

EDITORA



UnB

Simulação, Ambiente e Energia no Espaço Construído

**Caio Frederico e Silva, Gustavo de Luna Sales,
Joára Cronemberger e Vanda Alice Garcia Zanoni
(Organizadores)**



Pesquisa,
Inovação
& Ousadia



Universidade de Brasília

Reitora
Vice-Reitor

Márcia Abrahão Moura
Enrique Huelva

EDITORA



UnB

Diretora

Germana Henriques Pereira

Conselho editorial

Germana Henriques Pereira (Presidente)
Fernando César Lima Leite
Beatriz Vargas Ramos Gonçalves de Rezende
Carlos José Souza de Alvarenga
Estevão Chaves de Rezende Martins
Flávia Millena Biroli Tokarski
Jorge Madeira Nogueira
Maria Lidia Bueno Fernandes
Rafael Sanzio Araújo dos Anjos
Sely Maria de Souza Costa
Verônica Moreira Amado

EDITORA



UnB

Simulação, Ambiente e Energia no Espaço Construído

Caio Frederico e Silva, Gustavo de Luna Sales,
Joára Cronemberger e Vanda Alice Garcia Zanoni
(Organizadores)



Pesquisa,
Inovação
& Ousadia

Coordenadora de produção editorial
Preparação e revisão

Equipe editorial

Luciana Lins Camello Galvão
Alexandre Vasconcellos de Melo

© 2018 Editora Universidade de Brasília

Direitos exclusivos para esta edição:
Editora Universidade de Brasília
SCS, quadra 2, bloco C, nº 78, edifício OK,
2º andar, CEP 70302-907, Brasília, DF
Telefone: (61) 3035-4200
Site: www.editora.unb.br
E-mail: contatoeditora@unb.br

Todos os direitos reservados. Nenhuma parte desta publicação poderá ser armazenada ou reproduzida por qualquer meio sem a autorização por escrito da Editora.

Esta obra foi publicada com recursos provenientes do Edital DPI/DPG nº 2/2017.

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Central da Universidade de Brasília

S614 Simulação, ambiente e energia no espaço construído /
 organizadores, Caio Frederico e Silva ... [et al.]. – Brasília :
 Editora Universidade de Brasília, 2020.
 284 p. ; 23 cm. – (Pesquisa, inovação & ousadia).

ISBN 978-65-5846-043-5

1. Simulação computacional. 2. Desempenho energético. 3.
Sustentabilidade. I. Silva, Caio Frederico e (org.). II. Série.

CDU 72

Sumário

Prefácio	7
<i>Otto Ribas</i>	
Apresentação	9
Parte 1: Inputs – conforto, vento e luz	
Capítulo 1. Simulação do clima urbano do Distrito Federal: experimentando o ENVI-met	17
<i>Caio Frederico e Silva e Marta Adriana Bustos Romero</i>	
Capítulo 2. Caracterização de dados e arquivos climáticos de Brasília para simulação higrotérmica.....	55
<i>Vanda Alice Garcia Zanoni e José Manoel Morales Sánchez</i>	
Capítulo 3. Ferramentas para a simulação de ventilação natural na Arquitetura	99
<i>Gustavo de Luna Sales e Marta Adriana Bustos Romero</i>	
Capítulo 4. Qualidade da luz natural e ferramentas para o projeto arquitetônico	127
<i>Júlia Teixeira Fernandes e Cláudia Naves David Amorim</i>	

Parte 2: Outputs – ambiente construído e energia

Capítulo 5. Irradiação solar: ferramenta de análise para o uso de energia solar fotovoltaica em edifícios no Brasil 173

Joára Cronemberger e Estefanía Caamaño-Martín

Capítulo 6. Análise do balanço energético de casa pré-fabricada ZEB em Brasília 215

Larissa Sudbrack e Cláudia Naves David Amorim

Capítulo 7. Considerações sobre uma pauta para governança da eficiência energética 259

*Tássia Fonseca Latorraca, Raquel Naves Blumenschein e
Maria Vitória Duarte Ferrari*



Parte 1

Inputs – conforto, vento e luz



CAPÍTULO 2

Caracterização de dados e arquivos climáticos de Brasília para simulação higrotérmica

Vanda Alice Garcia Zanoni e José Manoel Morales Sánchez

1. Sobre dados e arquivos climáticos

As simulações computacionais aplicadas aos estudos da eficiência termoe-nergética, conforto térmico e desempenho higrotérmico das edificações utilizam as variáveis climáticas como dados de entrada, sendo o conjunto desses dados denominado *arquivo climático*.

Os estudos higrotérmicos referem-se ao campo conceitual da física das cons-truções, que estuda o transporte de calor, de umidade e de ar nos componentes e ambientes construídos (CIB W040, 2012; ASHRAE, 2017).

Em geral, os programas computacionais para simulação higrotérmica requerem um ano climático com 8.760 dados horários como arquivo climático representa-tivo do clima local. Por vezes, são requeridos somente alguns dados climáticos. Nesse caso, para alimentar os dados de entrada, costumam-se adotar como parâ-metros, por exemplo, dias típicos de verão e de inverno ou valores máximos e mínimos anuais.

A qualidade dos resultados obtidos nas simulações computacionais é fortemente dependente da qualidade dos dados de entrada. Para tanto, é necessário que o utilizador tenha controle sobre a seleção do arquivo climático, baseado no conhecimento das características e comportamento das variáveis climáticas.

Visando estabelecer uma base referencial para a seleção de arquivos climáticos representativos do clima local e análise de sensibilidade,¹ neste capítulo são apresentados os estudos realizados para a caracterização das variáveis climáticas da cidade de Brasília, com base nos valores médios, mínimos, máximos e nas frequências de ocorrência, em seu comportamento cíclico e sazonal ao longo do ano.

Para os estudos de caracterização das variáveis climáticas, foram utilizados dados horários medidos por 13 anos, no período de 2001 a 2013, pela estação meteorológica automática de superfície A001-Brasília, do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET).

Nesse contexto, para melhor fundamentar a seleção de um ano climático para os estudos higrotérmicos por meio de simulação computacional, são apresentados os tipos de arquivos climáticos disponíveis para Brasília, assim como os principais aspectos que influenciam a representatividade desses arquivos.

A Irradiância Global Horizontal (GHI: *Global Horizontal Irradiance*) é uma das principais variáveis climáticas que afetam o comportamento higrotérmico das edificações. Segundo o INMET (1999), a radiação solar é uma das variáveis mais difíceis de se obter, com confiabilidade e precisão, por meios automáticos. Por essas razões e com base nessa variável, foi elaborado um estudo comparativo entre os arquivos de ano climático disponíveis para Brasília e a série 2001-2013/INMET de dados climáticos horários usados na caracterização.

¹ *Análise de sensibilidade* é um termo definido pela ISO 15686-5 – *Buildings and constructed assets – Service-life planning. Parte 5 – Life-cycle costing* (BS, 2008) e refere-se aos testes de resultado de uma análise, alterando um ou mais parâmetros do valor inicial [test of the outcome of an analysis by altering one or more parameters from initial value].

A Tabela 1 mostra as variáveis climáticas utilizadas nos estudos de caracterização, assim como as quantidades de horas registradas e os respectivos percentuais de dados nulos obtidos do arquivo climático da série 2001-2013/INMET para Brasília.

Tabela 1: Quantificação dos dados horários das variáveis climáticas da série 2001-2013/INMET – Estação meteorológica automática em Brasília A001 – Código 86715

Variáveis climáticas	Série 2001-2013	Horas com dados nulos (h)	% de dados nulos
Temperatura do ar (°C)	113.880	4.221	3,71
Umidade relativa do ar (%)	113.880	4.226	3,71
Temperatura máxima (°C)	113.880	4.465	3,92
Temperatura mínima (°C)	113.880	4.466	3,92
Vento-velocidade (m/s)	113.880	4.869	4,28
Vento-direção (graus)	113.880	4.873	4,28
Radiação global horizontal (Wh/m ²)	113.880	12.125	10,65
Precipitação (mm)	113.880	4.343	3,81
Nebulosidade (variando de 1 a 10)	14.231**	-	-

** Diariamente, a variável nebulosidade é obtida visualmente por um observador, nos três horários sinóticos.

Fonte: Elaboração dos autores (2015).

Para os estudos de caracterização, considerando-se o tamanho da amostra (13 anos de dados horários) e o percentual de dados nulos (10% ou menos), foi tomada a decisão de não preencher os dados nulos da série 2001-2013, mantendo-se, assim, somente os arquivos com os dados medidos válidos, de forma a não incorrer no risco de se alterar o comportamento dos dados reais (ZAHUMENSKÝ, 2004; ZANONI *et al.*, 2015).

2. Caracterização das variáveis climáticas de Brasília

Quanto aos aspectos gerais do clima, a cidade de Brasília-DF está localizada na latitude 15,78° Sul, longitude 47,92° Oeste e altitude média de 1.160 m. De acordo com a classificação de Köppen-Geiger, o clima de Brasília caracteriza-se como Clima Tropical (A) com inverno seco (W). A cidade possui forte sazonalidade das chuvas, com duas estações bem distintas (ALVARES *et al.*, 2013). Situada no Planalto Central do Brasil, Brasília está localizada em um sítio convexo, aberto a todas as influências dos ventos predominantes (ROMERO, 2000).

O período chuvoso, sob a influência da Massa Equatorial Continental, compreende a primavera e o verão. Em relação à condição de tempo, nessa época, em geral, a cidade apresenta-se com céu nublado, evoluindo à tarde para encoberto com pancadas de chuvas e trovoadas, e ventos de rajadas moderadas a fortes. O período seco, que se estende pelo outono e inverno, com predomínio da Massa Equatorial Atlântica, apresenta boas condições de tempo em todo o Planalto Central, com sucessivos dias de céu claro pela manhã e à noite, nublado à tarde, com forte incidência de névoa seca, especialmente ao final do inverno (SALES; REBELLO; SILVA, 2010).

2.2 Precipitação

A precipitação é um conjunto de partículas líquidas ou sólidas que caem das nuvens em forma de chuva, chuveiro, neve, granizo, nevoeiro, bruma, geada ou orvalho. É medida em milímetros (mm), por meio de pluviômetro: uma lâmina de 1 mm de espessura corresponde a 1 litro de água em uma superfície plana horizontal de um metro quadrado. A intensidade da precipitação é o volume de água que cai na unidade de tempo. As medições podem ser registradas em milímetros por hora (INMET, 1999). O Quadro 1 apresenta uma classificação dos tipos de precipitação e suas características.

Quadro 1: Classificação do grau de intensidade da precipitação e suas características

Classificação	Intensidade e características	
Chuva ou chuvisco inapreciável (INAP)	Precipitação cuja quantidade não consegue ser acumulada.	
Chuvisco	Precipitação até 1,0 mm por hora	
Chuva fraca	Precipitação de 1,1 mm por hora até 5,0 mm por hora ou, no máximo, 0,8 mm em 10 minutos.	As gotas de chuva são bem destacadas; os pingos nos telhados são fracos; as poças de água formam-se lentamente; as superfícies secas levam cerca de dois minutos para se umedecerem; fios de água correm nas sarjetas das ruas.
Chuva moderada	Precipitação de 5,1 mm por hora até 60,0 mm por hora ou, no máximo, 6,0 mm em 10 minutos.	As gotas de chuva são bem identificadas, e ao encontrarem superfícies duras provocam borrifos; o escoamento das águas nas calhas dos telhados vai de um terço a mais da metade da sua capacidade; a queda das chuvas nos telhados provoca ruídos assemelhados a desde um simples chiado até o bater de tambores.
Chuva forte	Precipitação acima de 60,0 mm por hora ou de 10,0 mm em 10 minutos.	A chuva cai torrencialmente, e todas as demais características são mais acentuadas que as indicadas para chuva moderada.

Fonte: INMET (1999, p. 18).

As chuvas em Brasília ocorrem, principalmente, de setembro a abril. A Tabela 2 e a Figura 1 apresentam as médias mensais de precipitação em cada mês do ano, com base na série 2001-2013/INMET.

Tabela 2: Intensidade da precipitação mensal e anual (mm) da série 2001-2013/INMET para Brasília

Jan.	Fev.	Mar.	Abr.	Maió	Jun.	Jul.	Ago.	Set.	Out.	Nov.	Dez.	Total anual
216,0	164,2	187,9	132,0	18,5	2,1	2,4	15,2	33,8	138,7	220,8	242,2	1373,8

Fonte: Elaboração dos autores (2015).

Figura 1: Comportamento da precipitação ao longo do ano (mm) da série 2001-2013/INMET para Brasília



Fonte: Elaboração dos autores (2015).

Na série 2001-2013/INMET, em 13 anos de dados horários analisados, foi identificado que os seis meses mais chuvosos do ano (outubro, novembro, dezembro, janeiro, fevereiro e março) correspondem a 85,15% do total de precipitação. Consequentemente, 14,85% do total da precipitação anual correspondem aos seis meses menos chuvosos do ano (abril, maio, junho, julho, agosto e setembro).

2.3 Umidade relativa do ar

O elemento água existe na atmosfera sob três estados: sólido, líquido e gasoso. A umidade ou o vapor de água presente na atmosfera é o estado gasoso do elemento água e apresenta-se misturado com o ar seco. A umidade relativa do ar (UR) é uma variável climática que exprime a quantidade de vapor contida no ar, expressa pela razão entre a quantidade real de vapor existente no ar (umidade absoluta) e a quantidade máxima de vapor que o ar pode armazenar quando está saturado, nas mesmas condições de temperatura e pressão. A proporção de umidade da atmosfera, expressa em porcentagem (%), pode aumentar, devido à evaporação, ou pode

diminuir, devido à condensação (mudanças de estado). O ar com temperatura mais elevada contém maior quantidade de vapor, ou seja, quando a temperatura do ar aumenta, a umidade relativa do ar diminui.

As medições de umidade relativa envolvem equipamentos que associam as leituras das temperaturas de bulbo seco (temperatura do ar) com as temperaturas de bulbo úmido. A temperatura do ponto de orvalho é outra variável climática associada à umidade relativa (INMET, 1999).

Os processos evaporativos e de evapotranspiração que regulam a umidade relativa do ar são influenciados pelos regimes de vento, ciclo hidrológico, topografia, ocupação urbana, presença de vegetação, lagos, rios, mares, entre outros. Ao longo do dia, quando a temperatura do ar se eleva, a umidade relativa do ar fica mais baixa.

Como Brasília está localizada no Planalto Central, em uma região de Cerrado e longe das grandes massas de água, a umidade relativa do ar está fortemente ligada à sazonalidade da precipitação e aos ciclos diários de temperatura, além do armazenamento e transporte de vapor de água nas camadas superiores da atmosfera.

Segundo Cavalcante, Gomes Filho e Bezerra (2008), desde o final da década de 1930 já se sabe que a precipitação não depende simplesmente da evaporação e evapotranspiração local; depende também do armazenamento de vapor de água na atmosfera e seu transporte pela circulação geral.

Para melhor caracterizar a umidade relativa do ar, foram calculadas as médias mensais com base na série 2001-2013/INMET, conforme apresentado na Tabela 3. A média anual da umidade relativa do ar é de 67%.

Tabela 3: Médias mensais e anual da umidade relativa do ar (%) da série 2001-2013/INMET para Brasília

Jan.	Fev.	Mar.	Abr.	Maió	Jun.	Jul.	Ago.	Set.	Out.	Nov.	Dez.	Média anual
78%	75%	77%	73%	67%	63%	55%	47%	48%	63%	76%	77%	67 %

Fonte: Elaboração dos autores (2015).

Os dados de umidade relativa em estudo referem-se aos valores horários da umidade relativa do ar, não estando incluídas as variáveis climáticas URmáxima e URmínima, que também são medidas pelo INMET.

Figura 2: Umidade relativa do ar (%): frequência de ocorrência da série 2001-2013/INMET para Brasília



Fonte: Elaboração dos autores (2015).

A Figura 2 mostra a frequência de ocorrência da umidade relativa do ar da série 2001-2013, baseada em um total de 109.654 horas analisadas, com intervalo de classe variando em 5% UR. A frequência no intervalo de classe 95% UR é a mais alta da série, correspondendo a cerca de 12% da amostra.

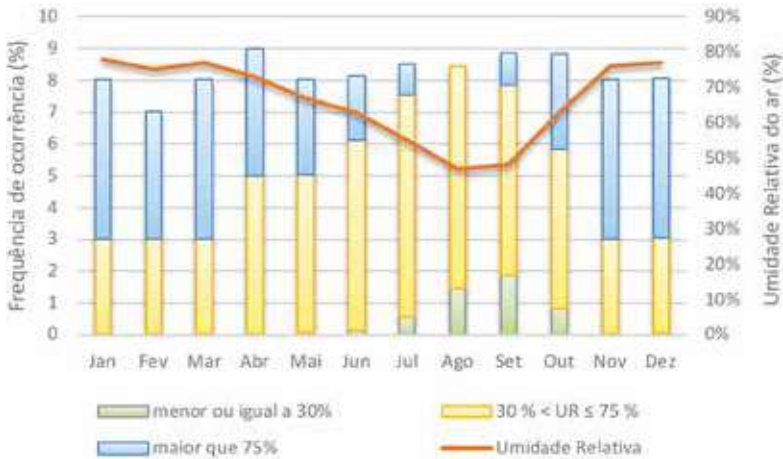
A Tabela 4 e a Figura 3 apresentam as frequências da umidade relativa do ar na série 2001-2013, em três faixas de ocorrência.

Tabela 4: Frequência de ocorrência por faixa de umidade relativa do ar (%) da série 2001-2013/INMET para Brasília

	Jan.	Fev.	Mar.	Abr.	Mai	Jun.	Jul.	Ago.	Set.	Out.	Nov.	Dez.	Média anual
UR<30%	0,02	0,02	0,02	0,01	0,04	0,13	0,53	1,46	1,87	0,83	0,02	0,05	5%
30%≤UR<75%	3	3	3	5	5	6	7	7	6	5	3	3	56%
UR>75%	5,5	4	5	4	3	2	1	0	1	3	5	5,5	39%

Fonte: Elaboração dos autores (2015).

Figura 3: Umidade relativa do ar (%) da série 2001-2013/INMET para Brasília: média mensal e por faixa de frequência de ocorrência



Fonte: Elaboração dos autores (2015).

Para a cidade de Brasília, conhecida pelas baixas taxas de umidade relativa do ar, a série 2001-2013 apresenta uma média anual de 67%UR, com cerca de 39% das horas com umidade relativa acima de 75%; 56% das horas com umidade relativa entre 30% e 75%; e 5% das horas com umidade relativa abaixo ou igual a 30%.

2.4 Nebulosidade

A nebulosidade é uma variável climática que indica a fração de céu coberto pelas nuvens, correspondente à porção de céu encoberto que varia de 1/8 a 8/8. Para a representação dos dados climatológicos, adota-se a nebulosidade em décimos (variando de 0 a 10 décimos), proporcionalmente aos octais observados. Para a condição de céu claro, sem nuvens, a situação é zero. A obtenção da nebulosidade é feita por meio da observação visual, mesmo quando a estação é automática. Por isso, a estação automática A001 de Brasília não mede essa variável. Para registrar a nebulosidade, o INMET faz três observações visuais diárias, nos horários sinóticos 12 UTC, 18 UTC e 24 UTC (INMET, 2009).

A sigla UTC significa Tempo Universal Coordenado (*Universal Time Coordinated*) e corresponde à hora de referência do Meridiano de Greenwich, a partir da qual se calculam todas as outras zonas horárias. Para Brasília, na transformação de UTC para hora local, basta subtrair 3 horas.

A nebulosidade pode ser classificada de acordo com a condição de céu (Quadro 2). A Tabela 5 mostra as médias mensais da nebulosidade, com base no arquivo climático da série 2001-2013.

Quadro 2: Classificação da nebulosidade

Condição de céu	Classificação
0 a 3,9	Céu claro (baixa nebulosidade)
4,0 a 6,9	Céu parcialmente nublado (média nebulosidade)
7,0 a 10,0	Céu encoberto (alta nebulosidade)

Fonte: Adaptado de Wollmann e Sartori (2010, p. 4).

Tabela 5: Média mensal da nebulosidade da série 2001-2013/INMET para Brasília

Jan.	Fev.	Mar.	Abr.	Mai.	Jun.	Jul.	Ago.	Set.	Out.	Nov.	Dez.	Média anual
8,1	7,5	7,3	6,0	4,8	3,5	3,0	2,8	4,4	6,6	8,0	8,0	5,8

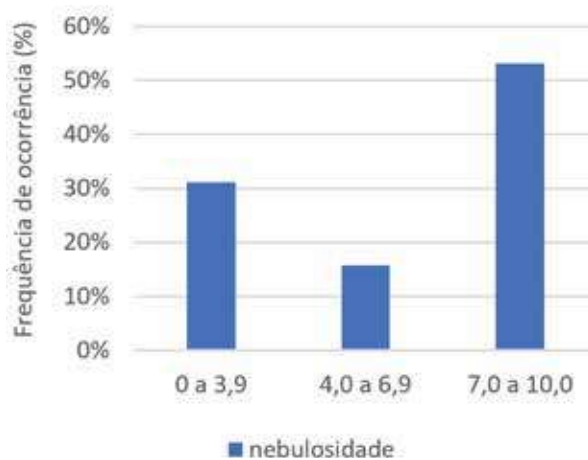
Fonte: Elaboração dos autores (2015).

A Figura 4 mostra a frequência de ocorrência da nebulosidade, de acordo com as faixas de classificação dadas para a condição de céu, apresentadas na Tabela 6.

A série 2001-2013 apresenta cerca de 53% de registros de nebulosidade para a condição de céu encoberto, típico do período chuvoso, quando as médias mensais da nebulosidade apresentam valores de 7 ou mais décimos. Cerca de 31% dos registros

de nebulosidade da série 2001-2013 correspondem à condição de céu claro, em que os valores de nebulosidade são da ordem de 0 a 3,9 décimos. No período seco, as médias mensais da nebulosidade dos meses junho, julho e agosto apresentam essa característica. Em média, o período da tarde registra maior índice de nebulosidade que o período da manhã ou o da noite.

Figura 4: Frequência de ocorrência (%) da nebulosidade por faixa de classificação da condição de céu da série 2001-2013/INMET para Brasília



Fonte: Elaboração dos autores (2015).

Tabela 6: Condição de céu e frequência de ocorrência de nebulosidade da série 2001-2013/INMET para Brasília

Condição de céu	Frequência
Céu claro – 0 a 3,9	31,1%
Céu parcialmente nublado – 4,0 a 6,9	15,7%
Céu encoberto – 7,0 a 10,0	53,2%

Fonte: Elaboração dos autores (2015).

2.5 Vento

Os ventos (movimento do ar) são originados pelo aquecimento diferenciado da atmosfera, que causa diferenças de pressão, e influenciados pelo movimento de rotação da Terra. As forças que atuam no movimento do ar são: forças dos gradientes de pressão, força de Coríolis, força centrífuga, forças de atrito e força da gravidade. Como resultado desses fenômenos, o vento sofre variação espaçotemporal, tanto em velocidade (intensidade) quanto em direção (INMET, 1999).

O regime de ventos, isto é, o comportamento estatístico dos ventos ao longo do dia, pode ser estudado em várias escalas: escala planetária, escala local e escala do edifício. O conhecimento do regime de ventos na escala local pode ser obtido pelo seu comportamento cíclico (periodicidade do movimento da série ao longo dos anos) e pela sua sazonalidade (picos repetitivos em intervalos iguais de tempo dentro da série, geralmente inferior a um ano) (SILVA, 1999; PEREIRA; PAIS; SALES, 1986).

O comportamento livre dos ventos corresponderia ao regime local dos ventos se o terreno fosse perfeitamente liso (sem rugosidade), plano e livre de obstáculos (MORETTIN; TOLOI, 2006). O Quadro 3 apresenta a Escala Anemométrica Internacional de Beaufort, que relaciona a velocidade dos ventos e as manifestações ou danos provocados na ambiência observada.

Para fins de comparação entre as estações meteorológicas, a Organização Meteorológica Mundial (OMM) recomenda procedimentos padronizados para os registros do vento como uma variável meteorológica: velocidade em m/s; direção (em graus ou azimute); média horária em 24 leituras diárias; período de integração da média horária – 10 minutos; altura para instalação dos sensores – 10 metros; rugosidade do terreno onde são instalados os sensores – plano e sem obstáculos; rajada – vento máximo registrado no período de uma hora, caracterizado por aumento brusco de curta duração da velocidade do vento, geralmente acompanhado por mudanças de direção (WMO, 2008).

Quadro 3: Escala Anemométrica Internacional de Beaufort – velocidade equivalente na altura padrão de 10 metros acima de um terreno plano e descoberto

(continua)

Escala Beaufort	Categoria	Velocidade do vento		Indicações visuais na superfície terrestre
		m/s	km/h	
00	Calma	0,0 – 0,2	< 1	Não se nota o menor deslocamento nos mais leves objetos. Folhas de árvores sem movimento. A fumaça sobe verticalmente.
01	Aragem	0,3 – 1,5	1 - 5	A direção do vento é indicada pelo desvio da fumaça, mas não pelos cata-ventos.
02	Brisa leve	1,6 – 3,3	6 – 11	Sente-se o vento no rosto. Folhas das árvores são levemente agitadas. Cata-ventos comuns são agitados.
03	Brisa fraca	3,4 – 5,4	12 – 19	Bandeiras leves começam a se estender. As folhas das árvores e os pequenos arbustos ficam em movimento.
04	Brisa moderada	5,5 – 7,9	20 – 28	Movem-se os pequenos galhos das árvores, poeira e pedaços de papéis.
05	Brisa forte	8,0 - 10,7	29 – 38	Árvores pequenas e folhagem oscilam. Surgem ondas com cristas nas superfícies dos lagos.
06	Vento fresco	10,8 – 13,8	39 – 49	Galhos grandes das árvores são agitados. Ouve-se o assvio produzido pelo vento ao passar pelos fios telegráficos. Torna-se difícil usar o guarda-chuva.
07	Vento forte	13,9 – 17,1	50 – 61	Árvores inteiras oscilam. Torna-se difícil caminhar contra o vento.
08	Ventania	17,2 – 20,7	62 – 74	Galhos de árvores são quebrados. Impossível andar contra o vento.
09	Ventania forte	20,8 – 24,4	75 – 88	Ocorrem pequenos danos em edificações (chaminés e telhas são arrancadas).

Quadro 3: Escala Anemométrica Internacional de Beaufort – velocidade equivalente na altura padrão de 10 metros acima de um terreno plano e descoberto

(conclusão)

Escala Beaufort	Categoria	Velocidade do vento		Indicações visuais na superfície terrestre
		m/s	km/h	
10	Tempestade	24,5 – 28,4	89 – 102	Árvores são derrubadas. Danos consideráveis nas edificações.
11	Tempestade violenta	28,5 – 32,6	103 – 117	Ocorrem grandes destruições.
12-17	Furacão/ Tornado	> 32,7	> 118	Fenômenos extremos.

Fonte: Adaptado de INMET (1999, p. 25) e WMO (2008, p. 1-3).

A fim de caracterizar o regime de ventos de Brasília, na escala local, com base no arquivo climático da série 2001-2013, com 13 anos de dados medidos pelo INMET na estação automática de superfície A001-Brasília, buscou-se determinar as médias das velocidades e quantificar a frequência de ocorrência para cada direção dos ventos em cada mês do ano.

Na série 2001-2013, foram consideradas válidas 109.000 horas de dados de direção e velocidade dos ventos, o que corresponde a cerca de 96% dos dados registrados pela estação A001 de Brasília, ou seja, foram descartados cerca de 4% correspondentes aos dados nulos do arquivo climático.

A direção do vento da série 2001-2013 é dada em graus e varia de 1 a 360. O valor máximo encontrado para a velocidade do vento foi de 10,40 m/s, estando compatível com o range previsto para esta variável climática para a cidade de Brasília. A média anual encontrada foi de 2,45m/s, semelhante à mediana da amostra.

As horas com velocidade de vento igual a 0,00 foram consideradas horas com ventos ausentes, tendo sido considerado período de calmaria aquele que compreende essas horas com ventos ausentes e as horas com ventos classificados como calmos, com velocidade de 0 a 0,2 m/s, conforme Escala Anemométrica Internacional de Beaufort (Quadro 3).

As horas de calma concentram-se durante a noite, aumentando pela madrugada até o amanhecer. Ao longo do dia, o aquecimento do solo aquece o ar que se desloca ascendentemente, originando gradientes de temperatura e pressão que aumentam a velocidade dos ventos diurnos, nas horas mais quentes do dia. À noite, como esse gradiente térmico é menor, a velocidade do vento também é menor (MUNHOZ; GARCIA, 2008; BITTENCOURT; CANDIDO, 2010).

A análise da série 2001-2013/INMET permitiu identificar que 1,9% da amostra equivale a ventos ausentes (velocidade igual a 0,00). Ao longo do ano, quando consideradas todas as horas do período de calma (para ventos de 0-0,2), o percentual foi de 3%. O mês de agosto e o mês de abril apresentaram, respectivamente, 0,10% e 0,37% das horas de calma do ano.

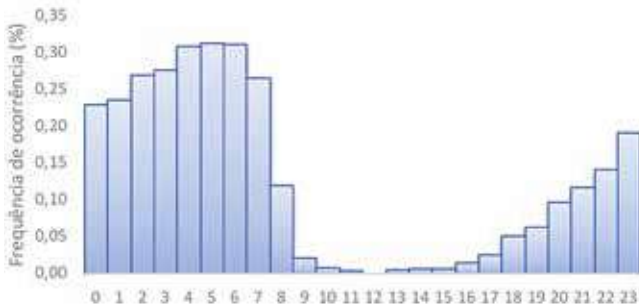
A Figura 5 mostra a distribuição das horas de calma (para ventos ausentes e na faixa de 0-0,2 m/s) ao longo das 24 horas do dia, cuja frequência foi tomada da série 2001-2013/INMET. O período do dia com menos horas de calma está entre 10h e 18h. A Figura 6 mostra a distribuição das horas de calma ao longo dos meses do ano. O mês de agosto é o mês com menos horas de calma. Os meses do período chuvoso possuem mais horas de calma que os meses mais secos, principalmente os meses da estação de inverno.

Figura 5: Comportamento dos ventos ausentes e calmos ao longo dos meses do ano para a série 2001-2013/INMET para Brasília



Fonte: Elaboração dos autores (2015).

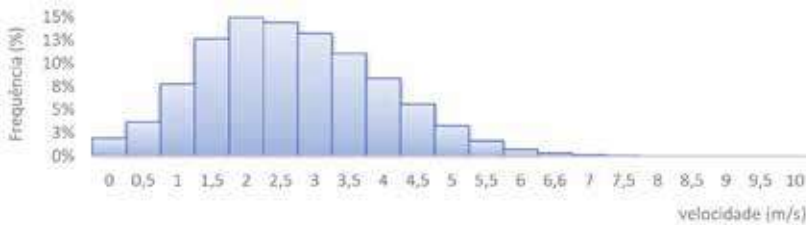
Figura 6: Comportamento dos ventos ausentes e calmos ao longo das horas do dia para a série 2001-2013/INMET para Brasília



Fonte: Elaboração dos autores (2015).

A figuras 7 e 8 apresentam, respectivamente, as frequências de ocorrência para a velocidade e para a direção dos ventos horários, incluindo-se as horas de calmaria.

Figura 7: Frequência de ocorrência da velocidade dos ventos da série 2001-2013/INMET para Brasília



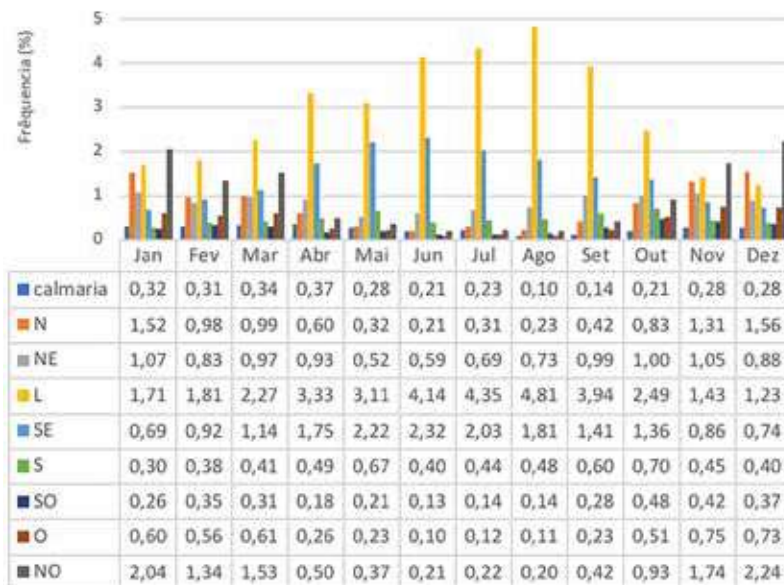
Fonte: Elaboração dos autores (2015).

Figura 8: Frequência de ocorrência da direção dos ventos da série 2001-2013/INMET para Brasília



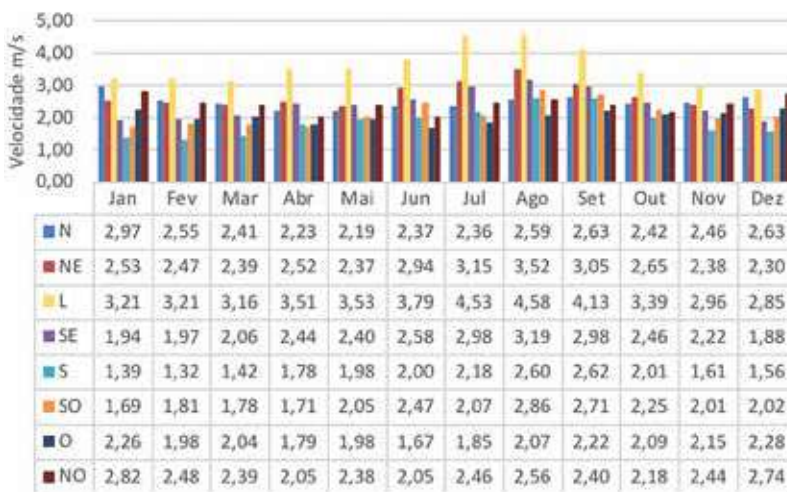
Fonte: Elaboração dos autores (2015).

Figura 9: Frequência de ocorrência da direção dos ventos da série 2001-2013/INMET para Brasília



Fonte: Elaboração dos autores (2015).

Figura 10: Velocidade média mensal dos ventos (m/s) da série 2001-2013/INMET para Brasília, para cada direção e mês do ano



Fonte: Elaboração dos autores (2015).

A Figura 9 mostra a frequência de ocorrência dos ventos (em %) para cada mês do ano e para cada direção do vento. A Figura 10 mostra a média mensal da velocidade do vento para cada direção, em cada mês do ano. Assim, associando-se as Figuras 9 e 10, é possível relacionar a velocidade média dos ventos para cada mês do ano e direção do vento, e com que frequência ela ocorre.

A Tabela 6 apresenta a frequência de ocorrência dos ventos da série 2001-2013 para cada direção. A média anual da velocidade do vento para cada direção é apresentada na Tabela 7. Na série 2001-2013, os ventos predominantes atuam na direção Leste (34,62%), que apresenta a maior média anual de velocidade de vento (3,57 m/s).

Tabela 6: Frequência de ocorrência de cada direção dos ventos da série 2001-2013/INMET para Brasília

Direção	Frequência (%)
Calmaria	3,08%
N	9,28%
NE	10,24%
L	34,62%
SE	17,26%
S	5,72%
SO	3,27%
O	4,81%
NO	11,73%
Total	100%

Fonte: Elaboração dos autores (2015).

Tabela 7: Velocidade dos ventos: média anual em cada direção da série 2001-2013/INMET para Brasília

Direção	Velocidade (m/s)
N	2,48
NE	2,69
L	3,57
SE	2,43
S	1,87
SO	2,12
O	2,03
NO	2,41
Média Anual	2,45

Fonte: Elaboração dos autores (2015).

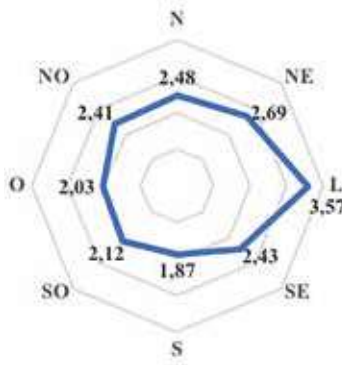
As médias mensais da velocidade do vento são apresentadas no gráfico da Figura 11, mostrando que, nos meses mais secos, a velocidade é maior. A Figura 12 apresenta as médias anuais da velocidade do vento para cada direção (já mostradas na Tabela 7).

Figura 11: Média mensal da velocidade do vento (m/s) da série 2001-2013/INMET para Brasília



Fonte: Elaboração dos autores (2015).

Figura 12: Média anual da velocidade do vento (m/s) da série 2001-2013/INMET para Brasília, em cada direção



Fonte: Elaboração dos autores (2015).

Para calcular as médias mensais da velocidade do vento, foram analisadas duas situações: a) média simples sem os valores 0,00; 0,10; 0,20, correspondentes ao período de calmaria; b) média simples com todos os dados da amostra. A Tabela 8 mostra os resultados e o percentual correspondente à diferença entre as médias.

Tabela 8: Média mensal da velocidade do vento (m/s) da série 2001-2013/INMET para Brasília

	Jan.	Fev.	Mar.	Abr.	Maió	Jun.	Jul.	Ago.	Set.	Out.	Nov.	Dez.	Média anual
Velocidades de 0,3-10,4 (sem dados horários de calmaria)	2,51	2,35	2,32	2,35	2,43	2,53	2,73	2,99	2,87	2,49	2,38	2,4	2,53
Velocidades de 0-10,4 m/s (com todos os dados horários)	2,42	2,26	2,23	2,25	2,34	2,47	2,66	2,95	2,82	2,43	2,3	2,32	2,45
Diferença entre as médias	3,5%	3,8%	3,8%	4,2%	3,7%	2,3%	2,5%	1,3%	1,7%	2,4%	3,3%	3,3%	3%

Fonte: Elaboração dos autores (2015).

Na metodologia do INMET para o cálculo das Normais Climatológicas 1961-1990, a composição da média mensal da velocidade dos ventos considerou todos os valores da amostra (INMET, 2009).

Para Bittencourt e Candido (2010), em seus estudos de conforto ambiental, os ventos de calmaria não devem entrar na composição das médias, pois mascaram a velocidade média. Os autores justificam que, por meio da análise do potencial do vento ao longo do dia e do ano, é possível identificar a disponibilidade e a velocidade real dos ventos, nos períodos de interesse, com vistas a adotar a ventilação natural como estratégia de resfriamento. Uma alta velocidade do vento no período de inverno pode causar desconforto, assim como uma baixa velocidade do vento no verão pode inviabilizar o uso da ventilação natural como estratégia de resfriamento dos espaços arquitetônicos.

A classe de velocidade de 1,6-3,3, na qual ocorrem cerca de 50% dos ventos, apresenta a maior predominância para os períodos noturno e diurno, tanto nos meses mais secos como nos chuvosos.

A segunda classe de velocidade predominante é a de 3,4-5,4 para os ventos diurnos, tanto nos meses mais secos como nos chuvosos; nessa classe, ocorrem cerca de 23% dos ventos.

Na classe de 0,3-1,5 ocorrem cerca de 23% dos ventos, principalmente os ventos noturnos. Para a velocidade de vento de 5,5 m/s ou mais, a frequência é menor que 2%. Os ventos de calmaria correspondem a 3% da amostra.

2.6 Radiação Solar Global Horizontal

A radiação solar atinge o globo terrestre na forma de ondas eletromagnéticas curtas, concentradas na região do espectro eletromagnético compreendido entre comprimentos de ondas de 0,2 μm e 0,3 μm . Varia continuamente ao longo do ano devido à distância Terra-Sol e de acordo com o ângulo zenital, que é o ângulo de incidência dos raios solares (BERGMAN *et al.*, 2011).

Os comprimentos de onda emitidos pelas componentes da radiação oriunda do Sol são considerados ondas curtas, e os comprimentos de onda emitidos pela Terra são considerados ondas longas. As fontes de baixa temperatura (por exemplo, o edifício) emitem radiação térmica de onda longa com comprimento de onda compreendido entre 3,0 μm e 100,0 μm . Quanto maior a temperatura da fonte, menor o comprimento de onda (DUFFIE; BECKMAN, 1980).

Seguindo a lei do inverso do quadrado da distância, à medida que a Terra se afasta do Sol, a irradiância solar extraterrestre é reduzida. As distâncias máximas e mínimas na trajetória solar correspondem, respectivamente, aos solstícios de inverno (22/06) e de verão (22/12).

A irradiância solar extraterrestre é a energia disponível em uma dada latitude, sem que sejam considerados os efeitos atenuantes da atmosfera. Segundo a NBR 15220-3 (ABNT, 2005), a irradiância solar refere-se à taxa de radiação incidente sobre um corpo, por unidade de área de superfície.

O ângulo zenital formado entre o zênite local e os raios solares incidentes no plano do observador varia de acordo com a latitude, época do ano e hora do dia. Pela Lei do Cosseno de Lambert, quanto maior for o ângulo zenital, maior será a inclinação dos raios solares e, portanto, maior será a área para a mesma quantidade de energia distribuída, o que resulta em uma menor concentração de irradiância solar. Por isso, a irradiância é máxima no período próximo ao meio-dia do horário solar local e mínima ao nascer e ao pôr do sol (SENTELHAS; ANGELOCCI, 2009).

A Tabela 9 apresenta os valores da irradiância solar extraterrestre, e da irradiância solar global horizontal, para a cidade de Brasília, a Figura 13 representa a atenuação da irradiância solar extraterrestre (Q_0), após sofrer os efeitos atenuantes da atmosfera e a Figura 14 ilustra as componentes direta, difusa e refletida da radiação global horizontal.

Tabela 9: Irradiância solar extraterrestre (Q_0) e irradiância solar global horizontal (I_g): Médias diárias em kWh/m² para Brasília

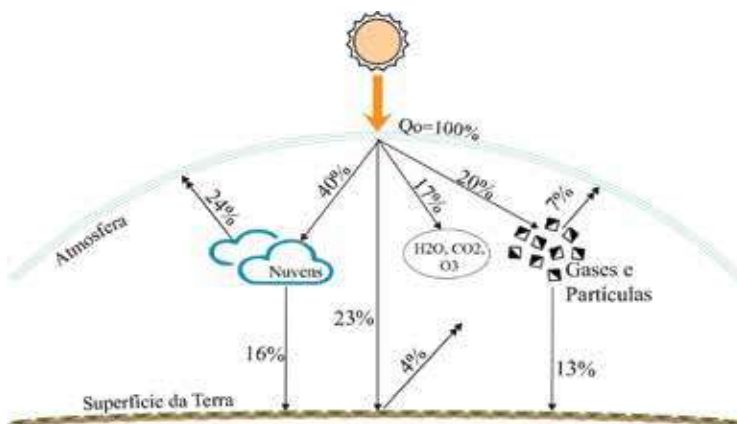
	Jan	Fev	Mar.	Abr.	Mai	Jun.	Jul.	Ago.	Set.	Out.	Nov.	Dez.
Q_0	11,43	11,28	10,79	9,76	8,51	7,51	7,31	8,00	9,21	10,33	11,08	11,37
I_g	5,15	5,38	5,15	5,05	4,84	4,77	5,01	5,64	5,71	5,33	4,9	5,05

Fonte da irradiância solar global horizontal: série 2001-2013/INMET.

Fonte da Irradiância solar extraterrestre: <http://www.cresesb.cepel.br/sundata/index.php#sundata>.

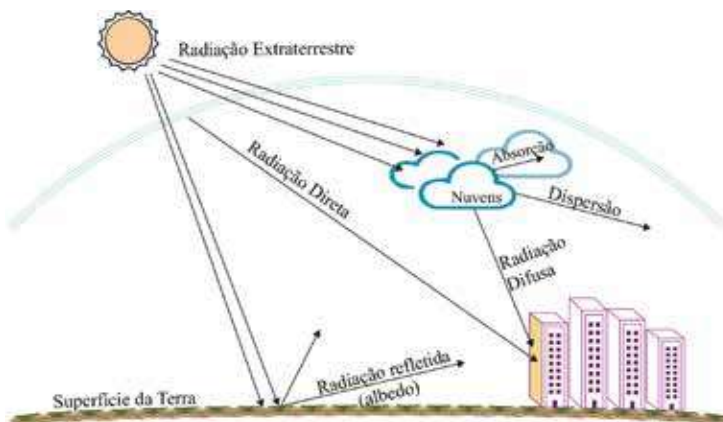
Fonte: Elaboração dos autores (2015).

Figura 13: Irradiância solar após os efeitos atenuantes da atmosfera



Fonte: Elaboração dos autores (2015), baseado em Pereira, Angelocci e Sentelhas (2007, p. 65).

Figura 14: Componentes da radiação solar



Fonte: Elaboração dos autores (2015).

A radiação global horizontal que incide na superfície terrestre é constituída pelas componentes direta e difusa. A radiação global direta é determinada pela Lei do Cosseno de Lambert, advinda da parcela da radiação extraterrestre que atravessa a atmosfera e incide diretamente sobre as superfícies. A radiação global difusa é resultado dos sucessivos processos de difusão, reflexão e absorção, que dependem das nuvens e das partículas da atmosfera, sendo refletida na abóbada celeste e nas nuvens e re-irradiada para a Terra. Para a condição de céu claro, sem nuvens, a radiação direta representa uma parcela maior que a difusa, mas, se o céu estiver muito nublado, a radiação difusa poderá apresentar-se em uma parcela maior que a parcela direta (LAMBERTS; DUTRA; PEREIRA, 2011).

Nas Normais Climatológicas 1961-1990, não consta registro de radiação solar, somente de horas de insolação (INMET, 2009). Desde 2000, a estação automática de superfície A001-Brasília tem registrado dados horários de radiação solar global horizontal. Segundo o INMET (1999), a radiação solar é uma das variáveis meteorológicas mais difíceis de serem obtidas com confiabilidade e precisão por meios automáticos. Tal fato pode esclarecer a condição do arquivo climático da série 2001-2013, conforme a qual a variável radiação solar global é aquela que apresenta a maior quantidade de dados nulos ou espúrios.

2.7 Temperatura do ar

A temperatura é uma variável climática que indica a quantidade de calor que existe no ar. Apesar de o Sol ser a principal fonte de calor da Terra, não é a radiação solar que determina diretamente a temperatura do ar, visto que este é transparente a todos os comprimentos de onda.

A temperatura do ar é resultado dos efeitos da radiação solar sobre as superfícies da Terra e do balanço energético. A radiação solar atinge o solo e as superfícies, aquecendo-os, e, por convecção, o calor por eles liberado aquece o ar.

De acordo com Lamberts, Dutra e Pereira (2011), nesse balanço energético estão envolvidos a radiação solar incidente; o coeficiente de absorção das superfícies receptoras da radiação solar; a condutividade e a capacidade térmica do solo, que determinam a transmissão de calor por condução; e as perdas por evaporação, convecção e radiação.

As temperaturas possuem um comportamento cíclico diário e sazonal e podem ser expressas em valores médios (horários, diários, mensais e anuais), valores extremos (máxima e mínima) e amplitude térmica. A temperatura do ar é uma variável climatológica obtida pela média das temperaturas verificadas em um período específico de tempo. A temperatura máxima e a temperatura mínima resultam, respectivamente, das médias das máximas temperaturas e das mínimas temperaturas, em um determinado período. A temperatura máxima absoluta e a temperatura mínima absoluta são, respectivamente, a mais alta das temperaturas máximas e a mais baixa das temperaturas mínimas, observadas em um determinado período (INMET, 1999).

As temperaturas mais baixas acontecem um pouco antes do nascer do sol; ao longo do dia, elas vão se elevando, atingindo os valores máximos cerca de duas horas após a passagem do Sol pelo Meridiano do observador. A partir desse momento, a temperatura da Terra começa a diminuir, e o balanço energético começa a ser negativo: a energia perdida, especialmente por radiação em direção às altas camadas da atmosfera, é maior que a recebida.

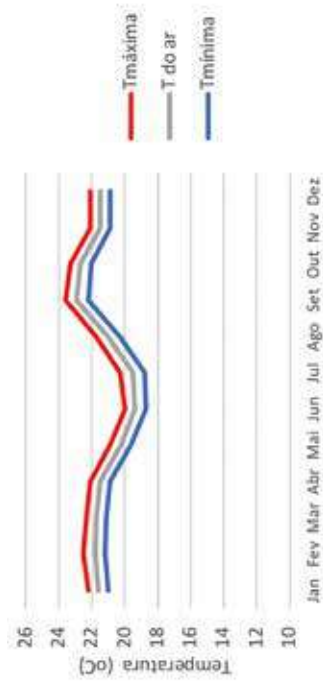
Com base na série 2001-2013 de dados climáticos horários, registrados pela estação automática de superfície A001-Brasília, são apresentados os perfis anuais das médias mensais da temperatura do ar, temperatura máxima e temperatura mínima (Tabela 10 e Figura 15).

Tabela 10: Médias mensais e anual das temperaturas da série 2001-2013/INMET para Brasília

Variáveis climáticas	Jan.	Fev.	Mar.	Abr.	Mai	Jun.	Jul.	Ago.	Set.	Out.	Nov.	Dez.	Média anual
Temperatura máxima (°C)	22,2	22,5	22,3	22,1	20,9	20,0	20,3	21,7	23,6	23,3	22,1	22,1	21,3
Temperatura do ar (°C)	21,6	21,8	21,7	21,5	20,2	19,4	19,5	21,0	22,9	22,7	21,5	21,5	21,9
Temperatura mínima (°C)	21,0	21,2	21,1	20,9	19,6	18,7	18,8	20,3	22,2	22,0	20,9	20,9	20,7

Fonte: Elaboração dos autores (2015).

Figura 15: Perfil das temperaturas médias mensais da série 2001-2013/INMET para Brasília



Fonte: Elaboração dos autores (2015).

A Tabela 11 mostra a análise estatística das três temperaturas registradas na série 2001-2013: temperatura do ar, temperatura máxima e temperatura mínima.

Tabela 11: Estatística descritiva das temperaturas da série 2001-2013/INMET para Brasília

	Temperatura do ar (°C)	Temperatura máxima (°C)	Temperatura mínima (°C)
Média	21,3	21,9	20,7
Mediana	20,7	21,4	20,1
Moda	19,1	19,4	19,1

Fonte: Elaboração dos autores (2015).

Os valores absolutos máximos e mínimos das temperaturas da série 2001-2013 são mostrados no Quadro 4. Na cidade de Brasília, a temperatura horária mínima absoluta acontece na madrugada, pouco antes do nascer do sol, e a temperatura horária máxima absoluta ocorre no meio da tarde.

Quadro 4: Valores absolutos máximos e mínimos das temperaturas da série 2001-2013/INMET para Brasília

	Temperatura do ar (°C)	Temperatura máxima (°C)	Temperatura mínima (°C)
Mínima horária	8,9°C em 24/07/2004 às 7h	9,4°C em 24/07/2004 às 7h	8,8°C em 24/07/2004 às 7h
Máxima horária	34,9°C em 28/10/2008 às 14h	35,3°C em 28/10/2008 às 15h	34,4°C em 28/10/2008 às 15h
<p>Máxima Absoluta da série 2001-2013: 35,3°C em 28/10/2008 às 15 horas Mínima Absoluta da série 2001-2013: 8,8°C em 24/07/2004 às 7 horas</p>			

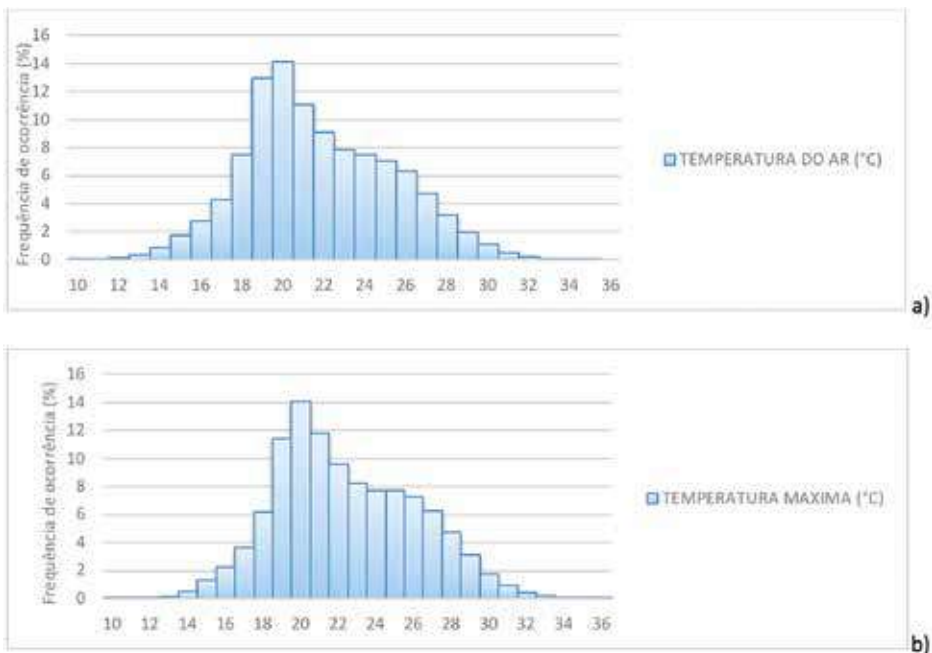
Fonte: Elaboração dos autores (2015).

As frequências de ocorrência das temperaturas do ar, máxima e mínima, representadas nos histogramas da Figura 16, ilustram o clima ameno da cidade de Brasília, com muitas horas do ano na zona de conforto.²

Segundo Lamberts, Dutra e Pereira (2013), Brasília possui 43,6% de horas do ano em zona de conforto térmico e 56,3% de horas em zona de desconforto, das quais 15,2% decorrem do calor e 41,1% do frio. Considerando-se a frequência de ocorrência da série 2001-2013, para os histogramas com intervalo de classe variando em 1°C, observa-se que menos de 1% das temperaturas máximas horárias ocorrem com valores acima de 31°C, e menos de 1% das temperaturas mínimas horárias ocorrem com valores abaixo de 14°C (Figura 16 – a, b e c).

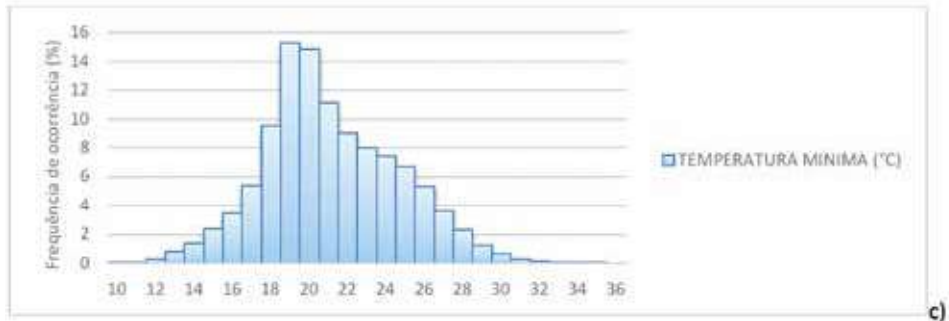
Figura 16: Histogramas para as temperaturas horárias da série 2001-2013/INMET para Brasília: a) Temperatura do ar (°C); b) Temperatura máxima (°C); c) Temperatura mínima (°C)

(continua)



² Baseado na carta bioclimática apresentada pela NBR 15220-3 (ABNT, 2005), que classifica as zonas bioclimáticas conforme metodologia adaptada do Diagrama Psicométrico de Givoni.

Figura 16: Histogramas para as temperaturas horárias da série 2001-2013/INMET para Brasília: a) Temperatura do ar (°C); b) Temperatura máxima (°C); c) Temperatura mínima (°C) (conclusão)



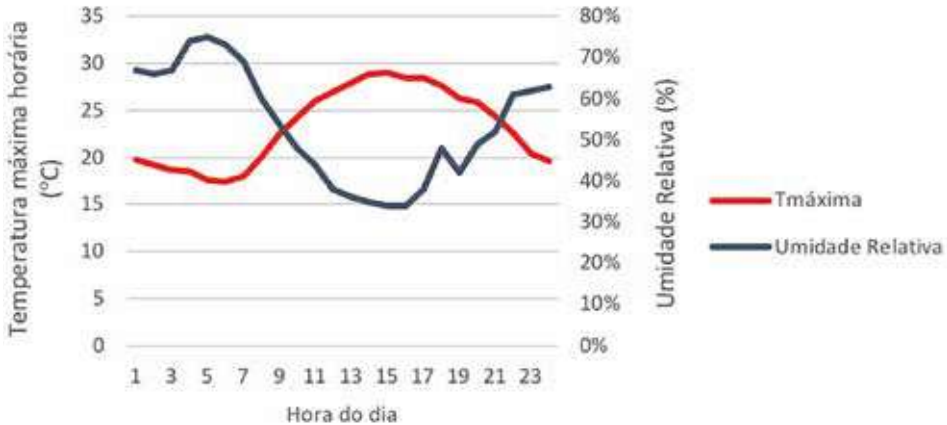
Fonte: Elaboração dos autores (2015).

2.8 Amplitude térmica

A amplitude térmica é uma variável que mede a flutuação térmica diária, obtida pela diferença entre a temperatura horária máxima absoluta e a temperatura horária mínima absoluta registradas naquele dia. Isto é, a diferença entre a máxima e a mínima temperatura, ao longo de 24 horas de um dia, chama-se *amplitude térmica* (INMET, 1999).

A umidade do ar influencia a amplitude térmica: quando o ar está muito úmido, a amplitude térmica é pequena; quando está muito seco, as temperaturas máximas e mínimas podem ser mais acentuadas. Assim, a amplitude térmica é uma variável que depende da umidade do ar. Climas mais secos possuem amplitudes maiores e, por outro lado, climas mais úmidos possuem amplitudes menores. A Figura 17 mostra o comportamento da umidade relativa do ar e da temperatura máxima em um dia de inverno na cidade de Brasília.

Figura 17: Perfil diário da temperatura máxima (°C) e da umidade relativa do ar (%) para um dia de inverno (24/07/2009) da série 2001-2013/INMET para Brasília



Fonte: Elaboração dos autores (2015).

A amplitude térmica diária da série 2001-2013 foi obtida pela diferença entre a máxima temperatura horária e a mínima temperatura horária para cada dia válido da amostra, ou seja, foram utilizadas a máxima e a mínima absoluta das 24 horas de cada dia. Para se obter o valor da amplitude térmica representativa de cada mês, foi feita a média aritmética simples com todas as amplitudes térmicas dos dias correspondentes ao mês em questão.

A Tabela 12 mostra as médias mensais da amplitude térmica e os valores máximos mensais da série 2001-2013. Mostra, também, a frequência de ocorrência por faixa de variação das amplitudes térmicas. Buscou-se classificá-las em três faixas que fossem mais representativas das condições de exposição das edificações: $AT < 10\text{ }^{\circ}\text{C}$; $10\text{ }^{\circ}\text{C} \leq AT < 15\text{ }^{\circ}\text{C}$ e $AT \geq 15\text{ }^{\circ}\text{C}$.

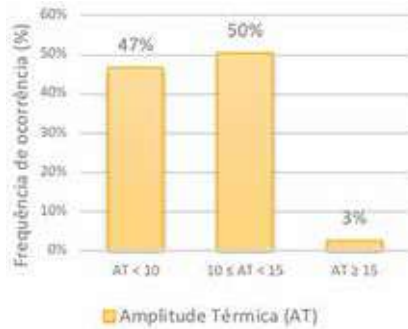
Tabela 12: Amplitude térmica (AT) da série 2001-2013/INMET para Brasília: médias mensais, máximos mensais e frequência de ocorrência

	Amplitude térmica do ar		Frequência da amplitude térmica diária por faixa de variação		
	AT média (°C)	AT max (°C)	AT < 10 °C	10 °C ≤ AT < 15 °C	AT ≥ 15 °C
Jan.	8,5	14,3	5,2%	4,5%	0,2%
Fev.	9,1	14,3	1,9%	6,4%	0,6%
Mar.	9,0	14,3	2,6%	6,9%	0,4%
Abr.	9,4	14,2	6,4%	2,3%	0,0%
Mai	10,6	16,2	4,7%	3,0%	0,0%
Jun.	11,2	18,3	2,1%	5,1%	0,4%
Jul.	12,0	16,9	2,2%	5,4%	0,4%
Ago.	12,1	17,6	5,4%	2,5%	0,0%
Set.	11,7	17,8	5,1%	2,6%	0,0%
Out.	10,5	16,1	2,2%	5,3%	0,4%
Nov.	8,8	14,3	3,5%	4,0%	0,2%
Dez.	8,6	14,2	5,4%	2,5%	0,0%
Média anual	10,1 °C	Total	47%	50%	3%

Fonte: Elaboração dos autores (2015).

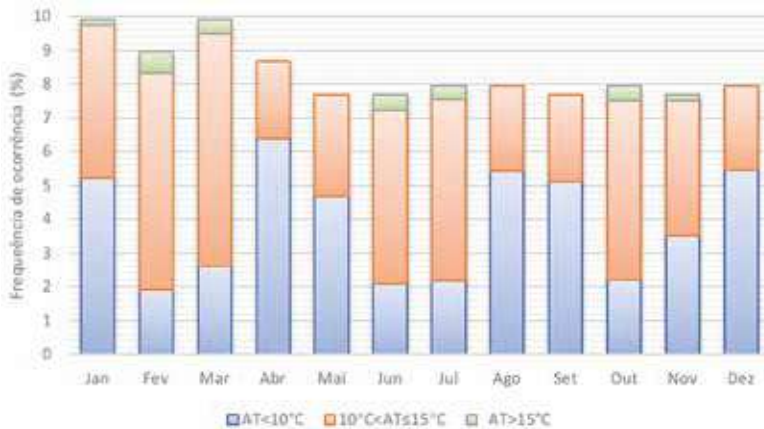
A Figura 18 mostra a frequência de ocorrência por faixa de variação das amplitudes térmicas da série 2001-2013. A Figura 19 ilustra as variações da amplitude térmica por faixa, ao longo dos meses do ano.

Figura 18: Frequência de ocorrência por faixa de variação da amplitude térmica (°C) da série 2001-2013/INMET para Brasília



Fonte: Elaboração dos autores (2015).

Figura 19: Frequência de ocorrência (%) por faixa de variação da média mensal da amplitude térmica (AT em °C) da série 2001-2013/INMET para Brasília



Fonte: Elaboração dos autores (2015).

No mês de junho, observou-se o maior valor para a amplitude térmica diária (18,3 °C). Quanto às médias mensais, elas variaram entre 8,5 °C e 12,1 °C. Os meses que apresentaram as maiores médias mensais de amplitudes térmicas foram julho e

agosto (em torno de 12 °C). As máximas amplitudes térmicas diárias e as maiores médias mensais correspondem ao período seco.

Na série 2001-2013 da cidade de Brasília, cerca de 50% dos dias apresentaram amplitude térmica diária maior ou igual a 10°C e menor que 15°C, e cerca de 3%, amplitude térmica igual ou maior que 15°C. Considerando-se esses percentuais, é possível concluir que a cidade de Brasília possui altas amplitudes térmicas, principalmente no período seco.

3. Arquivos climáticos de dados horários para simulação

Para as simulações computacionais que usam variáveis climáticas para alimentar os dados de entrada, em geral, é necessário que o arquivo climático seja representativo do local e contenha um ano completo de 365 dias com 8.760 dados horários. No caso dos anos bissextos, o dia 29 de fevereiro deve ser descartado.

Um ano climático, típico ou de referência, consiste em um ano de dados climáticos horários apresentados em um formato padronizado para as 8.760 horas do ano. Metodologias específicas permitem tratar os dados de uma série de 30 anos (10 anos, no mínimo) para compor um ano completo que representa um ano climático médio, típico ou de referência de determinado local. Os dados selecionados devem representar a série de padrões climáticos que normalmente seria encontrada em um conjunto de dados de vários anos.

Nesse caso, há diversas metodologias para a sua obtenção, entre elas, o *Test Reference Year* (TRY) e o *Typical Meteorological Year* (TMY).

3.1 Ano Climático de Referência (TRY - *Test Reference Year*)

O *Test Reference Year* (TRY) consiste em um ano real com dados climáticos horários, contendo informações climáticas para as 8.760 horas do ano, apresentados em um formato padronizado, necessário para as simulações de desempenho das edificações.

O TRY é gerado a partir de dados de temperatura. A metodologia para a formação de um Ano Climático de Referência - TRY consiste em eliminar do banco de dados os anos de temperaturas médias mensais extremas (altas ou baixas), até que se obtenha apenas um ano de dados médios. O TRY seleciona o ano mais representativo entre vários anos (GOULART; LAMBERTS; FIRMINO, 1998).

3.2 Ano Meteorológico Típico (TMY - *Typical Meteorological Year*)

O *Typical Meteorological Year* (TMY) é uma das metodologias para se obter um ano típico. Diferentemente do TRY, que seleciona o ano mais representativo entre vários anos, o TMY seleciona os meses mais representativos de vários anos distintos para compor um ano típico.

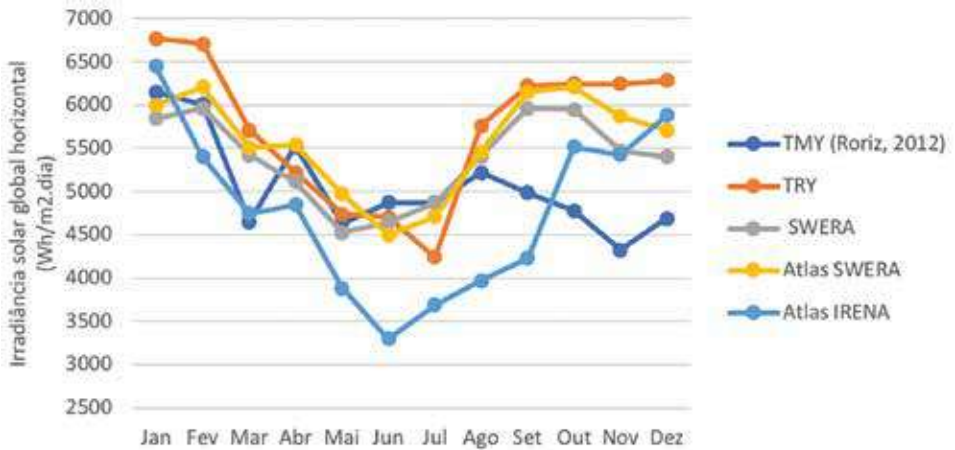
A metodologia para obtenção de um TMY baseia-se na variável temperatura e consiste em excluir sucessivamente os meses mais quentes e mais frios, até que reste apenas um, considerado como o mês típico do local. O TMY é formado por 12 meses reais, que podem ser de diferentes anos, desde que o mês selecionado seja representativo dos mesmos meses observados no período de 30 anos (de preferência) ou de, no mínimo, 10 anos (AKUTSU; VITTORINO, 1998).

3.3 Comparando arquivos de ano climático disponíveis para Brasília

Os principais arquivos climáticos referentes a um ano climático com 8.760 horas disponíveis para simulações computacionais para a cidade de Brasília são: Atlas SWERA, Atlas IRENA TRY, TMY da base SWERA (*Solar and Wind Energy Resource Assessment*) e TMY da base INMET (SCHELLER *et al.*, 2015).

A Figura 20 ilustra as médias diárias mensais da GHI dos arquivos climáticos Atlas IRENA, Atlas SWERA, SWERA, TRY e TMY-INMET, avaliados no trabalho de Scheller *et al.* (2015). Observa-se que, dependendo da base de dados e da metodologia utilizadas, os valores das médias mensais podem apresentar diferenças.

Figura 20: Média diária mensal da irradiância solar global horizontal ($\text{Wh}/\text{m}^2\cdot\text{dia}$) para Brasília



Fonte: Zaroni *et al.* (2015, p. 7) utilizando dados de Scheller *et al.* (2015).

Para simulações de desempenho termoenergético em Brasília, os arquivos climáticos mais utilizados são: arquivo climático TRY-1962_05CSV e arquivo climático TMY-INMET.

O arquivo climático TRY-1962_05CSV, pela metodologia adotada para a sua elaboração, selecionou o ano de 1962 como o ano médio representativo da série histórica de 30 anos de dados meteorológicos consecutivos, tomados das Normais Climatológicas Padronizadas do Brasil 1961-1990, resultantes de registros de dados sinóticos do INMET.

O arquivo climático TMY-INMET é resultado de uma metodologia que selecionou os meses médios mais representativos da série de dados horários medidos pelo INMET, no período 2000-2010, pela estação automática de superfície A001.

O arquivo climático TMY-INMET para Brasília foi elaborado por Maurício Roriz em 2012. Esse arquivo climático recebeu uma versão atualizada em 2016, sem apresentar, no entanto, nenhuma diferença nos dados em relação ao arquivo climático de 2012 (SCHELLER *et al.*, 2016).

As simulações computacionais que utilizam o arquivo TRY-1962_05CSV podem obter resultados bastante distintos entre os períodos de verão e de inverno, enquanto as simulações feitas com os arquivos TMY-INMET (2012 ou 2016) podem resultar em valores mais homogêneos, ao longo do ano.

A Figura 21 ilustra o comportamento das médias mensais diárias da irradiância global horizontal para a cidade de Brasília, de acordo com os arquivos climáticos: TRY-1962_05CSV, TMY-INMET (2012) e a série 2001-2013/INMET.

Figura 21: Médias mensais diárias da Irradiância Global Horizontal (Wh/m².dia) para Brasília



Fonte: Elaboração dos autores (2015).

Zanoni *et al.* (2015) realizaram um estudo comparativo entre o arquivo climático TMY-INMET para Brasília e a série 2001-2013/INMET para a variável GHI.

As análises estatísticas mostraram que não existem evidências de diferenças significativas quando comparadas as médias anuais dos dois arquivos analisados, tampouco as médias efetuadas por período (seco e chuvoso).

Analisados os desvios por períodos, verifica-se que, no período chuvoso, a diferença entre os arquivos climáticos é de cerca de 1,13% (0,35 kWh/m².dia), enquanto no período seco a diferença é de cerca de 3% (0,91 kWh/m².dia).

A análise dos desvios entre as médias mensais dos arquivos climáticos mostrou que os meses do ano climático TMY-INMET apresentam diferenças em relação aos meses da série 2001-2013 do INMET, principalmente nos meses mais chuvosos.

Vale destacar que, nem sempre, a média anual é um bom indicador para avaliar a representatividade de uma série temporal. A cidade de Brasília é um exemplo de como as médias anuais podem mascarar as médias mensais, devido a sua forte sazonalidade, marcada pelo período seco e período chuvoso (ver Tabela 2, que mostra seis meses do período chuvoso com 85,15% do total de precipitação anual). Outra variável que marca bem essa sazonalidade é a nebulosidade, que apresenta valores abaixo de 4 para a estação de inverno e acima de 7 para a estação de verão.

Por outro lado, para a cidade de Brasília, o arquivo climático TMY-INMET é um ano climático suficientemente representativo para ser usado nas simulações computacionais, quando consideradas as médias mensais das variáveis temperatura, umidade relativa do ar, pressão atmosférica e vento. Em relação à radiação solar, é o arquivo com a maior representatividade, se comparado com os outros anos climáticos disponíveis para simulação computacional. Quanto à variável nebulosidade, o arquivo climático TMY-INMET apresenta o valor de 0,5 fixado para todas as 8.760 horas do ano.

Para as simulações higrótérmicas, alguns programas utilizam a chuva dirigida como uma das fontes de umidade. Nesse caso, a opção pelo uso do ano climático TMY-INMET justifica-se, visto que este arquivo contempla as variáveis horárias precipitação e vento (velocidade e direção), utilizadas para a determinação da intensidade de chuva dirigida na envoltória edificada.

A representatividade de um arquivo climático pode ser afetada pela quantidade de anos utilizada para compor o ano climático, sendo recomendado, para tanto, uma amostra com, no mínimo, 10 anos de dados de registros horários consecutivos.

A metodologia para a obtenção de um ano meteorológico típico (TMY) seleciona os meses de referência com base nas temperaturas médias de 10 anos de

dados, no mínimo. Assim, os arquivos climáticos com 8.760 horas, gerados para simulações computacionais, a partir dos valores médios de temperatura, podem não ser representativos para outros parâmetros, quando analisados mês a mês.

Por essa razão, entre outras, recomenda-se avaliar os resultados das simulações higrotérmicas com base nas características cíclicas e sazonais das variáveis climáticas, considerando-se o seu comportamento mensal ou periódico, em termos de valores médios, máximos e mínimos, assim como a frequência de ocorrência, controlando-se os conflitos entre os arquivos climáticos e o clima local.

4. Considerações finais

Os estudos realizados com base no arquivo climático da série 2001-2013, com 13 anos de dados horários registrados pelo INMET na estação automática de superfície A001-Brasília, permitiram obter um conjunto de informações para a caracterização das variáveis climáticas e seus comportamentos cíclicos e sazonais, garantindo-se, assim, a base necessária para a seleção de arquivos climáticos, verificação da representatividade quanto ao clima local e análise de sensibilidade dos resultados dos estudos de simulação higrotérmica.

Em síntese, o período chuvoso integra os meses de primavera e verão, cujas temperaturas são mais elevadas que as do outono e do inverno. Os meses com temperaturas mais baixas são junho e julho. Os meses mais quentes do ano são setembro e outubro, coincidindo com o final do período da longa estiagem, quando começa o início das chuvas. Apesar de as temperaturas serem elevadas em todo o Brasil (por ser um país tropical), Brasília apresenta somente cerca de 1,5% das horas com temperaturas máximas acima de 30°C, e menos de 1% das temperaturas mínimas horárias ocorrem com valores abaixo de 14 °C.

A radiação solar é alta durante todo o ano, com médias diárias mensais acima de 4.700 Wh/m². No período chuvoso, apesar de maior nebulosidade (em média 7,6 décimos), a radiação é alta devido à trajetória do Sol mais próxima da Terra. No inverno

seco, apesar de o Sol estar mais distante da Terra, os dias de céu claro, devido à baixa nebulosidade (em média, 4,1 décimos), favorecem a radiação solar direta.

Em geral, os ventos são bem distribuídos em todas as direções, havendo baixa quantidade de horas de calmaria (3%). No entanto, 50% dos ventos horários são caracterizados como brisa leve (velocidade entre 1,6 e 3,3 m/s).

Embora a média anual da amplitude térmica do ar seja de 10,1 °C, cerca de 53% das amplitudes térmicas diárias ocorrem com valores iguais ou acima de 10 °C. Por isso, a cidade de Brasília pode ser considerada uma cidade com altas amplitudes térmicas, distribuídas durante todo o ano, sendo que as máximas amplitudes térmicas ocorrem no período seco, que compreende os meses mais frios. À noite, a temperatura cai, e, ao longo do dia, se eleva, fazendo cair a umidade relativa do ar. As baixas taxas de umidade relativa do ar (abaixo ou igual a 30% UR) correspondem somente a 5% das horas do ano, mas estão concentradas, principalmente, nos meses de agosto e setembro. Nesses meses, a velocidade de vento é maior, principalmente os ventos com direção Leste.

A chuva dirigida é a chuva projetada nas superfícies da envoltória edificada, decorrente da ação do vento sobre a precipitação. Apesar de os ventos predominantes serem mais frequentes na direção Leste, a chuva dirigida é mais intensa nas fachadas com orientações Norte e Noroeste, resultante da ação combinada de precipitação e vento (direção e velocidade).

Nos estudos sobre chuva dirigida, a média anual das variáveis climáticas nem sempre é representativa (ZANONI *et al.*, 2014). Para a cidade de Brasília, a média anual com base nas médias mensais descaracteriza fortemente a sazonalidade. Portanto, a periodicidade bem definida pelos seis meses mais secos e seis meses mais chuvosos deve ser considerada na análise de sensibilidade dos resultados das simulações higrótérmicas. Alerta-se que, para estudos similares em outras localidades, deve-se proceder às análises para identificar a caracterização mensal, sazonal, anual, ou outro período de tempo que melhor represente o comportamento dos dados climáticos do local a ser estudado.

Para as simulações computacionais, é preciso selecionar, como dado de entrada, um arquivo climático que represente um ano de 8.760 horas de dados climáticos característicos do clima local. Uma vez que a metodologia para obtenção de um ano meteorológico típico (TMY) seleciona os meses com base nas temperaturas médias, os arquivos climáticos gerados podem não ser representativos para as outras variáveis climáticas. Portanto, conhecer a metodologia de como o arquivo climático foi gerado, quais foram as bases de dados que o alimentaram e a representatividade desses dados, quando comparados com o contexto climático em estudo, são condições essenciais para a validação dos resultados simulados, considerando-se o comportamento cíclico e sazonal que afeta as pessoas, os edifícios e o ambiente.

Referências

AKUTSU, Maria, VITTORINO, Fúlvio. *Tratamento de dados climáticos para a avaliação do desempenho térmico de edificações – manual de procedimentos (Aplicação à cidade de São Paulo) - Anexo I*. Publicação IPT 1732. São Paulo, 1998.

ALVARES, Clayton Alcarde *et al.* Köppen's climate classification map for Brazil. *Meteorologische Zeitschrift*, Gebrüder Borntraeger, Stuttgart, v. 22, n. 6, p. 711-72, 2013.

ASHRAE – American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc. *2017 ASHRAE Handbook – Fundamentals (SI)*. Atlanta, EUA, 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). *ABNT NBR 15220-3*. Desempenho Térmico de Edificações - Parte 3: Zoneamento Bioclimático Brasileiro e Diretrizes Construtivas para Habitações Unifamiliares de Interesse Social. Rio de Janeiro, 2005.

BERGMAN, Theodore L. *et al.* *Fundamentals of heat and mass transfer*. 7. ed. Nova Jersey, EUA: Wiley, 2011.

BITTENCOURT, Leonardo; CANDIDO, Christhina. *Ventilação natural em edificações*. Rio de Janeiro: Eletrobras; PROCEL EDIFICA - Eficiência Energética em Edificações; PROCEL - Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica, 2010.

BRITISH STANDARD INSTITUTION. *BS ISO 15686-5*. Buildings and constructed assets – Service-life planning. Parte 5: Life-cycle costing. London, 2008.

CAVALCANTI, Enilson P.; GOMES FILHO, Manoel F.; BEZERRA, Wagner A. Fluxo de vapor de água atmosférico na obtenção do resíduo ET-P em três macrorregiões brasileiras. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v. 12, n. 5, p. 471-479, 2008.

CIB W040 - International Council for Research and Innovation in Building and Construction – Heat and Moisture Transfer in Buildings. *Heat, air and moisture transfer terminology - parameters and concepts*. Publication 369. Porto: FEUP Edições, 2012.

DUFFIE, John A.; BECKMAN, William A. *Solar engineering of thermal processes*. Hoboken, NJ: Wiley, 1980.

GOULART, Solange V. G.; LAMBERTS, Roberto; FIRMINO, Samanta. *Dados climáticos para projeto e avaliação energética de edificações para 14 cidades brasileiras*. 2. ed. Florianópolis: Núcleo de Pesquisa em Construção UFSC, 1998.

GUIDE TO METEOROLOGICAL INSTRUMENTS AND METHODS OF OBSERVATION. 7. ed. Geneva, Switzerland: World Meteorological Organization (WMO), 2008. (WMO-No. 8.)

INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA (INMET). *Manual de observações meteorológicas*. 3. ed. Brasília: Ministério da Agricultura e do Abastecimento, 1999.

INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA (INMET). *Normais Climatológicas do Brasil (1961-1990)*. Disponível em: <http://www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=clima/graficosClimaticos>. Acesso em: 10 fev. 2013.

LAMBERTS, Roberto; DUTRA, Luciano; PEREIRA, Fernando O. R. *Eficiência energética na arquitetura*. 3. ed. Rio de Janeiro: Eletrobras; Procel Edifica, 2013, p.365.

MORETTIN, Pedro A.; TOLOI, Clélia M. C. *Análise de séries temporais*. 2. ed. São Paulo: Blusher, 2006.

MUNHOZ, Fabrício César; GARCIA, Anice. Caracterização da velocidade e direção predominante dos ventos para a localidade de Ituverava-SP. *Revista Brasileira de Meteorologia*, v. 23, n. 1, p. 30-34, 2008.

PEREIRA, Basílio de Bragança; PAIS, Maria Bernadette Zanusso; SALES, Paulo Roberto de Holanda. *Análise espectral de séries temporais: uma introdução para Engenharia, Economia e Estatística*. Rio de Janeiro: Arte Final Leasing Editorial; Eletrobras S.A., 1986.

PEREIRA, Antônio Roberto; ANGELOCCI, Luiz Roberto; SENTELHAS, Paulo Cesar. *Meteorologia Agrícola*. Edição revista e ampliada. Piracicaba, SP: LCE 306. ESALQ/USP, 2007. 192 p.

RAMOS, Andrea Malheiros; SANTOS, Luiz André Rodrigues dos; FORTES, Lauro Tadeu Guimarães (Org.). *Normais climatológicas do Brasil 1961-1990*. Ed. rev. e ampliada. Brasília, DF: INMET, 2009.

ROMERO, Marta Adriana Bustos. *Princípios bioclimáticos para o desenho urbano*. São Paulo: ProEditores, 2000.

RORIZ, Maurício. Correções nas irradiâncias e iluminâncias dos arquivos EPW da Base ANTAC. Grupo de Trabalho sobre Conforto e Eficiência Energética de Edificações. ANTAC – Associação Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído. São Carlos – SP, 2012. Disponível em: <http://www.labee.ufsc.br/downloads/arquivos-climaticos/formato-epw>. Acesso em: 20 set. 2013.

SALES, Nadir Dantas de; REBELLO, Expedito; SILVA, José de Fátima da. Chuvas Intensas em Brasília nos últimos cinco anos. In: XVI CONGRESSO BRASILEIRO DE METEOROLOGIA - CBMET2010. *Anais...* Belém, setembro de 2010.

SCHELLER, Camila; MELO, Ana Paula; LAMBERTS, Roberto. *Correções realizadas nos arquivos climáticos INMET 2012*. Laboratório de Eficiência Energética em Edificações. Universidade Federal de Santa Catarina-UFSC. Florianópolis, 2016. Disponível em: <http://www.labee.ufsc.br>. Acesso em: 25 set. 2017.

SCHELLER, Camila *et al.* *Análise de arquivos climáticos para a simulação do desempenho energético de edificações*. Centro Brasileiro de eficiência energética em edificações-CB3E. Universidade de Santa Catarina-UFSC, Florianópolis, 2015.

SENTELHAS, Paulo Cesar; ANGELOCCI, Luiz Roberto. *Radiação solar: balanço de energia*. Notas de aulas. ESALQ/USP. Piracicaba, 2009. Disponível em: <http://www.lce.esalq.usp.br/aulas/lce306/Aula5.pdf>. Acesso em: 15 abr. 2013.

SILVA, Patrícia de Castro da. *Sistema para tratamento, armazenamento e disseminação de dados de vento*. 1999. Tese (Doutorado). Engenharia Mecânica, COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 1999.

WOLLMANN, Cássio Arthur; SARTORI, Maria da Graça Barros. A nebulosidade como fator condicionante à percepção da pluviometria anual pela população urbana e rural de São Sebastião do Caí/RS. *Revista Brasileira de Geografia Física*, v. 3, n. 1, p. 1-6, 2010.

ZAHUMENSKÝ, Igor. *Guidelines on Quality Control Procedures for data from Automatic Weather Stations*. Slovak Hydrometeorological Institute (SHMI). Slovakia, 2004.

ZANONI, Vanda Alice Garcia. *Influência dos agentes climáticos de degradação no comportamento higrotérmico de fachadas em Brasília*. 2015. 293 f. Tese (Doutorado em Arquitetura e Urbanismo) – Universidade de Brasília, Brasília, 2015.

ZANONI, Vanda Alice Garcia *et al.* Comparação entre arquivos climáticos de irradiação para estudos de degradação de fachada em Brasília-DF. In: XIII ENCAC - Encontro Nacional e IX Encontro Latino-americano de Conforto no Ambiente Construído, 2015. *Anais...* Campinas, 2015.

ZANONI, Vanda Alice Garcia *et al.* Matriz de análise do índice de chuva dirigida (ICD) para a cidade de Brasília-DF. *Revista Paranoá* (cadernos de arquitetura e urbanismo) - Conforto e Projeto: Cidades, Brasília, v. 11, p. 67-76, 2014.

Simulação, Ambiente e Energia no Espaço Construído

Este livro aborda conceitos, tecnologias e métodos relacionados aos aspectos energético, higrotérmico e lumínico, apresentando como pano de fundo o uso de programas de simulação computacional, diagramas e ferramentas simplificadas para estudos analíticos, aplicados ao espaço construído em diferentes climas. Na primeira parte do livro, “*Inputs* – conforto, vento e luz”, o Capítulo 1 apresenta a ferramenta alemã de simulação computacional ENVI-met e o seu potencial na análise do microclima urbano; o Capítulo 2 mostra as variáveis climáticas e os arquivos climáticos utilizados nas simulações higrotérmica; o Capítulo 3 aborda os programas de simulação aplicados à ventilação natural; e o Capítulo 4 trata da complexidade dos estudos de iluminação e a necessidade de avaliar várias dimensões, simultaneamente. Na segunda parte, “*Outputs* – ambiente construído e energia”, o Capítulo 5 ensina a identificar o potencial de aproveitamento das envoltórias para integrar sistemas de geração de energia; o Capítulo 6 traz a análise de uma casa pré-fabricada de balanço energético nulo; e o Capítulo 7 insere, à guisa de conclusão, uma visão sistêmica sobre o uso da energia elétrica no país. O livro dialoga com diversos perfis profissionais, pois contempla temas atuais e inovadores para estudantes e profissionais de Arquitetura, Engenharia, Geografia, Planejamento Urbano e áreas relacionadas com a qualidade e sustentabilidade do ambiente construído.



EDITORA



UnB