

DETERMINAÇÃO DE MODELOS DE CÉU DA NORMA ISO CIE 15469- 2004 UTILIZANDO ARQUIVOS CLIMÁTICOS

DETERMINATION OF SKY MODELS FROM ISO CIE 15469- 2004 STANDARD USING CLIMATE FILES

Anderson Claro ¹

Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC, Brasil, anderson.claro@ufsc.br

Resumo

A maioria dos programas de simulação de iluminação natural atualmente utilizam o Modelo de Perez, que utiliza dados de arquivos climáticos para determinar um conjunto de oito modelos de distribuição de Luminâncias caracterizando modelos representativos de céus entre inteiramente nublado e inteiramente claro. Geralmente estes simuladores utilizam também o método do ray-tracing em suas simulações, a maioria baseado nos algoritmos consagrados do programa Radiance. Entretanto desde 2004 existe a Norma ISO 15469- 2004 (E)-CIE S 011-E 2003, que estabelece 15 Modelos de Céu, de conceituação similar ao Modelo de Perez, mas com formulação diferenciada. Estes modelos receberam posteriormente tratamento de cálculo em artigos, para apoiar a sua determinação específica usando dados climáticos. Neste trabalho apresenta-se um método novo, baseado nos artigos mencionados, utilizando dados de radiação de arquivos climáticos para determinar, em um conjunto de possibilidades de modelos detectadas como possíveis (a diferenciação entre modelos não é inequívoca), qual o Modelo de Céu da Norma que mais se adequa aos dados originários. Este estudo foi desenvolvido utilizando-se nos cálculos o método da radiosidade, embora outros métodos também sejam aplicáveis. Os cálculos testaram arquivos de várias localidades no Brasil e em outros países, como França, Japão, EUA, chegando a resultados dentro de uma margem de aproximação bastante satisfatória, com divergências médias na maioria abaixo de cerca de 10%, demonstrando a coerência do método.

Palavras-chave Modelos de Céu da Norma ISO-CIE 15469. Simulação de Iluminação Natural. Simulação com Arquivos Climáticos.

Abstract

Most natural daylight simulation programs currently use the Perez Model, which employs climatic data files to determine a set of eight Luminance distribution models characterizing representative models of skies between entirely cloudy and entirely clear. Generally, these simulators also use the ray-tracing method in their simulations, mostly based on the established Radiance algorithms. Since 2004, ISO 15469-2004 (E) -CIE S 011-E 2003 Standard has established 15 Sky Models, similar to the Perez Model but with a distinct formulation. These models were subsequently given calculation treatment in articles to support their specific determination using climatic data. In this work, a new method is presented, based on the mentioned articles, using climatic data to determine, in a set of possible models (the differentiation between models is not unequivocal), which Standard Sky Model is more adequate to the original data. This study was developed using in calculations the radiosity method, although other methods also apply. The calculations tested files from various locations in Brazil and other countries, such as France, Japan, and the USA, reaching results within a very satisfactory approximation range, with average divergences mostly below about 10%, thus demonstrating the consistency of the method.

Keywords: Sky Models of ISO-CIE 15469. Simulation of Natural Lighting. Simulation with Climate Files.

How to cite this article:

CLARO, Anderson. Determinação de modelos de céu da norma ISO CIE 15469- 2004 utilizando arquivos climáticos. **PARC Pesquisa em Arquitetura e Construção**, Campinas, SP, v. 9, n. 4, p. 319-333, dez. 2018. ISSN 1980-6809. Disponível em: <<https://periodicos.sbu.unicamp.br/ojs/index.php/parc/article/view/8652677>>. Acesso em: 23 nov. 2018. doi:<https://doi.org/10.20396/parc.v9i4.8652677>.

Introdução

Os métodos de simulação dinâmica baseada em arquivos climáticos iniciados a partir da década de 80 utilizavam dados de medições em estações meteorológicas que registravam principalmente dados de radiação solar direta, difusa, global, além de outras informações obtidas hora a hora ao longo do ano. O marco de referência principal foi o trabalho publicado por Perez et al. (1990), propondo modelo para obtenção dos dados de iluminação usando radiação solar medida. Este modelo foi aliado ao conceito de Daylight Coefficients (DLC), baseando os atuais métodos de determinação de disponibilidade anual de luz natural. O método estabelece oito categorias distintas de céu e permite definir as distribuições relativas de luminâncias específicas de cada categoria. Posteriormente foi publicada a Norma ISO 15469:2003(E) CIE S 011/E:2003 Spatial Distribution of Daylight - CIE Standard General Sky (CIE, 2004), que estabeleceu 15 modelos de céu a partir de modelos anteriores, particularmente os de Perez. São 15 modelos matemáticos associados a uma formulação genérica que utiliza um conjunto de descritores e que estabelece uma distribuição de luminâncias proporcional à luminância do Zênite para cada um dos modelos. Trabalhos associados dão diretrizes para definir os novos modelos, mas não há método preciso para selecionar objetivamente um deles.

Objetivos

Este trabalho apresenta um novo método para determinar qual dos 15 modelos de céu seria o mais adequado para cada data / hora em simulações anuais de iluminação natural utilizando arquivos climáticos, utilizando-se o procedimento de cálculo da radiosidade. O método apresentado possui basicamente dois objetivos específicos:

- Conceituar um método para seleção do padrão de céu mais adequado da Norma ISO 15469 - 2004 (E)CIE S 011-E 2003 (CIE, 2004) para uma data / hora a partir de descritores extraídos de arquivos climáticos digitais.
- Conceituar um método para determinar a luminância do Zênite e caracterizar a distribuição de luminâncias dentro do padrão de céu escolhido como resultado do procedimento acima.

Fundamentos teóricos da Norma ISO

O ponto de partida dos fundamentos da Norma ISO 15469 - 2004 (E)CIE S 011-E 2003 (CIE, 2004) está no Modelo de Perez (PEREZ et al., 1990), basicamente um conjunto de “equações de eficácia luminosa”, deduzidas regressivamente de dados de iluminação empíricos

medidos em dez estações de medição norte-americanas e três europeias (duas na França e uma na Suíça) durante três anos, posteriormente acrescentando-se estações do Japão e Inglaterra (PEREZ; SEALS; MICHALSKY, 1993; INEICHEN; MOLINEAUX; PEREZ, 1994).

Fundamentos do Modelo de Perez

O Modelo de Perez envolveu diferentes parâmetros, como altura solar, grau de umidade no ar, irradiação difusa e global, entre outros, criando oito categorias de claridade. A cada categoria associaram-se parâmetros discretos inseridos num conjunto de equações que resultarão nos valores para uma data/hora estudada: (a) da iluminância horizontal global; (b) da iluminância horizontal difusa; (c) da iluminância solar direta normal ao Sol e (d) da luminância do Zênite;

A determinação de parâmetros para definição da distribuição de luminâncias criado por Perez et al. (1990), cria oito categorias de céu associadas às oito categorias de claridade, obtidas da interpretação de dados de radiação, temperatura e umidade. Também dos dados de radiação são definidas funções para determinar dados de iluminação que geram distribuição de luminâncias para cada categoria de céu. O modelo utiliza quatro parâmetros para definir grandezas luminosas descritas. Os parâmetros são:

- O ângulo solar com o Zênite (Z).
- A claridade do céu (ϵ), dependente do ângulo solar zenital, da irradiação difusa horizontal e da irradiação direta de incidência normal.
- O brilho do céu (Δ), dependente da irradiação difusa horizontal, da massa de ar óptica relativa e da irradiação normal extraterrestre;
- O conteúdo de água precipitável na atmosfera (W), dependente da temperatura superficial do ponto de orvalho.

As condições de insolação são expressas genericamente como na Equação 1:

$$F(\epsilon, \Delta, Z, W) = a_i(\epsilon) + b_i(\epsilon)f(W) + c_i(\epsilon)g(Z) + d_i(\epsilon)h(\Delta) \quad (1)$$

Onde:

f , g e h são funções analíticas;

a_i , b_i , c_i e d_i são funções discretas definidas em quatro matrizes associadas a oito categorias de brilho ϵ .

Cada matriz representa parâmetros para cada função de conversão. As oito categorias de brilho vão de completamente nublado a completamente limpo. Delas apresentam-se três equações de conversão luminosa de radiação global (Equação 2), difusa (Equação 3) e direta normal (Equação 4), além de uma quarta equação, de

predição da luminância do Zênite (Equação 5), como segue.

Conversão de radiação global horizontal para iluminância global horizontal

$$gh = Gh * [a_i + b_i * W + c_i * \cos(Z) * \ln(\Delta)] \quad (2)$$

Onde:

gh : iluminância global horizontal;

Gh : radiação global horizontal;

W : conteúdo de água precipitável na atmosfera;

Z : ângulo zenital do Sol;

$\ln(\Delta)$: logaritmo neperiano do brilho Delta.

Conversão de radiação difusa horizontal para iluminância difusa horizontal

$$dh = Dh * [a_i + b_i * W + c_i * \cos(Z) + d_i * \ln(\Delta)] \quad (3)$$

Onde:

dh : iluminância difusa horizontal;

Dh : radiação difusa horizontal;

W : conteúdo de água precipitável na atmosfera;

Z : ângulo zenital do Sol;

$\ln(\Delta)$: logaritmo neperiano do brilho Delta.

Conversão de radiação direta normal para iluminância direta normal

$$in = \max\{0, \ln[a_i + b_i * W + c_i * \exp(5.73 * Z - 5) + d_i * \Delta]\} \quad (4)$$

Onde:

in : iluminância direta normal do Sol;

Gh : radiação direta normal do Sol;

W : conteúdo de água precipitável na atmosfera;

Z : ângulo zenital do Sol;

Δ : brilho Delta.

Modelo de predição da luminância do Zênite

$$Lvz = Dh * [a_i + c_i * \cos Z + c'_i * \exp(-3 * Z) + d_i * \Delta] \quad (5)$$

Onde:

Lvz : luminância do Zênite;

Dh : radiação difusa horizontal;

Z : ângulo zenital do Sol;

Δ : brilho Delta.

Novos padrões da Norma ISO 15469

No trabalho de Kittler, Perez e Darula (1997) são apresentados 15 modelos de céu derivados da mesma concepção de Perez et al.(1990), mas com formulações um pouco diferentes na determinação dos parâmetros das equações. São propostos os conceitos de:

a) **Gradação** (“*gradation*”): indica a distribuição da claridade ao longo da altura angular em um determinado plano, dado pela Equação 6:

$$\frac{\varphi(Z)}{\varphi(0^\circ)} = \frac{1 + a * \exp(b/\cos Z)}{1 + a * \exp(b)} \quad (6)$$

Onde:

Z : é o ângulo solar com o Zênite, em graus;

a, b : são os coeficientes associados aos diferentes tipos de céu.

b) **Indicatriz** (“*indicatrix*”): que indica uma variação da função da gradação ao longo de um giro horizontal do plano que contém a função de gradação, de sorte que a cada plano vertical, a gradação é mediada pela indicatriz, que é dada pela Equação 7:

$$f(\chi) = 1 + c * [\exp(d * \chi) - \exp(d * \pi/2)] + e * [\cos]^2 \chi \quad (7)$$

Onde:

χ : é o ângulo entre a posição do Sol e uma posição específica qualquer da abóbada;

c, d, e : são coeficientes associados aos diferentes tipos de céu.

São definidas seis categorias de indicatriz e seis de gradação, sendo que ambas as funções são combinadas para gerar então um novo conjunto de padrões de céu, calculados genericamente pela Equação 8:

$$\frac{L}{Lz} = \frac{f(\chi) * \varphi(Z)}{f(Zs) * \varphi(0^\circ)} \quad (8)$$

Onde:

L : é a luminância de uma posição específica do céu;

Lz : é a luminância do Zênite;

χ : é o ângulo entre a posição específica e o Sol;

Z : é o ângulo entre a posição específica e o Zênite;

Zs : é o ângulo entre a posição do Sol e o Zênite.

O novo conjunto, no entanto, não é uma matriz de 36 combinações de funções, reduzindo-se a 15 padrões, considerando que algumas combinações apresentaram muita similaridade. Os modelos propostos por Kittler, Perez e Darula (1997) são associados com alguns descritores caracterizados por diferentes intervalos, dos quais se destacam:

- a) Razão iluminância difusa / iluminância extraterrestre horizontal (razão Dv / Ev);
- b) grau do brilho (Δ);
- c) índice de turvamento (Tv);
- d) Razão luminância do Zênite / iluminância difusa (razão Lz/Dv).

Este último descritor, Lz/Dv, os próprios autores consideram limitado a alguns tipos de céu e alturas solares.

As faixas de variação de todos os descritores associadas a cada tipo de céu observadas pelos autores, que permitem identificar as características de cada tipo de céu e, inversamente, através deles identificar um determinado tipo de céu, apresentam intervalos de variação que podem caracterizar, no conjunto, mais de um tipo de céu, sendo este o problema da determinação de um tipo mais adequado segundo os descritores, e que é o principal objetivo deste trabalho. Este conjunto de 15 padrões de céu é que configurará a Norma ISO 15469- 2004 (E)CIE S 011-E (CIE, 2004), cuja conceituação esquemática genérica é descrita na Figura 1.

O ângulo χ entre o Sol e um elemento do céu é dado pela Equação 9:

$$\chi = \arccos(\cos(Z_s) \cdot \cos(Z) + \sin(Z_s) \cdot \sin(Z) \cdot \cos(|\alpha - \alpha_s|)) \quad (9)$$

Onde:

χ : Ângulo entre o Sol e o elemento do céu;

α : Azimute de um elemento do céu;

α_s : Azimute do Sol;

Z : ângulo do elemento do céu com o Zênite;

Z_s : ângulo do Sol com o Zênite.

A determinação da luminância para uma dada posição do céu é dada pela mesma Equação (8), que combina os

coeficientes de gradação e indicatriz de acordo com as Equações (6) e (7) apresentadas acima. Particularmente no horizonte a gradação é dada pela Equação 10:

$$\varphi\left(\frac{\pi}{2}\right) = 1 \quad (10)$$

Particularmente no Zênite a gradação é dada pela Equação 11:

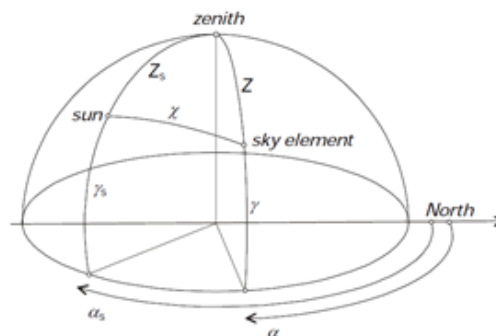
$$\varphi(0) = 1 + a \cdot \exp b \quad (11)$$

Particularmente no Zênite a indicatriz é dada pela Equação 12:

$$f(Z_s) = 1 + c \cdot \left[\exp(dZ_s) - \exp\left(d\frac{\pi}{2}\right) \right] + e \cdot \cos^2 Z_s \quad (12)$$

Os parâmetros a, b, c, d e e correspondentes a cada tipo são dados na Tabela 1, assim como os referenciais usuais de: a) razão entre iluminância difusa horizontal e a iluminância horizontal extraterrestre Dv / Ev; b) brilho Δ (delta); c) turvamento(Tv).

Figura 1 - Representação genérica definindo a posição do Sol e de um elemento genérico do Céu



Nota: α : Azimute de um elemento do céu; α_s : Azimute do Sol; γ : Altura angular do elemento do céu; γ_s : Altura angular do Sol; Z : ângulo do elemento do céu com o Zênite; Z_s : ângulo do Sol com o Zênite; χ : ângulo entre o Sol e o elemento do céu. Fonte: Norma ISO 15469-2004-CIE S 011-E (2004)

Tabela 1 - Parâmetros para a equação de determinação da distribuição de luminâncias de cada tipo de céu, com a descrição das características de cada um dos 15 tipos

Céu	Dv/Ev	Δ	Tv	a	b	c	d	e
1	0,02 - 0,25 (Raro 0,25 - 0,40)	< 0,18	> 40, > 20	4	-0,7	0	-1	0
2	0,20 - 0,40 (Raro > 0,40)	0,18 - 0,30	> 15	4	-0,7	2	-1,5	0,15
3	0,20 - 0,40	0,12 - 0,30	Próximo de 20	1,1	-0,8	0	-1	0
4	0,30 - 0,60	0,25 - 0,50	Próximo de 20	1,1	-0,8	2	-1,5	0,15
5	Próximo de 0,35	0,20 - 0,30	Próximo de 20	0	-1	0	-1	0
6	Geralmente > 0,30	0,25 - 0,50	Próximo de 15	0	-1	2	-1,5	0,15
7	Geralmente 0,40 - 0,60	> 0,35	Próximo de 10	0	-1	5	-2,5	0,3
8	Geralmente > 0,30	> 0,25	Geralmente 6 - 15	0	-1	10	-3	0,45
9	Geralmente > 0,30	> 0,25	> 15	-1	-0,55	2	-1,5	0,15
10	Geralmente 0,30 - 0,50	0,25 - 0,43	Geralmente 6 - 12	-1	-0,55	5	-2,5	0,3
11	Geralmente 0,10 - 0,40	0,06 - 0,32	Geralmente 1,5 - 4	-1	-0,55	10	-3	0,45
12	Geralmente 0,08 - 0,20	0,05 - 0,12	Geralmente 1,5 - 4	-1	-0,32	10	-3	0,45
13	Geralmente 0,15 - 0,45	0,10 - 0,37	Geralmente 3 - 8	-1	-0,32	16	-3	0,3
14	Geralmente 0,15 - 0,50	0,10 - 0,43	Geralmente 4 - 10	-1	-0,15	16	-3	0,3
15	Geralmente 0,20 - 0,60	0,12 - 0,55	Geralmente 6 - 12	-1	-0,15	24	-2,8	0,15

Fontes: Norma ISO 15469- 2004 (E)CIE S 011-E (CIE, 2004) ; Kittler, Perez e Darula (1997).

Em trabalhos posteriores à proposição de modelos em 1997 e anteriores à Norma ISO, Darula e Kittler (2002), diante da dificuldade de precisar os modelos a partir de dados relativamente variáveis, apresentam um método analítico para determinação da luminância do Zênite a partir dos dados de iluminância global, difusa e direta horizontal, obtidos através dos arquivos climáticos ou analiticamente. Neste trabalho é mencionada a imprecisão em que pode incorrer a determinação da luminância do Zênite através da equação de previsão desta grandeza proposta por Perez et al. (1990) (KITTLER; DARULA, 2000; KITTLER; PEREZ; DARULA, 1997; DARULA; KITTLER, 2002; DARULA et al., 2000). Os autores consideram a hipótese de não haver informações disponíveis para fins de simulação, por exemplo, níveis globais medidos, durações de Sol ou coberturas de nuvens.

A luminância do Zênite pode ser definida a partir de descritores típicos, o turvamento (T_v) e a razão entre a iluminância horizontal difusa e a extra-terrestre equivalente (D_v/E_v), conforme descritos na Tabela 2. Os autores apresentam uma formulação para a determinação do turvamento, usado como referência inicial. O fator de turvamento luminoso – T_v , que se aproxima do número ideal de claridade atmosférica representando um caso real, é obtido a partir da Equação 13:

$$\frac{P_v}{E_v} = \frac{G_v}{E_v} - \frac{D_v}{E_v} \quad (13)$$

Onde:

E_v = iluminância horizontal extraterrestre, (extraterrestre normal corrigida pelo seno da altura solar γ , equivalendo a $133,8 * \sin \gamma$).

P_v = iluminância direta horizontal;

G_v = iluminância global horizontal;

D_v = iluminância difusa horizontal ;

Tabela 2 - Valores típicos de descritores associados com cada tipo de céu

Tipo de céu	Parâmetros típicos		
	T_v	A	D_v/E_v
1	Acima de 45		0.10
2	Acima de 20		0.18
3	Acima de 45	Eq. (18) não é válida	0.15
4	Acima de 20		0.22
5	Acima de 45		0.20
6	Acima de 20		0.38
7	12.0	13.27	0.42
8	10.0	10.33	0.41
9	12.0	8.70	0.40
10	10.0	8.28	0.36
11	4.0	5.01	0.23
12	2.5	3.30	0.10
13	4.5	4.76	0.28
14	5.0	4.86	0.28
15	4.0	3.65	0.30

Fonte: Adaptado de Darula e Kittler (2002)

Uma vez determinada a relação P_v/E_v pode-se determinar o turvamento T_v pela Equação 14:

$$T_v = \frac{-\ln^*(P_v/E_v)}{(av * m)} \quad (14)$$

Onde

T_v : fator de turvamento;

E_v = iluminância horizontal extraterrestre;

P_v = iluminância direta horizontal;

m = massa de ar penetrada (massa de ar ótica relativa);

av = coeficiente de perda luminosa ideal (coeficiente de extinção), dependente de m e considerando a altura solar γ s em graus.

A massa de ar ótica m é dada pela Equação 15:

$$m = \frac{1}{\sin \gamma s + 0.50572(\gamma s + 6.07995^\circ)^{-1.6364}} \quad (15)$$

O coeficiente de perda av é dado pela Equação 16:

$$av = \frac{1}{9.9 + 0.043 m} \quad (16)$$

O tipo de céu é dado pela aproximação do valor do turvamento T_v e da relação D_v/E_v com os valores da Tabela 2 (acima). Conhecido o turvamento T_v , a razão D_v/E_v e o tipo de céu, pode-se utilizar a Tabela 3 com os parâmetros para as equações de luminância do Zênite correspondentes às situações com presença ou não de Sol.

Tabela 3 - Parâmetros de cálculo da luminância do Zênite por tipos de céu (unidades absolutas)

Sky Type	Sky Code	Parameter					
		A1	A2	B	C	D	E
1	I.1			54,63	1,00	0,00	0,00
2	I.2			12,35	3,68	0,59	50,47
3	II.1		*	48,30	1,00	0,00	0,00
4	II.2			12,23	3,57	0,57	44,27
5	III.1			42,59	1,00	0,00	0,00
6	III.2			11,84	3,53	0,55	38,78
7	III.3	0,957	1,790	21,72	4,52	0,63	34,56
8	III.4	0,830	2,030	29,35	4,94	0,70	30,41
9	IV.2	0,600	1,500	10,34	3,45	0,50	27,47
10	IV.3	0,567	2,610	18,41	4,27	0,63	24,04
11	IV.4	1,440	-0,750	24,41	4,60	0,72	20,76
12	V.4	1,036	0,710	23,00	4,43	0,74	18,52
13	V.5	1,244	-0,840	27,45	4,61	0,76	16,59
14	VI.5	0,881	0,453	25,54	4,40	0,79	14,56
15	VI.6	0,418	1,950	28,08	4,13	0,79	13,00

Nota:* Céu considerado sem Sol. O parâmetro A não é aplicável. Fonte: Darula e Kittler (2002)

Segundo os autores, se o turvamento é maior que 12, o céu é considerado sem a presença de Sol e a luminância do Zênite pode ser calculada pela Equação 17:

$$Lz = \frac{Dv}{Ev} \left[\frac{B(\sin \gamma_s)^c}{(\cos \gamma_s)^D} + E \sin \gamma_s \right] \quad (17)$$

Onde:

Lz : luminância do Zênite dada em kcd/m^2 ;

Ev = iluminância horizontal extraterrestre;

Dv = iluminância difusa horizontal;

γ_s = altura solar

B, C, D e E = Coeficientes conforme a Tabela 3.

Para períodos ensolarados, quando o turvamento é dado por $Tv \leq 12$, então a luminância do Zênite pode ser determinado pela Equação 18:

$$Lz = A * \sin \gamma_s + 0.7 * (Tv + 1) \left(\frac{(\sin \gamma_s)^c}{(\cos \gamma_s)^D} \right) + 0.04 * Tv \quad (18)$$

Onde:

Lz : luminância do Zênite dada em kcd/m^2 ;

Tv = turvamento;

γ_s = altura solar

C , e D = coeficientes conforme a Tabela 3.

A = coeficiente correspondente a $A_1 * Tv + A_2$, extraído-se A_1 e A_2 da Tabela 3.

Proposição Metodológica

Conforme demonstrado, os descritores dos modelos de céu apresentados por Kittler, Perez e Darula (1997) não permitem determinar precisamente qual o modelo a adotar a partir dos dados climáticos, havendo alguma superposição dos parâmetros de referência para a escolha. Dos seis descritores indicados, apenas 3 deles derivam diretamente dos dados dos arquivos climáticos:

- Razão iluminância difusa horizontal / iluminância horizontal extraterrestre (Dv / Ev)
- brilho Δ (delta);
- turvamento Tv .

Mais de um modelo de céu, entretanto, podem se encaixar nos intervalos característicos dos descritores, conforme apresentado na Tabela 1. Neste trabalho propõe-se uma nova abordagem para determinação do modelo de céu associado a cada determinada data / hora dos dados do arquivo climáticos, com os seguintes procedimentos:

- Determinar os descritores referenciais que derivam diretamente de dados medidos: razão Dv/Ev ; Brilho Δ (delta); turvamento Tv ,
- Verificar o enquadramento de cada um dos descritores nos intervalos referenciais para cada tipo de céu

conforme a Tabela 1, considerando-se as múltiplas possibilidades de enquadramento em diferentes tipos de céu.

- Utilizar os referenciais da Tabela 3 (desconsiderando-se a Tabela 2) e as Equações 17 e 18 para determinação da luminância do Zênite e da distribuição de luminâncias para cada um dos possíveis tipos de céu para aqueles dados.
- Calcular as iluminâncias global, difusa e direta horizontal para cada um dos modelos possíveis, optando-se então por aquele que apresentar os dados mais próximos dos valores iniciais de referência. Determina-se o **turvamento** (Tv) conforme Darula e Kittler (2002). A **razão Dv/Ev** é dada diretamente pela Equação 13 já apresentada. O **brilho Δ (delta)** é obtido usando-se o Modelo ASRC – CIE (PEREZ et al., 1990). Foi criada uma tabela de intervalos comuns destes descritores, coerente com a apresentada em Kittler, Perez e Darula (1997), com um valor mínimo e um máximo estipulados. O procedimento então verifica o enquadramento dos valores de Tv , Dv/Ev (que indicaremos **DE**) e brilho Δ (indicaremos **DT**) nos intervalos dos descritores de cada tipo de céu. São atribuídos valores diferentes aos descritores: a) Tv vale 1; b) **DE** vale 2; c) **DT** vale 4. Atribui-se para cada modelo de céu, como índice, a soma dos valores dos descritores onde os dados se enquadram. Assim, resume-se o enquadramento de uma data / hora conforme a Tabela 4.

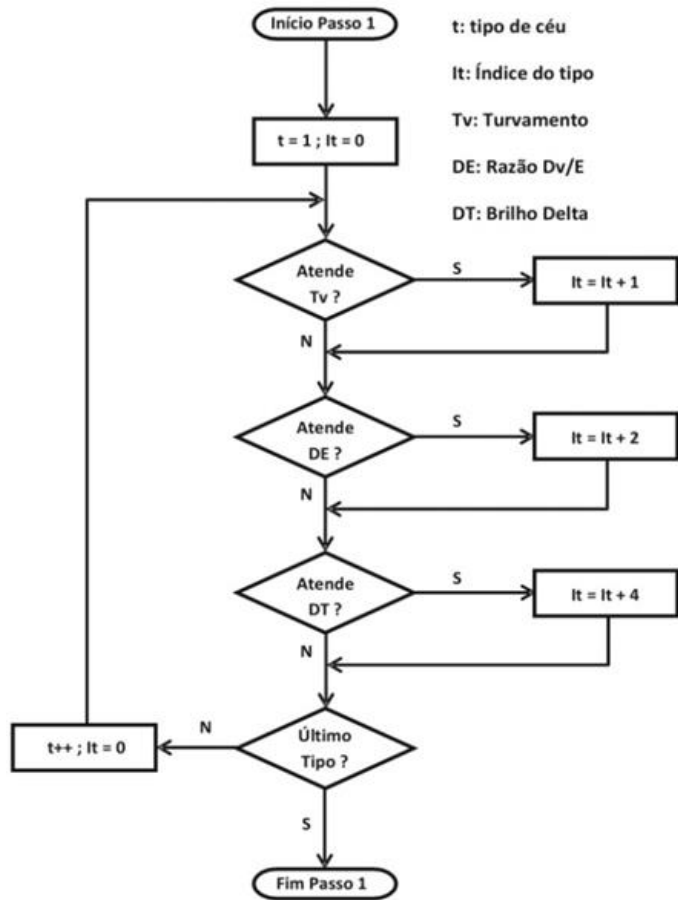
Tabela 4 - Combinações de enquadramento de uma data / horando (segundo os 3 descritores)

DESCRITORES (Atende a)	$Tv (+1)$	DE (+2)	DT (+4)	ÍNDICE
Tv, DE e DT	1	2	4	7
Tv e DE	1	2	0	3
Tv e DT	1	0	4	5
DE e DT	0	2	4	6
Tv	1	0	0	1
DE	0	2	0	2
DT	0	0	4	4
Nenhum	0	0	0	0

Fonte: O autor.

O procedimento computacional é dividido em quatro passos, cada um correspondendo a um algoritmo de tratamento dos descritores e sua análise. A Figura 2 representa o Passo 1. O algoritmo do Passo 1 calcula para uma data / hora o índice correspondente ao atendimento dos três descritores em cada um dos 15 tipos de céu, conforme a Tabela 4.

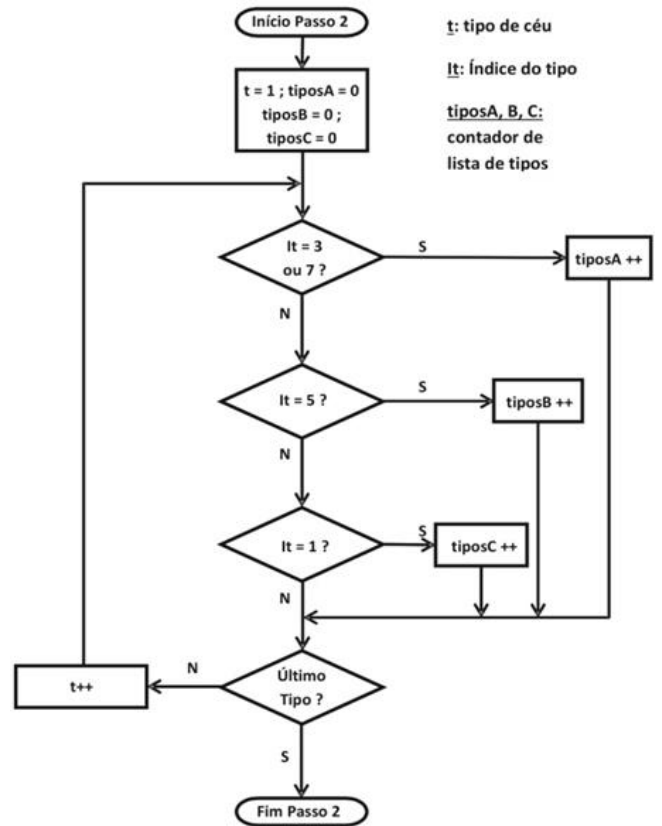
Figura 2 - Algoritmo do índice de atendimento aos descritores em cada tipo de céu Passo 1.



Fonte: O autor

O algoritmo do Passo 2, representado na Figura 3, constrói as listas de prioridades, sendo que a principal (tiposA, no algoritmo) indica os tipos de céu da data / hora que atendem Tv (1), Dv/Ev (2), e alternativamente a DT (4), os tipos que tiveram índice 3 ou 7. Na segunda lista (tiposB) atendem Tv (1), não atendem Dv/Ev, mas atendem a DT (4), os tipos que tiveram índice 5. Na terceira lista (tiposC) atendem apenas a Tv (1). Tipos que não atendem Tv (índices 2, 4 e 6) não são considerados, já que Tv é sempre testado em etapas anteriores. Por lógica caso algum tipo não se enquadre no turvamento é considerado inconsistente sendo então descartado.

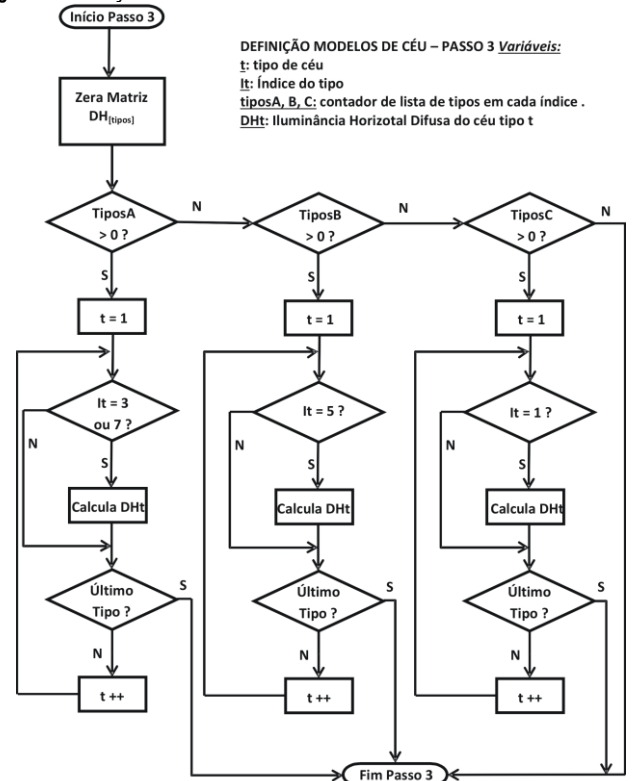
Figura 3 - Construtor das listas de prioridades dos índices de cada tipo de céu - Passo 2.



Fonte: O autor.

Segue-se o algoritmo do Passo 3 (Figura 4).

Figura 4 - Definição de Modelos de Céu Passo 3

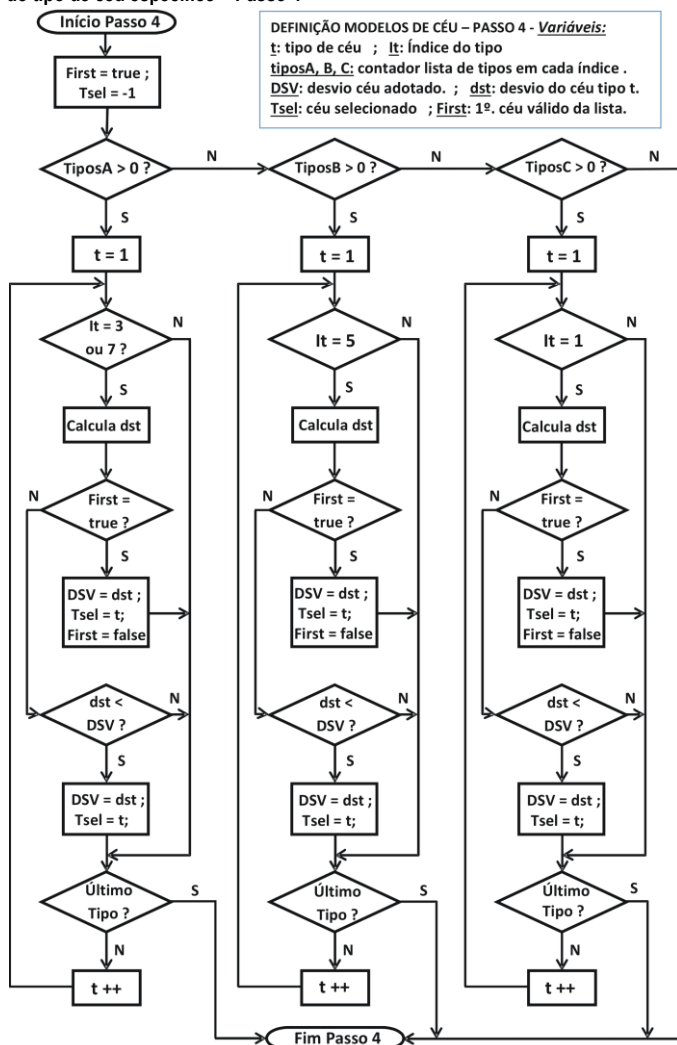


Fonte: O autor.

Ele toma a lista tiposA e calcula iluminância difusa horizontal para cada item. Define a luminância do Zênite de cada um (DARULA; KITTLER, 2002) e a distribuição de luminâncias da abóbada bem como a iluminância difusa horizontal. Se tiposA está vazia, toma-se tiposB e repete-se o procedimento. Se tiposB também está vazia, o procedimento repete-se com tiposC. Se tiposC está vazia, a data / hora é inválida e descartada.

No Passo 4 (Figura 5), toma-se a primeira lista que não esteja vazia e verifica-se para cada tipo o desvio da iluminância difusa horizontal calculada em relação à do arquivo climático, comparando-se sucessivamente os desvios. O tipo que tiver menor desvio é adotado.

Figura 5 - Comparação de desvios nas iluminâncias difusas horizontais e seleção do tipo de céu específico – Passo 4



Fonte: O autor.

Como parâmetro de referência para o método proposto, foram selecionados 27 arquivos climáticos de diferentes cidades brasileiras fornecidos pelo LABEEE – Laboratório de Eficiência Energética nas Edificações - UFSC, que possuem dados de iluminação, e aplicadas as equações de eficácia luminosa do Modelo de Perez et al

(1990). Não foi aplicada a equação de predição da luminância do Zênite proposta pelos autores. No método proposto justamente foi utilizada como alternativa as equações propostas por Darula e Kittler (2002) (ver Equações 17 e 18) a partir dos dados de iluminância global, difusa e direta horizontal obtidas com as equações de Perez et al (1990).

As cidades escolhidas foram: Aracaju, Belém, Belo Horizonte, Boa Vista, Brasília, Campo Grande, Cuiabá, Curitiba, Florianópolis, Fortaleza, Goiânia, João Pessoa, Macapá, Maceió, Manaus, Natal, Palmas, Porto Alegre, Porto Velho, Recife, Rio Branco, Rio de Janeiro, Salvador, São Luis, São Paulo, Teresina e Vitória.

Foram testados também arquivos do site do software Energy Plus de 10 das 27 cidades brasileiras estudadas no primeiro grupo. São elas: Belém, Belo Horizonte, Boa Vista, Brasília, Cuiabá, Curitiba, Florianópolis, Manaus, Salvador e São Paulo. Foram testados adicionalmente dados de seis cidades de diferentes países. São elas: Cairo, Nova Delhi, Nova York, Paris, Sidney e Tóquio. A partir dos resultados obtidos no método proposto foram realizadas as comparações com os valores obtidos nas conversões obtidas nos arquivos climáticos descritos acima. O procedimento geral consistiu então em: a) determinar as iluminâncias global, difusa e direta horizontal nos arquivos climáticos selecionados, hora a hora segundo as equações de Perez et al (1990); b) utilizar os valores de iluminância global, difusa e direta horizontal para determinar o turvamento; c) determinar a partir do turvamento a luminância do Zênite segundo as equações de Darula e Kittler (2002); d) determinar o modelo de céu pelos algoritmos propostos no método e suas consequentes iluminâncias global, difusa e direta horizontal; e) comparar os resultados hora a hora determinando-se a divergência entre a referência inicial e o calculado,

Verificação das conversões de radiação em iluminação

As rotinas de cálculo utilizadas na verificação do método aqui apresentado foram realizadas utilizando o programa Apolux IV, conforme os algoritmos de radiosidade propostos por Claro (1998). Para avaliar se as equações usadas na conversão da radiação para iluminação são coerentes e conferem com os dados de iluminação recentemente disponibilizados nos arquivos climáticos do LABEEE, foram geradas planilhas e gráficos de comparação, buscando-se avaliar a conversão de arquivos climáticos que não contenham os dados de luminosidade necessários à determinação dos modelos de céu conforme a Norma ISO 15469- 2004 (E)CIE S 011-E.

Os resultados gerais obtidos mostraram grande consistência na conversão da radiação global horizontal

em iluminância global horizontal, que se verificou também em escala um pouco menor na conversão da iluminância difusa horizontal. Na iluminância global, as divergências ficaram em torno de 5%, raramente atingindo cerca de 10%, sendo que estas diferenças mais significativas ocorreram particularmente nos ângulos solares zenitais elevados (Sol próximo do horizonte).

Esta consistência verificou-se tanto com os arquivos do LABEEE como do Energy Plus, e tanto nas cidades brasileiras quanto nas estrangeiras. No entanto, nestas últimas, houve maior discrepância entre os valores nos ângulos zenitais maiores (em geral acima de 75 graus), chegando em alguns poucos casos a cerca de 50% de diferença.

Há que se observar, entretanto, que estas grandes divergências ocorrem em razões que utilizam valores absolutos bem menores, entre 25 e 75 lux, com o Sol próximo do horizonte, diminuindo significativamente a divergência para posições mais elevadas do Sol, onde os valores absolutos são maiores, geralmente entre cerca de 30.000 lux e cerca de 70.000 lux. As mesmas observações valem para as iluminâncias difusas. Este desvio, portanto, deve influir menos significativamente nas análises de todo o conjunto de horas, quando se pretende determinar a estimativa de disponibilidade de luz natural anual. Embora com amplitude menor, no caso das cidades brasileiras também se verificou maior divergência nos ângulos zenitais maiores, acima de 70 ou 75 graus, sendo que quando utilizados os arquivos do Energy Plus, os valores de divergência maiores ocorreram também com ângulos menores, mas dentro da mesma margem de divergência. Realizou-se ainda uma análise numérica com base no conjunto anual de valores, através de médias e desvios padrões. Para esta análise tomamos as cidades de Belém (ao Norte), Brasília (Centro – Oeste) e Florianópolis (Sul). Para cada uma foi analisada toda a série de valores considerados válidos no intervalo anual (em torno de 4.000 horas, aproximadamente). Foram considerados separadamente os valores de iluminância horizontal global (GLB) e difusa (DIFU) inscritas no arquivo EPW – Energy Plus Weather File (indicadas como **EW**) e calculadas pelo APOLUX (indicadas como **AX**). A partir dos valores absolutos foi calculado um índice de Divergência (**div**), expresso pela razão EW / AX entre os valores horários do EPW e os calculados pelo APOLUX, assim como a **Diferença Absoluta $EW - AX$ (dif)** entre os valores horários do EPW e do APOLUX.

A partir destes indicadores horários foram então determinados os valores da média e do desvio padrão de cada grandeza **EW** e **AX** assim como da divergência e da diferença absoluta. Os resultados obtidos estão sintetizados na Tabela 5.

As divergências obtidas são inferiores a 1 %, com valores calculados um pouco maiores que no arquivo EPW. Os desvios padrões situaram-se entre 3% e 6,3%, que podem ser considerados baixos, bem aceitáveis perto dos erros mencionados na bibliografia revista, referenciados entre cerca de 6% e 25%. Os resultados destes testes mostram a viabilidade de se utilizar os dados convertidos, quando eles não estão presentes diretamente no arquivo climático, podendo-se supor que não se implicaria num erro maior que cerca de 10%.

Tabela 5 - Desvio padrão e média (valores absolutos e relativos) iluminância global e difusa, Belém – Pa, Brasília – DF, Florianópolis – SC

LOCAL	INDICADOR	EPW (EW)	APOLUX (AX)	EW / AX	EW - AX
BELÉM		GLB(EW)	GLB(AX)	DivGLB	DifGLB
	Média	49592	50681	0,990403	-1089
	DesvPD	27398	28463	0,030474	1389
		DIFU(EW)	DIFU(AX)	DivDIFU	DifDIFU
	Média	30141	32018	0,959987	-1877
	DesvPD	13239	14876	0,057631	2255
BRASÍLIA		GLB(EW)	GLB(AX)	DivGLB	DifGLB
	Média	53496	54157	0,993497	-660
	DesvPD	30167	30618	0,039383	1253
		DIFU(EW)	DIFU(AX)	DivDIFU	DifDIFU
	Média	26239	26446	0,998448	-207
	DesvPD	11184	11621	0,038530	799
FPOLIS		GLB(EW)	GLB(AX)	DivGLB	DifGLB
	Média	47996	48903	0,995515	-907
	DesvPD	28711	29504	0,069570	1701
		DIFU(EW)	DIFU(AX)	DivDIFU	DifDIFU
	Média	25566	25975	0,998696	-409
	DesvPD	11533	12169	0,062627	1136

Fonte: O autor.

Verificação do método de seleção do tipo de céu

Na verificação da seleção dos tipos de céu, aplicamos o procedimento de conversão aos arquivos EPW, gerando planilhas correspondentes a diferentes localidades do Brasil e do mundo com os dados de iluminação, conforme os locais e arquivos estudados na primeira etapa de verificação, anterior. Sobre os dados calculados foi aplicado o modelo de seleção do tipo de céu, conforme descrito na proposição metodológica, determinando-se os descritores **Tv**, **Dv / Ev** e **Brilho Δ**. Seguiu-se a avaliação indicada na Tabela 4, determinando-se em arquivo, em cada *data/hora* e para cada tipo de céu o atendimento a cada um dos três descritores.

Gerou-se, para cada *data/hora*, uma lista de tipos de céu atendidos e o índice de atendimento. Podemos ter, por exemplo, uma data / hora que atende a dois tipos de céu nos três coeficientes, e mais dois tipos com dois coeficientes, sendo diferentes estes dois em cada caso.

Os resultados obtidos em uma amostra das planilhas produzidas mostraram que **em todas as circunstâncias** o procedimento escolheu o céu com menor desvio.

A partir desta análise fez-se então uma verificação entre valores horários obtidos na conversão / integração da luminosidade do tipo de céu escolhido, através da média e do desvio padrão, calculados com a abóbada dividida em 8.151 setores (baixa resolução no programa APOLUX)) e com a abóbada dividida em 73.099 setores (alta resolução). Na baixa resolução verificou-se uma divergência média equivalente a 1,10911 (cerca de 10,9%) e um desvio padrão equivalente a 0,2636 (cerca de 26,3%). Na alta resolução verificou-se uma divergência média equivalente a 1,109061 (cerca de 10,9%) e um desvio padrão equivalente a 0,2637 (cerca de 26,3%).

Considerando-se a diferença comparada entre as divergências horárias nas duas resoluções, verificou-se uma diferença média de 0,00005, com um desvio padrão de 0,011908 (menos de 1,2%). Os valores obtidos permitiram fazer a análise do conjunto de arquivos de teste utilizando-se somente a baixa resolução, sem prejuízo da precisão. A partir disto foram processados os arquivos climáticos do LABEEE para um conjunto de cidades, sendo que em alguns casos, particularmente nos desvios de maior magnitude, foram também processados os arquivos climáticos EnergyPlus.

No caso particular de Florianópolis, foram processados, além do LABEEE, dois arquivos do EnergyPlus disponibilizados no site, um no formato TRY – *Test Reference Year* de 1963 e outro no formato SWERA - *Solar and Wind Energy Resource Assessment* de 2000.

Foram selecionados regionalmente, num total de 20 verificações em 14 cidades, os seguintes casos:

Florianópolis-SC (LABEEE, E+ TRY e E+ SWERA), Belém-PA, Belo Horizonte-MG, Brasília-DF, Campo Grande-MS, Cuiabá-MT, Curitiba-PR (LABEEE e E+), Fortaleza-CE, Manaus-AM (LABEEE e E+), Porto Alegre-RS (LABEEE e E+), Porto Velho-RD, Recife-PE, Rio de Janeiro-RJ e Salvador-BA (LABEEE e E+)(Tabela 6).

Os resultados demonstram que os valores das divergências médias estão no intervalo de 1,03% a 32,33%. O valor da divergência média geral é 12,13%. Já quando se considera o desvio padrão, observamos que os valores situam-se entre 17,83% e 196,46%. Os valores extremamente elevados encontrados no desvio padrão de Porto Alegre – LABEEE contrastam com valores relativamente bem mais baixos do arquivo correspondente do EnergyPlus, que ficou em 52,33%, ainda assim bastante elevado. Considerando-se o desvio padrão médio geral, obtido pela média dos desvios padrões de cada arquivo processado, chega-se ao valor de 43,46%. Os valores acima referem-se ao conjunto de 20 arquivos processados, incluindo a repetição de cidades. Numa segunda análise considerou-se, do conjunto acima, apenas um arquivo para cada cidade, utilizando o arquivo de menor desvio quando repetida a cidade. Assim, analisando-se o conjunto resultante de 14 cidades chegamos a uma divergência média geral equivalente a 9,41%, enquanto que o desvio padrão médio geral foi de 31,12%. Considerando-se especificamente o maior valor de máximo encontrado (maior igual a 62,495 em Porto Alegre – LABEEE) indicaram a necessidade de uma análise mais aprofundada dos resultados.

Tabela 6 - Valores de média, desvio padrão, valores de mínimo e de máximo obtidos para a divergência horária entre iluminâncias difusas do tipo de céu e da conversão luminosa, em diferentes localidades brasileiras

Local	FPOLIS	FPOLIS E+	FPOLIS E+SW	BELEM	B.H.
Min	0,4787	0,4339	0,4638	0,8187	0,3230
Máx	4,6370	5,5713	7,7101	2,6589	3,1683
Média	1,0586	1,2200	1,2235	1,0588	1,1098
Desv.Pad.	0,2986	0,6009	0,6022	0,2232	0,4122
Local	BRASILIA	CAMPO GD	CUIABÁ	CURITIBA	CURITIBA E+
Mín	0,6135	0,4819	0,4584	0,5447	0,3294
Máx	3,2915	2,9200	3,1923	4,0454	7,8818
Média	1,1621	1,1143	1,0559	1,1623	1,2005
Desv.Pad.	0,3086	0,3212	0,2759	0,3663	0,6389
Local	FORTALEZA	MANAUS	MANAUS E+	PORTO AL.	PORTO AL. E+
Min	0,5405	0,7877	0,5149	0,6894	0,5007
Máx	2,3372	2,6529	3,0857	62,4950	5,8136
Média	1,0366	1,0960	1,0103	1,3233	1,2201
Desv.Pad.	0,1783	0,2664	0,2498	1,9646	0,5498
Local	PORTO VE.	RECIFE	R. JANEIRO	SALVADOR	SALVADOR E+
Min	0,7235	0,4124	0,2363	0,6226	0,3944
Máx	2,9646	2,5961	3,7954	2,5345	2,9105
Média	1,0644	1,1028	1,0883	1,0727	1,0463
Desv.Pad.	0,2228	0,3432	0,3763	0,2309	0,2627

Fonte: O autor.

Para uma melhor precisão da análise foram então estabelecidos intervalos de divergência e verificadas as frequências de ocorrência das divergências horárias dentro de cada intervalo para o conjunto dos 20 arquivos processados.

Os intervalos foram estabelecidos com os seguintes valores:

- a) Menor ou igual a 0,50 (até -50%);
- b) De 0,50 a 0,75 (até -25%);
- c) De 0,75 e menor ou igual a 0,95 (até -5%);
- d) De 0,95 a 1,00 (até 0%);
- e) De 1,00 a 1,05 (até 5%);

- f) De 1,05 a 1,25 (até 25%);
- g) De 1,25 a 1,50 (até 50%);
- h) De 1,50 a 5,00 (até 500%);
- i) De 5,00 a 10,00 (até 1.000%);
- j) Acima de 10,00 (acima de 1.000%);

Os valores obtidos estão apresentados (Tabela 7) e demonstram que a grande maioria dos resultados situa-se na faixa até 5% de divergência, ficando o segundo maior grupo nas divergências até 25%. Fez-se ainda um refinamento dos intervalos considerando-se: a) Divergências horárias entre -5% e 5%; b) Divergências horárias entre -25% e 25%; c) Divergências horárias entre -50% e 50%.

Tabela 7 - Frequência de ocorrência de divergências horárias por cidade (% total de horas)

INTERV.	LOCAL						
	FLN	FLN E+	FLN E+SW	BELEM	B.H.	BRASI.	CPO. GD
TOTAL	3.279	3.285	3.285	3.285	3.285	3.285	3.285
até 0,5	0,34	0,09	0,03	0,00	3,32	0,00	0,15
até 0,75	7,17	4,23	3,87	0,00	7,40	0,21	3,96
até 0,95	6,22	7,49	15,59	3,14	14,28	5,78	11,29
até 1,00	25,68	32,79	19,67	43,44	21,16	22,71	22,77
até 1,05	37,91	22,28	16,99	34,76	17,08	28,31	23,35
até 1,25	11,10	9,41	18,51	12,24	17,50	20,91	20,61
até 1,5	3,63	9,01	9,98	1,70	6,33	9,19	7,18
até 5,00	7,96	14,37	15,04	4,72	12,94	12,88	10,68
até 10,00	0,00	0,33	0,33	0,00	0,00	0,00	0,00
acima 10,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

INTERV.	LOCAL						
	PTO. AL.	PTO. AL. E+	PTO. VLH.	RECIFE	R. JANEI.	SALVA.	SALVA. E+
TOTAL	3.283	3.285	3.283	3.285	3.285	3.285	3.285
até 0,5	0,00	0,00	0,00	1,40	2,28	0,00	0,79
até 0,75	0,03	3,99	0,03	8,10	5,54	1,92	5,57
até 0,95	5,06	10,96	3,56	13,94	11,66	12,36	14,79
até 1,00	20,29	25,30	39,17	19,57	22,89	27,67	33,33
até 1,05	38,29	18,66	35,88	15,77	29,13	22,53	15,53
até 1,25	17,67	14,82	14,26	22,16	12,94	24,11	17,63
até 1,5	4,78	10,14	2,19	6,24	4,72	4,93	7,25
até 5,00	12,55	15,89	4,90	12,82	10,84	6,48	5,11
até 10,00	0,85	0,24	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
acima 10,00	0,49	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

INTERV.	LOCAL					
	CUIABÁ	CURIT.	CURIT. E+	FORTAL.	MANAUS	MAN. E+
TOTAL	3.283	3.285	3.285	3.283	3.280	3.285
até 0,5	0,85	0,00	1,10	0,00	0,00	0,00
até 0,75	4,02	0,03	6,94	1,31	0,00	10,35
até 0,95	15,57	3,32	7,18	12,06	5,58	17,35
até 1,00	26,10	26,67	30,62	35,09	33,14	31,29
até 1,05	20,83	36,26	21,22	27,14	32,84	18,75
até 1,25	21,38	16,07	12,05	17,85	17,35	12,63
até 1,5	4,96	4,26	5,97	3,20	3,72	4,32
até 5,00	6,27	13,39	14,37	3,35	7,38	5,30
até 10,00	0,00	0,00	0,55	0,00	0,00	0,00
acima 10,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

Fonte: O autor.

Nos resultados (Tabela 8) constata-se que a maioria dos valores de divergência está entre -5% e 5%, com média geral de 53,64% das ocorrências. Considerando-se o

intervalo entre -25% e 25% os valores situam-se na maioria entre 70% e 80%, com uma média geral de 80,06% das ocorrências. Se o intervalo de divergências for ampliado

entre -50% e 50% teremos uma média geral de 89,48% das ocorrências. Relembramos aqui que estas divergências são relativas, não indicando a grandeza dos valores absolutos que as geraram. Por exemplo, o valor de divergência de 62,495, encontrado nas divergências horárias de Porto Alegre obtidas através do arquivo do LABEEE, foi calculado para o dia 10 de junho às 8h da manhã.

Neste caso as radiações global e difusa tinham ambas o valor de apenas 1 Wh/m2 e valor de iluminâncias global e difusa equivalentes a Zero. O programa, no entanto, modelou uma iluminância difusa convertida de 129,85 lux, integrando no tipo de céu o valor de 8.115,35 lux. Para uma avaliação da quantidade total de iluminância difusa modelada ao longo de um ano, foi feita uma verificação, para um conjunto de cidades, da soma anual de iluminâncias difusas horizontais horárias calculadas pela conversão luminosa e determinadas a partir da integração da distribuição das luminâncias calculadas em função do tipo de céu escolhido, determinando-se a diferença percentual entre as dos tipos de céu e as das convertidas iniciais.

Os resultados (Tabela 9) mostram diferenças percentuais entre 5,80% em Fortaleza e 21,09% em Brasília, com média de 11,44%. Com estes dados, consideramos suficientes as verificações realizadas para este passo do procedimento.

As iluminâncias difusas horizontais foram calculadas considerando a Equação 19:

$$E = \sum_{i=0}^n Li * Sri * \cos \theta i \tag{19}$$

Onde:

E: iluminância difusa horizontal;

i: direção do céu de 0 a n (conf. Resolução);

Li: luminância na direção i;

Sri: ângulo sólido da direção i;

θi : ângulo entre a direção i e o Zênite.

Tabela 8 - Frequência de ocorrência de divergências horárias, valores até 5%, 25% e 50% por cidade / arquivo (% total de horas).

INTERV.	LOCAL						
	FLN	FLN E+	FLN E+SW	BELEM	B.H.	BRASI.	CPO. GD
de -5% a 5%	63,6	55,1	36,6	78,2	38,2	51,0	46,1
de -25% a 25%	80,9	71,9	70,7	93,6	70,0	77,7	78,0
de -50% a 50%	91,7	85,2	84,6	95,3	83,7	87,1	89,2
INTERV.	LOCAL						
	PTO.AL.	PTO. AL. E+	PTO. VLH.	RECIFE	R. JANEI.	SALVADOR	SALVA. E+
de -5% a 5%	58,6	43,9	75,0	35,3	52,0	50,2	48,9
de -25% a 25%	81,3	69,7	92,9	71,4	76,6	86,7	81,3
de -50% a 50%	86,1	83,9	95,1	85,8	86,9	93,5	94,1
INTERV.	LOCAL						
	CUIABÁ	CURITIBA	CURITIBA E+	FORTALEZA	MANAUS	MANAUS E+	
de -5% a 5%	46,9	62,9	51,8	62,2	65,9	50,1	
de -25% a 25%	83,9	82,3	71,1	92,1	88,9	80,0	
de -50% a 50%	92,9	86,6	84,0	96,6	92,6	94,7	

Fonte: O autor.

Tabela 9 - Soma anual de iluminâncias difusas horizontais horárias na conversão luminosa, pelo tipo de céu, (diferença absoluta e % entre elas).

LOCAL	SOMA APOLUX	SOMA TIPOCEU	DIFERENÇA	%
BELEM	112.342.196	119.361.573	7.019.377	6,25
B.H	94.967.637	107.644.805	12.677.168	13,35
BRASILIA	98.593.457	119.384.711	20.791.253	21,09
CAMPO GRANDE	96.923.936	111.651.401	14.727.465	15,19
CUIABÁ	104.583.605	113.800.629	9.217.025	8,81
CURITIBA	90.563.402	107.669.474	17.106.071	18,89
FPOLIS	87.874.108	93.475.231	5.601.123	6,37
FORTALEZA	106.427.261	112.595.595	6.168.334	5,80
MANAUS	105.413.036	117.496.343	12.083.307	11,46
PORTO VELHO	106.088.769	114.001.619	7.912.849	7,46
RECIFE	107.352.272	117.616.902	10.264.630	9,56
PORTO ALEGRE	79.888.095	89.266.324	9.378.229	11,74
RIO DE JANEIRO	87.418.990	98.515.476	11.096.486	12,69

Fonte: O autor.

Discussão dos resultados

Sobre o método de seleção dos tipos de céu

O conceito proposto para conversão das informações dos arquivos climáticos em dados de caracterização do tipo de céu segundo um dos 15 modelos normalizados envolveu dois aspectos que foram verificados no trabalho. O primeiro refere-se à confiabilidade do método de conversão dos dados de radiação em dados de iluminação baseado numa interpretação da aplicação das equações de conversão luminosa do Modelo de Perez, conforme descrito. O segundo refere-se ao procedimento de análise dos diferentes descritores derivados dos dados de iluminação para a caracterização de um dos 15 modelos de céu normalizados, associando-se ao tipo selecionado as informações necessárias para a caracterização da distribuição de luminâncias da abóbada.

Sobre a consistência das conversões de radiação em iluminação

Esta verificação envolveu a consistência de obtenção dos dados das iluminâncias horizontais global, difusa e direta a partir dos dados de radiação equivalentes de cada uma. Envolveu arquivos climáticos de 26 cidades brasileiras fornecidos pelo LABEEE dos quais foi selecionado um subconjunto de 10 cidades das quais foram analisados também os arquivos climáticos fornecidos pelo site do *EnergyPlus*, sendo que deste site também foram selecionados arquivos de seis cidades localizadas em outros países e continentes. Todos continham dados de iluminação já inscritos e atualizados que foram considerados como referências corretas, apesar de não se ter exatamente a informação de sua fonte de elaboração. Lembramos que a plena aplicação do Modelo de Perez (PEREZ et al.,1990) utiliza variáveis que podem ser obtidas por diferentes métodos resultando em valores próximos, mas distintos, e que não estavam presentes na bibliografia resultante de nossa revisão.

A ampla avaliação dos resultados de conversão, que foram sintetizadas no tópico de verificação, demonstrou claramente que as formulações de conversão aplicadas às grandezas iluminância horizontal global e iluminância horizontal difusa apresentaram na grande maioria dos casos uma proximidade muito grande com os valores apresentados no arquivo, com maior precisão nos horários com alturas solares mais próximas do Zênite, correspondente aos horários de maior luminosidade, e maior divergência nos horários de alturas solares mais próximas do horizonte. Considerando-se que o objetivo é uma análise anual feita hora a hora, pode-se avaliar a partir dos gráficos que para estas duas grandezas nos horários de maior intensidade luminosa as divergências são bem inferiores a 10%, enquanto que nos horários de menor luminosidade a divergência é mais próxima de 10% ou

mesmo superior. No conjunto a divergência situa-se significativamente abaixo de 10%, o que pode ser considerado bastante aceitável para um modelo que lida com grandezas bastante imprecisas.

Os resultados destes testes mostram a viabilidade de se utilizar os dados convertidos de iluminância horizontal global e iluminância horizontal difusa, quando eles não estão presentes diretamente no arquivo climático, podendo-se afirmar que seu uso implicará num erro geralmente abaixo de 10%.

Conforme demonstrado nesta verificação, a adoção destas duas grandezas como referência para determinar a iluminância horizontal direta seria então o melhor procedimento. A luminância predita do Zênite foi descartada como grandeza diretamente utilizável no método, tendo sido então utilizados neste caso modelos analíticos para sua determinação, conforme conceituado para a etapa seguinte de desenvolvimento do modelo. Observamos ainda que mesmo os dados de luminosidade já presentes nos arquivos EPW utilizados não apresentavam a coerência matemática entre o valor global e o valor da soma (Difusa + Direta) que será necessária posteriormente ao procedimento de caracterização dos modelos dos tipos de céu.

Observamos ainda que todos os arquivos consultados, que envolveu um universo maior que o selecionado para a mostra deste estudo, continham já os dados de luminosidade, o que em princípio dispensaria um método de conversão dos dados de radiação. No entanto considerou-se necessário este procedimento para que no ambiente do programa APOLUX o usuário pudesse dispor de algum arquivo que eventualmente não contivesse estes dados.

Sobre o algoritmo de interpretação dos dados luminosos e seleção do tipo de céu

Tomamos como referência nas conclusões deste tópico a afirmação de Reinhart: “A combinação do Radiance com os Daylight Coefficients de Perez podem eficiente e seguramente modelar séries temporais anuais de iluminância com um erro médio relativo de 20%” (REINHART, 2012, slide 13/23). Também nos referenciamos na afirmação de Dogan, Reinhart e Michalatos (2012), considerando resultados entre 7% a 18% de Erro Quadrático Médio (RMSE) obtidos no estudo de seu método para estimativas urbanas, como valores aceitáveis dentro do intervalo de erro que considera validado para o Daysim / Radiance, entre 6% e 26%. Ainda lembramos os resultados obtidos por Reinhart e Herkel (2000), onde comparando seis métodos distintos consideraram aceitáveis os erros obtidos através da modelagem do DLC com desvios padrões (RSME – Erro Quadrático Médio) entre 16% e 22%.

Pelos resultados demonstrados nas verificações realizadas considera-se que o procedimento de aplicação do algoritmo de seleção dos tipos de céu é totalmente consistente com a proposição conceitual apresentada para o método. Nesta verificação o algoritmo demonstrou-se bastante consistente em selecionar o modelo de céu cujos resultados obtidos para as iluminâncias global e difusa a partir da integração da iluminância parcial provocada pelas diferentes direções do céu mais se aproximaram dos valores de referência utilizados para determinação dos modelos de céu. Constatou-se que a maioria dos valores de divergência situa-se no intervalo entre -5% e 5%, com uma média geral de 53,64% das ocorrências.

Considerando-se o intervalo entre -25% e 25% os valores situam-se na maioria entre 70% e 80%, com uma média geral de 80,06% das ocorrências, o que é bastante consistente com as referências adotadas. Quando se tratou da avaliação anual da quantidade total de iluminâncias difusas modeladas, os valores das diferenças percentuais situaram-se entre 5,80% em Fortaleza e 21,09% em Brasília.

A diferença percentual média entre os valores destas cidades verificadas foi de 11,44%. Constatou-se que nas alturas solares mais próximas do Zênite (maiores valores absolutos de iluminância) os valores de conversão foram significativamente mais próximos dos valores iniciais de referência, enquanto que nas alturas solares mais próximas do horizonte a divergência foi maior, embora incidindo sobre valores iniciais absolutos muito menores que nos casos das alturas solares mais elevadas, o que reforçou a suposição final apresentada no tópico anterior desta discussão quanto à magnitude aproximada de erro dos resultados.

Aqui também se constatou que a adoção do modelo analítico de predição da luminância do Zênite a partir da relação “Global = Difusa + Direta” e da determinação

analítica do turvamento, conforme proposto na conceituação deste procedimento, não comprometeu os resultados além da divergência já verificada na aplicação das equações de eficácia luminosa. Ou seja, os resultados obtidos a partir da aplicação do conceito mantiveram divergência significativamente abaixo de 10 % em relação aos valores iniciais de referência, em muitos casos em torno de 1% e 3%, conforme apresentaram as planilhas.

Destaca-se, entretanto, que esta divergência entre o valor convertido (este com bastante precisão em relação aos dados do arquivo climático) e o valor integrado a partir do tipo de céu podem ser reduzidos a praticamente zero, já que a equação de distribuição de luminâncias é relativa à luminância do Zênite, aqui determinada analiticamente.

Uma vez conhecida a divergência entre a integração e a conversão, é possível reajustar a luminância do Zênite segundo o fator de divergência encontrado, de forma que o resultado final fique praticamente igual ao da conversão luminosa ou aos próprios dados de luminosidade do arquivo climático, quando utilizados.

Conclusões

Os resultados obtidos demonstram que o método proposto é coerente e confiável, para determinação dos 15 modelos de céu de acordo com a norma internacional atual, atingindo ambos os objetivos inicialmente propostos.

Trabalhos futuros podem propor métodos de simulação dinâmica utilizando o método aqui proposto com segurança de resultados.

A maior limitação encontrada foi a falta de trabalhos determinando os 15 modelos de céu que permitissem comparação de resultados, embora na pesquisa tenhamos conseguido verificar a consistência dos resultados de acordo com formulações consagradas.

Referências

CIE - COMMISSION INTERNATIONALE DE L'ECLAIRAGE. **ISO 15469:2003(E) CIE S 011/E:2003 Spatial Distribution of Daylight - CIE Standard General Sky**. CIE Central Bureau, Vienna, 2004.

CLARO, A. **Modelo Vetorial Esférico para Radiosidade Aplicado à Iluminação Natural**. 1998. Tese (Doutorado em Engenharia de Produção) – Programa de Pós Graduação em Engenharia de Produção, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.

DARULA, S.; KITTLER, R. CIE General Sky Standards Defining Luminance Distributions. *In: THE CANADIAN CONFERENCE ON BUILD ENERGY SIMULATION*, Montreal, 2002. **eSIM 2002 Conference Proceedings ...**, 2002, Montreal: IBPSA. [s.p].

DOGAN, T.; REINHART, C.; MICHALATOS, P. Urban Daylight Simulation Calculating the Daylit Area of Urban Designs. *In: NACIONAL CONFERENCE OF THE INTERNATIONAL BUILDING PERFORMANCE SIMULATION ASSOCIATION - USA*, 5., 2012. Madison. **Proceeding ...** [s.l.]: IBPSA, 2012, p. 613-620.

INEICHEN, P.; MOLINEAUX, P. B.; PEREZ, R. Sky luminance data validation: Comparison of seven models with four data banks. **Solar Energy**, v. 52, n. 4, p. 337-34, abr. 1994. DOI:[https://doi.org/10.1016/0038-092X\(94\)90140-6](https://doi.org/10.1016/0038-092X(94)90140-6)

KITTLER, R.; PEREZ, R.; DARULA, S. A new generation of sky standards. *In*: EUROPEAN LIGHTING CONFERENCE, 8., Amsterdam. **Proceedings ...**, 1997: [s.n.], p. 359-378. Disponível em: <http://www.gbv.de/dms/tib-ub-hannover/310765137.pdf>. Acesso em: 26.10.2018.

KITTLER, R.; DARULA, S. Determination of sky types from global illuminance. **Lighting Research Technology**, v. 32, n. 4, p.187-193, dez. 2000. DOI:<https://doi.org/10.1177%2F096032710003200402>

DARULA, S. et al.. **Guidelines for more realistic daylight exterior conditions in energy conscious designs**. Bratislava, Athens: Institute of Construction and Architecture & National Observatory of Athens, 2000. 34 p. (SK - GR 013/1998). Disponível em: http://www.efee.gr/wp-content/uploads/2011/06/GUIDSKGR_V97.pdf. Acesso em: 26.10.2018.

PEREZ, R. et al. Modeling daylight availability and irradiance components from direct and global irradiance. **Solar Energy**, v. 44, n. 5, p. 271-289, 1990. DOI:[https://doi.org/10.1016/0038-092X\(90\)90055-H](https://doi.org/10.1016/0038-092X(90)90055-H)

PEREZ, R.; SEALS, R.; MICHALSKY, J. All-weather model for sky luminance distribution—Preliminary configuration and validation. **Solar Energy**, v. 50, n. 3, p. 235-245. mar. 1993. DOI:[https://doi.org/10.1016/0038-092X\(93\)90017-I](https://doi.org/10.1016/0038-092X(93)90017-I)

REINHART, C.F.; HERKEL, S. The simulation of anual daylight illuminance distributions – a state-of-art comparision of six RADIANCE-based methods. **Energy and Building** v 32, n. 2, p.167-187, jul. 2000. DOI:[https://doi.org/10.1016/S0378-7788\(00\)00042-6](https://doi.org/10.1016/S0378-7788(00)00042-6)

REINHART, C. **Daylighting Simulation**. MIT OpenCourseWare: 4.430, Lecture Notes. Massachusetts Institute of Technology, Department of Architecture, Building Technology Program. Spring 2012. Disponível em: https://ocw.mit.edu/courses/architecture/4-430-daylighting-spring-2012/lecture-notes/MIT4_430S12 lec09.pdf. Acesso em: 26.10.2018.

¹ **Anderson Claro**

Arquiteto Urbanista. Doutor em Engenharia de Produção. Universidade Federal de Santa Catarina. Endereço Posta: Rod. SC401 José Carlos Daux, nº 7.050, Florianópolis – SC, Brasil, CEP 88050-000.