



Iluminação natural – Parte 2 – Procedimentos de cálculo para a estimativa da disponibilidade de luz natural e para a distribuição espacial da luz natural

Daylighting Part 2: Calculation procedures for daylight availability and daylight spatial distribution

Prefácio

A Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) é o Foro Nacional de Normalização. As Normas Brasileiras, cujo conteúdo é de responsabilidade dos Comitês Brasileiros (ABNT/CB), dos Organismos de Normalização Setorial (ABNT/ONS) e das Comissões de Estudo Especiais (ABNT/CEE), são elaboradas por Comissões de Estudo (CE), formadas pelas partes interessadas no tema objeto da normalização.

Os Documentos Técnicos ABNT são elaborados conforme as regras da ABNT Diretiva 2.

A ABNT chama a atenção para que, apesar de ter sido solicitada manifestação sobre eventuais direitos de patentes durante a Consulta Nacional, estes podem ocorrer e devem ser comunicados à ABNT a qualquer momento (Lei nº 9.279, de 14 de maio de 1996).

Os Documentos Técnicos ABNT, assim como as Normas Internacionais (ISO e IEC), são voluntários e não incluem requisitos contratuais, legais ou estatutários. Os Documentos Técnicos ABNT não substituem Leis, Decretos ou Regulamentos, aos quais os usuários devem atender, tendo precedência sobre qualquer Documento Técnico ABNT.

Ressalta-se que os Documentos Técnicos ABNT podem ser objeto de citação em Regulamentos Técnicos. Nestes casos, os órgãos responsáveis pelos Regulamentos Técnicos podem determinar as datas para exigência dos requisitos de quaisquer Documentos Técnicos ABNT.

A ABNT NBR 15215-2 foi elaborada pelo Comitê Brasileiro da Construção Civil (ABNT/CB-002), pela Comissão de Estudo de Iluminação Natural (CE-002:135.002). O (Projeto/Projeto de Revisão) circulou em Consulta Nacional conforme Edital nº XX, de XX.XX.XXXX a XX.XX.XXXX.

Scope

This Part of ABNT NBR 15215 provides procedures for calculating daylight availability in horizontal and vertical external planes; for clear, overcast and partly cloudy sky conditions.

NOTE 1 The daylight availability estimated values for any location, following the procedures presented in this standard, are reference values for design and not instantaneous values. They are data obtained by well-accepted algorithms which, in turn, are derived from measured values and estimation models developed in various countries over several decades. Therefore, the values determined by this standard have good reliability because they consider aspects of the solar orbit relative to each latitude, day and month of the year, as well as different atmospheric conditions.

NOTE 2. The algorithms presented in this document can be used to develop simulation software.



Introdução

A luz natural que incide no ambiente construído é composta basicamente pela luz direta do sol e a luz difundida na atmosfera (abóbada celeste). O primeiro passo no desenvolvimento do projeto de sistemas de iluminação natural consiste no conhecimento da disponibilidade de luz proporcionada por estas fontes.

NOTA O termo luz natural também é conhecido como luz do dia.

A disponibilidade de luz natural caracteriza a quantidade de luz em um determinado local, em função de suas características geográficas e climáticas, que se pode dispor por um certo período de tempo. Dados e técnicas para a estimativa das condições de disponibilidade da luz natural são importantes para a avaliação do desempenho final de um projeto em termos de conforto visual e consumo de energia. A disponibilidade de luz natural se refere à maneira como varia a quantidade de luz durante o dia e épocas do ano, quanto dura essa iluminação ao longo do dia e os motivos pelos quais as localidades dispõem de mais ou menos luz, face aos parâmetros que influenciam no cálculo da disponibilidade da luz natural, como:

- a) os dados relativos à posição do sol;
- b) as épocas da determinação, como o dia e o mês do ano;
- c) a latitude e a longitude geográficas; e
- d) o tipo de céu.

Esta Norma é uma referência básica para o desenvolvimento de ferramentas de projeto e trabalhos de pesquisa, uma vez que não é direcionada apenas para projetistas, mas também para qualquer interessado na área.

Iluminação natural – Parte 2 – Procedimentos de cálculo para a estimativa da disponibilidade de luz do natural

1 Escopo

Esta Parte da ABNT NBR 15215 estabelece procedimentos estimativos de cálculo da disponibilidade da luz natural em planos horizontais e verticais externos, para condições de céu claro, encoberto e parcialmente encoberto ou intermediário.

NOTA 1 Os valores estimados da disponibilidade de luz natural para uma localidade qualquer, de acordo com os procedimentos apresentados nesta Parte da ABNT NBR 15215, são valores referenciais para projeto e não valores instantâneos. São dados obtidos por algoritmos universalmente aceitos que, por sua vez, derivam de valores medidos e de modelos estimativos desenvolvidos em diversos países ao longo de várias décadas. Os valores assim determinados apresentam boa confiabilidade, pois consideram aspectos da órbita solar relativa a cada latitude, dia e mês do ano, assim como distintas condições atmosféricas.

NOTA 2 Os algoritmos apresentados nesta Parte da ABNT NBR 15215 podem ser utilizados no desenvolvimento de programas computacionais.

NOTA 3 Os termos luz natural e luz do dia são usados nesta Norma como sinônimos, havendo tendência mundial para a substituição do termo luz natural (*natural light*), mais comumente empregado no Brasil na área de ambiente construído, pelo termo luz do dia (*daylight*).

NOTA 4 Os termos céu parcialmente encoberto, céu parcialmente nublado e céu intermediário também são usados nesta Norma como sinônimos, havendo o uso destes três termos na literatura técnica da área de ambiente construído no Brasil.

2 Referência normativa

O documento a seguir é citado no texto de tal forma que seu conteúdo, total ou parcial, constitui requisitos para este Documento. Para referências datadas, aplicam-se somente as edições citadas. Para referências não datadas, aplicam-se as edições mais recentes do referido documento (incluindo emendas).

CIE S 017, *International Lighting Vocabulary, ILV*

3 Termos e definições

Para os efeitos deste documento, aplicam-se os seguintes termos e definições.

3.1

condições de céu

aparência da abóbada celeste quando vista por um observador situado na superfície terrestre, que está relacionada à distribuição espacial da sua emissão de luz

NOTA 1 O termo céu é adotado nesta Parte da ABNT NBR 15215 como sinônimo de abóbada celeste.

NOTA 2 O Céu Encoberto Padrão CIE e o Céu Claro Padrão CIE foram desenvolvidos em uma série de publicações entre 1955 e 1994 [1-4] e são apresentados nesta Norma para fins de demonstração genérica de suas distribuições de luz. O Céu Geral Padrão CIE é uma generalização da fórmula do Céu Claro CIE [5]. Estes têm se mostrado um bom modelo para céus com distribuições luminosas que variam suavemente, ocorrendo em várias condições climáticas. Fórmulas desse tipo também fornecem uma boa aproximação aos céus parcialmente encobertos em climas marítimos. Também foi demonstrado que aproximadamente quatro tipos do Céu Geral da CIE podem dar uma boa caracterização das condições externas de iluminação natural, embora os tipos específicos de

céus possam diferir entre os climas. As distribuições de luminâncias para outros tipos de céu são apresentadas também nesta Norma.

3.1.1 céu claro

condição na qual, dada a inexistência de nuvens e baixa nebulosidade, as reduzidas dimensões das partículas de água fazem com que apenas os baixos comprimentos de onda, ou seja, a porção azul do espectro, consigam emergir em direção à superfície da Terra, conferindo a cor azul, característica do céu

NOTA 1 O céu claro apresenta sua porção mais escura a 90° do sol e sua parte mais brilhante ao redor deste, conforme indicado na Figura 1. O céu tende a ser mais brilhante nas regiões próximas à linha do horizonte.

NOTA 2 A luminância de qualquer ponto da abóbada celeste é correlacionada com a luminância do zênite, em função da posição do ponto considerado com relação ao zênite e ao sol (ver Seção 7).

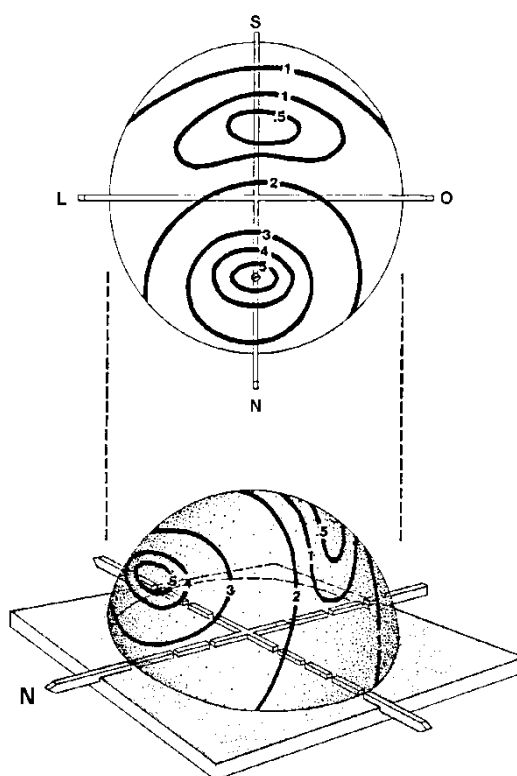


Figura 1 — Distribuição de luminâncias para céu claro¹

3.1.2 céu encoberto

condição de céu na qual as nuvens preenchem toda a superfície da abóbada celeste

NOTA 1 O céu encoberto resulta da reflexão/refração da luz direta do sol, para todos os comprimentos de onda, em grandes partículas de água em suspensão na atmosfera. O resultado é uma abóbada cinza-claro, com a porção zenital apresentando uma luminância três vezes maior que a porção próxima à linha do horizonte, conforme mostrado na Figura 2.

NOTA 2 A luminância de um ponto qualquer da abóbada celeste é correlacionada com a luminância do zênite, dada em função da posição do ponto considerado em relação ao zênite (ver Seção 7).

¹) A luminância do ponto depende da altura solar, da mesma maneira que para o céu claro padronizado. .

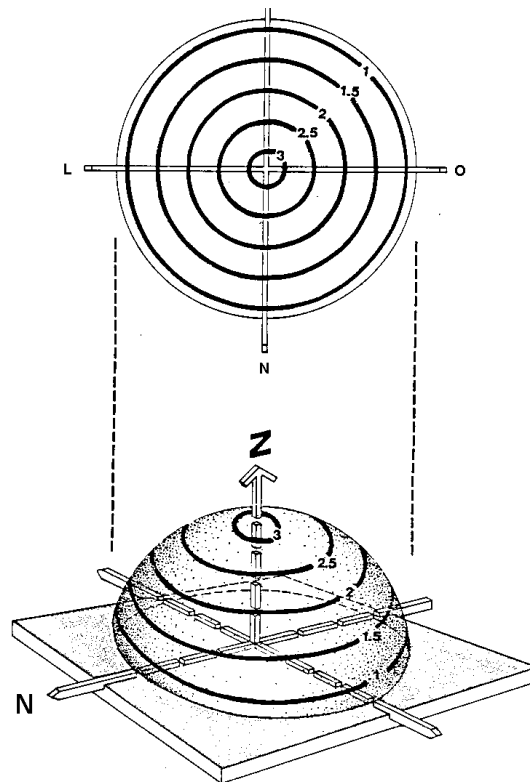


Figura 2 — Distribuição de luminâncias para céu encoberto²

3.1.3

céu parcialmente encoberto

céu parcialmente nublado

céu parcialmente intermediário

condição de céu na qual a luminância de um dado elemento é definida para uma dada posição do sol sob uma condição climática intermediária que ocorre entre os céus padronizados como céu claro e totalmente encoberto

3.2

declinação solar

δ_s

ângulo entre o raio do sol, do ponto de vista do observador e com vértice neste, e o equador celeste, ou seja, a inclinação do eixo da terra em relação à elíptica da trajetória, compreendida entre os limites $23,45^\circ \leq \delta_s \leq +23,45^\circ$

NOTA Os valores da declinação do sol são positivos quando o sol se apresenta ao norte do equador celeste e negativos quando o sol se apresenta ao sul. A Figura 3 mostra este parâmetro geográfico do sol.

² O sol e sua auréola ao redor, são excluídos desta distribuição de luminâncias.

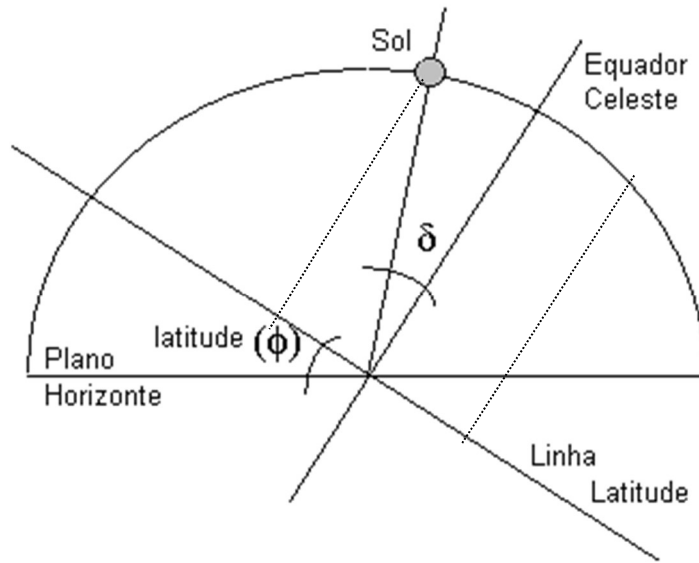


Figura 3 — Desenho esquemático do ângulo de declinação solar (δ)

3.3 altura solar³

γ_s
 ângulo entre o raio do sol e o horizonte, do ponto de vista do observador obtido em função da hora do dia, da época do ano e da latitude e longitude geográfica do local considerado

3.4 azimute solar⁴

α_s
 ângulo entre o norte geográfico e o plano vertical que passa pelo centro do sol, do ponto de vista do observador e com vértice neste, estando compreendido entre $0^\circ \leq \alpha_s \leq 360^\circ$, medido a partir do norte no sentido horário

4 Símbolos

Para os efeitos deste documento, aplicam-se os seguintes símbolos.

E	iluminância, expressa em lux (lx)
E_{EXT}	iluminância solar extraterrestre, expressa em lux (lx)
M	número do mês do ano, sendo igual a 1 para janeiro e 12 para dezembro
D	número do dia do mês, variando de 1 a 30 ou de 1 a 31, exceto para fevereiro
h	hora local marcada no relógio
h_s	hora solar verdadeira
x_h	expressão horária

³ A variação da altura é de 0° a 90° , sendo que, quando o sol se encontra no zênite, sua altura é igual a 90° .

⁴ O azimute solar é função da hora do dia, época do ano e coordenadas geográficas do local considerado.

c	correção do horário de verão, quando em vigor (1 para o verão e 0 para o inverno)
J	dia Juliano, dado por $J = i + D$
i	valor numérico mensal, fornecido pela tabela 1, e D é o dia do mês
a, b	parâmetros de gradação de luminância
c, d, e	parâmetros de dispersão da indicatriz
α	azimute de um elemento do céu (sentido horário a partir do norte), expresso em radianos (rad)
α_s	azimute solar, no sentido horário a partir do norte, expresso em radianos ou graus (rad ou °)
δ_s	declinação solar, expressa em graus (°)
φ	latitude do local
λ	longitude do local, expressa em graus (positiva, caso localizada a oeste de Greenwich)
λ_p	longitude do meridiano padrão do local, expressa em graus, e múltiplo de 15
χ	menor distância angular entre um elemento do céu e o sol, expresso em radianos (rad)
$f(\chi)$	função indicatriz de dispersão
$\varphi(Z)$	função de gradação de luminância
γ	ângulo de elevação de um elemento do céu acima do horizonte, expresso em radianos (rad)
γ_s	ângulo de elevação do sol acima do horizonte, expresso em radianos (rad)
L_a	luminância de um elemento do céu, expressa em candela por metro quadrado (cd/m^2)
L_z	luminância do zênite, expressa em candela por metro quadrado (cd/m^2)
Z	distância angular entre um elemento do céu e o zênite, expresso em radianos (rad)
Z_s	distância angular entre o sol e o zênite, expressa em radianos (rad)]

5 Determinação dos parâmetros relativos à geometria da insolação

5.1 Determinação da declinação solar

A declinação solar (δ_s), considerando-a como função exclusivamente da época do ano, é calculada por meio da Equação (1).

$$\delta_s = 23,45^\circ \times \text{sen} (29,7^\circ M + 0,98^\circ D - 109^\circ) \quad (1)$$

onde

- δ_s é a declinação solar, expressa em graus (°);
- M é o número do mês do ano, sendo igual a 1 para janeiro e 12 para dezembro;
- D é o número do dia do mês, variando de 1 a 30 ou de 1 a 31, exceto para o mês de fevereiro.

A Tabela 1 indica, para cada mês, os valores numéricos (i) e (M) dos meses, a declinação solar (δ_s), as iluminâncias solares extraterrestres (E_{ext}) e as equações horárias (x_h), para os dias 21 de cada mês.

Tabela 1 — Iluminâncias solares extraterrestres (E_{ext}) e equações horárias (x_h)

Mês	M	Dia	i	δ_s	E_{EXT} (lx)	x_h (h)
Janeiro	1	21	0	- 20,041	131.605	- 0,185
Fevereiro	2	21	31	- 11,376	130.327	- 0,228
Março	3	21	59	0,278	128.482	- 0,123
Abril	4	21	90	11,859	126.198	0,022
Mai	5	21	120	20,325	124.327	0,058
Junho	6	21	151	23,450	123.266	- 0,025
Julho	7	21	181	20,414	123.359	- 0,105
Agosto	8	21	212	12,014	124.586	- 0,059
Setembro	9	21	243	0,458	126.623	0,112
Outubro	10	21	273	- 11,218	128.833	0,258
Novembro	11	21	304	- 19,947	130.746	0,239
Dezembro	12	21	334	- 23,435	131.741	0,049

5.2 Determinação da altura solar

A altura solar é determinada pela Equação (2).

$$\gamma_s = \text{arc sen} [\text{sen}(\varphi) \times \text{sen}(\delta_s) - \text{cos}(\varphi) \times \text{cos}(\delta_s) \times \text{cos}(15^\circ \cdot h_s)] \quad (2)$$

onde

γ_s é a altura solar, expressa em graus (°);

φ é a latitude do local, expressa em graus (°) (negativa, caso localizada ao sul do Equador);

h_s é a hora solar verdadeira, calculada pela Equação (3):

$$h_s = h + \frac{(\lambda_p - \lambda)}{15} + x_h - c \quad (3)$$

h é a hora local;

λ longitude do local, expressa em graus (°) (positiva, caso localizada a oeste de Greenwich);

λ_p longitude do meridiano padrão do local, expressa em graus (°), e múltiplo de 15°;

x_h é a expressão horária, calculada pela Equação (4):

$$x_h = 0,170 \times \text{sen}[1,93 (J) - 154,4] - 0,129 \times \text{sen}[1,01 (J) - 8,08] \quad (4)$$

A expressão horária equação (4), é o termo de correção entre a hora solar e a hora do relógio, causada devido às flutuações da duração do dia solar e a órbita elíptica da terra compreendida entre os limites:

$$14 \text{ min } 17 \text{ s} \leq x_h \leq +16 \text{ min } 25 \text{ s} \quad (\text{ver Tabela 1}) \quad (5)$$

onde

- C é a correção do horário de verão, quando em vigor (igual a 1 para o verão e 0 para o inverno);
- J é o dia Juliano, dado por $J = i + D$, onde i é o valor numérico mensal, fornecido pela Tabela 1, e D é o dia do mês.

6 Determinação matemática de iluminâncias céu claro, céu encoberto e céu parcialmente encoberto ou parcialmente nublado ou intermediário – Cálculos simplificados

6.1 Caracterização de condições de céu padrão por meio de dados de nebulosidade

Para fins de estimativas que se façam necessárias, a caracterização de condições genéricas do céu pode ser feita pela cobertura de nuvens estimada em percentual e expressa em uma escala de 0% a 100 %.

Assim sendo, apresentam-se as seguintes condições de céus:

- céu claro: 0 % a 25 %;
- céu parcialmente encoberto: 25 % a 75 %;
- céu encoberto: 75 % a 100 %.

Pressupõe-se que no céu claro há a presença do sol (presença de radiação solar direta), que no céu encoberto não há presença do sol (sem componente de radiação solar direta), e, que nos céus parcialmente encobertos (parcialmente nublados ou intermediários) a presença do sol pode ou não existir (presença ou não de radiação solar direta).

6.2 Céu claro com sol

6.2.1 Generalidades

A iluminação oriunda de céu claro é considerada como a soma das parcelas de iluminação devida à luz direta do sol e à irradiação do céu, chamada também de parcela difusa da luz natural.

6.2.2 Determinação da iluminância devida ao céu num plano horizontal

A iluminância devida à abóbada celeste E_{ch} pode ser estimada de maneira simplificada, calculada pela Equação (8).

$$E_{ch} = 124 (\text{sen} \gamma_s)^{0,923} \times \Delta^{0,875} \quad (8)$$

onde

- E_{ch} é a iluminância devida ao céu, em um plano horizontal, expressa em quilolux (klx)
- Δ é o índice de brilho do céu, que para as condições de céu claro, assume-se o valor de 0,12.

6.2.3 Determinação da iluminância devida ao céu em um plano vertical

A iluminância devida ao céu em um plano vertical é calculada pela Equação (9) e pela Tabela 2:

$$E_{cv} = E_{ch} \times V \quad (9)$$

onde

E_{cv} é a iluminância devida ao céu, em um plano vertical, expressa em quilolux (klx);

V é o fator de iluminação vertical de meio céu, obtido em função da altura solar (γ_s) e a diferença azimutal entre o sol e a elevação ($|\alpha_s - \alpha_e|$), ver Tabela 2.

Tabela 2 — Valores para V

γ_s	azimute do sol - azimute da elevação												
	0°	15°	30°	45°	60°	75°	90°	105°	120°	135°	150°	165°	180°
0°	1,76	1,71	1,58	1,38	1,14	0,89	0,68	0,55	0,49	0,47	0,46	0,46	0,46
15°	1,70	1,66	1,53	1,32	1,08	0,82	0,60	0,47	0,40	0,37	0,36	0,36	0,36
30°	1,35	1,32	1,22	1,06	0,88	0,68	0,52	0,41	0,35	0,32	0,31	0,30	0,30
45°	1,01	0,99	0,92	0,82	0,70	0,57	0,46	0,38	0,33	0,30	0,28	0,28	0,27
60°	0,74	0,73	0,69	0,63	0,56	0,49	0,42	0,37	0,33	0,30	0,29	0,28	0,28
75°	0,53	0,53	0,51	0,49	0,46	0,43	0,40	0,37	0,35	0,33	0,32	0,31	0,31
90°	0,38	0,38	0,38	0,38	0,38	0,38	0,38	0,38	0,38	0,38	0,38	0,38	0,38

6.2.4 Determinação da iluminância devida ao sol em um plano horizontal

A iluminância devida ao sol em um plano horizontal é calculada pela Equação (10).

$$E_{sh} = E_s \times \text{sen}(\gamma_s) \quad (10)$$

onde

E_{sh} é a iluminância em um plano horizontal, expressa em lux (lx);

E_s é a iluminância devida ao sol, perpendicular ao plano de incidência, expressa em lux, calculada pela Equação (11):

$$E_s = E_{ext} \times \exp(-c \times m \times T) \quad (11)$$

E_{ext} é a iluminância solar extraterrestre, devida à órbita da terra, dada em função da época do ano, expressa em lux (lx), calculada pela Equação (12);

$$E_{ext} = E_{ext.média} \times \{1 + 0,034 \times \cos[0,986 (J) - 1,973]\} \quad (12)$$

$E_{ext.média}$ é a constante de iluminação solar, tomada à meia distância entre a terra e o sol, expressa em quilolux (klx), igual a 127 500 lux

c é o coeficiente de extinção ou dissipação atmosférica, calculado pela equação 13:

$$c = 0,1 / (1 + 0,0045 m) \quad (13)$$

m é a massa de ar óptica que, simplificada para locais próximos ao nível do mar e alturas solares superiores a 10°, pode ser determinada pela Equação (14):

$$m = 1/(\text{sen } \gamma_s) \quad (14)$$

T é o fator de turvamento, coeficiente, adimensional, atmosférico através do qual a iluminação é atenuada.

O fator de turvamento é variável de acordo com as condições de poluição atmosférica do local, podendo ser considerado conforme indicado na Tabela 3.

Tabela 3 — Fatores de turvamento

Região	Fator de turvamento (T)
ar perfeitamente limpo e seco	1,0
ar seco em áreas montanhosas	1,5
áreas rurais	2,5
áreas urbanas	3,0 a 5,5
áreas industriais	> 5,5

6.2.5 Determinação da iluminância devida ao sol em um plano vertical

A iluminância em um plano vertical pode ser determinada pela Equação (15):

$$E_{sv} = E_s \times \cos \beta \quad (15)$$

onde

E_{sv} é a iluminância devida ao sol em um plano vertical, expressa em quilolux (klx);

E_s é a iluminância devida ao sol, perpendicular ao plano de incidência, expressa em quilolux (klx);

β é o ângulo de incidência, distância angular entre a normal à elevação e o raio do sol, calculado pela Equação (16):

$$\beta = \text{arc cos}[\cos \gamma_s \times \cos \alpha_z] \quad (16)$$

onde

α_z é o ângulo azimutal entre o sol e a normal à elevação;

$$\alpha_z = \alpha_s - \alpha_e;$$

α_e é o azimute da elevação (fachada).

Relacionando a iluminância devida ao sol em um plano vertical, com a iluminância devida ao sol em um plano horizontal, obtém-se a Equação (17):

$$E_{sv} = E_{sh} \times \cotg \gamma_s \times \cos(\alpha_s - \alpha_e) \quad (17)$$

Ou, pela Equação (19) se:

$$\cotg \gamma_s \times \cos(\alpha_s - \alpha_e) = k \quad (18)$$

onde

k_h é o coeficiente de relação entre a iluminância no plano vertical e horizontal, devido ao sol, em função da altura do sol (γ_s), e da diferença azimutal (α_z) entre o sol e a elevação (ver Tabela 4).

$$E_{sv} = E_{sh} \times k \quad (19)$$

Tabela 4 — Fator k de relação entre iluminâncias no plano vertical e horizontal, devidas ao sol, para a condição de céu claro

Altura solar	Azimute do sol - azimute da elevação									
	0°	10°	20°	30°	40°	50°	60°	70°	80°	90°
10°	5,67	5,59	5,33	4,91	4,34	3,65	2,84	1,94	0,98	0,00
15°	3,73	3,68	3,51	3,23	2,86	2,40	1,87	1,28	0,65	0,00
20°	2,75	2,71	2,58	2,38	2,10	1,77	1,37	0,94	0,48	0,00
25°	2,14	2,11	2,02	1,86	1,64	1,38	1,07	0,73	0,37	0,00
30°	1,73	1,71	1,63	1,50	1,33	1,11	0,87	0,59	0,30	0,00
35°	1,43	1,41	1,34	1,24	1,09	0,92	0,71	0,49	0,25	0,00
40°	1,19	1,17	1,12	1,03	0,91	0,77	0,60	0,41	0,21	0,00
45°	1,00	0,98	0,94	0,87	0,77	0,64	0,50	0,34	0,17	0,00
50°	0,84	0,83	0,79	0,73	0,64	0,54	0,42	0,29	0,15	0,00
55°	0,70	0,69	0,66	0,61	0,54	0,45	0,35	0,24	0,12	0,00
60°	0,58	0,57	0,54	0,50	0,44	0,37	0,29	0,20	0,10	0,00
65°	0,47	0,46	0,44	0,40	0,36	0,30	0,23	0,16	0,08	0,00
70°	0,36	0,36	0,34	0,32	0,28	0,23	0,18	0,12	0,06	0,00
75°	0,27	0,26	0,25	0,23	0,21	0,17	0,13	0,09	0,05	0,00
80°	0,18	0,17	0,17	0,15	0,14	0,11	0,09	0,06	0,03	0,00
85°	0,09	0,09	0,08	0,08	0,07	0,06	0,04	0,03	0,02	0,00
90°	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

6.3 Céu encoberto

6.3.1 Determinação da iluminância em um plano horizontal

A iluminância em um plano horizontal pode ser determinada simplificadamente pela Equação (20):

$$E_{ceh} = 124 (\text{sen} \gamma_s)^{0,923} \times \Delta^{0,875} \quad (20)$$

onde

E_{ceh} é a iluminância absoluta em um plano horizontal para céu encoberto, expressa em quilolux (klx);

Δ é o índice de brilho do céu, que para as condições de céu encoberto, assume-se o valor de 0,30.

6.3.2 Iluminância em um plano vertical

A iluminância em um plano vertical (E_{cev}) é calculada pela Equação (21):

$$E_{cev} = 0,396 \times E_{ceh} \quad (21)$$

6.4 Céu intermediário

6.4.1 Generalidades

A iluminação oriunda de céu intermediário (ou parcialmente encoberto ou parcialmente nublado) é determinada a partir da distribuição de luminâncias para este tipo de céu.

NOTA A distribuição de luminâncias para este tipo de céu, a ser ainda padronizada internacionalmente, só é válida de acordo com a Equação 32 para alturas solares de até 80°.

6.4.2 Determinação da iluminância devida ao céu em um plano horizontal

A iluminância devida ao céu em um plano horizontal é calculada pela Equação (22):

$$E_{cih} = 124 (\text{sen}\gamma_s)^{0,923} \times \Delta^{0,87} \quad (22)$$

onde

- E_{cih} é a iluminância do céu intermediário, devida ao céu, em um plano horizontal, expressa em quilolux (klx);
- γ_s é a altura solar, expressa em graus (°);
- Δ é o índice de brilho do céu, que para as condições de céu parcialmente encoberto, assume-se o valor de 0,25.

6.4.3 Determinação da iluminância devida ao céu em um plano vertical

A iluminância devida ao céu em um plano vertical é, do mesmo modo que no caso de céu claro, calculada pela seguinte equação:

$$E_{civ} = E_{cih} \times V \quad (23)$$

onde

- E_{civ} é a iluminância do céu intermediário, devida ao céu em um plano vertical, expressa em quilolux (klx);
- E_{cih} é a iluminância do céu intermediário, devida ao céu em um plano horizontal, expressa em quilolux (klx);
- V é o fator dado pela Tabela 2.

6.4.4 Determinação da iluminância devida ao sol em um plano horizontal

A iluminância devida ao sol em um plano horizontal é calculada pela Equação (24):

$$E_{dih} = E_{din} \times \text{sen}\gamma_s \quad (24)$$

onde

- E_{dih} é a iluminância do céu intermediário devido ao sol, em um plano horizontal, expressa em quilolux (klx);
- E_{din} é a iluminância devido ao sol, em um plano normal, expressa em quilolux (klx);
- γ_s é a altura solar, expressa em graus (°);

6.4.5 Determinação da iluminância devido ao sol em um plano vertical

A iluminância devida ao sol em um plano vertical é calculada pela Equação (25):

$$E_{div} = E_{din} \times \cos \beta \quad (25)$$

onde

- E_{div} é a iluminância do céu intermediário devida ao sol, em um plano vertical, expressa em quilolux (klx);
- E_{din} é a iluminância devida ao sol, em um plano normal, expressa em quilolux (klx);
- β é o ângulo de incidência, conforme a Equação (16), em graus (°).

7 Determinação da distribuição de Luminâncias de céu

7.1 Geral

A distribuição de luminâncias do céu depende do tempo e do clima, e muda ao longo do dia de acordo com a posição do sol. Esta Norma lista um conjunto de distribuições de luminâncias, que modelam o céu sob uma ampla gama de condições, do céu encoberto ao céu sem nuvens com o objetivo de:

- ser uma base universal para a classificação de distribuições medidas de luminância do céu;
- estabelecer um método para calcular a luminância do céu em procedimentos de projeto de iluminação natural.

Esta Parte da ABNT NBR 15215 define as distribuições relativas de luminância: a luminância do céu em qualquer ponto é dada em função da luminância do zênite.

Esta Norma incorpora modelos de céu de Perez (1998) e modelos de céu conforme a ISO 15469, ambos usados em programas de simulação computacional para o cálculo de iluminação da luz natural (ou luz do dia). Para fins de cálculo de iluminação natural, podem ser usados valores de luminância zenital ou de iluminância horizontal para obter distribuições absolutas de luminância.

Os modelos de céu da CIE incorporam tanto o Céu Claro Padrão CIE quanto o Céu Encoberto Padrão CIE, que são tratados como casos particulares do Céu Geral. O Céu Encoberto é mantido como uma fórmula separada porque existem muitos procedimentos de cálculo que incorporam a formulação matemática desta distribuição em particular.

7.2 Especificações?

Essa Norma especifica um conjunto de condições externas de iluminação natural vinculando a luz solar e a luz de céu para fins teóricos e práticos.

As distribuições de luminância dadas têm as seguintes características:

- são simétricas em relação ao meridiano solar e são função da distância angular, Z_s , entre o sol e o zênite (ver Figura 4);

- b) são definidas por funções contínuas suaves. Estas distribuições são típicas de céus sem nuvens e daqueles onde a cobertura de nuvens é homogênea. Eles fornecem uma aproximação aos céus parcialmente encobertos que é suficientemente precisa para muitos propósitos práticos de cálculo de iluminação natural.

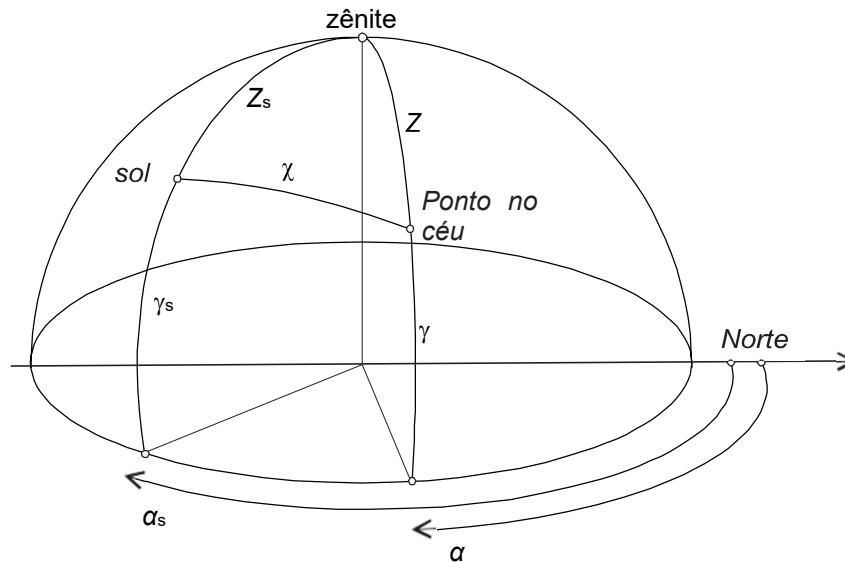


Figura 4 — Ângulos que definem a posição do sol e de um dado ponto no céu

7.3 Distribuição relativa de luminâncias de céu de acordo com a ISO CIE 15469:2004

7.3.1 Generalidades

A luminância relativa em qualquer ponto do céu depende do ângulo, χ , entre esse elemento do céu e o sol, e do ângulo, Z , entre o elemento do céu e o zênite. É dada em termos de duas funções: a indicatriz de dispersão relativa, $f(\chi)$, e a gradação de luminância entre o horizonte e o zênite, $\varphi(Z)$.

A posição de um elemento arbitrário do céu é definida por seu ângulo zenital, Z , e pela diferença entre o azimute do elemento e o do sol, $|\alpha - \alpha_s|$. Se Z_s é o ângulo zenital do sol, a distância angular entre o elemento e o sol é calculada conforme a seguir:

$$\chi = \arccos(\cos Z_s \cdot \cos Z + \sin Z_s \cdot \sin Z \cdot \cos|\alpha - \alpha_s|) \quad (26)$$

Como alternativa, o ângulo de elevação, γ , pode ser usado em vez do ângulo zenital, Z , para definir a posição de um elemento. Então, obtém-se a Equação (27):

$$Z = \frac{\pi}{2} - \gamma \quad (27)$$

Da mesma forma, o ângulo zenital do sol pode ser obtido a partir da elevação solar pela Equação (28):

$$Z_s = \frac{\pi}{2} - \gamma_s \quad (28)$$

A razão da luminância, L_a , de um elemento arbitrário do céu para a luminância zenital, L_z , é calculada pela Equação (29):

$$\frac{L_a}{L_z} = \frac{f(\chi) \cdot \varphi(Z)}{f(Z_s) \cdot \varphi(0)} \quad (29)$$

A função de gradação da luminância, φ , relaciona a luminância de um elemento do céu ao seu ângulo

zenital calculada conforme a Equação (30):

$$\varphi(Z) = 1 + a \cdot \exp\left(\frac{b}{\cos Z}\right), \quad \text{quando } 0 \leq Z < \frac{\pi}{2} \quad (30)$$

$$\varphi\left(\frac{\pi}{2}\right) = 1, \quad \text{no horizonte}$$

Os parâmetros a e b são fornecidos na Tabela 5 para tipos de céu padrão.

A Equação 29 requer o valor no zênite. Este é indicado na Equação (31):

$$\varphi(0) = 1 + a \cdot \exp b \quad (31)$$

A função f é uma indicatriz de dispersão que relaciona a luminância relativa de um elemento do céu à sua distância angular do sol, calculada conforme a Equação (32):

$$f(\chi) = 1 + c \cdot \left[\exp(d\chi) - \exp\left(d\frac{\pi}{2}\right) \right] + e \cdot \cos^2 \chi \quad (32)$$

Seu valor no zênite é calculado conforme a Equação (33):

$$f(Z_s) = 1 + c \cdot \left[\exp(dZ_s) - \exp\left(d\frac{\pi}{2}\right) \right] + e \cdot \cos^2 Z_s \quad (33)$$

Tabela 5 — Parâmetros-padrão

Tipo de céu	Grupo de gradação	Grupo da indicação	a	b	c	d	e	Descrição da distribuição de luminância
1	I	1	4,0	-0,70	0	-1,0	0	Céu Encoberto Padrão CIE, Gradação de luminância acentuada em direção ao zênite, uniformidade azimutal
2	I	2	4,0	-0,70	2	-1,5	0,15	Encoberto, com gradação acentuada de luminância e leve brilho em direção ao sol
3	II	1	1,1	-0,8	0	-1,0	0	Encoberto, com gradação moderada e com uniformidade azimutal
4	II	2	1,1	-0,8	2	-1,5	0,15	Céu encoberto, com gradação moderada e leve brilho em direção ao sol
5	III	1	0	-1,0	0	-1,0	0	Céu de luminância uniforme
6	III	2	0	-1,0	2	-1,5	0,15	Céu parcialmente encoberto, sem gradação em direção ao zênite, leve brilho em direção ao sol
7	III	3	0	-1,0	5	-2,5	0,30	Céu parcialmente encoberto, sem gradação em direção ao zênite, região circunsolar mais brilhante
8	III	4	0	-1,0	10	-3,0	0,45	Céu parcialmente encoberto, sem gradação em direção ao zênite, coroa solar nítida
9	IV	2	-1,0	-0,55	2	-1,5	0,15	Parcialmente encoberto com sol encoberto
10	IV	3	-1,0	-0,55	5	-2,5	0,30	Parcialmente encoberto, com região circunsolar mais brilhante
11	IV	4	-1,0	-0,55	10	-3,0	0,45	Céu azul-esbranquiçado com coroa solar nítida
12	V	4	-1,0	-0,32	10	-3,0	0,45	Céu Claro Padrão CIE, turbidez de baixa luminância
13	V	5	-1,0	-0,32	16	-3,0	0,30	Céu Claro Padrão CIE, atmosfera poluída
14	VI	5	-1,0	-0,15	16	-3,0	0,30	Céu sem nuvens e turvo com ampla coroa solar
15	VI	6	-1,0	-0,15	24	-2,8	0,15	Céu azul-esbranquiçado turvo com ampla coroa solar

7.3.2 Especificação de parâmetros-padrão

Para fins de classificação e descrição, os parâmetros de a a e nas Equações (30) a (33) devem ser selecionados da Tabela 5.

A Tabela 5 lista quinze distribuições de luminância relativa padrão, as quais são baseadas em seis grupos de valores a e b para a função de gradação e seis grupos de valores c , d e e para a função da indicatriz. As curvas resultantes são ilustradas nas Figuras 6 e 7.

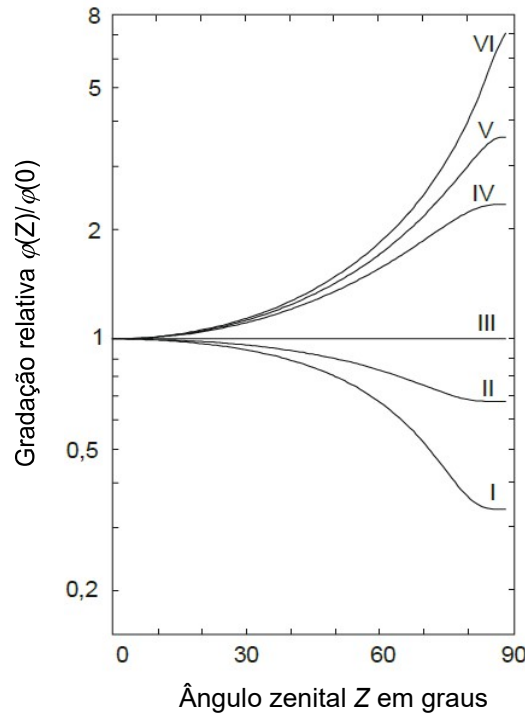


Figura 5 — Grupos de funções de gradação padrão

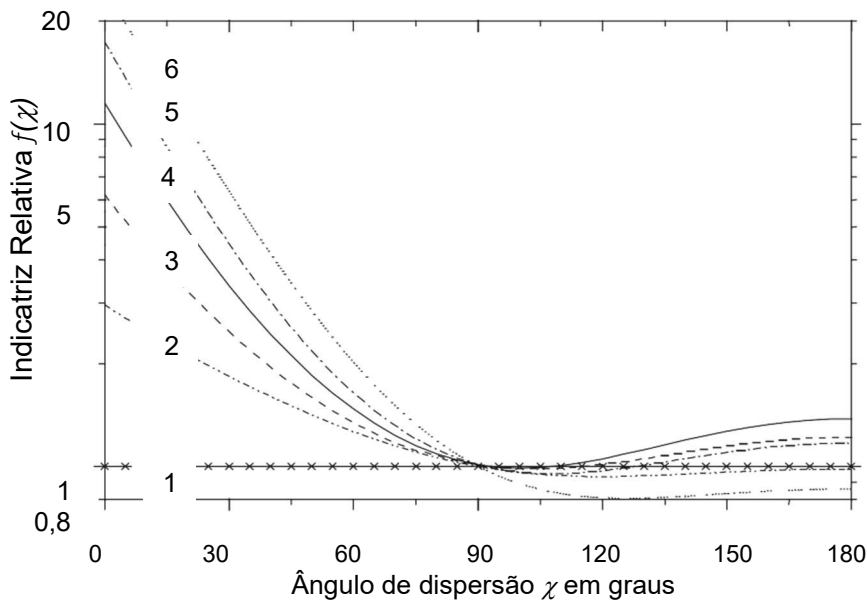


Figura 6 — Grupos da função indicatriz padrão

7.3.3 Especificação do céu encoberto tradicional

O céu geral padrão integra a equação do céu encoberto tradicional como o 16º céu⁵ que pode ser usado como uma alternativa ao Céu Tipo 1 quando apenas céus encobertos forem modelados. Esta distribuição de luminância deve ser expressa pela razão entre a luminância de um elemento do céu, $L_{oc}(\gamma)$, e a luminância do zênite, L_{zoc} :

$$\frac{L_{oc}(\gamma)}{L_{zoc}} = \frac{1+2 \times \sin \gamma}{3} \quad (34)$$

onde

γ é o ângulo de elevação do elemento do céu acima do horizonte.

A diferença entre os tipos de céu 1 e 16 é mostrada na Figura 7.

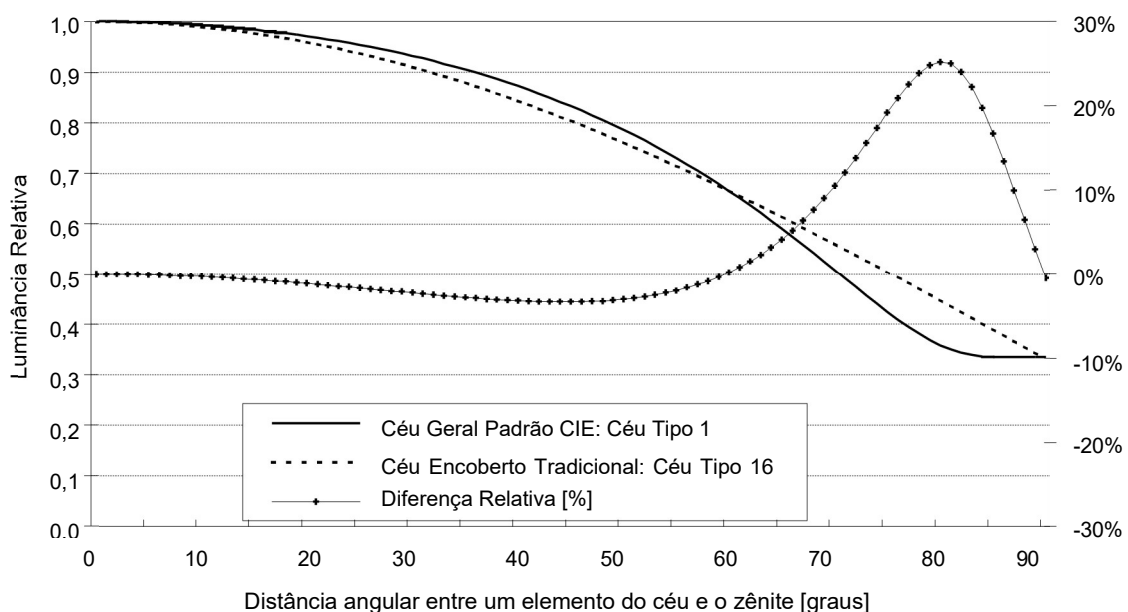


Figura 7 — Diferença entre os tipos de Céu 1 e 16

7.3.4 Derivação do céu padrão

O Céu Encoberto Padrão CIE e o Céu Claro Padrão CIE foram desenvolvidos em uma série de publicações entre 1955 e 1994 [CIE, 1955; CIE, 1973; CIE, 1994; CIE, 1996].

O Céu Geral Padrão CIE é uma generalização da equação do Céu Claro CIE [5]. Estes têm se mostrado um modelo adequado para céus com distribuições luminosas que variam suavemente, ocorrendo em várias condições climáticas. **Fórmulas** desse tipo também fornecem uma boa aproximação aos céus parcialmente encobertos em climas . Também foi demonstrado que aproximadamente quatro tipos do Céu Geral podem caracterizar as condições externas de iluminação natural, embora os tipos específicos de céus possam diferir entre os climas.

Os valores absolutos da luminância do céu variam com a elevação solar e, portanto, com a latitude. Equações empíricas para a luminância do zênite e iluminância horizontal foram publicadas para vários climas.

⁵Igual ao Céu Encoberto Padrão CIE da CIE S003/E.

7.4 Distribuição relativa de luminâncias de céu de acordo com o método de cálculo de Perez

O método de cálculo de luminâncias de céu de Perez é válido para oito tipos de céu, classificado com base nos valores de um índice de claridade ε . Este índice é variável do valor $\varepsilon = 1$ (céu totalmente nublado) até valores $\varepsilon > 6,2$ (céu totalmente claro), é calculado conforme a seguir:

$$\varepsilon = \frac{(G_{do} + (G_{bo} / \sin \alpha_s) / G_{do}) + 1.041 z_s^3}{1 + 1.041 z_s^3} \quad (35)$$

onde

G_{bo} e G_{do} são, respectivamente, a irradiância direta e difusa no plano horizontal, assim como α_s é a elevação do sol e z_s é o ângulo zenital do sol, expresso em radianos (rad).

A iluminância L_p de um ponto do céu é calculada pela Equação 36:

$$L_p = L_z l_r \quad (36)$$

onde

l_r é a luminância relativa, definida como a razão entre a luminância do ponto do céu e uma luminância de referência L_z , geralmente tomada no zênite, calculada conforme a Equação 37.

$$l_r = \frac{\phi(\alpha) f(\zeta)}{\phi(\pi/2) f(\pi/2 - \alpha_s)} \quad (37)$$

Na Equação (37), a função $\phi(\alpha)$ é a função de gradação, que considera a dependência da luminância na elevação do ponto α_s , enquanto a função $\phi(\zeta)$ é a função indicatrix, que considera a dependência da luminância na distância angular ζ entre o ponto e o sol, conforme a seguir

$$\phi(\alpha) = 1 + a \exp(b / \sin \alpha) \quad (38)$$

$$\zeta = \arcsin[\sin(\alpha_s) \sin(\alpha) + \cos(\alpha_s) \cos(\alpha) \cos|\varphi_s - \varphi|] \quad (39)$$

Na Equação (39), φ_s é o ângulo azimutal do sol e φ é o ângulo azimutal do ponto no céu.

$$f(\zeta) = 1 + c \exp(d\zeta) + e \cos^2(\zeta)$$

As quantidades a e e nas equações (38) e (40) são funções de três parâmetros: a elevação solar α_s , o brilho do céu Δ e o índice de claridade ε . Para os cálculos de a – e , um número total de 320 constantes deve ser considerado. A luminância do zênite L_z na Equação (36) é calculada por uma correlação de Perez, desenvolvida para as oito condições do céu:

$$L_z = G_{do} [a_i + c_i \sin(\alpha_s) + c'_i \exp(-3(\pi/2 - \alpha_s))] + d_i \Delta \quad (40)$$

$$\Delta = G_{do} \frac{m}{I_0} \quad (41)$$

As constantes a_i , c_i , c'_i , d_i variam com o índice de claridade de céu, com uma total de 24 constantes. Na Equação (41) I_0 é a irradiação normal extraterrestre, igual a 1367 W/m² e m é a massa relativa de ar, calculada pela seguinte equação:



$$m = \frac{1}{\text{sen } a_s + 015(a_s + 3885)^{-1253}}$$

Para a aplicação do modelo, ver a Tabela 6.

Tabela 6 — Coeficientes do modelo de Perez

Para claridades de céu variando									
De	Até	α_1	α_2	α_3	α_4	b_1	b_2	b_3	b_4
1,000	1,065	1,3525	-0,2576	-0,2690	-1,4366	-0,7670	0,0007	1,2734	-0,1233
1,065	1,230	-1,2219	-0,7730	1,4148	1,1016	-0,2054	0,0367	-3,9128	0,9156
1,230	1,500	-1,1000	-0,2515	0,8952	0,0156	0,2782	-0,1812	-4,5000	1,1766
1,500	1,950	-0,5484	-0,6654	-0,2672	0,7117	0,7234	-0,6219	-5,6812	2,6297
1,950	2,800	-0,6000	-0,3566	-2,5000	2,3250	0,2937	0,0496	-5,6812	1,8415
2,800	4,500	-1,0156	-0,3670	1,0078	1,4051	0,2875	-0,5328	-3,8500	3,3750
4,500	6,200	-1,0000	0,0211	0,5025	-0,5119	-0,3000	0,1922	0,7023	-1,6317
6,200	-	-1,0500	0,0289	0,4260	0,3590	-0,3250	0,1156	0,7781	0,0025
		c_1	c_2	c_3	c_4	d_1	d_2	d_3	d_4
1,000	1,065	2,8000	0,6004	1,2375	1,0000 ^t	1,8734	0,6297	0,9738	0,2809 ^t
1,065	1,230	6,9750	0,1774	6,4477	-0,1239	-1,5798	-0,5081	-1,7812	0,1080
1,230	1,500	24,7219	-13,0812	-37,7000	34,8468	-5,0000	1,5218	3,9229	-2,6204
1,500	1,950	33,3389	-18,3000	-62,2500	52,0781	-3,5000	0,0016	1,1477	0,1062
1,950	2,800	21,0000	-4,7656	-21,5906	7,2492	-3,5000	-0,1554	1,4062	0,3988
2,800	4,500	14,0000	-0,9999	-7,1406	7,5469	-3,4000	-0,1078	-1,0750	1,5702
4,500	6,200	19,0000	-5,0000	1,2438	-1,9094	-4,0000	0,0250	0,3844	0,2656
6,200	-	31,0625	-14,5000	-46,1148	55,3750	-7,2312	0,4050	13,3500	0,6234
		e_1	e_2	e_3	e_4				
1,000	1,065	0,0356	-0,1246	-0,5718	0,9938				
1,065	1,230	0,2624	0,0672	-0,2190	-0,4285				
1,230	1,500	-0,0156	0,1597	0,4199	-0,5562				
1,500	1,950	0,4659	-0,3296	-0,0876	-0,0329				
1,950	2,800	0,0032	0,0766	-0,0656	-0,1294				
2,800	4,500	-0,0672	0,4016	0,3017	-0,4844				
4,500	6,200	1,0468	-0,3788	-2,4517	1,4656				
6,200	-	1,5000	-0,6426	1,8564	0,5636				

Para $X = a, b, c, d, e$, calcular conforme as equações a seguir:

$$X = x_1 + x_2 Z + D[x_3 + x_4 Z] \quad \text{exceto para o primeiro grupo de claridade de céu, onde:}$$

$${}^t c = \exp[\Delta(c_1 + c_2 Z)^{e_3}] - 1$$

$${}^t d = -\exp[\Delta(d_1 + d_2 Z)] + d_3 + \Delta d_4$$



Bibliografia

- [1] ABNT NBR 5461, *Iluminação*
- [2] ABNT NBR 15215-1, *Iluminação natural - Parte 1: Conceitos básicos e definições*
- [3] ABNT NBR 15215-4, *Iluminação natural - Parte 4: Verificação experimental das condições de iluminação interna de edificações - Método de medição*
- [4] IES RP-21, *Calculation of Daylight Availability*
- [5] ISO 15469, *Spatial distribution of daylight — CIE standard general sky*
- [6] ISO 80000-7, *Quantities and units — Part 7: Light and radiation*
- [7] Barbaro, S., Cannata, G., Coppolino, S., Leone, C., & Sinagra, E. (1981). Correlation between relative sunshine and state of the sky. *Solar Energy*, 26(6), 537–550. doi:10.1016/0038-092x(81)90166-3
- [8] Compte Rendu CIE 13 Session 1955. Natural Daylight. Official Recommendation, 2, part3.2, II-IV & 35-37 (1955)
- [9] CIE 22-1973. *Standardization of luminance distribution on clear skies*
- [10] CIE 110 – 1994
- [11] CIE S 003.3/E – 1996. *Spatial Distribution of Daylight - CIE Standard Overcast Sky and Clear Sky*
- [12] DIN 5034-2 – 1985. *Daylight in Interiors: Principles*
- [13] IGAWA, N., NAKAMURA, H., MATSUZAWA, T., KOGA, Y., GOTO, K. and KOJO, S. Sky luminance distribution between two CIE Standard Skies (Part 2). Numerical equation for relative sky luminance distributions. *Proc. Lux Pacifica '97*, Nagoya, Japan, E.13 – E.18 (1997)
- [14] IGAWA, N., NAKAMURA, H. and MATSUURA, K. Sky luminance distribution model for simulation of daylight environment. *Proc. Building Simulation '99*, Kyoto, 969-975 (1999)
- [15] KITTLER, R. – 1981. A Universal Calculation Method for Simple Predetermination of Natural Radiation on Building Surfaces and Solar Collectors – *Building & Environment*, Vol. 16, Nº 3, pp. 177-182, UK
- [16] KITTLER, R., PEREZ, R. and DARULA S. A new generation of sky standards. *Proc. Lux Europa Conf.* 359-373 (1997)
- [17] KITTLER, R. and DARULA, S. Parametrization problems of the very bright cloudy sky conditions. *Solar Energy*, 62 (2), 93-100 (1998)
- [18] KITTLER, R., PEREZ, R. and DARULA, S. *A set of standard skies characterizing daylight conditions for computer and energy conscious design*. Final Report of the U.S.-Slovak Grant Project US-SK 92

052. Without appendices published by Polygrafia, Bratislava. (1998)

- [19] KITTLER, R., PEREZ, R. and DARULA, S. Universal models of reference daylight conditions based on new sky standards. In *Proc. 24th Session of the CIE*. CIE 133 - 1999, Vol.1 Part 1, 243-247
- [20] KROCHMANN, J. – 1974. Quantitative data on daylight for illuminating engineering – CIBSE Lighting, Research & Technology, Vol. 6, Nº 3, pp. 165-171
- [21] MATSUZAWA, T., NAKAMURA, H., IGAWA, N. KOGA, Y, GOTO, K. and KOJO, S. Sky luminance distribution between two CIE Standard Skies (Part 1), Arrangement of the sky luminance distribution data measured. *Proc. Lux Pacifica '97*, Nagoya, Japan, E.7 – E.12 (1997)
- [22] MOORE, F. – 1985. Concepts and Practice of Architectural Daylighting – New York, USA: Van Nostrand Reinhold
- [23] PEREZ, R., INEICHEN, P., SEALS, R., MICHALSKY, J., Stewart, R., 1990. Modelling daylight availability and irradiance components from DIRECT and global irradiance. *Solar Energy* 44,271–289
- [24] PEREZ, R., SEALS, R., and MICHALSKY, J. All-Weather Model for Sky Luminance Distribution - Preliminary Configuration and Validation. *Solar Energy*, **50** (3), 235-245 (1993)
- [25] PEREZ, R., SEALS, R., MICHALSKY, J., 1993b. ERRATUM to all-weather model for sky luminance distribution -preliminary configuration and validation. *Solar Energy* 51,423
- [26] TREGENZA, P. R. Standard skies for maritime climates. *Lighting Research & Technology* **31** (3),97-106 (1999)