



DETERMINAÇÃO DE CÉUS TÍPICOS PARA MINAS GERAIS – METODOLOGIA DE OBTENÇÃO A PARTIR DE DADOS SIMPLIFICADOS

Flávia de Fátima Ferreira (1); Roberta Vieira Gonçalves de Souza (2)

(1) Departamento de Tecnologia em Arquitetura e Urbanismo – Escola de Arquitetura – Universidade Federal de Minas Gerais, Brasil – e-mail: flaviafferreira@gmail.com

(2) Departamento de Tecnologia em Arquitetura e Urbanismo – Escola de Arquitetura – Universidade Federal de Minas Gerais, Brasil – e-mail: roberta@arq.ufmg.br

RESUMO

Proposta: Diversos estudos têm sido desenvolvidos no sentido de possibilitar o cálculo de iluminação natural de um ambiente interno em relação à quantidade de luz disponível no céu, através da determinação das características do clima luminoso das cidades, em termos da disponibilidade de luz, e frequência de ocorrência dos tipos de céus. Este trabalho traz uma proposta para a determinação de tipos de céu a partir de dados existentes nas Normais Climatológicas, para cidade de Belo Horizonte, que pudesse ser extrapolado para o restante do Estado. **Método de pesquisa/ Abordagens:** foi inicialmente usado um modelo apresentado por Duffie e Beckman (1987) para a extrapolação de dados de radiação global e difusa a partir de dados de horas de insolação, para se chegar a tipos de céu típicos para cada mês do ano, através da determinação de um índice de claridade. **Resultados:** Os resultados encontrados no uso do modelo apresentado por Duffie e Beckman (1987), não tiveram comportamento esperado para o fim de se obter um índice de claridade confiável, quando comparados ao comportamento de dados de radiação global e difusa obtidos para Florianópolis. Este método então foi descartado como uma forma de obter-se uma definição da condição média de céu de determinado período. Foi usado então o método simplificado proposto pelos mesmos autores para a obtenção das condições de céu de Belo Horizonte. Os resultados obtidos preliminarmente estão de acordo com as características de céu observadas para a cidade. **Contribuições/Originalidade:** Teste de um método simplificado para se definir o céu típico de cada mês, baseado nos dados de insolação mensal, encontrados nas Normais Climatológicas, que possa ser usado para estudos de iluminação natural.

Palavras-chave: iluminação natural; disponibilidade de luz; tipos de céus.

ABSTRACT

Propose: Various studies have been developed aiming to allow the estimation of daylighting indoors related to the amount of exterior daylighting, through the determination of the characteristics of the luminous climate in terms of daylight availability according to the frequency of occurrence of sky conditions. This work brings a proposal to allow the determination of sky conditions from the data supplied in Climatologic Series. **Methods:** a model that uses climatologic data in order to determine sky conditions was tested, in order to obtain a clearness index and therefore a simplified classification method. **Findings:** Radiation data calculated with the application of Duffie and Beckman (1987) model did not present an expected behavior of diffuse radiation in relation to the global radiation which indicated that it would not be possible to determine a valuable clearness index to allow sky classification. Afterwards a simpler methodology proposed by the same author was tested for Belo Horizonte. Results agree to observation. **Originality/value:** testing of a simplified method the definition of the prevalent sky conditions in a month or period using sunlight hours data. The determination of these conditions will allow more precise studies of indoor daylight behavior.

Keywords: daylighting; daylight availability, sky conditions.

1 INTRODUÇÃO

Tem havido na sociedade contemporânea um renovado entusiasmo sobre a utilização de energias naturais em substituição às artificiais. A substituição de energia, e o uso mais consciente, requer considerações dentro do projeto arquitetônico.

A luz natural traz benefícios à saúde, às atividades humanas, à produtividade e à economia, além de ajudar na redução de demanda de energia artificial ou elétrica. A iluminação natural, além de ter qualidade, é limpa e gratuita. Um ambiente iluminado naturalmente além de mais agradável também se torna mais econômico, economizando luz elétrica e energia para refrigeração, pois, em geral, a carga térmica da iluminação natural difusa é menor do que uma equivalente artificial, o que no caso de do uso de condicionamento artificial de ar de um edifício, aumenta sua eficiência e, portanto, economia.

Cada ambiente necessita de uma quantidade de iluminação de acordo com a atividade a ser aí desenvolvida. Para se ter a quantidade desejada de luz num ambiente interno de uma edificação, é necessária a consideração no projeto arquitetônico das aberturas que captarão essa luz, sua orientação e a quantidade de luz disponível no ambiente externo. Essa disponibilidade de luz no céu sofre variações de acordo com o tipo de céu, que sofre modificações relativas ao clima. Trabalha-se então, um céu predominante, que por sua vez varia de lugar pra lugar e ao longo do ano.

Este trabalho foi desenvolvido em nível de Iniciação Científica dentro do Programa de Pesquisa e Desenvolvimento, P&D16, “Abordagem Integrada da Eficiência Energética e Energias Renováveis” um convênio da UFMG, CEFET-MG e PUCMINAS com a CEMIG. Este é um amplo projeto que tem como objetivo alcançar uma melhoria da eficiência energética no que tange aos processos, equipamentos e consumo, englobando o planejamento sistêmico das edificações como base para a integração entre os projetos arquitetônicos e de utilidades, incorporando também as energias renováveis. Este projeto é subdividido em cinco sub-projetos. Este estudo de Disponibilidade de Luz Natural para o estado de Minas Gerais se insere no sub-projeto 1 - “Habitação Eficiente”.

1.1 Objetivo

Sendo necessário o conhecimento da quantidade de luz disponível no céu para se calcular e planejar a quantidade de luz natural num ambiente interno, surge também a necessidade de se saber o tipo de céu que será usado para cálculo. O tipo de céu usado deve ser o céu predominante, naquela região e época do ano. Para isso, deve-se saber os tipos de céus e suas ocorrências ao longo do ano na região. Como estações de medição de luz natural ainda não são comumente encontradas no Brasil, existe a necessidade de, através dos recursos disponíveis, adaptar e utilizar um modelo que nos caracterize os céus para projeto. Esta determinação é tanto mais objetiva e precisa quanto mais dados medidos sobre as grandezas que afetam esta disponibilidade de luz se dispuser. Em geral são calculados índices de claridade a partir de dados medidos através dos quais se determina o tipo de céu. No entanto a realidade brasileira é da existência de estações não automatizadas que realizam a anotação de valores das variáveis climáticas em 3 períodos por dia, dos quais se fornece uma média. Os dados fornecidos por estas estações não incluem iluminância de céu, que deve ser então obtida indiretamente através de dados de radiação solar, nebulosidade e insolação.

O objetivo desse trabalho é definir um método matemático que seja adequado para a definição do tipo de céu predominante nas cidades brasileiras, em especial para Minas Gerais que possuem estações meteorológicas do INMET (BRASIL, 1992). O método deve apresentar resultados a partir dos dados disponíveis nas Normais Climatológicas, como os dados de insolação mensal ou nebulosidade.



Figura 1 – Céu claro, parcialmente encoberto e encoberto (fonte: SOUZA, 2004).

2 METODOLOGIA

Trata-se do desenvolvimento de uma metodologia para a determinação dos céus típicos para todo o estado de Minas Gerais, expansível para todo o país, a partir de dados existentes nas Normais Meteorológicas do INMET (BRASIL, 1992).

O índice de claridade é um índice largamente usado na literatura técnica. Em 1990, Perez et al. (B) apresentam uma extensa compilação sobre a modelagem da disponibilidade de iluminação natural. Neste trabalho os autores propõem a utilização importantes índices na avaliação das condições de céu, entre eles o índice de claridade, ε' . Este índice é o componente básico que permite parametrizar condições de céu, do encoberto ao claro. O índice, ε' , expressa a transição de um céu totalmente encoberto a um céu claro de baixo turvamento

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

Onde :

I_d - irradiância difusa ; I_n - irradiância normal; Z – ângulo zenital do sol (radianos).

2.2 Estimativa a partir da insolação para obtenção do índice de claridade

Se pudermos extrair este índice de dados de irradiação médios para um dado período, teríamos então as condições de céu típicas de cada período de análise. Duffie e Beckman (1987) usam dados de insolação mensal, para a extrapolação horária de valores diários de irradiação global e difusa, a partir dos quais se poderia obter a radiação normal. Foi feito então o cálculo destes valores para Belo Horizonte a partir dos dados médios mensais das Normais Climatológicas (BRASIL, 1992), partir dos quais se pretendia obter um índice de claridade médio, para se definir os tipos de céus e suas frequências ao longo do ano. Para tal cálculo foi desenvolvida uma tabela no programa Excel, na qual foi possível também gerar gráficos que melhor expressam os resultados. A tabela necessita da entrada dos seguintes dados: latitude, constante solar (corrigida para a região, foi usada a 1367 W/m^2 , dia juliano que represente a média mensal de insolação, e a insolação mensal. A sequência de cálculos colocadas na tabela é expressa a seguir.

- Declinação solar, δ

$$\delta = 23,45 \cdot \sin[360(284+j)/365] \quad (02)$$

Onde: δ é a declinação solar
 j é o dia juliano ou gregoriano

- Hora angular, ω

$$\omega = 15 \cdot (h - 12) \quad (03)$$

Onde: ω é a hora angular
 h é hora solar

Radiação solar no topo da atmosfera sobre o plano horizontal, **G_o** (04)

$$G_o = G_{sc} \cdot (1 + 0,033 \cdot \cos(360j / 365)) \cdot (\sin\phi \cdot \sin\delta + \cos\phi \cdot \cos\delta \cdot \cos\omega)$$

Onde: **G_{sc}** é a constante solar, foi usada 1367 W/m²
 j é o dia juliano ou gregoriano
 ϕ é a latitude
 δ é a declinação solar
 ω é a hora angular

- Ângulo do pôr do sol (em graus) **ω_s**

$$\cos\omega_s = -\tan\phi \cdot \tan\delta \quad (05)$$

Onde: ϕ é a latitude
 δ é a declinação solar

- Radiação solar diária horizontal no topo da atmosfera, **H_o**

$$H_o = (24/\pi) G_{sc} (1 + 0,033 \cdot \cos(360j / 365)) \cdot (\cos\phi \cdot \cos\delta \cdot \sin\omega_s + (\pi \cdot \omega_s / 180) \sin\phi \cdot \sin\delta) \quad (06)$$

Onde: **G_{sc}** é a constante solar, foi usada 1367 Wh/m²
 j é o dia juliano ou gregoriano
 ϕ é a latitude
 δ é a declinação solar
 ω_s é o ângulo do por do sol (em graus)

- Horas de insolação diária, **n**

$$n = \text{Insolação mensal} / \text{dias do mês} \quad (07)$$

- Média diária máxima possível de insolação, **N**

$$N = (2/15) \cdot \cos^{-1}(-\tan\phi \cdot \tan\delta) \quad (08)$$

Onde: ϕ é a latitude
 δ é a declinação

- Coeficientes **a** e **b** de acordo com Samuel (1991)

$$a = -0,14 + 1,20 (n/N) - 0,82 (n/N)^2 \quad (09)$$

$$b = 1,32 - 2,89 (n/N) + 2,24 (n/N)^2 \quad (10)$$

Onde: **n** é numero de horas de insolação diária
N é a média diária máxima possível de horas de insolação

Estes são coeficientes **a** e **b** foram desenvolvidos para o Sri Lanka cujas latitudes variam de 5°N a 10°N. No entanto, vários autores da literatura técnica os usam para latitudes diferentes, como Rehman (1999) que usou os coeficientes para latitudes de 17° a 31°N e Guimarães (1995) que utilizou os coeficientes para 20° S.

- Índice de limpidez, **k_t**

$$k_t = H/H_o = a + b \cdot (n/N) \quad (11)$$

Onde: **H** é a radiação diária horizontal na superfície
H_o é a radiação solar diária horizontal no topo da atmosfera

- Componente difusa diária horizontal, **H_d**

$$H_d/H = 0,775 + 0,00653 \cdot (\omega_s - 90) - [0,505 + 0,00455 \cdot (\omega_s - 90) \cdot \cos(115 k_t - 103)] \quad (12)$$

Onde: **H** é a radiação diária horizontal na superfície
 ω_s é o ângulo do por do sol (em graus)
k_t é o índice de claridade

- Coeficientes **A** e **B**

$$A = 0,4090 + 0,5016 \cdot \sin(\omega_s - 60) \quad (13)$$

$$B = 0,6609 - 0,4767 \cdot \sin(\omega_s - 60) \quad (14)$$

Onde: ω_s é o ângulo do por do sol (em graus)

- Razão para radiação total, **r_t**

$$r_t = (\pi/24) \cdot (A + B \cdot \cos\omega_s) \cdot (\cos\omega - \cos\omega_s) / [\sin\omega_s - (\pi \cdot \omega_s/180) \cdot \cos\omega_s] \quad (15)$$

Onde: **A** é coeficiente (equação 13)

B é coeficiente (equação 14)

ω_s é o ângulo do por do sol (em graus)

- Razão para radiação difusa, **r_d**

$$r_d = (\pi/24) \cdot (\cos\omega - \cos\omega_s) / [\sin\omega_s - (\pi \cdot \omega_s/180) \cdot \cos\omega_s] \quad (16)$$

Onde: ω_s é o ângulo do por do sol (em graus)

- Radiação diária horizontal na superfície, **H**

$$H = H_0 \cdot (a + b) \quad (17)$$

Onde: **a** é coeficiente (equação 09)

b é coeficiente (equação 10)

H₀ é a radiação solar diária horizontal no topo da atmosfera

- Componente difusa diária horizontal, **H_d**

$$H_d = H_d/H \cdot H \quad (18)$$

Onde: **H_d/H** dado pela equação 19

H é a radiação diária horizontal na superfície

- Radiação global horizontal, **I_g**

$$I_g = r_t \cdot H \text{ (W/m}^2\text{)} \quad (19)$$

Onde: **r_t** é a razão para radiação total ou global (equação 15)

H é a radiação diária horizontal na superfície

- Radiação difusa horizontal, **I_d**

$$I_d = r_d \cdot H \text{ (W/m}^2\text{)} \quad (20)$$

Onde: **r_d** é a razão para radiação difusa (equação 16)

H_d é a componente difusa diária horizontal

- Radiação horária direta horizontal **I_{dir}**

$$I_{dir} = I_g - I_d \text{ (W/m}^2\text{)} \quad (21)$$

Onde: **I_g** é a radiação horária global horizontal

I_d é a radiação horária difusa horizontal

A partir desses dados de radiação difusa e global, seria feita a determinação do índice de claridade, ε' , que seria usado para definir a condição típica de céu para o período analisado.

Este índice de claridade, ε' é um indicativo indireto da razão existente entre a irradiância global e a difusa em relação a uma dada altura solar (ou ângulo zenital), uma vez que a irradiância direta normal pode ser determinada em função da radiação global. Em dias de céu claro esta razão tende a ser máxima para dada altura solar enquanto em dias de céu encoberto tende a 1, ou seja os valores de radiação global e difusa tendem a ser iguais, uma vez que não há radiação direta.

Para facilitar a visualização das grandezas estimadas pelo método de Duffie e Beckman (1987), as radiações global e difusa foram plotadas em gráficos, mostrados a seguir. Verificou-se que os dados estimados pelo método descrito não apresentavam o comportamento esperado, descrito acima. As curvas de radiação difusa “acompanham” a variação ocorrida na radiação solar global, independente do tipo do céu analisado (figuras 2, 4 e 6). Esta diferença no comportamento fica mais clara quando

comparamos o comportamento do modelo com dados medidos em Florianópolis que mostram as condições de céu claro, parcialmente encoberto e encoberto para julho de 2002 (figuras de 3, 5 e 7).

DADOS ESTIMADOS COM O MODELO

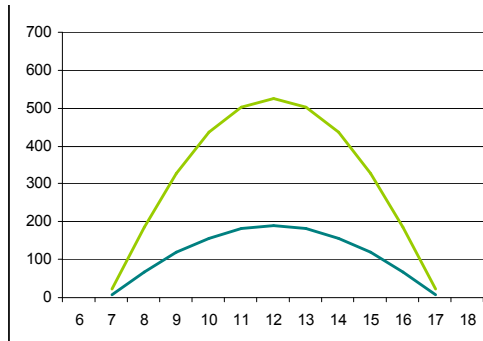


Figura 2 - Radiação global e difusa – dados médios estimados para cada hora. Condição de céu claro, Florianópolis, 28/06.

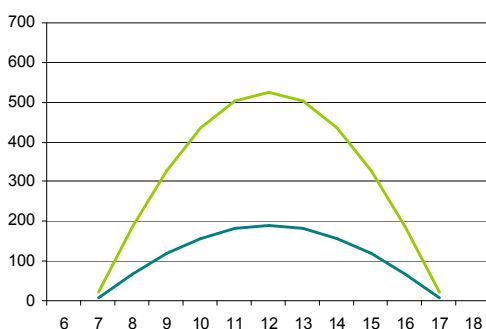


Figura 4 - Radiação global e difusa (W/m^2) – dados médios estimados para cada hora. Condição de céu parcialmente encoberto, Florianópolis, 09/06.

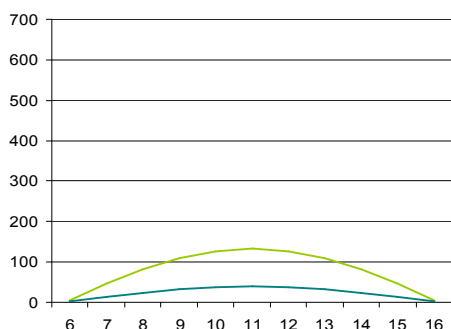


Figura 6 - Radiação global e difusa (W/m^2) – dados médios estimados para cada hora. Condição de céu encoberto, Florianópolis, 09/06.

DADOS MEDIDOS

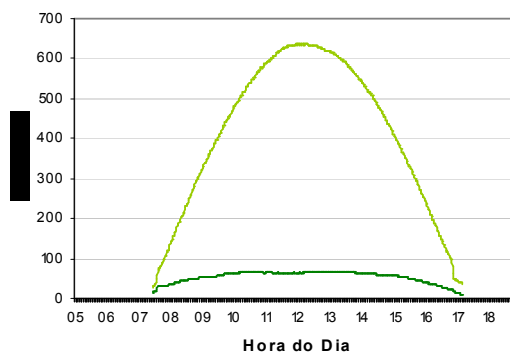


Figura 3 - Radiação global e difusa (W/m^2) – dados medidos a cada 1 minuto. Condição de céu claro, Florianópolis, 28/06/02.

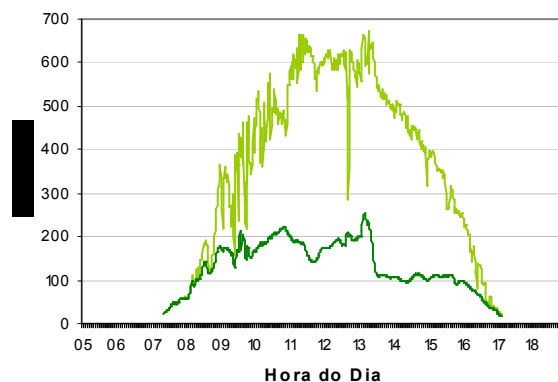


Figura 5 - Radiação global e difusa (W/m^2) - dados medidos a cada 1 minuto. Condição de céu parcialmente encoberto, Florianópolis, 09/06/02.

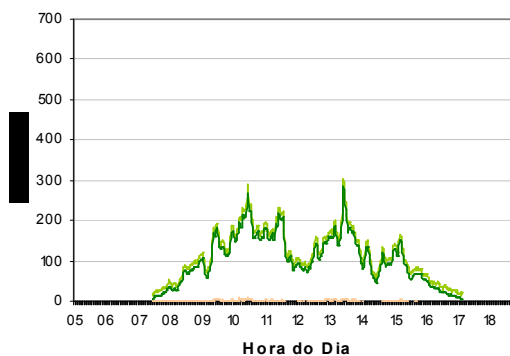


Figura 7 - Radiação global e difusa (W/m^2) - dados medidos a cada 1 minuto. Condição de céu encoberto, Florianópolis, 23/06/02.

Nota-se que sob céu claro a radiação difusa tende a apresentar valores bem menores que a radiação global, enquanto esta relação já é menos marcada sob céus parcialmente encobertos. Sob céus encobertos as radiação global e difusa tendem a apresentar valores idênticos, como é o esperado sob

esta condição. Ao comparar-se os gráficos dos dados gerados pelo modelo matemático nota-se que apenas sob a condição de céu parcialmente encoberto o comportamento do modelo se assemelha ao dos dados medidos, enquanto sob céu claro parece haver uma sobrestimação dos valores de radiação difusa e sob céu encoberto a tendência das duas curvas se sobrepõem não se verifica nos dados obtidos através do modelo.

Considera-se então que o modelo não atende ao propósito, que seria através dos valores de radiação global e difusa estimar-se um índice de claridade médio para a determinação da condição de céu predominante num certo período em determinada localidade.

2.2 Método simplificado

Duffie e Beckman (1987) propõem também um método simplificado para obtenção das condições de céu médias de uma dada localidade baseado no número de horas de insolação, n , dado nas Normais Climatológicas. Este número é comparado ao número médio máximo de horas de insolação, N , que se poderia ter, sob condições de céu claro. A comparação do número real de horas de insolação com o máximo possível nos fornece um percentual de cobertura de nuvens, que nos indicam as condições de céu prevalentes em determinado período em uma localidade.

Determina-se então que: quando o número de horas de insolação é inferior a 40% do total N , o céu é encoberto, entre 40% e 70% o céu é parcialmente encoberto, e acima de 70% o céu é claro. Para facilitar a utilização desse método para todo o estado foi feita uma planilha do Excel (Tabela 1), onde o usuário entra apenas com os dados de latitude e de insolação mensal, como o apresentado a seguir.

Tabela 1 - Tabela de classificação simplificada de condições de céus para Belo Horizonte

Mês	Dias M	Declinação	In. mês	n	N	%	Tipo de Céu
Janeiro	13	-21,60	189,8	6,12	13,10	46,74	Parcialm. Encoberto
Fevereiro	46	-13,29	195,5	6,74	12,66	53,27	Parcialm. Encoberto
Março	75	-2,42	215,1	6,94	12,12	57,26	Parcialm. Encoberto
Abril	105	9,41	228,9	7,63	11,54	66,12	Parcialm. Encoberto
Maio	135	18,79	237,1	7,65	11,06	69,18	Parcialm. Encoberto
Junho	162	23,09	240,1	8,00	10,82	74,01	Claro
Julho	199	21,01	256,5	8,27	10,93	75,68	Claro
Agosto	228	13,45	255,6	8,25	11,34	72,73	Claro
Setembro	259	1,82	210,1	7,00	11,91	58,79	Parcialm. Encoberto
Outubro	289	-9,97	190,5	6,15	12,49	49,21	Parcialm. Encoberto
Novembro	317	-18,67	181,7	6,06	12,94	46,81	Parcialm. Encoberto
Dezembro	346	-23,18	165,1	5,33	13,19	40,37	Encoberto

Nota-se então que Belo Horizonte possui céus claros nos meses que vão de junho a agosto, correspondendo ao período do inverno e de maior escassez de chuvas. No verão mais chuvoso apenas o mês de dezembro pode ser classificado como possuindo céus predominantemente encobertos enquanto o resto do ano é caracterizado pela presença predominante de céus parcialmente encobertos.

3 ANÁLISE DE RESULTADOS

A iluminação natural apesar de estar reassumindo significativa relevância no projeto arquitetônico, ainda dispõe de poucos dados no nosso país que possam auxiliar em sua quantificação. Este trabalho visa trabalhar no sentido de suprir parte desta lacuna, que a seleção do tipo de céu de análise em cada período do ano.

A simplificação dos métodos reflete a simplicidade dos recursos que temos disponíveis hoje no país. Ao mesmo tempo revela que mesmo numa situação de escassez de recursos é possível obter-se resultados na classificação de céus;

A partir da implantação definitiva da Estação de Medição de Belo Horizonte, EMIN-BH, cujos trabalhos foram interrompidos para a melhoria de seu equipamento de armazenamento de dados, espera-se poder comprovar a eficácia da metodologia aqui proposta.

4 REFERÊNCIAS

- BRASIL, Ministério da Agricultura e Reforma Agrária. **Normais Climatológicas 1961-1990**. Brasília, Dep. Nacional de Meteorologia, 1992.
- DUFFIE, J. A., BECKMAN, W. A. **Solar Engineering of Thermal Processes**. 2nd edition. New York: John Wiley & Sons, 1987.
- GUIMARÃES, A. P. C. **Estudo solarimétrico com base na definição de mês padrão e seqüência de radiação diária**, Dissertação de Mestrado, Curso de Pós Graduação em Engenharia Mecânica, UFMG, 1995.
- PEREZ, R.; INEICHEN, P.; SEALS, R.; MICHALSKY, J.; STEWART, R., **Modeling daylight availability and irradiance components from direct and global irradiance**, Solar Energy (44), nº 5, Elsevier Science Ltd., Great Britain, 1990. pp 271-289.
- REHMAN, S., **Estimation of global radiation**, Applied Energy (64), Elsevier Science Ltd., Great Britain, 1999. pp 369-378.
- SAMUEL, T. D. M. A., **Estimation of global radiation for Sri Lanka**, Solar Energy (47), nº 5, Elsevier Science Ltd., Great Britain, 1991.
- SOUZA, R. V. G., **Desenvolvimento de modelos matemáticos empíricos para a descrição dos fenômenos de iluminação natural externa e interna**. 292f., enc. Tese (doutorado) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis. 2004.
- SOUZA, R. V. G., **Iluminação natural em edificações : calculo de iluminâncias internas - desenvolvimento de ferramenta simplificada**. 153f. Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa Catarina, CTC, Florianópolis, 1997.

5 AGRADECIMENTOS

À CEMIG (Companhia Energética de Minas Gerais), pelo suporte financeiro. À professora Eleonora Sad de Assis pela sua colaboração e apoio durante o trabalho. Aos colaboradores do laboratório do GreenSolar, da PUCMINAS, que me disponibilizaram os dados da EMIN-BH. Ao ex-bolsista Do LABCON UFSC, Otávio Fuck Pereira, que de forma prestativa concedeu auxílio na revisão das macros. Aos colegas do LABCON UFMG que sempre ajudaram e participaram deste trabalho.