeticamente eficiente é feita mediante o conhecimento do desempenho desses sistemas ante as várias condições climáticas que se apresentem. Para auxiliar o desenvolvimento de edificações mais bem integradas com a variabilidade da luz natural, a existência de dados sistematicamente medidos sobre o clima luminoso local (estatística sobre a radiação e a iluminação horizontal e vertical incidente) será de grande importância.

Em climas com dias predominantemente ensolarados, alguma forma de controle da radiação solar incidente é necessária e o uso de sistemas de redirecionamento da insolação direta pode ser considerado como uma alternativa para levar mais luz natural a regiões internas mais afastadas das aberturas. Para os climas onde houver uma predominância de dias encobertos, maiores aberturas para ampliar a admissão de luz devem ser consideradas. Os sistemas de controle de iluminação são bastante úteis para garantir níveis especificados de iluminação. Mas esses sistemas de controle devem ser especificados em função do clima luminoso local, uma vez que sua eficiência, sob o ponto de vista da economia de energia e da resposta do usuário, é fortemente dependente da distribuição de iluminação natural no ambiente, que, por sua vez, é dependente das características climáticas externas (RUCK, 1998; ZONNENVELDT; MALLORY-HILL, 1998).

Dados de disponibilidade de luz natural e distribuição de luminâncias de céus são um problema meteorológico com as mesmas escalas de tempo e incertezas da predição de tempo. Isso indica que não haverá grandes certezas para predição de valores instantâneos, mas com dados medidos de longo prazo, adequadamente tratados, poder-se-á obter predições do desempenho de soluções racionais de iluminação natural (JULIAN, 1998). Os desvios locais, temporais e de média, assim como a complexidade de escolher o melhor conjunto de tipos de céus, definidos pelas condições predominantes de nebulosidade ou turvamento, juntamente com as irradiancias e iluminâncias direta, difusa e global resultantes, têm que ser definidos para que se chegue a uma resposta satisfatória das necessidades de projeto (KITTLER, 1994).

É com o objetivo de gerar uma base de dados sobre iluminação natural confiável e adequada para o Brasil que se lançou em 2001 a primeira Estação de Medição de Iluminação Natural Brasileira em Florianópolis/SC – EMIN Floripa. Espera-se que, a partir desta estação e da implementação de novas estações, como a já instalada EMIN BH, em Belo Horizonte/MG, se possa utilizar cada vez mais efetivamente a luz natural em edificações a partir de dados medidos que possibilitem a seleção e/ou o desenvolvimento de modelos matemáticos para caracterizar a disponibilidade de luz natural no Brasil.

## Grandezas medidas

De acordo com a CIE (1994), as seguintes grandezas devem ser medidas em uma estação de medição de Classe Geral:

- (a) iluminância global horizontal ( $E_g$ ) em klux;
- (b) iluminância difusa horizontal ( $E_d$ ) em klux;
- (c) irradiância global horizontal ( $I_g$ ) em  $W/m^2$ ;
- (d) irradiância difusa horizontal ( $I_d$ ) em  $W/m^2$ ;
- (e) iluminância de céu e de sol nas superfícies verticais orientadas para norte, leste, sul e oeste ( $E_n, E_e, E_s, E_w$ ) em klux;
- (f) irradiância de céu e de sol nas superfícies verticais orientadas para norte, leste, sul e oeste ( $I_n, I_e, I_s, I_w$ ) em  $W/m^2$ ; e
- (g) luminância do zênite ( $L_z$ ) em  $lm/m^2$ .

A estação EMIN Floripa realiza essas medições a cada 5 segundos, armazenando dados médios de cada minuto. Faz-se, ainda, o registro fotográfico do céu a cada 15 minutos, durante o período diurno, obtendo-se uma informação extra para a análise das condições de céu local.

## A estação de medição de iluminação natural

### Localização

A EMIN Floripa (27° 32' de latitude sul e 48° 43' de longitude oeste) localiza-se na cobertura do prédio de Engenharia Mecânica da UFSC, junto à estação de medição de radiação solar do Laboratório de Energia Solar (Labsolar), Campus da Universidade Federal de Santa Catarina, e foi montada com recursos do Laboratório de Conforto Ambiental (Labcon), do Departamento de

Arquitetura da mesma instituição, obtidos em grande parte com projeto financiado pelo Conselho Nacional de Pesquisa (CNPq).

## Equipamentos

A estação é composta de um conjunto de sete fotocélulas para medições de luminância de zênite, iluminância horizontal global e difusa, iluminância vertical norte, sul, leste e oeste. Quatro piranômetros fazem as medições de irradiâncias verticais norte, sul, leste e oeste. Os sinais emitidos pelos sensores são lidos por uma estação de coleta de dados. Faz-se, ainda, o registro fotográfico das condições de céu a cada 15 minutos, através de uma câmara digital Pixera Professional, com lente olho de peixe Nikon FC-08 adaptada para o uso com a câmara digital. Um programa desenvolvido pelo Labsolar/UFSC faz a ativação da câmera em intervalos de 15 minutos ao longo da duração do dia.

O registro fotográfico permite aferir a correção de índices usados na determinação de tipos de céu, além de verificar a ocorrência de chuva e outros fenômenos, como ocorrência de granizo, geada, poluição, etc., que possam afetar as medições. O registro ainda está disponível para uso por diversos pesquisadores que necessitem do registro visual das condições de céu simultâneas às medições de iluminação ou temperatura do ar em ambientes internos ou por pesquisadores que trabalhem com a frequência de ocorrência e tipos de nuvens. Um exemplo desse registro fotográfico, conjugado a medições de iluminâncias difusas e globais, pode ser visto na Figura 1.

A seguir descrevem-se os sensores e suas bases de suporte desenvolvidas para este projeto:

(a) fotocélulas: para as medições de iluminância e luminância foram utilizadas fotocélulas LI-210SZ com resposta de cosseno-corrigido e correção espectral para um observador padrão CIE (Figura 2). São fotocélulas de silício com faixa de medição de até 100.000 lux e desenhadas para resistir ao tempo. Esses sensores devem ser recalibrados a cada ano.

(b) piranômetros: para as medições de radiação em plano vertical, foram utilizados quatro piranômetros LI-200SZ. Embora a resposta desse tipo de sensor não seja ideal (resposta espectral igual para comprimentos de onda de 280 nm a 2.800 nm – Figura 3), estes têm sido utilizados por várias estações da rede IDMP.

(c) *data logger Campbell CR10X*: aparelho para a aquisição de dados, faz a leitura do sinal emitido pelos sensores e armazena dados a cada minuto.

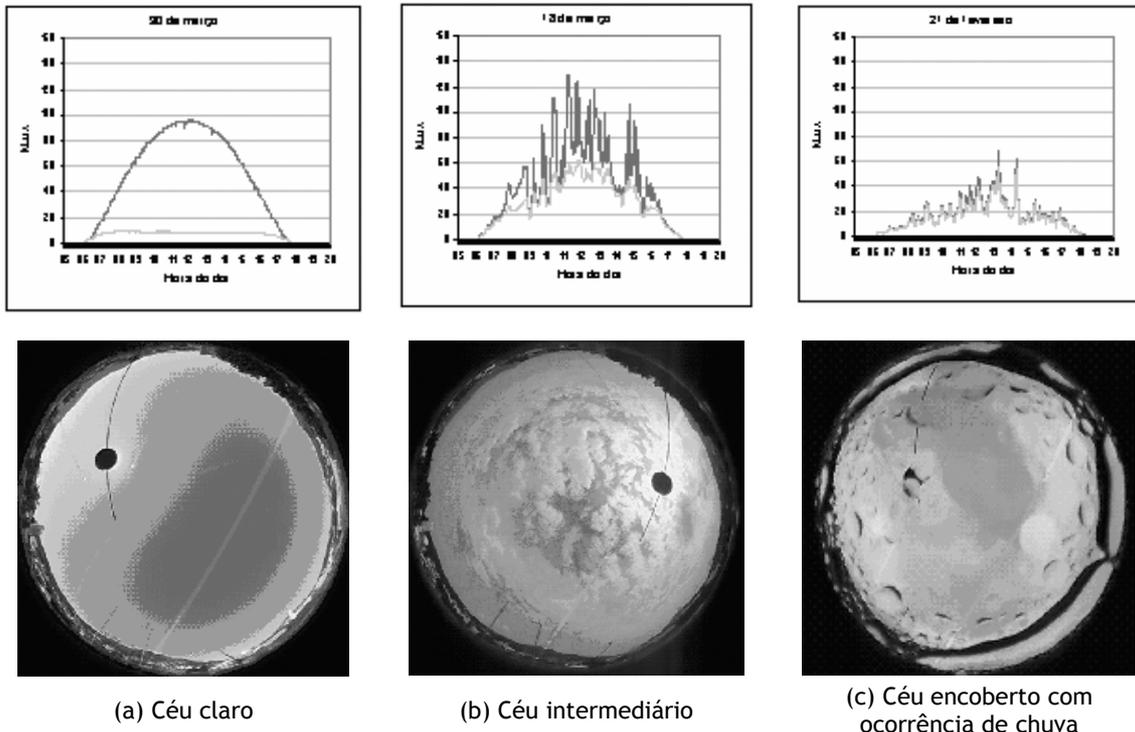


Figura 1 - Exemplo de dados de iluminância difusa e global - fotos tiradas às 12h00 HSV nos dias correspondentes.

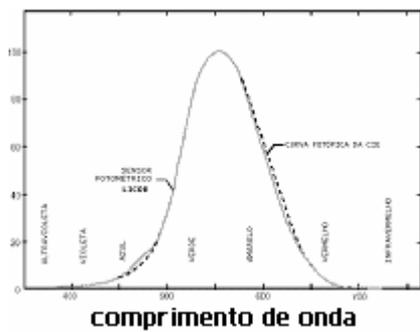


Figura 2 - Resposta espectral do sensor LI-210SZ em relação à visão do observador padrão da CIE (LICOR, 1991)



Figura 3 - Resposta espectral do piranômetro LI 210SZ sobre distribuição de energia do espectro solar (LICOR, 1991)

## Bases de suporte para os sensores

Para fixação dos sensores e proteção contra incidência indesejável de radiação ou iluminação, foram construídos diversos tipos de suportes, descritos a seguir:

(a) anel de sombreamento: anel com inclinação igual à latitude do local (28 graus), que faz sombra no sensor horizontal para evitar a incidência da luz solar direta sobre este. Este anel deve ser ajustado semanalmente para correção do sombreamento em face da trajetória do sol (Figura 4);

(b) obstrutor para leitura vertical: os sensores para medição de iluminância e irradiância vertical devem ser protegidos da luz refletida pelo solo, e isso é feito por um aro preto fosco, que forma um horizonte artificial no nível do centro da cabeça de medição do sensor, como pode ser visto no dispositivo apresentado na Figura 5. A distância perpendicular entre o sensor e a tela deve ser de no mínimo 10 vezes o diâmetro da cabeça de medição do sensor. A luz refletida de baixo para cima dentro do horizonte artificial deve ser minimizada usando-se persianas ou colméias preto-foscas (CIE, 1994);

(c) tubo colimador para medição de luminâncias do zênite: a luminância de céu é obtida a partir da leitura da iluminância horizontal produzida pela porção zenital do céu em um ângulo sólido de  $11^\circ$ . Para tal, foi construído um tubo dentro do qual foram colocados diversos anéis concêntricos, de forma a evitar reflexões indevidas da luz incidente no interior do tubo quando o sol se encontra próximo ao zênite (Figura 6);

(d) disco de sombreamento e proteção contra intempéries da câmera fotográfica: foi montado um dispositivo para o sombreamento e proteção da câmera fotográfica, como mostrado na Figura 7. Esta câmera tem um sensor bastante sensível, e sua exposição ao sol direto causa rápida degradação do sensor óptico, por isso é imprescindível sua conexão a um disco de sombreamento, assistido com um sistema “no-break” e constante supervisão de seu funcionamento. A lente deve ser impermeabilizada para evitar infiltrações, já que está diretamente exposta à chuva;

(e) ligação dos sensores: para a conexão dos sensores ao *datalogger*, foram utilizados cabos blindados. Foram ligadas resistências para transformar o sinal das fotocélulas de corrente para voltagem;

(f) verificação do norte verdadeiro: o norte verdadeiro foi tomado mediante verificação da direção da sombra de uma haste ao meio-dia solar, em hora solar verdadeira; e

(g) limpeza: os sensores são limpos semanalmente.

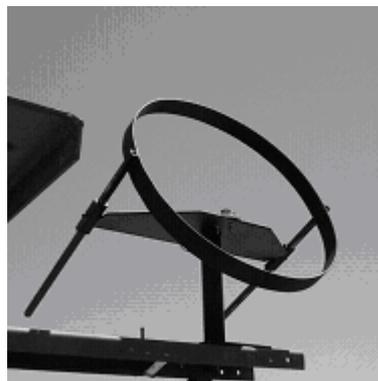


Figura 4 - Anel de sombreamento para medição de radiação difusa

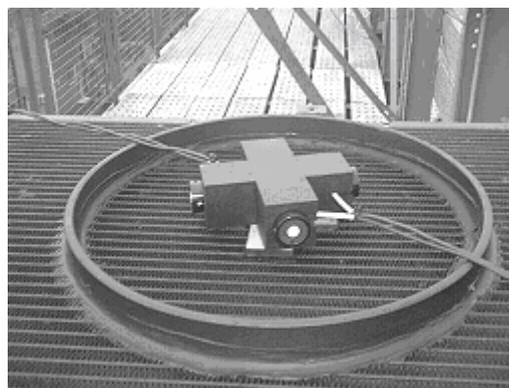
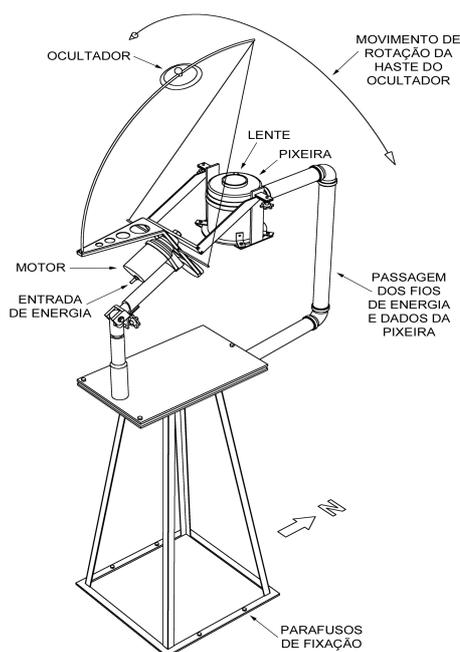


Figura 5 - Cruzeta com base rotativa. O norte foi localizado pela direção da sombra no meio dia solar



Figura 6 - Tubo colimador para medição de luminância do zênite



Fonte: Pesquisadora Mariza Pereira de Souza - INPE.

Figura 7 - Conjunto câmara e lente acoplados a disco de sombreamento

### Calibração dos sensores

Foram utilizados dois processos distintos para calibrar os sensores de iluminação e os sensores de radiação, descritos a seguir. Os primeiros foram calibrados com um calibrador de radiação óptica 1800-02 da LI-COR, que é um sistema de calibração portátil usado para calibrar instrumentos de medida de radiação na faixa de 300 nm a 1.100 nm de comprimento de onda. Os piranômetros LI-COR, por sua vez, foram calibrados por comparação com o piranômetro padrão Kipp&Zonen CM11.

### Obstrução de entorno

A estação deve estar situada em local o mais livre de obstruções de entorno possível, admitindo-se uma obstrução contínua máxima de 5 graus.

Para verificar a presença de obstruções, fez-se um estudo fotográfico pela sobreposição de curvas de geradas a cada 10 graus de leitura acima do nível do horizonte, tomadas a partir do centro da lente olho de peixe (que possui 183° de abertura). São ignorados os 3 graus a mais que estariam abaixo da linha do horizonte. Os ângulos de obstrução puderam, então, ser avaliados como mostra a Figura 8. Nota-se que as obstruções de entorno são em média de 2° a 4°, relação admissível pela norma CIE 108 (CIE, 1994).

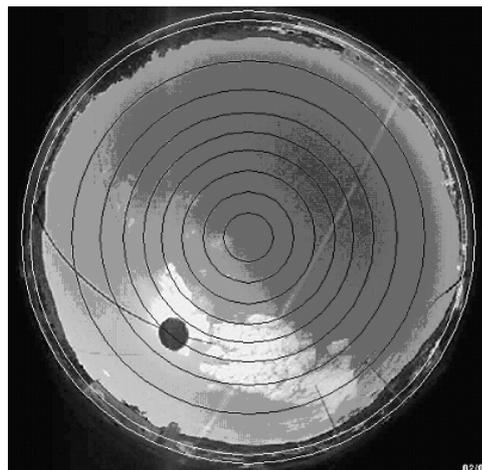


Figura 8 - Projeção do entorno da estação com lente olho de peixe

### Tratamento de dados

Uma série de procedimentos é realizada após a coleta inicial dos dados para a identificação de eventuais desvios ou falhas nas medições. Deve-se:

- eliminar valores de irradiância/iluminância difusa horizontal que sejam maiores que os correspondentes de global horizontal;
- eliminar os dados de irradiância/iluminância global horizontal maiores que 1,2 vezes a constante extraterrestre,  $I_e$ , e da difusa horizontal maiores que 0,8 vezes a constante extraterrestre;
- eliminar os valores de irradiância/iluminância global horizontal menores ou iguais a 0,5 W/m<sup>2</sup> ou 0,2 klux, de irradiância e iluminância, respectivamente;
- eliminar os valores de componente direta  $[(\text{global-difusa})/\text{sen}\alpha]$  que excedam a razão  $I_e/E_e$  (sendo  $I_e$  e  $E_e$  iluminância e irradiância extraterrestres), sendo  $\alpha$  a altura solar; e
- eliminar dados para alturas solares menores que 4°.

Ainda, os valores de iluminância difusa medidos com anel de sombreamento devem ser tratados de forma a compensar o sombreamento causado pelo anel. Usa-se para tal a correção de Drummond (IQBAL, 1983), com um fator de correção,  $f_D$ , que apresenta o seguinte procedimento de correção:

$$f_D = 1 / (1 - X), \quad (1)$$

onde

$$X = (2b / \pi r) \cdot \cos 3\delta \cdot [(\pi/180) \cdot \psi_o \cdot \text{sen } \phi \text{sen } \delta + \cos \phi \cos \delta \cdot \text{sen } \psi_o], \quad (2)$$

onde  $b$  = largura do anel;  $\psi_0$  = ângulo do azimute solar ao nascer do sol;  $r$  = raio do anel;  $\phi$  = latitude do local;  $\delta$  = declinação solar.

Este modelo leva em consideração apenas a geometria solar, apresentando o mesmo valor ao longo do dia. Nenhuma anisotropia da radiação difusa decorrente da variação da posição do sol no céu ao longo do dia ou da cobertura de nuvens é levada em consideração (ABREU et al., 1999).

Após essa limpeza inicial nos dados e a correção do sombreamento, são gerados gráficos diários para nova verificação das medidas resultantes.

Verificou-se ao longo do processo que os gráficos de iluminância difusa medida com anel e de irradiância difusa medida com anel e também com disco de sombreamento possuíam curvas bastante similares em sua forma. As curvas dessas três grandezas são, então, representadas em um único gráfico com escalas distintas para iluminâncias e irradiâncias, e o comportamento dessas curvas é verificado visualmente (Figura 9a). No caso de ocorrerem discrepâncias entre as curvas, os dados considerados discrepantes (geralmente por incidência solar direta sobre o sensor) são eliminados em nova triagem, e a correta exclusão é verificada (Figura 9b).

Também são representadas graficamente as demais grandezas medidas, formando um conjunto diário de cinco gráficos, que são analisados em busca de desvios que possam ter ocorrido. Um exemplo desse conjunto de gráficos é dado na Figura 10, que representam os dados obtidos no dia 11 de fevereiro de 2002. Nota-se que esse dia apresentou céu claro pela manhã e início da tarde, caracterizando-se como parcialmente encoberto (ou encoberto) no meio da tarde, e como um céu tendendo a ser claro novamente no fim do dia. Essa movimentação pode ser acompanhada pela variação dos índices de brilho e de claridade apresentados no gráfico (Figura 10e).

## Condições de céu

De acordo com Kittler, Perez e Darula (1997), podem-se classificar os tipos de céu em duas categorias básicas: céus homogêneos e céus não homogêneos. Céus homogêneos são os que variam do claro ao turvo, nebuloso e encoberto, com uma densidade atmosférica razoavelmente semelhante em todas as direções. Estes céus irão possuir um padrão de céu típico de distribuição espacial homogênea e terão uma marcada tendência a uma mudança fluida ou constante que pode ser definida por funções matemáticas. Os céus não homogêneos são caracterizados por irregularidades e distribuições não homogêneas – como o céu azul

com nuvens, céus parcialmente encobertos e céus com nuvens esparsas – e possuem diferenças aleatórias nas luminâncias medidas em um esquema de “escaneamento” regular. Estes tipos de céu terão diferentes classificações em função do tipo, altura e quantidade de nuvens presentes no céu.

A CIE propõe cinco tipos de céu homogêneos, baseados no valor do índice de nebulosidade, ou razão de nuvens: encoberto, encoberto intermediário, médio intermediário, claro intermediário e claro. No entanto, considera-se neste trabalho que são três as categorias de céu mais relevantes para a caracterização das condições de iluminação natural: céu encoberto, céu claro e céu intermediário (ou parcialmente encoberto). São estes os três modelos com que grande parte da literatura científica trabalha e acredita-se que sejam suficientes para caracterizar as condições de céu de determinada localidade.

Em um dia completamente encoberto não há luz solar direta atingindo o solo, a coroa solar não é visível e a luz de céu é tão uniformemente difundida que o padrão da luminância de céu é visualmente simétrico em relação ao zênite. A luminância de um céu encoberto é menor no horizonte do que no zênite. Este tipo de céu resulta de refração/reflexão da luz direta do sol (em todos os comprimentos de onda) em grandes partículas de água em suspensão na atmosfera. O resultado é uma abóbada que pode apresentar gradações do branco ao cinza escuro, geralmente com a porção zenital apresentando uma luminância maior que a da porção próxima à linha do horizonte (LYNES, 1968; PEREIRA, 1994).

Céu claro é aquele céu onde não há significativa presença de nuvens. O modelo de distribuição de luminâncias do céu em um dia claro se baseia inteiramente na luz do sol dispersa em sua passagem pela atmosfera, chamada de luz do céu ou luz difusa. Neste tipo de céu, as reduzidas dimensões das partículas de água fazem com que os comprimentos de onda da porção azul do espectro sejam refletidos com maior intensidade que os outros em direção à superfície da terra, conferindo esta cor ao céu.

O céu intermediário ou parcialmente encoberto é um céu com presença de nuvens que não cobrem totalmente a abóbada celeste. Para este tipo de céu possui-se ainda um conhecimento limitado, especialmente com relação ao seu formato, grau de cobertura e tipo mais freqüente de nuvens. É, no entanto, um tipo de céu dos mais freqüentes em território brasileiro e deve ser considerado em estudos de iluminação natural.

Para a separação dos tipos de céu em claro, encoberto e intermediário, adotam-se dois índices: o Índice de Claridade ( $\epsilon'$ ) e o Índice de Brilho ( $\Delta$ ) (PEREZ, 1990a). Estes dois índices, juntamente com a altura solar, são os componentes básicos que permitem parametrizar as condições de céu. O primeiro índice ( $\epsilon'$ ) expressa a transição de um céu totalmente encoberto a um céu claro de baixo turvamento; as variações do segundo ( $\Delta$ ) refletem o grau de opacidade/espessura das nuvens.

$$\epsilon' = \frac{(I_d + I_n)}{I_d} + 1,041 Z^3, \quad (3)$$

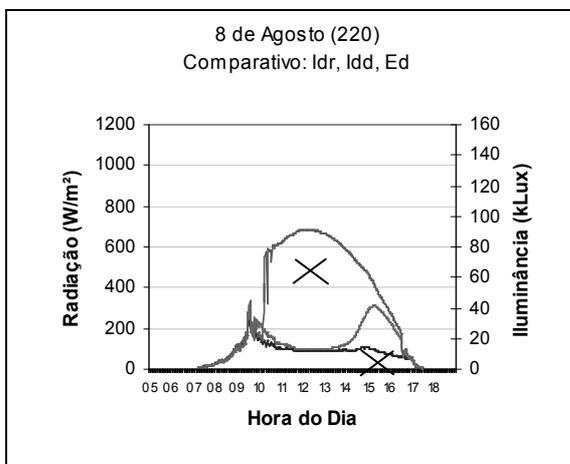
$$\frac{1}{1 + 1,041 Z^3}$$

onde  $I_d$  = irradiância difusa;  $I_n$  = irradiância normal;  $Z$  = ângulo zenital do sol (radianos).

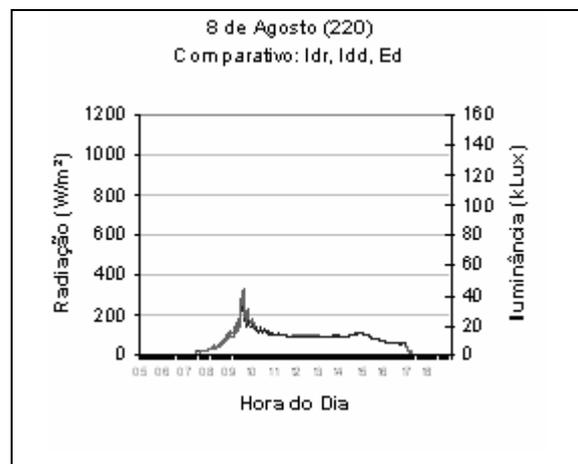
$$\Delta = \frac{I_d m}{I_e}, \quad (4)$$

onde  $I_e$  = irradiância extraterrestre.

Estes índices são calculados para médias de meia hora dos dados medidos. Assim, pode-se analisar a frequência de ocorrência de tipos de céu em cada mês ou ao longo do ano.

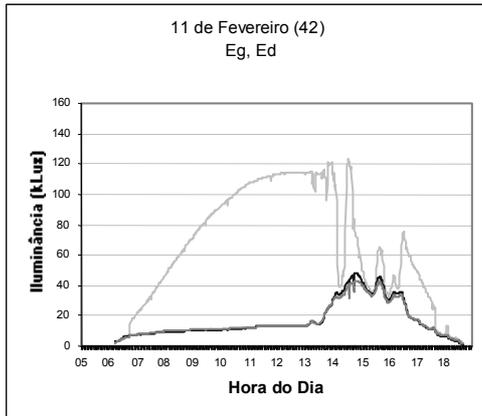


(a)

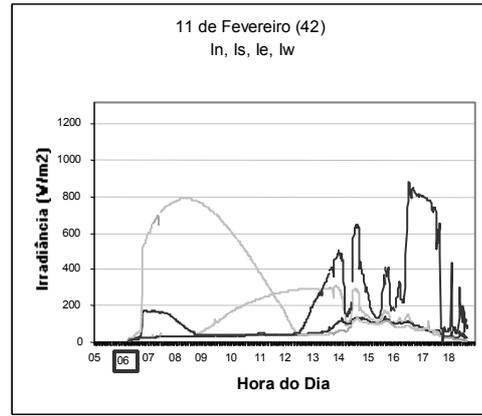


(b)

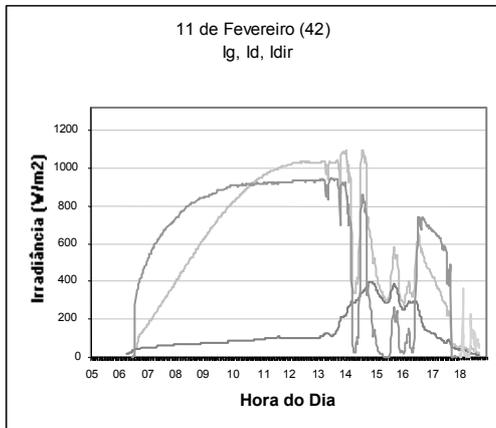
Figura 9 - Gráficos de dados de iluminância e irradiância difusas medidas com anel de sombreamento, e de irradiância difusa medida com disco: dados que evidenciam incidência solar direta (a) são eliminados (b).



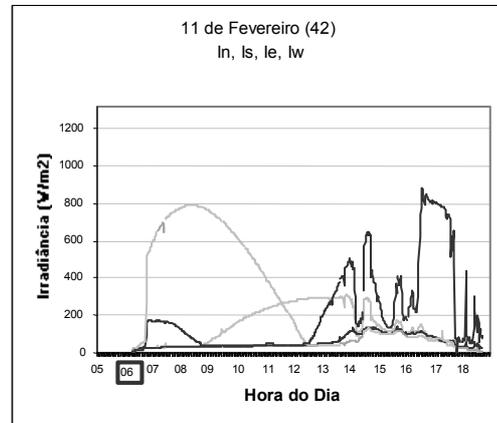
(a) Iluminância horizontal difusa e global



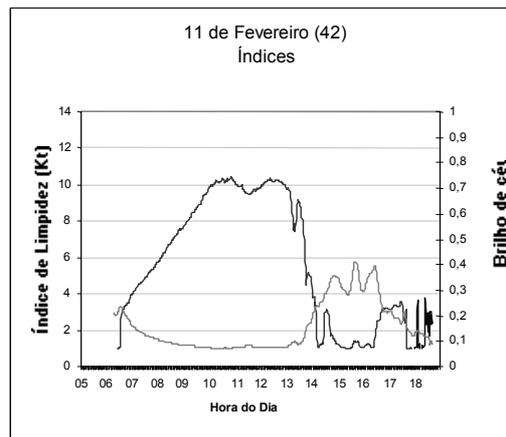
(b) Iluminância vetical, norte, sul, leste e oeste



(c) Iluminância horizontal difusa, direta e global



(d) Irradiância vertical, norte, sul, leste e oeste



(e) Índice de brilho e de claridade

Figura 10 - Iluminância horizontal difusa e global: dados de 11 de fevereiro de 2002

## Níveis de iluminação natural e caracterização de tipos de céu

A representação gráfica das iluminâncias difusa e global medidas também fornece uma importante informação sobre a ocorrência de tipos de céu e níveis de iluminância. Essas informações, conjugadas às fotografias de céu, fornecem indicativos para o estabelecimento dos limites adotados para os índices descritos no item anterior.

Tomando-se o mês de fevereiro de 2002 como exemplo, teremos as curvas diárias de iluminância global e difusa (Figura 11). São calculados os Índices de Claridade e de Brilho, para médias a cada meia hora. Esses valores são comparados com a informação visual das fotografias de céu (Figura 12) representadas de forma a obter-se uma visualização da flutuação das condições de céu ao longo do dia e ao longo do mês.

As fotos permitem verificar as condições de insolação e condições de céu e a adequação dos índices  $\Delta$  e  $\varepsilon'$ . A análise da informação visual das fotografias permitiu que se definissem com maior clareza os intervalos-limite a serem adotados para esses índices.

Inicialmente, adotaram-se valores de  $\varepsilon' > 6,00$  e  $\Delta < 1,23$ , como indicado por Perez et al. (1990b) para caracterizar as condições de céu claro e límpido. Pela análise visual das fotografias e dos gráficos gerados, no entanto, decidiu-se adotar a classificação de Robledo e Soler (2000), que indica condições de céu claro para  $\varepsilon'$  a partir de 5,00 e  $\Delta < 1,2$ , sendo a classificação adotada como se segue.

A partir desta definição, pode-se analisar a frequência de ocorrência dos tipos de céu para cada época do ano. Essa informação é bastante importante na definição dos tipos de céus para análise de desempenho dos sistemas de iluminação natural e em projetos de conservação de energia, já que cada tipo de céu implica diferentes características de projeto e de desempenho luminoso do ambiente.

A seguir mostram-se os resultados conforme a classificação dos tipos de céu que ocorreram nos meses de fevereiro e agosto de 2002, apresentados nas Figuras 4 e 5, a seguir. São delimitadas nove condições de céu, classificadas através dos limites de Índice de Brilho e Índice de Claridade propostos

por Robledo e Soler (2000): céus encobertos, com abóbada escura (T11), com abóbada de baixa luminosidade (T12) e com abóbada de alta luminosidade (T13), céus intermediários, com abóbada escura (T21), com abóbada de baixa luminosidade (T22) e com abóbada de alta luminosidade (T23), e, finalmente, céus claros, com abóbada escura (T31), com abóbada de baixa luminosidade (T32) e com abóbada de alta luminosidade (T33). Este último tipo é inexistente em Florianópolis, pelo que se pode verificar a partir dos dados medidos.

O mês de fevereiro de 2002 (Figura 13) apresenta uma evidente ocorrência de céus claros ou intermediários com uma composição aproximada de 30% de céus claros, 40% de céus intermediários e 30% de céus encobertos. Nota-se que o mês apresenta elevada ocorrência de céus brilhantes, que representam 72% dos casos. Se a mesma análise for feita para o mês de agosto de 2002 (Figura 14), notar-se-á uma maior predominância de céus escuros e encobertos e de menor luminosidade, sendo 45% dos céus classificados como encobertos, 43% como intermediários e apenas 12% como céus claros. No mês de fevereiro há maior predominância de céus claros no período da manhã, com maior entrada de nuvens no período da tarde. O mês de agosto já apresenta maior presença de nuvens durante todos os horários do dia.

## Ocorrência de tipos de céu

Foi feita uma compilação da ocorrência registrada dos três tipos de céu: claro, encoberto e intermediário ao longo dos anos de 2002 e 2003. Essa ocorrência é mostrada na Figura 14.

Verifica-se que os meses de fevereiro e março são os que apresentam maior ocorrência de céus claros, sendo os céus encobertos mais frequentes nos meses de junho e julho. Nota-se que a condição insular da cidade de Florianópolis influencia fortemente em seu clima luminoso, fazendo com que haja constante presença de nuvens, de forma que as condições de céu predominantes ao longo de todo o ano sejam as que vão dos céus parcialmente encobertos a encobertos. Nota-se, ainda, que os meses de verão que vão de novembro a março são os meses que apresentam céus mais brilhantes, mesmo em dezembro e janeiro, que são meses caracterizados por maior ocorrência de chuvas.

Categorias de céu	$\epsilon$	$\Delta$
céu encoberto	1 – 1,20	
céu intermediário	1,20 – 5,00	
céu claro	$\geq 5,00$	$< 0,12$

Tabela 1 - Limites dos Índices  $\epsilon$  e  $\Delta$ , para classificação dos tipos de céu

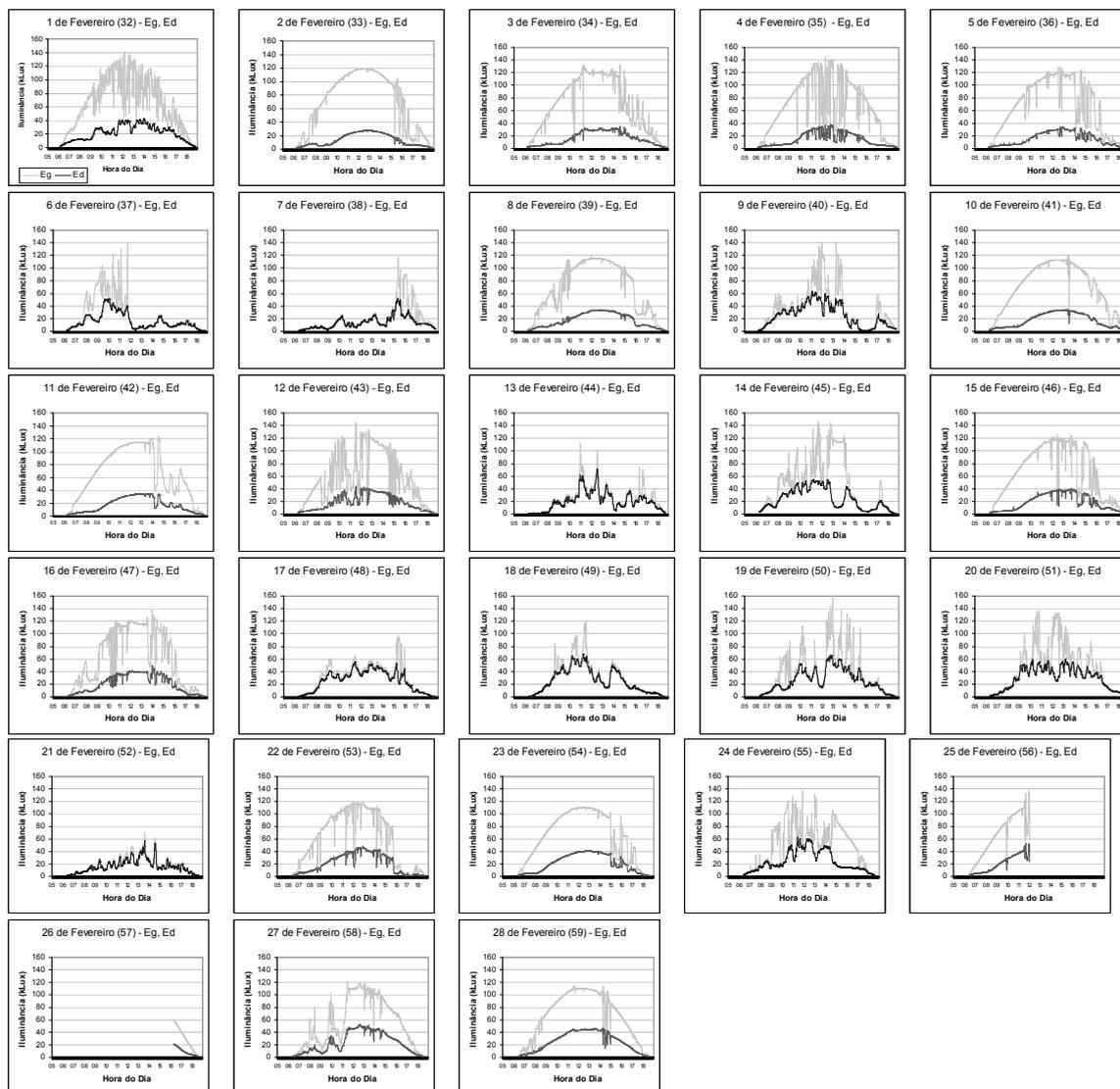


Figura 11 - Iluminâncias horizontais, global e difusa, medidas para o mês de fevereiro de 2002

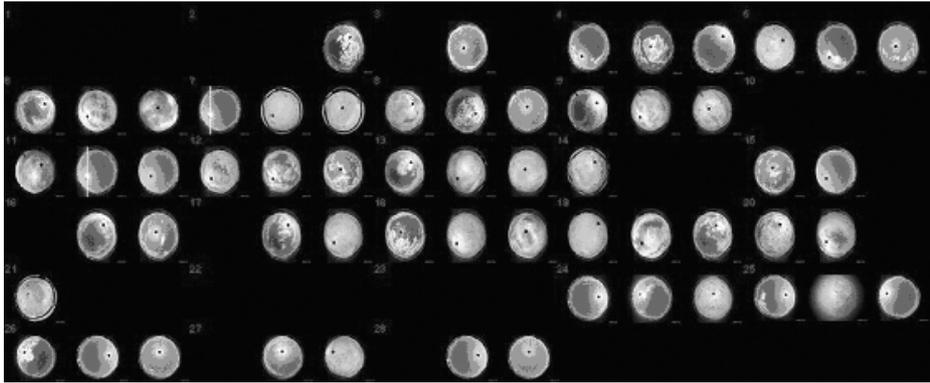


Figura 12 - Fotos das condições de céu para os dias do mês de fevereiro em três horários do dia: 9h00, 12h00 e 15h00 HSV

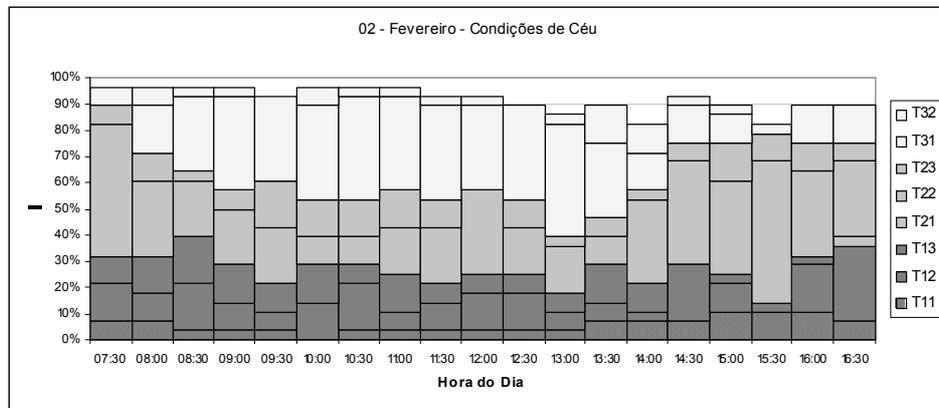


Figura 13 - Resumo das condições de céu para fevereiro de 2002 em Florianópolis

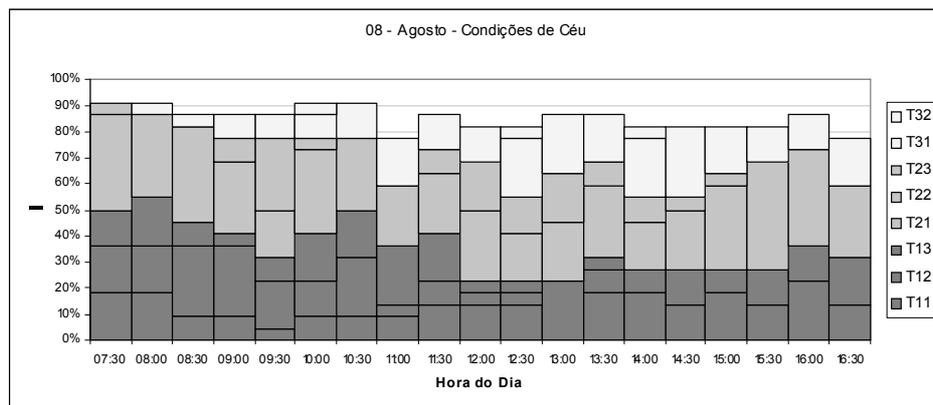
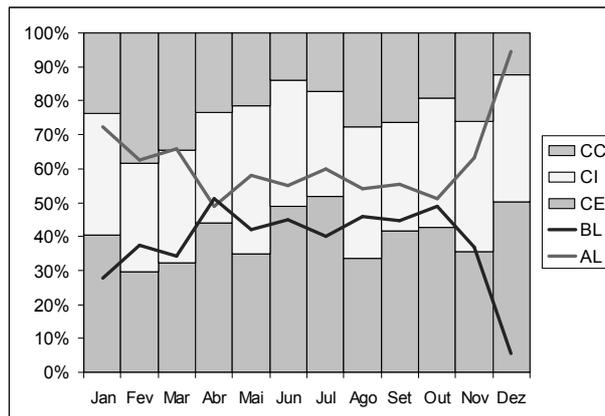


Figura 14 - Resumo das condições de céu para agosto de 2002 em Florianópolis



Legenda: Frequência percentual de tipos de céu claro (CC), intermediário (CI) e encoberto (CE). Percentual de céus com alta luminosidade (AL) e baixa luminosidade (BL)

Figura 15 - Resumo das condições de céu para os anos de 2002 e 2003 em Florianópolis

## Níveis de iluminância global e difusa

Na área de iluminação natural em edificações, geralmente se trabalha com níveis de iluminância separados em duas componentes: a global e a difusa; a primeira é a iluminância total em plano horizontal obtida pela iluminância do sol e do céu, e a segunda, relativa somente à luz do céu. A primeira será um indicativo da possibilidade de aproveitamento por sistemas de redirecionamento da luz solar. A segunda é a componente com que comumente se trabalha na análise de desempenho de sistemas de iluminação natural em que a luz direta do sol não é considerada.

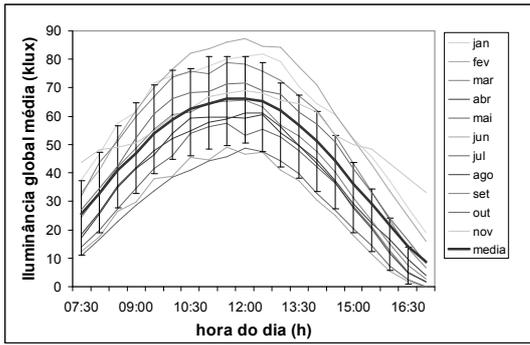
A seguir são mostrados os níveis de iluminância média mensal global obtidos para os anos de 2002 e 2003. Pode-se verificar como as iluminâncias difusas médias variam de uma média máxima de 37.500 lux no verão (dezembro) a 17.000 lux no inverno, enquanto as iluminâncias globais variam de 88.000 a 49.000 de média máxima no mesmo período (Figura 16).

As Figuras 16 e 17 reproduzem a informação acima, porém em gráficos de curvas com isoiluminâncias (*isolux*) e permitem verificar claramente que a iluminância de céu aumenta à medida que se aproxima do meio-dia e que é maior nos meses que vão de janeiro a março e de outubro a dezembro. Ressalta-se que esses gráficos são elaborados a partir de dados reais, e não de modelos preditivos, o que explica a maior inconstância nos níveis médios de iluminância encontrados (curvas *isolux* não uniformes). Tal inconstância pode ser devida a diversos fatores climáticos, como a presença de período de chuvas no mês, ou de dias bastante diversos (alternância de dias claros e encobertos ou parcialmente

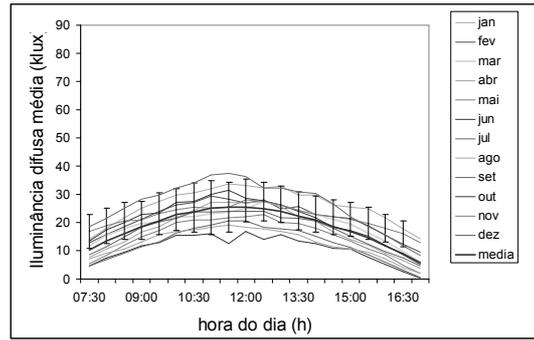
encobertos). De qualquer maneira, já apresentam um primeiro resultado na compilação do tipo de iluminâncias que podem ser esperadas em Florianópolis.

Os gráficos de frequência de ocorrência permitem analisar qual a porcentagem do tempo que se pode contar com níveis de iluminação acima de determinado valor. Essa informação é bastante útil para as análises que usam métodos de cálculo que fornecem o percentual de iluminação interna em relação aos níveis externos, como o fator de luz diurna (FLD – ou *daylight factor*, DF) ou diagrama de contribuição relativa de luz (DCRL) (SOUZA, 1997). A seguir apresentam-se, na Figura 18, as frequências de ocorrência de níveis de iluminação externa para 2002 e 2003, no período de “inverno” (menor quantidade de luz natural disponível) e de “verão” (maior quantidade de luz natural disponível), tanto do nascer ao pôr-do-sol quanto nas horas de trabalho (de 8h00 da manhã às 17h00 da tarde, quando se considera que se pode contar com níveis mínimos adequados de iluminação natural externa que possam efetivamente contribuir com a iluminância interna). Considera-se o ano dividido em apenas duas épocas, sendo os meses de outubro a março usados para a média do “verão” e os meses de abril a setembro considerados para a média do “inverno”.

Verifica-se na Figura 17 que, se a iluminância global for considerada, durante 70% do período de trabalho (HT - das 8h00 às 17h00), pode-se contar com um nível mínimo de 17.000 lux no inverno e de 35.000 lux no verão. Caso apenas a iluminância difusa de céu for considerada, pode-se contar, respectivamente, com 1.500 e 15.000 lux. Esta verificação é importante quando se fazem análises sobre a disponibilidade média de iluminação de um ambiente ao longo do ano.

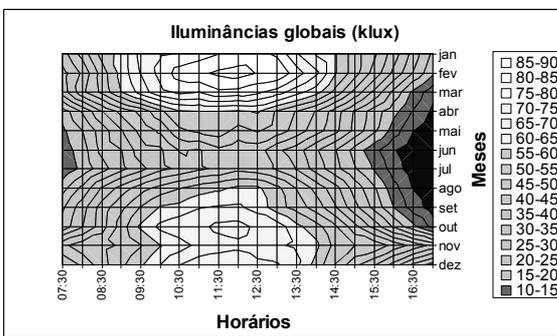


(a) Iluminância global média mensal

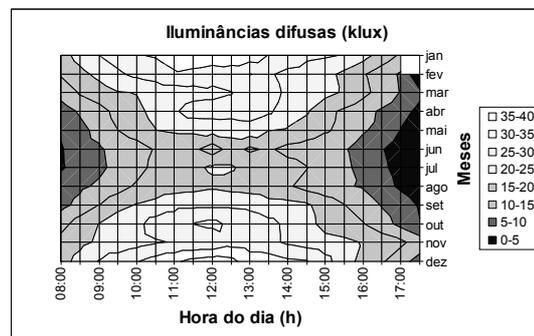


(b) Iluminância difusa média mensal

Figura 16 - Iluminâncias médias mensais globais e difusas para os anos de 2002 e 2003 em Florianópolis

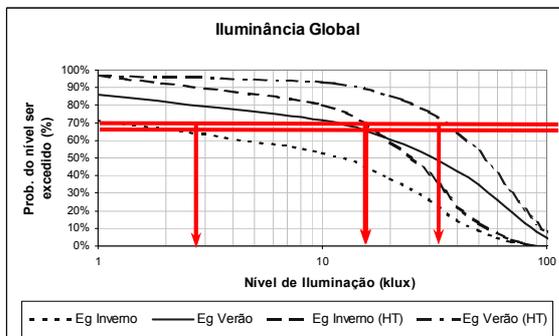


(a) Iluminância global média mensal

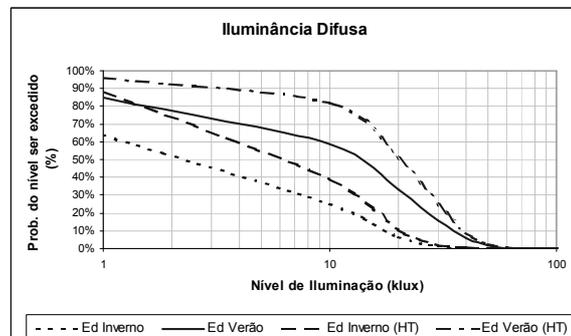


(b) Iluminância difusa média mensal

Figura 17 - Gráficos de isolux para iluminância global média mensal e iluminância difusa média mensal para os anos de 2002 e 2003



(a) Iluminância global



(b) Iluminância difusa

Figura 18 - Frequência de ocorrência dos níveis de iluminâncias globais e difusos para 2002 e 2003 para todos os tipos de céu em Florianópolis

## Conclusão

Edifícios que possuem um bom sistema de iluminação natural são mais agradáveis, saudáveis e também mais eficientes do ponto de vista do uso de energia elétrica para iluminação e condicionamento de ar. Segundo Hayman (1994), a natureza da luz natural, como uma fonte variável, deve ser então entendida e as ferramentas de *design* devem levar em conta sua característica

estatística inerente, já que a avaliação do nível de iluminação encontrado será altamente dependente das premissas assumidas em relação à iluminação externa.

Programas computacionais, estudos de ofuscamento e métodos de iluminação energeticamente eficiente ou de suplemento de iluminação natural precisam de um conjunto de padrões de iluminâncias que possa caracterizar as

mudanças típicas das condições externas. De acordo com a variação local e o padrão de frequência de ocorrência de tipos de céu, uma combinação adequada de padrões de céu e de iluminâncias pode simular as mudanças diárias, sazonais ou anuais que são necessárias para a predeterminação de uma iluminação eficiente energética, controle de ofuscamento e de gerenciamento de dispositivos de controle (KITTLER et al., 1997).

Este trabalho apresentou a primeira compilação de dados de iluminação natural externa medidos em Florianópolis/SC, durante 2002 e 2003. As medições foram realizadas de acordo com os padrões estabelecidos pelo *International Daylighting Measuring Programme* (IDMP) e representam a primeira base de dados de níveis de iluminação natural externa obtidas em território brasileiro. Foram apresentados gráficos diários e mensais dos níveis de iluminância global e difusa, assim como a ocorrência de tipos de céu e a frequência de ocorrência de níveis de iluminação para esse período. Espera-se que esse esforço seja seguido por outros em todo o território brasileiro, de forma que se possa estabelecer uma base consistente sobre a disponibilidade de luz natural no país.

Essa disponibilidade de dados de iluminação natural externa medida sistematicamente visa principalmente à produção de modelos matemáticos para a previsão de níveis de iluminação natural externa em seus principais fluxos: difuso, direto e global, para cada uma das condições de céu consideradas: claro, encoberto, intermediário e qualquer tipo de céu; tanto em planos horizontais quanto verticais. Esses modelos podem ser usados para diversos fins que necessitem de dados externos (validação e operação de ferramentas de cálculo de iluminação interna, por exemplo), passando a integrar ferramentas otimizadas para analisar os níveis de iluminação em países tropicais.

## Referências

- ABREU, S. L.; COLLE, S.; ALMEIDA, A. P. Determinação de um fator de correção para a radiação difusa medida com anel de sombreamento. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA MECÂNICA, 15., 1999, Águas de Lindóia. **Anais...** Águas de Lindóia, São Paulo: COBEM, 1999. p. 1051-1054.
- CIE. **Guide to recommended practice of daylight measurement.** Vienna, Austria: Commission Internationale de L'Eclairage, 1994. (Technical Report, CIE 108).
- HAYMAN, S. N. Daylight: the inexact science. In: ELECTRICAL ENGINEERING CONGRESS, 1994, Sydney. **Proceedings...** Sydney, Australia: National Conference Publication, Institution of Engineers, 1994. p. 743-746.
- IQBAL, M. **An introduction to solar radiation.** Toronto, Canada: Academic Press, 1983.
- JULIAN, W. G. Daylighting standards, codes and policies. In: INTERNATIONAL DAYLIGHTING CONFERENCE, 1998, Ottawa. **Proceedings...** Ottawa, Canada: Ministry of Supply and Services Canada, 1998. p. 266-267.
- KITTLER, R. The need for standard skies and models for energy conservation measures. **Lighting Research and Technology**, Great Britain, v. 26, n. 4, p. 171-180, 1994.
- KITTLER, R.; PEREZ, R.; DARULA, S. Sky classification respecting energy-efficient lighting, glare and control needs. **Journal of the Illuminating Engineering Society**, p. 57-68, Winter. 1997.
- LI-COR. LI-COR Radiation Sensors. **Instruction Manual.** Lincoln, 1991. (n. 8609-56)
- LYNES, J. A. **Principles of natural lighting.** New York: Elsevier, 1968.
- PEREIRA, F. O. R. **Apostila de iluminação natural.** Santa Catarina: Departamento de Arquitetura, Universidade Federal de Santa Catarina, 1994.
- PEREZ, R.; INEICHEN, P.; SEALS, R.; MICHALSKY, J.; STEWART, R. Modeling daylight availability and irradiance components from direct and global irradiance. **Solar Energy**, Great Britain, v. 44, n. 5, p. 271-289, 1990a.
- PEREZ, R.; INEICHEN, P.; SEALS, R.; ZELENSKA, A. Making full use of the clearness index for parameterizing hourly insolation conditions. **Solar Energy**, Great Britain, v. 45, n. 2, p. 111-114, 1990b.
- ROBLEDO, L.; SOLER, A. Estimation of direct illuminance on a horizontal surface for clear and intermediate skies. **Renewable Energy**, Great Britain, v. 19, p. 55-60, 2000.
- RUCK, N. The impact of daylight availability on the design and performance of innovative daylighting systems. In: INTERNATIONAL DAYLIGHTING CONFERENCE, 1998, Ottawa. **Proceedings...** Ottawa, Canada: Ministry of Supply and Services Canada, 1998. p. 325.

SOUZA, R. V. G. **Iluminação natural em edificações**: cálculo de iluminâncias internas: desenvolvimento de ferramentas simplificada. 1997. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 1997.

ZONNENVELDT, L.; MALLORY-HILL, S. Evaluation of daylight responsive lighting control systems. In: INTERNATIONAL DAYLIGHTING CONFERENCE, 1998, Ottawa. **Proceedings...** Ottawa, Canada: Ministry of Supply and Services Canada, 1998. p. 223-227.

## Agradecimentos

Agradecemos às instituições de apoio à pesquisa Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e Fundação de Pesquisa de Minas Gerais (Fapemig), pelo apoio financeiro fornecido para a montagem das duas primeiras estações EMIN em território brasileiro. Agradecemos à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (Capes), pelo apoio financeiro fornecido através de bolsas de pesquisas. Por fim, agradecemos ao apoio e infraestrutura fornecidos pelo Laboratório de Energia Solar (Labsolar/UFSC), Laboratório de Conforto Ambiental, Departamento TAU-UFMG, Laboratório de Conforto Ambiental (Labcon/ARQ/UFSC) e Instituto de Pesquisas Espaciais (Inpe).