

PARÂMETROS CLIMÁTICOS PARA SIMULAÇÃO DE DESEMPENHO TÉRMICO SEGUNDO A NBR 15.575

CLIMATE PARAMETERS FOR THERMAL PERFORMANCE SIMULATION ACCORDING TO THE BRAZILIAN STANDARD NBR 15.575

Emeli Lalesca Aparecida da Guarda ¹

Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC, Brasil, emeliguarda@gmail.com

Luciane Cleonice Durante ²

Universidade Federal de Mato Grosso, Cuiabá, MT, Brasil, luciane.durante@hotmail.com

Ivan Julio Apolonio Callejas ³

Universidade Federal de Mato Grosso, Cuiabá, MT, Brasil, ivancallejas1973@gmail.com

Resumo

A norma brasileira NBR 15.575 estabelece que a avaliação de desempenho térmico de uma edificação por meio de simulação computacional deve ser conduzida pela relação entre a temperatura externa e a temperatura interna do ambiente, para os dias típicos de verão e inverno de forma a quantificar o atendimento aos requisitos dos usuários. Assim sendo, esse artigo tem por objetivo avaliar o desempenho térmico de uma edificação considerando métodos distintos de determinação de dia típico de verão e inverno e diferentes algoritmos de cálculo da irradiação solar (modelo de céu). A metodologia parte de uma edificação implantada em zona bioclimática 7, para a qual três algoritmos de modelo de céu foram testados, por meio de simulação computacional, para os dias típicos de verão e inverno. Verificou-se que, desconsiderando-se a nebulosidade, as temperaturas internas máximas e mínimas sofreram pouca alteração ao se variar os dias típicos obtidos por diferentes métodos, obtendo-se classificação de desempenho térmico Superior para a edificação pesquisada. Ao se considerar os modelos de céu, introduzindo-se a nebulosidade como parâmetro de entrada no dia típico de verão, a classificação de desempenho foi superior nos modelos ASHRAEClearSky e ASHRAETau, e intermediária com o modelo Zhang Huang, concluindo-se que os modelos de céu influenciam a classificação de desempenho. O modelo ASHRAETau forneceu, para o dia típico de verão, temperaturas internas inferiores às obtidas com os outros modelos de céu, não sendo recomendada a sua utilização. Comportamento semelhante foi obtido para o dia típico de inverno. O estudo fornece subsídios para determinação do dia típico para cidades brasileiras não especificadas na norma brasileira, contribuindo com reflexões acerca das lacunas existentes nos parâmetros normativos.

Palavras-chave: Dia Típico. Avaliação de Desempenho. Modelos de Céu. Irradiação Solar. Simulação Computacional.

Abstract

The Brazilian standard NBR 15.575 states that thermal performance evaluation of a building should be conducted by the relationship between outdoor temperature and indoor temperature conditions for summer and winter design days, which allows quantifying the compliance of the user requirements. Thus, this research aims to evaluate the thermal performance of a building considering different methods to determine the summer and winter days and different algorithms to calculate solar radiation (sky model). The methodology starts from a building located in bioclimatic zone 7, for which three sky model algorithms were tested, through computer simulation, for summer and winter design days. Without considering the sky clearness, the maximum and minimum indoor temperatures suffered slight variations when using different methods to obtain the design days, resulting in a Superior thermal performance level for the researched building. When considering the sky models, introducing sky clearness as an input parameter on the summer design day, the performance level was also Superior for the ASHRAEClearSky and ASHRAETau models, and intermediate for the Zhang Huang model, showing that the sky models can influence the performance classification. The ASHRAETau model provided, for the summer design day, underestimated indoor temperatures compared to other sky models, so its use is not recommended. Similar behavior was obtained for winter design day. The study subsidizes the construction of the design day for Brazilian cities not specified in the Brazilian standard, contributing to analyzing the existent gaps on normative parameters.

Keywords: Design Day. Performance Evaluation. Sky Models. Solar Irradiation. Computer Simulation.

How to cite this article:

GUARDA, E. L. A. DA; DURANTE, L. C.; CALLEJAS, I. J. A. Parâmetros climáticos para simulação de desempenho térmico segundo a NBR 15.575. **PARC Pesquisa em Arquitetura e Construção**, v. 11, p. e019014, 6 ago. 2020. DOI: <https://doi.org/10.20396/parc.v11i0.8655374>

Received in 06.06.2019 - accepted in 20.05.2020 - published 06.08.2020

e020014-1 | **PARC Pesq. em Arquit. e Constr.**, Campinas, SP, v. 11, p. e020014, 2020, ISSN 1980-6809



Introdução

No Brasil, as primeiras discussões sobre desempenho de edificações foram iniciadas pelo Instituto de Pesquisas Tecnológicas do estado de São Paulo (IPT), quando surgiu a necessidade de se analisar o comportamento das habitações do Banco Nacional de Habitação (BNH), na década de 1980 (GONÇALVES et al., 2003). A primeira normatização brasileira acerca de requisitos térmicos é a NBR 15220 (ABNT, 2005) que estabelece o Zoneamento Bioclimático Brasileiro e as respectivas recomendações e estratégias construtivas destinadas às habitações. Atualmente, a NBR 15575 (ABNT, 2013) define o desempenho de uma edificação como sendo o seu comportamento em uso, mensurado por requisitos específicos, conforme critérios atribuídos com base nas exigências dos usuários. Os requisitos dos usuários compreendem exigências de segurança (estrutural, contra fogo, no uso e operação), habitabilidade (estanqueidade, térmica, acústica, iluminação, saúde, higiene e qualidade do ar, funcionalidade e acessibilidade, conforto tátil e antropodinâmico) e sustentabilidade (durabilidade, manutenibilidade e impacto ambiental).

A determinação do desempenho térmico conforme estabelecido pela NBR 15575 (ABNT, 2013) prevê três métodos: simplificado, simulação computacional e medição. No método simplificado, a verificação é feita considerando as propriedades termofísicas dos sistemas construtivos (transmitância térmica, capacidade térmica e absorptância solar), sem, no entanto, considerar o projeto arquitetônico (BRITO et al., 2012). Caso a edificação não atinja os requisitos estabelecidos por este método, avalia-se o desempenho pelo método de simulação, no qual se avalia o desempenho dos dias típicos de verão e de inverno, conforme a zona bioclimática, baseado em valores máximos e mínimos de temperatura para verão e para inverno, respectivamente, no interior dos ambientes de permanência prolongada (sala de estar ou dormitório). O método de medição, por sua vez, se aplica a edificações em escala real ou a protótipos e tem caráter meramente informativo, não se sobrepondo aos dois métodos anteriores.

Nos métodos de simulação e medição, considerando o critério de avaliação mínimo do desempenho térmico no verão, o ambiente de permanência prolongada deve apresentar temperaturas menores ou iguais à temperatura externa máxima do dia típico de verão ($T_{int} \leq T_{ext}$). Já o critério mínimo de desempenho no inverno considera que a temperatura interna mínima do ambiente deve ser maior ou igual a 3°C da temperatura mínima externa ($T_{int} \geq T_{ext} + 3^\circ\text{C}$).

A simulação de desempenho térmico fornece como resultado a temperatura interna da edificação, a qual é derivada de informações contidas nos arquivos climáticos e decorrentes das características construtivas da edificação. Acerca dos formatos dos arquivos climáticos, tem-se o ano climático de referência *Test Reference Year* (TRY) (SCHELLER; SORGATO; MELO; LAMBERTS, 2015), do qual se derivam os valores horários dos parâmetros climáticos, podendo estes serem agrupados nos chamados dias típicos de projeto, para o período de verão e de inverno. Estes representam as condições mais significativas ao longo desses períodos, o que permite que sejam utilizados como representativos nas avaliações de desempenho térmico (SIQUEIRA et al. 2005). Estes dias são caracterizados por sua frequência de ocorrência para um período não menor que dez anos e representam as condições mais extremas de frio e calor ao longo deste período. Adota-se a frequência de ocorrência de 10% tanto para o dia típico de verão como para o dia típico de inverno (AKUTSU, 1998).

De acordo com a NBR 15575 (ABNT, 2013), define-se dia típico como um dia real caracterizado pelas variáveis ambientais de temperatura do ar, umidade relativa do ar, velocidade do vento e radiação solar incidente em superfície horizontal. Porém, na

referida norma são apresentados, para 26 cidades brasileiras, dados de temperatura máxima/ mínima diária (°C), amplitude térmica diária (°C), temperatura de bulbo úmido (°C), radiação solar (Wh/m²) e nebulosidade (em décimos), não sendo estabelecida a data e o método de cálculo dos mesmos, gerando dúvidas quanto aos valores apresentados e quanto à definição dos dias típicos para as cidades não apresentadas. Como consequência dessas lacunas, os resultados das avaliações podem ser distintos, pois a adoção de valores diferentes pode conduzir a resultados de desempenho diferentes.

Nesse sentido, Ferreira e Pereira (2012) avaliaram o desempenho térmico de uma habitação de interesse social de acordo com a NBR 15575 (ABNT, 2013) para diversas zonas bioclimáticas e verificaram que os dados dos dias típicos sugeridos pela referida norma se apresentaram insatisfatórios, tornando-se necessária a sua reavaliação para garantir a habitabilidade das edificações.

Sorgato, Melo e Lamberts (2014) questionaram a adoção dos dias típicos de projeto (*Design Days*) para avaliação de desempenho, pois estes se distanciam muito das reais condições de uso. Os autores conduziram simulações em ambientes de permanência prolongada em uma habitação unifamiliar de interesse social na cidade de Florianópolis, inserida na zona bioclimática 3. Ao utilizarem os dados do dia típico de verão para a região, segundo a NBR 15575 (ABNT, 2013) e admitirem diferentes condições de céu limpo nas simulações (100%, 70% e 30%, respectivamente), encontraram temperaturas do ar internas máximas de 32,7 °C, 31,1 °C e 28,6 °C, evidenciando a importância da configuração do tipo de céu utilizado para caracterização dos dias típicos de verão, condição esta que não é especificada na referida norma brasileira. Sugerem a simulação anual para uma avaliação mais adequada.

Entende-se que a NBR 15575 (ABNT, 2013), ao adotar dias típicos de verão e inverno como parâmetro de avaliação, avalia o atendimento da habitabilidade nas condições mais desfavoráveis, aplicando, portanto, princípios a favor da segurança, ou seja, nas condições mais extremas. Porém, a ausência de algumas informações na definição dos dias típicos propostos na norma, como a data para a configuração do dia típico, não fornecimento da direção e velocidade do ar, bem como indefinição da condição do céu, entre outros, interferem no processo de simulação das edificações, especialmente para cidades brasileiras quentes e frias, que possuem condições climáticas rigorosas decorrentes de sua própria localização geográfica, onde estes parâmetros são de fundamental importância. Desta forma, as lacunas da norma comprometem a estimativa do nível de desempenho das edificações, tornando-se imprescindível caracterizar os dias típicos de projeto de forma mais adequada.

Desta maneira, este trabalho tem por objetivo avaliar potenciais impactos no desempenho térmico de uma edificação considerando: (i) métodos distintos de determinação do dia típico de projeto e (ii) diferentes algoritmos de cálculo da irradiação solar (modelo de céu). O estudo visa fornecer subsídios para determinação do dia típico, especialmente para o caso das cidades brasileiras não especificadas na norma de desempenho, e contribui com reflexões acerca das diferenças encontradas ao se tomar decisões para preenchimento das lacunas nos parâmetros dos dias típicos, para o caso das cidades cujo dia típico esteja especificado.

Materiais e métodos

Partiu-se de uma edificação objeto de estudo implantada na cidade de Cuiabá/MT, Zona Bioclimática 7, para a qual se aplicou o método de avaliação de desempenho por simulação computacional, conforme estabelecido na NBR 15575 (ABNT, 2013). As simulações foram realizadas no *software* EnergyPlus, a partir do arquivo climático (EPW)

da cidade de Cuiabá, disponível em *Department of Energy* (2017). Os dados de saída da simulação foram a temperatura horária externa do dia típico e a temperatura do ar no centro de cada zona térmica. Determinou-se a classificação de desempenho da habitação por meio da média ponderada das temperaturas internas máximas e mínimas pelas respectivas áreas dos ambientes.

Mediante a ausência de indicação do período do banco de dados utilizado para determinação do dia típico na NBR 15575 (ABNT, 2013), determinou-se um dia típico conforme a metodologia Akutsu e Vittorino (1998), considerando um banco de dados de 1999 a 2009, como forma de verificação dos valores prescritos na normativa brasileira e a abrangência de seus resultados. Assim, a simulação computacional foi realizada considerando dados climáticos dos dias típicos de verão e inverno definidos conforme método adaptado da NBR 15575 (ABNT, 2013) e conforme Akutsu e Vittorino (1998).

Muito embora a NBR 15575 (ABNT, 2013) não solicite a avaliação de desempenho térmico de inverno para a cidade de Cuiabá/MT, pelo fato de que a mesma apresenta clima quente ao longo de todo o ano, optou-se por considerá-la, uma vez que se pretende apresentar uma metodologia que possa ser utilizada para definir dias típicos para cidades não listadas na referida norma, e que, provavelmente, necessitam avaliar o desempenho de edificações em condições de dias típicos de inverno. O critério de avaliação de desempenho, definido na NBR 15575 (ABNT, 2013) é o indicado na Tabela 1, referentes às condições de verão e inverno.

Tabela 1 – Critério de avaliação de desempenho térmico

Condições	Classificação de desempenho	Critérios	
		Zonas 1 a 7	Zona 8
Verão	Mínimo (M)	$T_{i,máx.} \leq T_{e,máx.}$	$T_{i,máx.} \leq T_{e,máx.}$
	Intermediário (I)	$T_{i,máx.} \leq T_{e,máx.} - 2 \text{ °C}$	$T_{i,máx.} \leq T_{e,máx.} - 1 \text{ °C}$
	Superior (S)	$T_{i,máx.} \leq T_{e,máx.} - 4 \text{ °C}$	$T_{i,máx.} \leq T_{e,máx.} - 2 \text{ °C}$
Inverno		Zonas 1 a 5	Zonas 6, 7 e 8
	Mínimo (M)	$T_{i,mín.} \geq T_{e,mín.} + 3 \text{ °C}$	Nestas zonas, este critério não precisa ser verificado
	Intermediário (I)	$T_{i,mín.} \geq T_{e,mín.} + 5 \text{ °C}$	
	Superior (S)	$T_{i,mín.} \geq T_{e,mín.} + 7 \text{ °C}$	

Fonte: Adaptado de NBR 15.575 (ABNT, 2013)

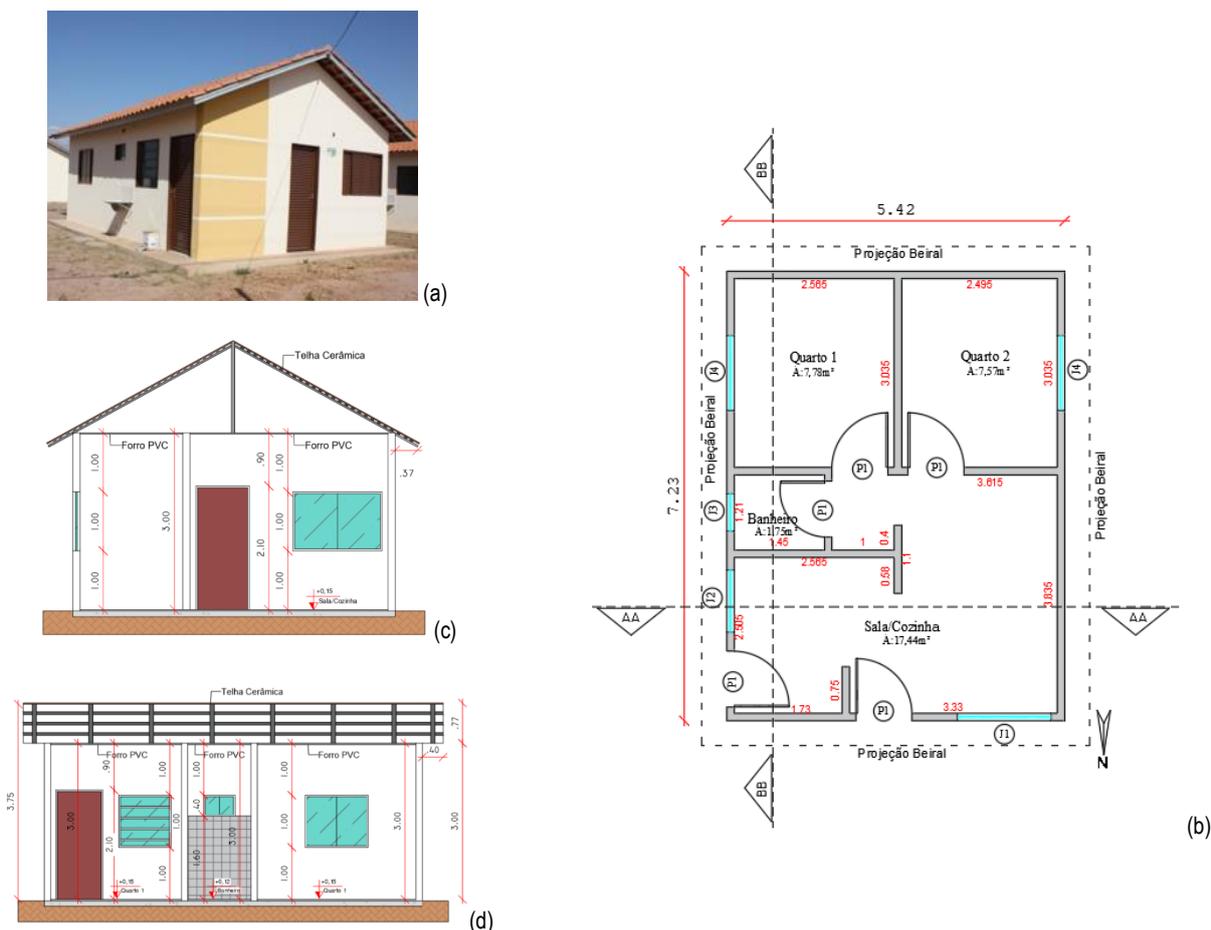
O caminho metodológico consistiu das etapas abaixo relacionadas e a seguir descritas:

- a) Caracterização da edificação objeto de estudo;
- b) Determinação dos parâmetros climáticos do dia típico de projeto de verão e inverno, conforme método proposto por Akutsu e Vittorino (1998), a partir de um banco de dados climáticos de 1999-2009;
- c) Determinação dos parâmetros climáticos do dia típico de projeto de verão e inverno, conforme adaptação do método proposto pela NBR 15575 (ABNT, 2013);
- d) Determinação dos procedimentos de simulação para os algoritmos de cálculo da irradiação solar:
 - d.1) Modelo de céu ASHRAEClearness;
 - d.2) Modelo de céu ASHRAETau Model e
 - d.3) Modelo de céu ZhangHuang.
- e) Simulação computacional do desempenho térmico da habitação considerando a influência do dia típico e dos modelos de céu.

Caracterização do objeto de estudo

Tomou-se como objeto de estudo uma habitação residencial unifamiliar com 34,95 m² e 34,18 m² de área total e útil, respectivamente, contendo os ambientes Sala/Cozinha (15,80 m²), Quarto 01 (7,54 m²), Quarto 02 (7,77 m²) e Banheiro (1,73 m²) (Figura 1). A fachada principal é orientada a Norte. O sistema de vedação vertical é em alvenaria de tijolos cerâmicos de oito furos revestidos em ambas as faces e o sistema de vedação horizontal é de telhas de barro sobre laje de concreto, com resistência térmica da câmara de ar de 0,21 m²K/W, alta emissividade, espessura maior que 5 cm, cujas propriedades termofísicas dos materiais construtivos e tipologias das aberturas constam nas Tabelas 2 e 3.

Figura 1 - Edificação de Estudo (a), Planta Baixa (b), Corte transversal (c) e Corte longitudinal (d)



Fonte: Adaptado de Caixa Econômica Federal (2018)

Tabela 2 – Propriedades termofísicas dos materiais construtivos

Envoltória	Composição	Espessura (cm)	α	c (J/Kg.K)	γ (W/m ² K)	ρ (Kg/m ³)
Paredes	Argamassa externa	1,5	0,30	1000	1,15	2000
	Tijolo Cerâmico	9,0	0,85	920	0,90	1600
	Argamassa interna	1,5	0,30	100	1,15	2000
Cobertura	Telha Cerâmica	1,0	0,85	920	0,90	1600
	Laje de Concreto	10,0	0,30	1000	1,75	2400

Nota: Absortância (α), Calor Específico (c), Condutividade Térmica (γ), Densidade (ρ). Fonte: Adaptado de NBR 15.220 (ABNT, 2005).

Tabela 3 – Tipologias das aberturas

Janelas	Ambientes de permanência prolongada			
	Sala	Cozinha	Quarto 1	Quarto 2
Dimensões (m)	1,50x1,00	1,00x1,00	1,20x1,00	1,20x1,00
Área (m ²)	1,50	1,00	1,20	1,20

Fonte: os autores.

Determinação do dia típico de projeto de verão e inverno conforme Akutsu e Vittorino (1998)

Na metodologia de Akutsu e Vittorino (1998), obtêm-se os dias típicos de projeto por meio de análise estatística dos valores médios, máximos e mínimos diários dos parâmetros climáticos considerando um período mínimo de dez anos. Consiste em tratar os dados climáticos definindo os meses mais quentes e os mais frios, os quais determinam os períodos de verão e inverno, respectivamente. Detalham-se, a seguir, os procedimentos para a obtenção do dia típico de verão e inverno para a cidade de Cuiabá/MT. Os dados climáticos compreendem o período de 1999 a 2009, obtidos no Banco de Dados Meteorológicos para Ensino e Pesquisa do Instituto Nacional de Meteorologia – INMET (BANCO DE DADOS METEOROLÓGICOS, 1999 a 2009).

Seleciona-se o mês mais quente de cada ano do período dos dados disponibilizados, utilizando-se as médias das temperaturas máximas diárias para a definição dos meses de verão, sendo que o mês mais quente é representado por aquele que apresentar maior média das temperaturas máximas (TBSmáx). O período de verão é composto pelo mês mais quente, o qual é identificado como mês de referência, e pelos meses que apresentarem uma diferença de até α °C do mês de referência (Equação 01). Para o período de inverno o processo é análogo, sendo representado pelo mês mais frio aquele que apresentar menor média das temperaturas mínimas diárias.

$$\alpha = 0,10 (TBSmáx - TBSmín) \quad \text{Eq. (1)}$$

Em que:

- α = diferença (°C);
- TBSmáx = temperatura de bulbo seco máxima (°C); e,
- TBSmín = temperatura de bulbo seco mínima (°C).

A próxima etapa consiste na definição da sequência de meses mais quentes para o período de verão e de meses mais frios para o período de inverno, em ordem de importância, para a determinação do mês e ano climáticos. Para tanto, separam-se os meses mais quentes e mais frios correspondentes ao período analisado, ordena-se de forma decrescente a TBSmáx para verão e a TBSmín para inverno, selecionando-se o conjunto das doze maiores ocorrências de meses não repetidos, ou seja, eliminam-se as eventuais ocorrências de TBSmáx e TBSmín em meses iguais, para que o ano típico de verão e inverno não tenha meses repetidos em sua composição. Considera-se o mês de verão aquele que obtiver maior média de TBSmáx e o mês de inverno aquele que obtiver maior média de TBSmín dentre todos os meses do ano climático.

Para estes meses, determinam-se as temperaturas máximas diárias (Tmáxdíaria) e as temperaturas mínimas diárias (Tmíndíaria), que serão correspondentes aos níveis de Frequência de Ocorrência Acumulada (FOA) de 10% (nível de exigência utilizado para avaliação de desempenho térmico das edificações) (SOARES; SILVA, 2017). Analisam-se os dias desse mês típico, que deve conter as seguintes variáveis climáticas: temperatura máxima (TBSmáx), temperatura mínima (TBSmín), umidade relativa do ar (UR), radiação solar (RS), velocidade do vento (VV), direção do vento (DV), pressão barométrica (P) e

amplitude (A), por meio de um extrato (Equação 02). O mesmo procedimento se faz para o dia típico de inverno, considerando a Equação 3.

$$TBSmáx = (TVn) \pm \varepsilon \quad \text{Eq. (2)}$$

$$TBSmín = (TVn) \pm \varepsilon \quad \text{Eq. (3)}$$

Em que:

- TBSmáx = temperatura de bulbo seco máxima (°C);
- TBSmín. = temperatura de bulbo seco mínima (°C);
- TVn = temperatura de verão correspondente à frequência acumulada de 10% (°C); e,
- ε = corresponde a $\pm 0,5$ (°C).

Encontrando-se mais de um dia que satisfaça essa condição, os mesmos são relacionados com todas as suas variáveis climáticas diárias (temperatura do ar máxima - TBSmáx e mínima - TBSmín, umidade relativa média - UR e velocidade média - VV). Na sequência, calcula-se o valor médio de cada uma dessas variáveis (para todos os dias relacionados) e a diferença quadrática entre esse valor médio dos dias e o valor da variável climática de cada dia. O valor do desvio quadrático de cada variável é então somado, determinando-se o somatório dos desvios quadráticos das variáveis em relação aos respectivos valores médios. O dia que resultar em menor somatório do desvio quadrático é considerado o dia típico de projeto para o período de verão e para o período de inverno (Equação 4).

$$\Sigma \text{desvios} = (TBSmáx_{\text{média dias}} - TBSmáx)^2 + (TBSmín_{\text{média dias}} - TBSmín)^2 + (UmidRel_{\text{média dias}} - UmidRel)^2 + (Vel_{\text{média dias}} - Vel)^2 \quad \text{Eq. (4)}$$

Determinação do dia típico de projeto de verão e inverno conforme método adaptado da NBR 15575 (ABNT, 2013)

Considerando que a NBR 15575 (ABNT, 2013) não traz o dia e o mês a que se refere o dia típico estabelecido e que os dados de velocidade do vento e direção do vento não são especificados (Tabela 4), buscou-se um dia típico no arquivo climático EnergyPlus Weather Data (EPW), com valores coincidentes ou próximos às temperaturas máximas e mínimas citadas pela norma.

Para o dia típico de verão, identificaram-se os dias em que ocorre a temperatura máxima especificada na norma (37,8 °C) e, para maior confiabilidade na escolha de um dia semelhante ao especificado (D), aplicou-se um extrato (Equação 05), onde Tmáx é a temperatura máxima correspondente na NBR 15575 (ABNT, 2013) e ε corresponde a $\pm 0,5$ °C. Já para inverno, identificaram-se os dias que a temperatura mínima especificada na norma ocorre (11,4 °C) e aplicou-se um extrato (Equação 05), para maior confiabilidade na escolha de um dia semelhante.

$$D = (Tmáx) \pm \varepsilon \quad \text{Eq. (5)}$$

Em que:

D = dia semelhante ao da norma NBR 15575 (ABNT, 2013);

Tmáx = temperatura máxima (°C);

ε = corresponde a $\pm 0,5$ (°C).

Tabela 4 – Parâmetros climáticos do dia típico de verão e inverno para a cidade de Cuiabá, considerando a NBR 15575 (ABNT, 2013)

Variáveis Climáticas	Verão	Inverno
Dia e Mês	Não especificado	Não especificado
Temperatura máxima diária (°C)	37,8	11,4
Temperatura de bulbo úmido (°C)	24,8	20,1
Amplitude térmica diária (°C)	12,4	14,3
Radiação solar (Wh/m ²)	4972	4163
Umidade relativa (%)		
Pressão atmosférica (Pa)		
Velocidade do vento (m/s)	Não especificado	Não especificado
Direção do vento (°)		
Nebulosidade	6	4

Fonte: NBR 15.575 (ABNT, 2013)

Os valores não especificados na tabela da norma foram tomados como sendo os do dia típico do arquivo EPW. Destaca-se que a NBR 15575 (ABNT, 2013) não especifica a qual componente da radiação se refere (radiação solar global, direta, difusa), tendo sido tomado o valor da radiação solar direta, em função da coerência de sua ordem de grandeza. Da mesma forma, não faz referência aos algoritmos de cálculo da irradiação solar (modelos de céu) tomados para simular o dia típico, tendo sido adotado como parâmetro padrão nas simulações o modelo ASHRAEClearSky (no menu do EnergyPlus “Sizing Period Design Day”, variável “Solar Model Indicator”). Os dados de nebulosidade deixados em branco (no menu do EnergyPlus “Sizing Period Design Day”, variável “Sky Clearness”).

Procedimentos de simulação para os algoritmos de cálculo da irradiação solar

O software EnergyPlus traz quatro algoritmos de cálculo da irradiação solar (Solar Model Indicator) - ASHRAEClearSky, ASHRAETau, Zhang Huang e Schedule – que estimam condições de radiação solar, baseados em dados de clareza do céu ou de porcentagem de cobertura de nuvens. Apesar da radiação solar não ser utilizada na modelagem do dia típico de projeto no EnergyPlus, a NBR 15575 (ABNT, 2013) apresenta apenas o somatório da radiação solar diária para o dia típico, e não sua distribuição horária, o que não permite que essa variável possa ser utilizada para fins de comparação com aquela geradas pelos modelos irradiação solar

De acordo com o Enginerring Reference (ENERGYPLUS, 2017), a ASHRAE ClearSky é o modelo mais utilizado para simulações nos estados americanos com clima temperado, podendo ser indicado para climas semelhantes. É usado para estimar radiação solar diária de um dia claro, em qualquer mês do ano, no hemisfério norte ou nos Estados Unidos. O modelo é representado pela Equação 06.

$$\text{Irradiação Normal Direta} = A/\exp(B/\sin\beta) \quad \text{Eq. (6)}$$

Em que:

A = Irradiação solar aparente na massa de ar (W/m²);

B = Coeficientes de extinção atmosférica; e,

β = altitude solar (°).

Os valores A e B variam durante o ano devido às mudanças sazonais, ao conteúdo de poeira e ao vapor de água da atmosfera (Tabela 5). A equação não fornece o valor máximo da irradiação normal direta, mas produz valores a partir da Irradiação Solar Extraterrestre (I_0), representativos de condições em dias sem nuvens para uma atmosfera relativamente seca e limpa, no 21º dia de cada mês do ano base de 1964.

Tabela 5 – Parâmetros A e B utilizados para estimar a Irradiação Normal Direta no modelo ASHRAE ClearSky.

Meses	I_0^1 (W/m ²)	Equação do Tempo (min.)	Declinação (°)	A (W/m ²)	B (adimensional)
Janeiro	1416	-11,20	-20,00	1202	0,141
Fevereiro	1401	-13,90	-10,80	1187	0,142
Março	1381	-7,50	0,00	1164	0,149
Abril	1356	1,10	11,60	1130	0,164
Mai	1336	3,30	20,00	1106	0,177
Junho	1336	-1,40	23,45	1092	0,185
Julho	1336	-6,20	20,60	1093	0,186
Agosto	1338	-2,40	12,30	1107	0,182
Setembro	1359	7,5	0,00	1136	0,165
Outubro	1380	15,40	-10,50	1166	0,152
Novembro	1405	13,80	-19,80	1190	0,144
Dezembro	1417	1,60	-23,45	1204	0,141

Nota: ¹ I_0 se refere a Irradiação Solar Extraterrestre. Fonte: Engineering Reference (ENERGYPLUS, 2017);

A ASHRAE (2009) traz um modelo de céu limpo revisado a partir do ASHRAEClearSky denominado ASHRAETau, que se baseia nas radiações direta e difusa. Estes valores são tabulados por mês para 5.564 locais. O modelo requer massa de ar (m) (Equação 07), sendo que β é altitude solar em graus.

$$m = 1 / [\sin\beta + 0.50572 * (6.07995 + \beta) e^{-1.6364}] \quad \text{Eq. (7)}$$

Em que:

- m = massa de ar; e,
- β = altitude solar (°).

As irradiâncias direta e difusa são determinadas a partir da Irradiação Solar Extraterrestre (I_0) pelas Equações 08 e 09, respectivamente. Os valores de τ_b e τ_d são específicos da localização e variam durante o ano. Os expoentes da massa de ar “ab” e “ad” foram correlacionados com τ_b e τ_d por meio das relações empíricas expressas nas Equações 10 e 11.

$$E_b = I_0 \cdot \exp[-\tau_b \cdot m^{ab}] \quad \text{Eq. (8)}$$

$$E_d = I_0 \cdot \exp[-\tau_b \cdot m^{ad}] \quad \text{Eq. (9)}$$

$$ab = 1,219 - 0,043 * \tau_b - 0,151 * \tau_b - 0,204 * \tau_b * \tau_d \quad \text{Eq. (10)}$$

$$ad = 0,202 - 0,852 * \tau_b - 0,007 * \tau_b - 0,357 * \tau_b * \tau_d \quad \text{Eq. (11)}$$

Em que:

- E_b = irradiação normal do feixe (W/m²),
- E_d = irradiação horizontal difusa (W/m²);
- I_0 = irradiação normal extraterrestre (W/m²);
- m = massa de ar;
- τ_b e τ_d = feixe e profundidade óptica difusa; e,
- ab e ad = feixe e expoentes de massa de ar difusa.

Para este modelo, há a necessidade de se considerar o valor da nebulosidade (em oitavas). Desta forma, adotaram-se, nesta pesquisa, os valores de nebulosidade estabelecidos na NBR 15575 (ABNT, 2013) e apresentados na Tabela 4.

O modelo de céu denominado ZhangHuang foi desenvolvido para o uso inicial na modelagem de anos meteorológicos típicos para a China e países da Ásia, sendo

considerado adequado para aplicação em outros locais, pelo Engineering Reference (ENERGYPLUS, 2017). Neste método, a radiação solar total (horizontal global) é estimada pela cobertura total de nuvem, temperatura do bulbo seco, umidade relativa, velocidade do vento (Equação 12) (KUBO, 2017),

$$I=[E_0 \cdot \sin(h) \cdot (c_0 + c_1 \cdot CC + c_2 + CC_2 + c_2 + (T_n - 3)) + c_4 \cdot \varphi + c_5 \cdot VW] + d / k \quad \text{Eq. (12)}$$

Em que:

- I= Radiação solar por hora (W/m²);
- E₀= Constante solar global (1355 W/m²);
- H= ângulo de altitude solar (o ângulo entre a horizontal e a linha do sol);
- CC= Cobertura de nuvem;
- φ=umidade relativa (%);
- T= temperatura de bulbo seco (°C);
- T_{n-3}= temperatura de bulbo seco menos 3°C;
- VW= velocidade do vento (m/s); e,
- d e K = coeficientes de regressão, sendo d = -17,853 e K=0,843.

Na sequência metodológica, simularam-se, para os dias típicos de verão e de inverno determinados pelos dois métodos- Akutsu e Vittorino (1998) adaptação da NBR 15575 (ABNT, 2013), os algoritmos de cálculo da irradiação solar ASHRAEClearness, ZhangHuang e ASHRAETau.

Na aplicação do método de determinação do dia típico conforme Akutsu e Vittorino (1998), o banco de dados disponibilizado não dispunha da variável nebulosidade, que foi determinada por meio da razão de nebulosidade (TERAMOTO; ESCOBEDO, 2012). A razão de nebulosidade expressa o número de horas em que o Sol ficou encoberto por nuvens, por meio da Equação 13.

$$\Phi = 1 - (n/N) \quad \text{Eq. (13)}$$

Em que:

- Φ = razão de nebulosidade expressa o número de horas em que o Sol ficou encoberto por nuvens;
- n= número de horas de brilho solar;
- N= fotoperíodo - duração do dia em relação à noite em um tempo de 24 horas.

O fotoperíodo foi estimado para os dias típicos conforme procedimentos estabelecidos em Ometto (1981). A condição de céu hora a hora do dia, requerida na variável “n”, foi obtida em um sítio eletrônico que agrega um banco de dados de várias estações meteorológicas ao redor do planeta (WEATHER COMPANY, 2017). A partir da definição da data dos dias típicos no banco de dados do INMET (BANCO DE DADOS METEOROLÓGICOS, 1999 a 2009), acessou-se o sítio eletrônico e quantificou-se, manualmente, o número de horas com nebulosidade e o número de horas de brilho solar, o que permitiu identificar a razão de nebulosidade destes dias.

Resultados

Dia típico de verão e inverno conforme Akutsu e Vittorino (1998)

Os anos típicos do período analisado (1999 a 2009) são os correspondentes a 1999, 2000, 2001, 2003, 2004, 2005, 2006, 2007, 2008 e 2009, com as maiores médias das temperaturas máximas ocorrendo nos meses de agosto e setembro e as menores médias das temperaturas mínimas em maio, junho e julho (Tabela 6).

Aplicando-se a metodologia de Akutsu e Vittorino (1998) para o dia típico de verão, setembro de 2007 é caracterizado como o mês e ano mais quente do período analisado. Aplicando a Frequência de Ocorrência Acumulada (FOA) de 10% e o intervalo $\epsilon \pm 0,5$ no mês 09/2007 identificam-se nove dias típicos (Tabela 6). O mês de julho de 2000 é caracterizado como o mês e ano mais frio do período analisado. Aplicando a Frequência de Ocorrência Acumulada (FOA) de 10% e o intervalo $\epsilon \pm 0,5$ no mês 07/2000 identificam-se três dias típicos (Tabela 7).

Tabela 6 – Médias das temperaturas máximas e mínimas de 1999 a 2009

Ano	Temp	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
1999	Máx.	33,2	33,8	32,5	33,0	32,2	32,1	31,7	34,5	36,1	34,8	33,1	33,4
	Mín.	23,6	23,5	21,3	21,9	19,2	18,8	17,5	17,9	22,8	23,4	22,2	23,8
2000	Máx.	33,6	32,4	31,9	33,1	31,9	32,1	30,3	35,0	33,5	35,6	33,0	32,5
	Mín.	24,3	23,7	23,2	22,6	20,2	18,6	15,5	20,4	22,0	23,4	23,3	23,7
2001	Máx.	33,3	34,2	32,8	34,0	30,9	30,8	33,5	36,4	35,2	34,4	33,1	31,9
	Mín.	23,3	23,3	22,6	22,5	19,3	15,8	17,7	18,6	20,9	21,4	21,9	21,7
2003	Máx.	32,8	33,0	32,8	32,8	32,6	33,2	32,4	33,0	34,7	34,3	33,4	34,4
	Mín.	23,4	22,4	22,8	21,5	19,6	18,3	16,5	17,7	20,5	22,1	22,1	23,2
2004	Máx.	32,3	32,0	34,4	33,5	28,1	31,3	31,0	33,8	36,1	34,8	33,7	34,3
	Mín.	23,4	22,8	22,9	22,5	18,8	17,6	17,4	17,9	21,4	22,7	22,1	23,0
2005	Máx.	32,3	33,5	32,7	31,8	33,2	31,3	31,3	35,5	32,2	35,1	33,9	33,2
	Mín.	23,3	22,8	22,9	21,6	20,6	17,6	16,3	19,4	19,6	22,9	23,2	22,8
2006	Máx.	32,7	32,9	32,9	32,1	29,9	33,1	33,1	34,5	33,6	33,1	34,0	33,0
	Mín.	22,8	22,7	22,9	22,0	17,4	18,6	17,9	19,5	21,0	23,0	22,7	23,1
2007	Máx.	33,3	32,8	34,1	34,2	30,9	30,2	31,5	33,5	37,3	35,3	33,4	33,7
	Mín.	23,7	22,9	22,6	22,3	18,3	17,9	16,7	17,4	22,0	22,9	22,8	22,7
2008	Máx.	32,0	33,0	32,8	32,5	30,8	29,7	34,7	36,9	35,5	35,7	35,3	33,7
	Mín.	22,6	22,4	22,4	21,4	18,8	17,5	16,9	20,1	19,8	22,8	23,1	22,7
2009	Máx.	34,5	33,5	33,7	33,5	32,9	29,6	32,5	34,8	34,5	35,1	34,7	33,2
	Mín.	22,3	22,8	23,0	22,0	20,5	17,6	17,9	19,0	21,7	23,1	23,5	22,9

Fonte: os autores.

Tabela 7 – Dias selecionados pela FOA do período (1999 a 2009)

Condição	Dia	Máx (°C)	Mín (°C)	UR (%)	VV (m/s)	Radiação (W/m²)	Amplitude (°C)	Pressão (hPa)	Erro Quadrático
Verão	29/09	40,5	22,6	35,5	1,3	6660	17,8	1012,1	74,3
	30/09	40,5	23,0	31,7	1,3	7344	17,5	1011,1	149,6
	13/09	40,0	22,8	39,8	2,5	4536	17,2	1008,7	17,8
	22/09	40,0	26,2	45,8	1,3	6948	13,7	1009,8	18,1
	14/09	39,8	24,5	33,8	2,5	4644	15,3	1009,2	103,1
	10/09	39,5	22,6	39,1	1,3	5220	16,8	1010,5	24,0
	19/09	39,5	23,8	62,5	2,5	5616	15,6	1011,2	353,0
	24/09	39,5	22,4	62,7	4,7	2520	17,1	1018,0	357,7
Inverno	13/07	15,1	8,6	67,	2,0	-	23,7	-	90,41
	17/07	19,0	9,8	57,0	1,40	-	9,20	-	98,66
	18/07	27,9	10,2	65,7	1,30	-	17,70	-	60,64

Fonte: os autores.

Os dias típicos de verão e inverno para o período, na cidade de Cuiabá, são respectivamente 13/09/2007 e 18/07/2000, com os menores erros quadráticos sendo 17,85 e 60,64, respectivamente (Tabela 8).

O fotoperíodo estimado foi de 11,56 com horários de nascer e pôr de sol 05h 42min e 17h 38min para o dia típico de verão, e 11,15 horas, 6h 12min e 17h 28 min, respectivamente, para o inverno. Desta forma, considerou-se 9h 38min de nebulosidade e aproximadamente 2h 18min de céu limpo para o dia de verão e nenhuma hora de nebulosidade e 11,15h de céu limpo para o dia de inverno (Tabela 8). Assim, procedeu-se a estimativa da razão de nebulosidade (Φ), conforme Equação 9, obtendo-se os valores de 0,80 e 0,00, respectivamente. Os parâmetros climáticos definidos para os dias típicos pelo método de Akutsu e Vittorino (1998) podem ser visualizados na Tabela 9.

Tabela 8 – Condições de céu em 13/09/2007 e 18/07/2000 obtido no sítio da Weather Company (2017)

Condições de céu	Horas do dia													
	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
13/09/2007	L	L	L	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N
18/07/2000	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L

Notas: N – nublado; L – céu limpo. Fonte: os autores.

Tabela 9 – Parâmetros climáticos derivados para os dias típicos de verão e inverno, conforme Akutsu e Vittorino (1998)

Variáveis Climáticas	Akutsu e Vittorino (1998)	
	Verão	Inverno
Dia e Mês	13/09	18/07
Temperatura máxima diária (°C)	40,0	-
Temperatura mínima diária (°C)	-	10,2
Temperatura de bulbo úmido (°C)	28,1	23,2
Amplitude térmica diária (°C)	17,2	17,7
Radiação solar (Wh/m ²)	4536	Não especificado ¹
Umidade relativa (%)	39,8	65,8
Pressão atmosférica (Pa)	1008,7	1015,2
Velocidade do vento (m/s)	2,5	1,3
Direção do vento (°)	0	0
Nebulosidade	8 ²	0

Notas: ¹ No ano de 2000, a INMET não dispunha na estação equipamento para medição da radiação solar horizontal; ² A nebulosidade varia de 0 a 10 na simulação do dia típico pelo programa EnergyPlus. Fonte: os autores.

Dia típico de verão e inverno conforme método adaptado da NBR 15575 (ABNT, 2013)

Para verão, foram encontrados doze dias que possuem valores de temperatura máxima próximos a 37,8 °C, estabelecido na NBR 15575 (ABNT, 2013), a saber: 15/08, 27/08, 28/08, 29/08, 16/09, 17/09, 04/10, 06/10, 11/10, 12/10, 13/10 e 15/10 cujas amplitudes são de 15,0 °C, 13,6 °C, 17,0 °C, 13,0 °C, 11,2 °C, 12,8 °C, 11,0 °C, 12,0 °C, 13,6 °C, 12,8 °C, 13,4 °C e 12,4 °C, respectivamente. Dentre todos, selecionou-se o dia 15/10, por apresentar valor de amplitude idêntico ao estabelecido na NBR 15575 (ABNT, 2013). Para inverno foram encontrados dois dias que possuem valores de temperatura mínima próximos a 11,4 °C, estabelecido na NBR 15575 (ABNT, 2013), a saber: 06/07 e 08/07, cujas amplitudes são 6,2 °C e 13,2 °C, respectivamente. Dentre os dois, selecionou-se o dia 08/07, por apresentar a amplitude térmica mais próxima ao valor normativo, que é de 14,3 °C. Os parâmetros climáticos obtidos por este método constam da Tabela 10.

Simulação computacional e a influência dos dias típicos e dos modelos de céu

Compararam-se os dias típicos obtidos pelos métodos de Akutsu e Vittorino (1998) e da NBR 15575 (ABNT, 2013). A diferença das temperaturas externas máximas entre os dias típicos de verão 15/10 (ABNT, 2013) e 13/09 (AKUTSU; VITTORINO, 1998) é de 2,2 °C. No dia 13/09 das 12 às 17 h, as temperaturas se mantiveram acima de 37 °C. Em 15/10, esse

período é menor, sendo das 14 às 16 h. Ressalta-se que às 15 h do dia 13/09, a temperatura alcança 40 °C (Figura 2).

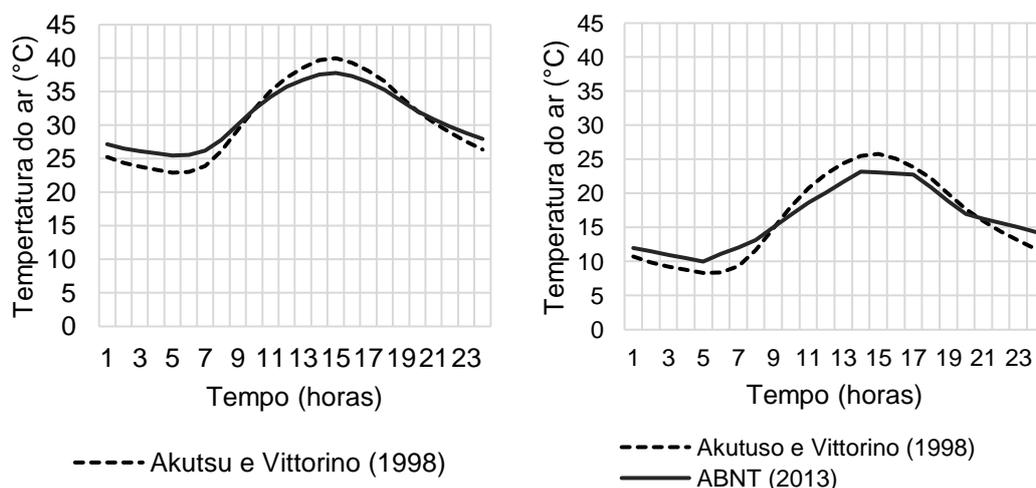
Tabela 10 – Parâmetros climáticos do dia típico de verão e inverno, conforme o método adaptado da NBR 15575 (ABNT, 2013)

Variáveis Climáticas	Método adaptado da NBR 15575 (ABNT, 2013)	
	Verão	Inverno
Dia e Mês	15/10	08/07
Temperatura máxima diária (°C)	37,8	-
Temperatura mínima diária (°C)	-	10,0
Temperatura de bulbo úmido (°C)	29,72	20,1
Amplitude térmica diária (°C)	12,8	13,2
Radiação solar (Wh/m ²)	6589	5008
Umidade relativa (%)	55,0	75,3
Pressão atmosférica (Pa)	9887	1000
Velocidade do vento (m/s)	0,3	1,7
Direção do vento (°)	0	0
Nebulosidade	7	0

Fonte: os autores.

Nos dias típicos de inverno, a diferença das temperaturas externas mínimas entre os dias 08/07 (ABNT, 2013) e 18/07 (AKUTSU; VITTORINO, 1998) é de 2,75 °C. No dia 18/07 das 12 às 18 h, as temperaturas se mantiveram acima de 20 °C. Em 08/07, esse período é maior, sendo das 11 às 18 h. Ressalta-se que às 05 h do dia 18/07, a temperatura chega a 8,33 °C (Figura 2).

Figura 2 – Marcha horária da temperatura do ar nos dias típicos de verão (esquerda) e Marcha horária da temperatura do ar nos dias típicos de inverno (direita)



Fonte: os autores.

Ao se considerar os dias típicos de verão, 13/09 e 15/10, sem atribuição de valor para a nebulosidade, a diferença (ΔT) entre as temperaturas máximas interna e externa foi de 11,4 °C e 9,7 °C, respectivamente, para a metodologia de Akutsu e Vittorino (1998) e da norma brasileira (ABNT, 2013) (Tabela 11). Conforme a NBR 15575-1 (ABNT, 2013), como a diferença foi superior a 4 °C, a decorrente classificação de desempenho da habitação foi superior. Nos dias típicos de inverno, 18/07 e 08/07, a diferença (ΔT) entre as temperaturas mínimas interna ($T_{i,min}$) e externa ($T_{e,min}$) foi de 7,7 e 7,5 °C, respectivamente (Tabela 11). Conforme a NBR 15575-1 (ABNT, 2013), a decorrente classificação de desempenho da habitação foi Superior.

Nota-se que as temperaturas internas no verão ficaram subestimadas em relação às demais simulações sem considerar modelo de céu (“Sky Clearness”). Este fato pode

estar relacionado à ausência de informações normativas sobre os dados dos dias típicos da norma brasileira, o que pode resultar em níveis de desempenho equivocados. Para o inverno, houve similaridade entre os resultados, com os modelos de céu investigados.

Tabela 11 – Classificação de desempenho da habitação nos dias típicos de verão e de inverno

Critérios de simulação	Temperatura máxima (verão) ou mínima (inverno)		ΔT	Classificação de desempenho		
	Interna	Externa				
Dia típico verão	13/09					
	Akutsu e Vittorino	28,6	40,0	11,4	Superior	
	15/10					
	NBR 15575	28,0	37,8	9,7	Superior	
Modelo de céu	13/09	ASHRAEClearSky	34,5		5,4	Superior
	Akutsu e Vittorino	ASHRAETau	28,6	40,0	11,3	Superior
		ZhangHuang	34,0		5,9	Superior
		ASHRAEClearSky	33,5		4,2	Superior
	15/10	ASHRAEClearSky	33,5		4,2	Superior
		ASHRAETau	28,0	37,8	9,7	Superior
ZhangHuang		34,3		3,4	Intermediário	
Dia típico inverno	18/07					
	Akutsu e Vittorino	18,0	10,3	7,7	Superior	
	08/07					
	NBR 15575	17,5	10,0	7,5	Superior	
Modelo de céu	18/07	ASHRAEClearSky	18,0		7,7	Superior
	Akutsu e Vittorino	ASHRAETau	18,0	10,3	7,7	Superior
		ZhangHuang	19,3		9,3	Superior
		ASHRAEClearSky	18,5		8,5	Superior
	08/07	ASHRAEClearSky	18,5		8,5	Superior
		ASHRAETau	17,3	10,0	7,3	Superior
ZhangHuang		19,2		9,2	Superior	

Fonte: os autores.

Para o dia típico de verão, no modelo de céu ASHRAEClearSky, a diferença entre a temperatura interna máxima da edificação obtidas entre os dias típicos foi de 1 °C (34,5 °C em 13/09 e 33,5 °C em 15/10). No modelo ASHRAETau e Zhang Huang, as diferenças foram de 0,6 °C e -0,3 °C, respectivamente, inferiores ao ASHRAEClearSky. Os modelos ASHRAEClearSky e ASHRAETau enquadraram a classificação de desempenho da habitação como Superior, conforme a NBR 15575-1 (ABNT, 2013), e o modelo Zhang Huang, como Intermediário. Destaca-se que o modelo de céu ASHRAETau, no verão, apresentou resultados superiores aos demais (maiores diferenças entre a temperatura máxima externa e interna). Como se pode constatar pelos níveis de desempenhos alcançados, o modelo de céu influencia na classificação do edifício.

Para os dias típicos de inverno, no modelo de céu ASHRAEClearSky a diferença entre as temperaturas internas mínimas da edificação obtidas entre os dias típicos foi de -0,5 °C (18,0 °C em 18/07 e 18,5 °C em 08/07). No modelo ASHRAETau e Zhang Huang, as diferenças foram de 0,7 °C e 0,1 °C, respectivamente. O modelo ASHRAETau foi o que apresentou maior diferença no inverno. Todos os modelos enquadraram a classificação de desempenho da habitação como superior, conforme a NBR 15575-1 (ABNT, 2013). Diferentemente do verão, o modelo de céu ZhangHuang obteve resultados superiores aos demais (maiores diferenças entre a temperatura mínima externa e interna). Nesse sentido, o uso de um único modelo de céu para o dia típico de verão e de inverno poderia levar a resultados de desempenho mais favoráveis em uma estação do que em outra.

Conclusão

Os dados climáticos da região onde uma habitação é edificada são importantes parâmetros para avaliação do desempenho térmico da mesma. Com vistas a conduzir

essa avaliação, são necessários dados horários referentes à radiação solar, temperatura do ar, umidade relativa do ar, velocidade e direção do vento e pressão atmosférica.

Ao se determinar os dias típicos de verão e inverno, notou-se que as temperaturas máximas e as amplitudes térmicas obtidas pelo método de Akutsu e Vittorino (1998) foram maiores do que as obtidas pelo método da NBR 15575-1 (ABNT, 2013). Isso decorre do uso de bancos de dados distintos, uma vez que, para o primeiro método, utilizou-se de dados de INMET (BANCO DE DADOS METEOROLÓGICOS, 1999 a 2009) e, para o segundo, utilizou-se de dados do arquivo EPW. Por este motivo, o primeiro método acabou impondo condições térmicas mais severas que as sugeridas pela NBR 15575 (ABNT, 2013).

As simulações com modelo de céu padrão e sem atribuição de valor para a nebulosidade (variável “Sky Clearness” no Schedule da modelagem do dia típico de projeto) resultaram, no verão, em temperaturas internas subestimadas tanto para os dias típicos determinados pela metodologia de Akutsu e Vittorino (1998) quanto pela da NBR 15575-1 (ABNT, 2013). Recomenda-se, portanto, que este modelo de simulação seja utilizado com critérios explícitos, uma vez que a classificação de desempenho resultante depende das informações dos dias típicos utilizadas como dados.

Com relação às simulações com diferentes modelos de céu (ASHRAEClearSky, ASHRAETau, ZhangHuang), nas quais a nebulosidade foi ajustada de acordo com os dados dos dias típicos de projeto, o modelo ASHRAETau resultou em temperaturas internas subestimadas no verão, não sendo, portanto, recomendada sua utilização, em virtude da elevada diferença quantificada (superior a 5,5 °C em relação aos outros modelos). Por outro lado, no inverno, o modelo ZhangHuang proporcionou temperaturas internas mais elevadas do que as outras duas opções de modelo de céu, (diferença máxima foi de 1,9 °C em relação aos outros modelos). Evidenciou-se, assim, que os modelos de céu influenciam na classificação do desempenho do edifício, uma vez que no verão foram observadas diferenças entre os modelos testados, para o caso aqui apresentado. Outro aspecto importante a ser destacado é que o uso de um único modelo de céu para ambos os dias típicos poderia levar a resultados de desempenho mais favoráveis em uma estação do que em outra, o que deve ser analisado caso a caso.

Nesse sentido, com intuito de determinar qual modelo de céu (ASHRAEClearSky ou ZhangHuang) é capaz de representar mais adequadamente o comportamento das temperaturas internas dos edifícios, recomenda-se que sejam feitas campanhas de monitoramento, tanto no verão quanto no inverno, das variáveis meteorológicas externas e internas do edifício. De posse destes dados, pode-se calibrar as simulações com vistas a identificar os modelos de céu que mais fidedignamente representam as temperaturas internas medidas. As medições devem ser realizadas de acordo com as prerrogativas da norma (ABNT, 2013), ou seja, o edifício deve estar sem presença de ocupação/ uso de equipamentos e ventilação ocorrendo apenas pelas frestas das aberturas.

Agradecimentos

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Mato Grosso (FAPEMAT) pela bolsa de mestrado concedida no período de elaboração deste artigo, sob número de edital 017/2015. Ao Laboratório de Tecnologia e Conforto Ambiental (LATECA) da Universidade Federal de Mato Grosso.

Referências

- ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15220**: Desempenho térmico de edificações. Rio de Janeiro, 2005.
- ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15575-1**: Edifícios habitacionais – Desempenho. Rio de Janeiro, 2013.
- AKUTSU, M. **Método para avaliação do desempenho térmico de edificações no Brasil**. 1998, 156 f, Tese (Doutorado em Arquitetura) – Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1998.
- AKUTSU, M., VITTORINO, F. **Tratamento de dados climáticos para a avaliação do desempenho térmico de edificações Manual de Procedimentos** (Aplicação à Cidade de São Paulo) - Anexo I. São Paulo, 1998. Publ. IPT 1732, 1998.
- ASHRAE - AMERICAN SOCIETY OF HEATING, REFRIGERATING AND AIR-CONDITIONING ENGINEERS. **Handbook – Fundamentals**. Atlanta: ASHRAE, 2009.
- BANCO DE DADOS METEOROLÓGICOS. Dados Históricos Anuais. In: INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA. **INMET Dados Meteorológicos**. Brasília, DF: INMET, [1999 a 2009]. Disponível em: <http://www.inmet.gov.br/portal/>. Acesso em: 9 mai. 2019.
- BRITO, A. C.; AKUTSU, M.; VITTORINO, F.; AQUILINO, M. M. Contribuições Para o Aprimoramento da NBR 15575 Referente ao Método Simplificado de Avaliação de Desempenho Térmico de Edifícios. In: ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 14. Juiz de Fora, 2012. **Anais [...]**. Juiz de Fora: ENTAC, 2012.
- ENERGYPLUS DOCUMENTATION. **Engineering Reference**. U.S Department of Energy, v. 8.8.0, California, 2017.
- FERREIRA, C. C.; PEREIRA, I. M. Avaliação do desempenho térmico de habitação de interesse social de acordo com a NBR 15575, para as diversas zonas bioclimáticas. In: ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 14., Juiz de Fora, 2012. **Anais [...]**. Minas Gerais: ANTAC, 2012.
- GONÇALVES, O. M. et al. Normas técnicas para avaliação de sistemas construtivos inovadores para habitações. In: ROMAN, H.; BONIN, L. C. (ed.) **Coletânea Habitare: Normalização e certificação na construção habitacional – Vol. 3**. Porto Alegre: ANTAC, 2003.
- KUBO, G. K. **A influência das variáveis do Design Day, consideradas na simulação com o EnergyPlus desconsideradas pela NBR 15.575/2013, nos resultados de desempenho térmico de edificações**. 2017. Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, 2017.
- OMETTO, J. C. **Bioclimatologia vegetal**. São Paulo: Ceres, 1981. 440p.
- SHELLER, C; SORGATO, M. J; MELO, A. P; LAMBERTS, R. **Análise de Arquivos Climáticos para a Simulação do Desempenho Energético de Edificações**. Florianópolis: Centro Brasileiro de Eficiência em Edificações, 2015.
- SIQUEIRA, T. C. P. A.; AKUTSU, M.; LOPES, J. I. E.; SOUZA, H. Ar. de. Dados climáticos para avaliação de desempenho térmico de edificações. **Rem: Rev. Esc. Minas**. v.58, n.2, p.133-138, 2005. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/S0370-44672005000200007>
- SOARES, M. M.; SILVA, A. C. S. B. da. Análise e compatibilização dos métodos simplificado e por simulação da NBR 15575: zona bioclimática 2. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 17, n. 1, p. 305-327, jan./mar. 2017. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/s1678-86212017000100137>
- SORGATO, M. J.; MELO, A. P.; LAMBERTS, R. Análise do Método de Simulação de Desempenho Térmico da Norma NBR 15575. In: ENCONTRO NACIONAL DE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 12. Brasília, 2013. **Anais [...]**. Brasília: ANTAC, 2013.

SORGATO, M. J.; MELO, A. P.; LAMBERTS, R. Análise do método de simulação de desempenho térmico da norma NBR 15.575. **Paranoá: cadernos de arquitetura e urbanismo**, v. 12, n. 12, 29 set. 2014. DOI: <https://doi.org/10.18830/issn.1679-0944.n12.2014.12205>

TERAMOTO, É. T.; ESCOBEDO, J. F. Análise da frequência anual das condições de céu em Botucatu, São Paulo. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.16, n.9, p.985–992, 2012. <http://dx.doi.org/10.1590/S1415-43662012000900009>

WEATHER COMPANY. Weather Underground: Weather Forecast & Reports. Disponível em: <https://www.wunderground.com/>. Acesso em: out, 2017.

WATANABE, T., URANO, Y.; HAYASHI, T. Procedures for Separating Direct and Diffuse Insolation on a Horizontal Surface and Prediction of Insolation on Tilted Surfaces (in Japanese). **Transactions of the Architectural Institute of Japan**. v. 330, p. 96-108, 1983. DOI: https://doi.org/10.3130/aijsaxx.330.0_96

ZHANG, Q. Y; HUANG, Y. J. Development of typical year weather files for Chinese locations. *ASHRAE Transactions*, v. 108, n. 2, 2002.

¹ **Emeli Lalesca Aparecida da Guarda**

Arquiteta e Urbanista. Mestre em Engenharia de Edificações. Doutoranda em Arquitetura e Urbanismo. Endereço postal: Rua Engenheiros Andrei Cristian Ferreira, s/n, Trindade, Florianópolis-SC, Brasil, 88040-900.

² **Luciane Cleonice Durante**

Engenheira Civil. Doutora em Física Ambiental. Professora do Departamento de Arquitetura e Urbanismo da Universidade Federal de Mato Grosso. Endereço postal: Av. Fernando Correa da Costa, nº 2367, Bairro Boa Esperança, Cuiabá – MT, Brasil, 78060-900.

³ **Ivan Julio Apolonio Callejas**

Engenheiro Civil. Doutor em Física Ambiental. Professora do Departamento de Arquitetura e Urbanismo da Universidade Federal de Mato Grosso. Endereço postal: Av. Fernando Correa da Costa, nº 2367, Bairro Boa Esperança, Cuiabá – MT, Brasil, 78060-900.