

Analysis of the norm NBR 15220-2: the origin of the values of convective coefficients and consequences on the thermal design of buildings

Análise da norma NBR 15220-2: a origem dos valores dos coeficientes convectivos e suas consequências no projeto térmico de edificações

Monalisa Coelho Martins¹
monalisa.cmartins@gmail.com

Aloísio Leoni Schmid¹
iso@ufpr.br

¹Universidade Federal do Paraná – UFPR
Programa de Pós-Graduação em Engenharia de
Construção Civil

Abstract: The thermal performance of buildings makes out a relevant share of their energy efficiency. In this context, convective coefficients play an important role in heat exchanges. These coefficients are dependent on the environment. The Brazilian standard NBR 15220-2 suggests average values of convective coefficients to be used throughout the country. The method that resulted in these values is not described in the norm. By means of a documental research, the method was identified and its origin was found in an international standard that prioritized cold climates, which are different from the Brazilian reality. In this paper, other methods were compared with the NBR

method for the thermal calculation in several regions of Brazil. Different results were obtained. Three distinct regions were identified in the country where the NBR method can result in oversizing, undersizing or adequate thermic conditioning systems, evidencing the importance of more detailed analyses of different methods under different climate conditions.

Keywords: Thermal performance of buildings, convective coefficient, energy efficiency.

Resumo: O desempenho térmico dos edifícios corresponde a uma parte relevante da sua eficiência energética. Nesse contexto, os coeficientes convectivos desempenham um papel importante nas trocas de calor. Esses coeficientes são dependentes de condições ambientais. A norma NBR 15220-2 sugere valores médios de coeficientes convectivos a serem utilizados em todo o país. O método que resultou nesses valores não está descrito na norma. Após pesquisa documental, o método foi identificado e a origem dele está contida em uma norma internacional que priorizou os climas frios, diferentes da realidade brasileira. Neste trabalho, outros métodos foram comparados com aquele da NBR, e usados para o cálculo térmico em diversas regiões do Brasil. Diferentes resultados foram obtidos. Três regiões distintas foram identificadas no país onde o método NBR pode resultar em sistemas de condicionamento térmico superdimensionado, subdimensionado ou apropriado, evidenciando a importância de análises mais detalhadas de diferentes métodos em diferentes condições climáticas.

Palavras-Chave: Desempenho térmico de edificações, coeficiente convectivo de transferência de calor, eficiência energética.

1 Introdução

Um dos requisitos a serem atendidos no projeto de edificações é o conforto térmico dos seus usuários, considerando as condições climáticas externas, tais como temperatura, umidade, vento e a radiação solar [1]. As variáveis ambientais são utilizadas como parâmetros de entrada em simulações computacionais para verificar o desempenho térmico de edifícios que permitem especificar sistemas de condicionamento térmico. Existem outros parâmetros de entrada utilizados, tais como os coeficientes superficiais de transferência de calor, que representam os efeitos de convecção e também de radiação nas trocas de calor que ocorrem nas superfícies das paredes [2] [3] [4] [5].

Há uma relevante influência da transferência de calor por convecção no balanço energético do edifício, que determina a energia térmica necessária para manter o conforto térmico. Contudo, são verificadas divergências entre os programas de simulação térmica, que podem estar relacionadas aos diferentes métodos utilizados para determinar o coeficiente de troca de calor por convecção [6] [7]. De acordo com Shao (2009), a escolha dos métodos pode resultar em diferenças de 20% a 40% no consumo estimado de energia do edifício [8]. Peeters et al. (2011) mencionaram que somente o coeficiente de convecção interno pode causar diferenças de até 8% [9].

Existem normas [10] que tratam do fenômeno térmico que ocorre nas superfícies das paredes, referindo-se aos coeficientes convectivos, e outras [11] o fazem se referindo ao seu inverso – as resistências térmicas superficiais. Existem várias formas de se determinar esses parâmetros, tais como métodos analíticos, que são aplicáveis para geometrias simples, métodos numéricos, estudos experimentais aplicados em modelos em escala reduzida, e ensaios em escala real. Para que os modelos forneçam resultados confiáveis é importante que os materiais, ambientes internos e externos e condições de operação sejam considerados simultaneamente [12] [13].

A norma brasileira NBR 15220-2 [11] é amplamente utilizada no Brasil para se estimar o desempenho térmico de edificações [14]. Com relação ao fenômeno convectivo, a norma sugere alguns valores pré-definidos de resistências superficiais. É importante observar que os valores sugeridos na norma são constantes, e ela não apresenta as equações e o método usado para a obtenção de tais valores, e tampouco a referência para possibilitar a busca da origem daquelas equações. Contudo, a norma brasileira NBR 15220-2 [11] alerta que a resistência térmica superficial pode variar de acordo com diversos fatores, tais como emissividade da superfície, velocidade do ar sobre a superfície e temperatura. Vale ressaltar que, ao se utilizar valores fixos para os coeficientes em todo o Brasil, as variações das condições ambientais das diversas regiões do país não estão sendo consideradas. Contudo, assim como a própria norma brasileira cita, diferentes condições podem afetar os valores dos coeficientes. Após pesquisa bibliográfica, verificou-se que os valores utilizados na NBR 15220-2 [11] foram retirados da norma internacional ISO 6946 [10]. Nessa norma também são apresentados os métodos usados para a obtenção dos valores dos coeficientes convectivos. Assim, torna-se possível verificar a adequação do método utilizado no Brasil e compará-lo com outros métodos disponíveis na literatura. Diversos cálculos de consumo energético foram realizados e seus resultados foram comparados no fim com aqueles obtidos ao se utilizar a norma brasileira.

Ressalta-se que o objetivo do trabalho não é refutar o método da NBR 15220-2 [11]. Pelo contrário, espera-se que os projetistas tenham condições de usar o mesmo método da norma brasileira em seus projetos, contudo, tendo a opção de alterar as condições ambientais e de contorno utilizadas no cálculo, obtendo valores mais precisos para a região onde será construída a edificação. Essa é a justificativa para a análise e apresentação do método.

2 Modelos para cálculo dos coeficientes térmicos convectivos

Apresentam-se nesta seção a) o método para o cálculo dos coeficientes térmicos usado na NBR 15220-2 e b) métodos alternativos para obtenção da resistência térmica superficial do envelope de edificações.

2.1 Método da NBR 15220-2 [11]

A norma brasileira trata dos coeficientes térmicos em função da resistência térmica, e a relação entre eles é dada pela Equação 1:

$$R = \frac{1}{h} \quad (1)$$

onde:

R, representa a resistência térmica [(m²K)/W];
h, representa o coeficiente convectivo [W/(m²K)].

O fluxo de calor entre dois ambientes depende da resistência térmica entre eles, além da diferença de temperatura e da área de interface. A NBR 15220-2 [11] apresenta a forma para o cálculo da resistência térmica total, descrita na Equação 2:

$$R_T = R_{se} + R_t + R_{si} \quad (2)$$

onde:

R_T representa a resistência térmica total [(m²K)/W];
R_{se} representa a resistência do ar para a superfície externa [(m²K)/W];
R_t representa a resistência da superfície externa até a superfície interna [(m²K)/W];
R_{si} representa a resistência superficial interna para o ar [(m²K)/W].

Com relação às resistências térmicas superficiais, R_{se} e R_{si}, a norma brasileira sugere valores médios a serem utilizados na Equação 2; porém, não é apresentado o método que deu origem a eles. Isso dificulta a análise dos projetistas, o que pode gerar uma tendência de adoção desses valores em todas as regiões climáticas do Brasil.

Após realização de revisão bibliográfica foram encontrados na norma internacional ISO 6946 [10] os mesmos valores sugeridos na NBR 15220-2 [11]. Contudo, constatou-se que na ISO 6946 [10] também está descrito o método de cálculo que originou tais valores. Com isso foi possível verificar quais foram os dados ambientais utilizados para o cálculo, bem como as condições de contorno. Assim, foi possível verificar se tais dados se aplicam às condições presentes no Brasil. As informações para aplicação do método estão dispersas na norma ISO 6946 [10], com isso, a forma de cálculo utilizada nesta norma será detalhada a seguir, para facilitar o entendimento dos projetistas que queiram avaliar os dados ambientais e condições de contorno utilizadas.

As Equações de 3 a 6 descrevem como os valores dos coeficientes convectivos sugeridos na norma ISO 6946 [10] foram calculados. Uma observação importante é que na norma são apresentadas as equações, mas não a sua origem.

$$R_s = \frac{1}{h_c + h_r} \quad (3)$$

onde:

R_s é a resistência térmica superficial [(m²K)/W];
h_c é o coeficiente convectivo [W/(m²K)];
h_r é o coeficiente de troca de calor por radiação térmica [W/(m²K)].

A Equação 3 foi utilizada para o cálculo da resistência térmica interna e também para a externa. No cálculo da resistência interna, usaram-se R_{si} para designar R_s e h_{ci} para designar h_c . Por sua vez, no cálculo da resistência externa, usaram-se R_{se} para designar R_s e h_{ce} para designar h_c .

Para a obtenção de h_r , a norma ISO 6946 [10] utilizou as Equações 4 e 5.

$$h_r = \epsilon h_{ro} \quad (4)$$

$$h_{ro} = 4\sigma T_m^3 \quad (5)$$

onde:

- h_r é o coeficiente de troca de calor por radiação térmica [W/(m²K)];
- ϵ é a emissividade da superfície (adimensional);
- h_{ro} é o coeficiente de radiação para uma superfície de corpo negro [W/(m²K)];
- σ é a constante de Stefan-Boltzmann [W/(m²K)];
- T_m é a temperatura termodinâmica média da superfície e para os seus arredores [K].

Para a obtenção da resistência térmica superficial interna, a norma ISO 6946 [10] apresenta três valores de h_{ci} em forma de tabela, sem informação sobre as equações que os originaram. No entanto, ela os separa em função da direção do fluxo de calor: ascendente, horizontal ou descendente.

Para obtenção da resistência térmica superficial externa, foi utilizada uma equação em função da velocidade do ar para obtenção do coeficiente convectivo externo [10], conforme demonstrado na Equação 6.

$$h_{ce} = 4 + 4V \quad (6)$$

onde:

- h_{ce} é o coeficiente convectivo da superfície externa [W/(m²·K)];
- V é a velocidade do vento adjacente à superfície [m/s].

Os valores de emissividade e os dados ambientais utilizados nas Equações 4, 5 e 6 estão descritos na Tabela 4. Esses valores foram utilizados na norma ISO 6946 [10], que resultaram nos valores de resistências térmicas superficiais internas e externas, que foram sugeridos na NBR 15220-2 [11]. Não estão descritos os motivos da escolha desses valores apresentados na Tabela 1. Uma hipótese possível seria que representam condições conservadoras para climas frios, com emissividade e vento elevados e temperatura externa baixa, resultando em um projeto de sistema de aquecimento com maior potência.

Tabela 1: Dados utilizados pela ISO 6946 [10] para o cálculo dos coeficientes convectivos superficiais de envelope de edificações.

Dados de entrada			
Emissividade	Temperatura interna (°C)	Temperatura externa (°C)	Velocidade do vento (m/s)
0,9	20	0	4

Verifica-se na Tabela 1 que, para o cálculo da resistência superficial externa, foi utilizado o valor de 0 °C de temperatura. Para o cálculo da resistência superficial interna, foi utilizado o valor de 20 °C. Percebe-se que os parâmetros ambientais aplicados são típicos de países com inverno rigoroso, em que a temperatura externa atinge facilmente 0 °C. Tais condições divergem do que é comumente registrado no Brasil e podem ser apontadas como possíveis causas de desvio na estimativa dos coeficientes convectivos.

2.2 Métodos alternativos para obtenção da resistência térmica superficial do envelope de edificações

Existem outros métodos para a determinação dos valores dos coeficientes convectivos. Mirsadeghi et al. (2013) [2] realizaram uma compilação de diversas equações disponíveis na literatura para o cálculo do coeficiente convectivo externo, que estão expostas na Tabela 2.

Tabela 2: Modelos para cálculo do coeficiente convectivo superficial levantados por Mirsadeghi et al. [2].

Modelo	Descrição	Equação
McAdams (1954)	Medições em túnel de vento (aplicações para superfície lisa ou rugosa)	$h_{c,ext} = 5,678 \left[m + n \left(\frac{V_f}{0,3048} \right)^p \right]$
CIBS (1979)	Medições em túnel de vento	$h_{c,ext} = 4,1V_{loc} + 5,8$
Jayamaha (1996)	Medições em campo	$h_{c,ext} = 1,444V + 4,955$
Sturrock (1971)	Superfície exposta	$h_{c,ext} = 6,1V_r + 11,4$
	Superfície normal	$h_{c,ext} = 6V_r + 5,7$
Nicol (1977)	Medições noturnas para uma janela externa, nas regiões árticas no Canadá	$h_{c,ext} = 7,55V_r + 4,35$
Hagishima & Tanimoto (2003)	Medições em edifício, superfícies horizontais	$h_{c,ext} = 2,28V_r + 8,18$
	Medições em edifício, superfícies verticais	$h_{c,ext} = 10,21V_{loc} + 4,47$
Loveday mixe (2003)	Sem referencias da publicação original	$h_{c,ext} = 16,7V_{loc}^{0,5}$
ISO 6946 (2007)	Sem referencias da publicação original	$h_{c,ext} = 4V + 4$

Na Tabela 2, são utilizadas diferentes notações para o vento, onde:

- V_{10} é a velocidade de vento medido a 10 m de altura do solo (m/s);
- V_f é a velocidade de vento medido em local longe de qualquer objeto e das bordas (m/s);
- V_{loc} é a velocidade de vento medido a uma certa distância d da fachada da edificação e a uma certa altura H do solo (m/s);

V_r é a velocidade de vento medido a uma altura H' do telhado da edificação (m/s).

As equações que possuem o vento simbolizado apenas por V não fornecem quais são as condições da medição daquele.

Como o propósito deste trabalho foi comparar os resultados dos diferentes métodos, foi considerada a mesma condição para todos. Para isso, foi utilizado o vento V_{10} em todas as equações, aplicando as Equações de 7 a 10.

Segundo Mirsadeghi et al. (2013) [2], a relação entre V_{loc} e V_{10} , considerando uma parede vertical e com ângulo de direção de vento variando entre 0° e 90° com a superfície, é dada pela Equação 7.

$$V_{loc} = V_{10} \sin \theta \quad (7)$$

onde:

θ é o ângulo entre a direção do vento e a parede em graus.

Para que fosse possível a comparação entre as diversas equações foi determinada a condição de ângulo de noventa graus entre o vento e a superfície. Com isso a Equação 7 resulta na Equação 8.

$$V_{loc} = V_{10} \quad (8)$$

Com relação a V_f e V_r , assume-se a seguinte relação, segundo Mirsadeghi et al. (2013), descritas nas Equações 9 e 10.

$$V_f = V_{loc} \quad (9)$$

$$V_{loc} = \frac{2}{3} V_r \quad (10)$$

Observa-se ainda na Tabela 2 que o modelo de McAdams (1954) possui parâmetros a serem definidos, de acordo com o tipo de superfície, conforme Tabela 3.

Tabela 3: Parâmetros da equação de McAdams para cálculo da resistência térmica superficial externa.

Superfície	$V_r < 4,88 \text{ m/s}$			$4,88 \text{ m/s} \leq V_r < 30,48 \text{ m/s}$		
	m	n	p	m	n	p
Lisa	0,99	0,21	1	0	0,50	0,78
Rugosa	1,09	0,23	1	0	0,53	0,78

Com relação aos coeficientes convectivos internos, Peeters et al. [9] apresentaram em seu trabalho diversas equações disponíveis na literatura, descritas na Tabela 4.

Para as equações contidas na Tabela 4, tem-se que:

- ΔT é a diferença de temperatura entre a superfície e o ambiente (K);
- H é a altura a partir do piso (m).

Tabela 4: Modelos de cálculo de coeficientes convectivos internos levantados por Peeters et al. [9].

Modelos	Descrição	Equações $W/(m^2K)$
ASHRAE (1997)	Placas grandes verticais – fluxo turbulento	$h_{c,int}=0,19(\Delta T)^{0,33}$
	Placas pequenas verticais – laminar	$h_{c,int}=0,29\left(\frac{\Delta T}{H}\right)^{0,25}$
	Placas grandes horizontais, voltadas para cima – turbulento	$h_{c,int}=0,22(\Delta T)^{0,33}$
	Placas grandes horizontais, voltadas para cima – fluxo laminar	$h_{c,int}=0,27\left(\frac{\Delta T}{H}\right)^{0,25}$
	Placas pequenas horizontais.	$h_{c,int}=0,12\left(\frac{\Delta T}{H}\right)^{0,25}$
ISO 6946 (2007)	Fluxo ascendente (Tabelado)	5,0
	Fluxo horizontal (Tabelado)	2,5
	Fluxo descendente (Tabelado)	0,7
TRNSYS (1998)	Superfícies verticais	$h_{c,int}=1,5\Delta T^{0,25}$
Fohanno e Polidori (2003)	Superfícies verticais laminar	$h_{c,int}=1,332\left(\frac{\Delta T}{H}\right)^{1/4}$
	Superfícies verticais turbulento	$h_{c,int}=1,235\exp(0,0467H)(\Delta T)^{1/4}$
Min (2001)	Todas as superfícies	$h_{c,int}=1,646\left(\frac{\Delta T^{0,32}}{H^{0,05}}\right)$
Awbi and Hatton (1997)	-	$h_{c,int}=1,832\left(\frac{\Delta T^{0,293}}{H^{0,121}}\right)$

3 Método

Para verificar o impacto dos coeficientes propostos pela NBR 15220-2 [11], quando comparado com valores obtidos em outros métodos, foram realizadas três etapas:

- prospectar diferentes valores de coeficientes convectivos, começando pela norma NBR 15220-2 [11] incluindo aqueles baseados em modelos obtidos na literatura;
- selecionar diferentes valores de coeficientes convectivos que serão utilizados para realizar simulações de consumo de energia em climatização (visando a manter a temperatura interna dentro de uma faixa desejada);
- aplicar tais valores na simulação do desempenho térmico de uma edificação padrão, anotando a

influência no consumo de energia necessário para a climatização.

Assim, para uma dada situação de clima, forma, orientação, propriedades dos materiais e dados de ocupação e operação do edifício, passa-se a dispor de uma faixa de estimativas do consumo de energia. A estimativa da NBR 15220-2 [11] pode ser visualizada dentro dessa faixa e, a depender de sua posição relativa, pode-se avaliar a possibilidade de erro para menos ou para mais do consumo de energia estimado e, respectivamente, subdimensionamento ou superdimensionamento dos sistemas de climatização artificial.

3.1 Análise da variação do coeficiente convectivo do envelope de edificações

A estratégia de análise consiste em verificar como as equações variam com essa velocidade. Para calcular os valores de coeficientes convectivos externos, em função da velocidade do vento, para as equações apresentadas na Tabela 5, todos os valores foram transformados para aquele medido a 10 m de altura, conforme já demonstrado nas Equações de 7 a 10. Na Figura 1, é possível comparar os resultados das diversas equações com o método de cálculo da norma ISO 6946 [10] (velocidade de vento de 4 m/s), que é o método aplicado na NBR 15220-2 [11].

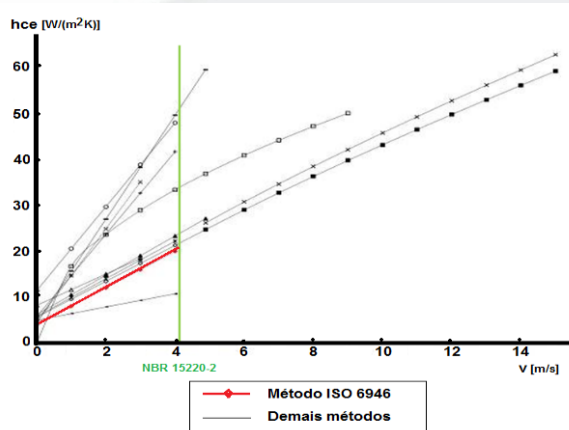


Figura 1: Variação do coeficiente convectivo externo do envelope de edificações em função da velocidade do vento. Comparação de diversos métodos [2] [10].

Observa-se na Figura 1 que a velocidade do vento utilizada na NBR 15220-2 [11], de 4 m/s, resulta em um coeficiente convectivo h_c de 20 W/(m²K). Se acrescido o valor do coeficiente de radiação de 5,0 W/(m²K), obtém-se, aplicando a Equação 1, a resistência térmica de 0,04 [(m²K)/W]. Esse é o valor apresentado na norma brasileira como sugestão de uso para os projetistas. Outra constatação importante é que os outros métodos utilizados podem chegar a valores de coeficiente convectivos entre 8 W/(m²K) e 50 W/(m²K), para o mesmo valor de velocidade do ar da NBR 15220-2 [11], ou seja, há uma grande variação entre os modelos matemáticos.

A Figura 2 mostra como os coeficientes convectivos internos variam em função do método ou modelo escolhido e que os

valores da norma ISO 6946 [10] (iguais aos da NBR 15220-2 [11]) são os maiores entre os demais.

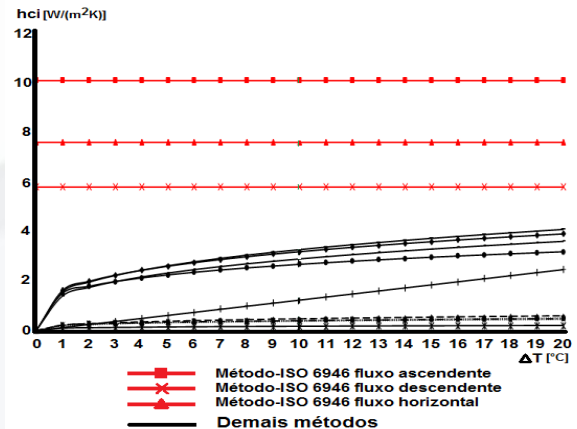


Figura 2: Variação do coeficiente convectivo interno em função da diferença de temperatura entre a superfície e o ambiente. Comparação entre diversos métodos [9] [10].

3.2 Definição dos valores de coeficientes convectivos a serem utilizados nas simulações

Como verificado, os valores dos coeficientes convectivos variam conforme o modelo utilizado para o cálculo. Com isso, a estratégia para análise nas simulações foi usar quatro valores diferentes de coeficientes convectivos: 8 W/(m²K), 16 W/(m²K), 25 W/(m²K) e 40 W/(m²K), assim, pode-se analisar os impactos de diferentes valores, dentro da faixa encontrada nos resultados das simulações

Para os coeficientes convectivos internos, a variação entre os diferentes modelos ficou entre 0,5 W/(m²K) e 10 W/(m²K), conforme demonstrado na Figura 2. Contudo, não se tem informação se os modelos que apresentaram valores mais baixos consideraram a radiação. Com isso, para a análise, foi adicionado o valor de 5,0 W/(m²K) no valor mais baixo obtido, de 0,5 W/(m²K). 5,0 W/(m²K) corresponde ao coeficiente de radiação usado na NBR 15220-2 [11]. Portanto, para as simulações, foram usados os seguintes valores de coeficientes convectivos internos: 5,5 W/(m²K), 7,6 W/(m²K) e 10 W/(m²K). É importante ressaltar que a análise não considera se é fluxo horizontal ou vertical. Isso porque alguns modelos não informam essa condição.

Foram realizadas simulações considerando diversas combinações possíveis de coeficientes, conforme demonstrado na Tabela 5. Por exemplo, na simulação 5 foram utilizados os valores de 7,6 W/(m²K) e 16,0 W/(m²K) para os coeficientes internos e externos respectivamente.

Tabela 5: Combinações de valores de coeficientes a serem usados nas simulações.

Coeficiente convectivo externo $h_{c,ext}$ W/(m ² K)	Coeficiente convectivo interno $h_{c,int}$ W/(m ² K)		
	5,5	7,6	10,0
8,0	sim. 1	sim. 2	sim. 3
16,0	sim. 4	sim. 5	sim. 6
25,0	sim. 7	sim. 8	sim. 9
40,0	sim. 10	sim. 11	sim. 12

3.3 Definição dos demais parâmetros para simulação de consumo

A norma NBR 15220-3 [15] define oito zonas bioclimáticas no Brasil, caracterizadas pela média das temperaturas mínimas, máximas, e da umidade relativa do ar. Com isso, foram realizadas simulações utilizando dados históricos ambientais em uma cidade de cada zona bioclimática, conforme apresentado na Tabela 6. Para o levantamento dos dados climáticos de cada cidade foi consultada a base de dados do Instituto Nacional de Meteorologia – INMET [16]. Os arquivos apresentam temperaturas médias horárias no período de 2001 até 2010.

Tabela 6: Cidades usadas nas simulações de consumo de energia com diferentes valores de coeficientes convectivos.

Cidade	Zona Bioclimática
Curitiba	Z1
Santa Maria	Z2
Belo Horizonte	Z3
Brasília	Z4
Vitória da Conquista	Z5
Campo Grande	Z6
Cuiabá	Z7
Belém	Z8

Tal procedimento resultou em 96 simulações, ou seja, doze simulações da Tabela 5 para cada uma das oito cidades da Tabela 6. As simulações foram realizadas em uma ferramenta computacional. O software utilizado, denominado Mestre, desenvolvido pelo segundo autor deste artigo, é um sistema para simulação do comportamento térmico de edificações em múltiplas zonas, utilizando linguagem Java [17]. As vantagens da utilização desse software são: portabilidade, caráter compacto, gratuidade e utilização de dados relativamente simples. A análise é feita com as seguintes considerações:

- múltiplas zonas (ar) e múltiplos elementos de interface entre as zonas (sólidos);
- aplicação de diferenças finitas simples no eixo do tempo e no eixo do espaço, nas interfaces sólido-ar do edifício;
- discretização dos raios solares numa malha regular;
- nas superfícies opacas expostas ao sol, aplicação do conceito de temperatura sol-ar (ou seja, eleva-se a temperatura do ar de modo a reproduzir, nas superfícies externas das paredes, o efeito do fluxo de calor radiante do sol que é absorvido e transmitido em parte para dentro da parede, em parte ao ar);
- armazenamento de calor nos elementos sólidos.

Um arquivo-texto é utilizado como entrada de dados com quebra de linhas, contendo séries de dados separados por espaço. Cada grupo de dados é iniciado por um dos seguintes comandos:

- “d”, para entrada de dados gerais da simulação, clima e parâmetros de plotagem e convergência;

- “p”, para entrada de paredes;
- “z”, para entrada de zonas;
- “m”, para entrada de materiais;
- “ta”, para entrada de temperatura atmosférica em séries horárias.

O software Mestre é bastante útil para a compreensão dos processos térmicos. Considera a insolação, a transmissão e o armazenamento de calor. Como resultado, pode-se obter o consumo de energia em cada zona, dentro de uma faixa de conforto térmico preestabelecida.

O modelo adotado para simulação foi de uma edificação de múltiplos pavimentos com projeção retangular, a ser utilizada em todas as cidades. As dimensões do ambiente utilizado nos cálculos são de 5,5 m de largura, 9,0 m de profundidade e altura do pé direito de 2,5 m conforme as Figuras 3 e 4.

Para realizar cada etapa da simulação, outros parâmetros devem ser considerados, tais como fontes de calor internas, e a temperatura a ser mantida internamente. Assim, foram consideradas as seguintes premissas para a simulação:

- temperatura interna a ser mantida entre 20,0 °C e 26,0 °C;
- fonte de calor interna considerando uma pessoa constantemente dentro do ambiente, a 100 W;
- fonte de calor considerando uma lâmpada no período entre 18 h e 24 h, a 50 W.

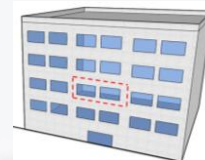


Figura 3: Desenho esquemático representando um edifício de múltiplos andares.

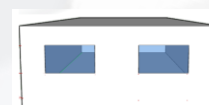


Figura 4: Desenho esquemático representando o ambiente do edifício utilizado nas simulações.

Foi considerado no cálculo um fluxo de ar na ventilação dado pelo valor mínimo por pessoa de 27 m³/h, conforme Portaria 3523 [18], considerando uma pessoa no interior de cada unidade do edifício. Os parâmetros dos materiais utilizados estão detalhados na Tabela 7.

Tabela 7: Parâmetros dos materiais utilizados na fachada do edifício.

Material	Espessura (m)	Condutividade de térmica (W/(m ² K))	Área (m ²)	Resistência térmica (m ² K)/W
Alvenaria	0,120	0,600	11,67	0,200
Vidro	0,004	1,000	2,08	0,004

4 Resultados e discussões

Os resultados obtidos na simulação de consumo de energia térmica na climatização, para cada cidade, estão expostos a seguir. Estão apresentados os valores de consumo de energia total e potência máxima para diversas combinações de possíveis valores de coeficientes convectivos externos e internos, para cada cidade considerada. É importante ressaltar que os valores foram referentes a uma edificação pequena e simplificada, servindo apenas de referência para comparação entre as simulações, ou seja, não representam alguma edificação real. Com isso, os valores obtidos não devem ser considerados de forma absoluta, senão para sugerir tendências.

Em Curitiba, situada na zona bioclimática 1, a energia necessária anual para manter o ambiente entre 20 °C e 26 °C, para diversas combinações de valores de coeficientes convectivos externos e internos, está apresentada na Tabela 8, na qual estão em vermelho os valores máximos e mínimos, e em azul os valores obtidos com os coeficientes convectivos sugeridos pela NBR 15220-2 [11]. Os valores representam a energia total, independentemente se é para aquecimento ou resfriamento. Percebe-se que o maior consumo de energia estimado ocorre quando são utilizados os maiores coeficientes convectivos internos e externos simultaneamente.

Tabela 8: Energia necessária para manter a temperatura entre 20 °C e 26 °C na edificação simulada em Curitiba.

		Consumo anual de energia (kWh/ano)		
		h_c interno W/(m ² K)		
		5,5	7,6	10,0
h_c externo W/(m ² K)	8,0	1041,16	1054,33	1075,5
	16,0	1092,68	1145,04	1205,31
	25,0	1133,78	1212,21	1299,46
	40,0	1169,83	1271,38	1384,85

Para melhores análise e detalhamento, os valores obtidos na Tabela 8 são apresentados na Figura 5 com curvas para cada valor do coeficiente convectivo interno, separados em energia para aquecimento e para resfriamento. Se o método que deu origem aos valores adotados pela NBR 15220-2 [11] foi desenvolvido para países com clima frio, a tendência dos valores de h_c para a segurança causaria escolha de valores dos coeficientes convectivos internos e externos maiores, acarretando superdimensionamento dos sistemas de aquecimento. Esse comportamento no aquecimento foi verificado em Curitiba, que está situada em uma zona bioclimática mais fria, pois, no ponto 4 da Figura 5, correspondente aos valores de coeficientes da NBR 15220-2 [11], sugerem mais energia para o aquecimento do que aqueles com coeficientes menores, do ponto 3. O ponto 4 (prescrição da norma) indica um sistema de aquecimento com potência maior do que aquele indicado pelo ponto 3 (configuração alternativa, encontrada na literatura).

Para o resfriamento apresentado na Figura 5, verifica-se que, em Curitiba, a NBR 15220-2 [11] (ponto 2) estima valores menores de consumo de energia de climatização que a

maioria dos demais métodos. Admitindo que o ponto 1 esteja mais próximo da realidade, a norma brasileira provavelmente conduz a um sistema de condicionamento de ar subdimensionado para resfriamento. Em uma região fria, esse resultado não seria crítico.

Outro dado importante é a potência máxima exigida durante uma hora no período de simulação, para o fornecimento ou extração de calor.

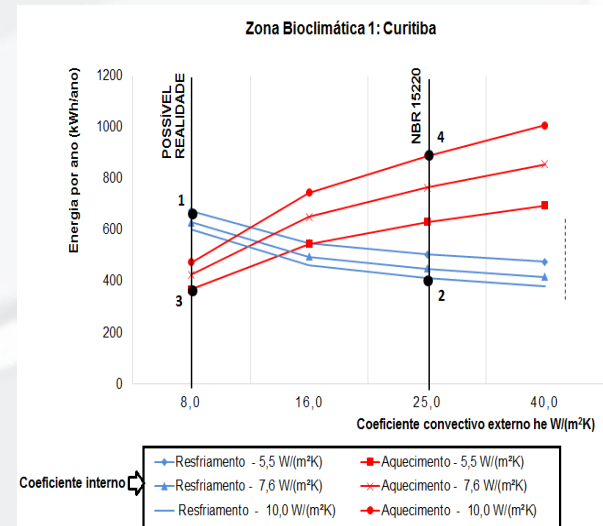


Figura 5: Energia de aquecimento e de resfriamento necessária para manter a temperatura entre 20 °C e 26 °C.

Na Tabela 9, verifica-se que, em regime de resfriamento, a potência estimada ao se aplicar a NBR 15220-2 [11] apresenta valores próximos às simulações que apresentaram a mínima energia total e a máxima energia total. Contudo, para a situação que requer aquecimento, o valor estimado pela norma brasileira supera em 45% aquele da simulação que apresentou menor consumo de energia total por ano. Tal situação reforça haver superdimensionamento do sistema de climatização no caso de aquecimento.

Tabela 9: Potência máxima para manter a temperatura entre 20 °C e 26 °C na edificação simulada – Curitiba.

	Potência térmica máxima necessária na climatização		
	MÍNIMA SIMULAÇÃO 1	NBR 15220 SIMULAÇÃO 8	MÁXIMA SIMULAÇÃO 9
POTÊNCIA MÁXIMA DE RESFRIAMENTO	735,0 W	760,0 W	789,0 W
POTÊNCIA MÁXIMA DE AQUECIMENTO	593, W	861,0 W	959,0 W

Os resultados das simulações realizadas para a zona bioclimática 2, na cidade de Santa Maria, demonstraram a mesma tendência da zona 1, ou seja, os valores dos coeficientes convectivos sugeridos pela norma brasileira causam o subdimensionamento de sistemas de resfriamento e o superdimensionamento de sistemas de aquecimento. Contudo, diferente da zona 1, o consumo de energia foi maior no resfriamento.

Foi verificado na zona bioclimática 3, em Belo Horizonte, ao observar a Tabela 10, que, diferentemente das zonas 1 e 2, o maior consumo de energia ocorreu quando foram usados os menores valores de coeficientes convectivos simultaneamente. Esse comportamento pode ser mais bem entendido ao se separar a energia usada para resfriamento daquela para aquecimento, conforme mostrado na Figura 6.

Tabela 10: Energia necessária para manter a temperatura entre 20 °C e 26 °C na edificação simulada em Belo Horizonte.

Consumo anual de energia (kWh/ano)				
		h _c interno W/(m ² K)		
		5,5	7,6	10,0
h _c externo W/(m ² K)	8,0	1486,19	1475,95	1471,31
	16,0	1363,59	1341,17	1327,90
	25,0	1319,60	1292,58	1277,03
	40,0	1289,51	1259,99	1244,10

Na Figura 6, verificou-se que, na zona bioclimática 3, a energia utilizada foi maior para o resfriamento. Ao analisar os pontos 1 e 2 da Figura 6, constatou-se que a aplicação da norma NBR 15220-2 [11] levaria os projetistas a subdimensionar o sistema de condicionamento de ar no resfriamento, assim, haveria possibilidade de não atender aos requisitos de conforto térmico dos usuários.

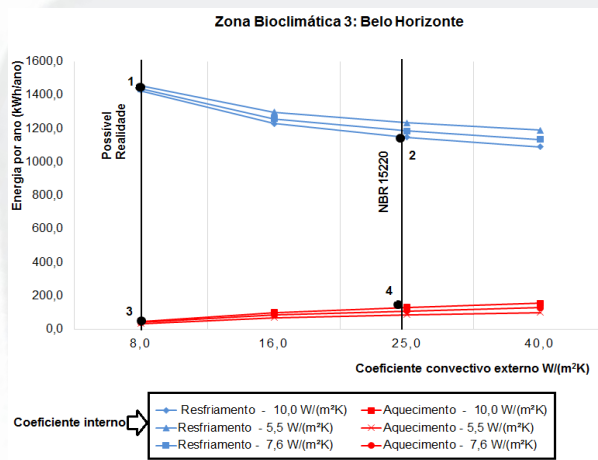


Figura 6: Energia de aquecimento e resfriamento necessária para manter a temperatura entre 20 °C e 26 °C.

Na Tabela 11, é possível verificar que a potência necessária para resfriamento foi 74% superior à potência necessária para aquecimento, ao se utilizarem os coeficientes sugeridos pela norma NBR 15220-2 [11]. Contudo, analisando somente o resfriamento, a energia total, apresentada na Figura 6, mostrou uma tendência de subdimensionamento, mas, ao analisar a potência na Tabela 11, foi indicado o superdimensionamento (comparação da simulação 6 com a 1).

Tabela 11: Potência máxima para manter a temperatura entre 20 °C e 26 °C na edificação simulada em Belo Horizonte.

Potência térmica máxima necessária na climatização			
	MÍNIMA SIMULAÇÃO 1	NBR 15220 SIMULAÇÃO 6	MÁXIMA SIMULAÇÃO 12
POTÊNCIA MÁXIMA DE RESFRIAMENTO	865 W	940,0 W	1010,0 W
POTÊNCIA MÁXIMA DE AQUECIMENTO	344,0 W	540,0 W	651,0 W

Assim, ao mesmo tempo em que o consumo anual de energia pode ter sido subestimado pela norma, a instalação (com seu tamanho dado pela potência máxima em dado momento) pode ter sido superestimada, representando um investimento que fica ocioso na maior parte do tempo.

Para a zona bioclimática 4, na cidade de Brasília, os resultados das simulações mostraram que o comportamento térmico foi similar ao da zona 3, pois a maior energia consumida ocorreu para os menores coeficientes convectivos. Os resultados da potência máxima para o resfriamento também foram semelhantes. Portanto, assim como para a zona 3, o subdimensionamento não seria muito crítico.

Para a cidade de Vitória da Conquista, situada na zona 5, verificou-se o mesmo comportamento das zonas 3 e 4, ao se realizar as mesmas análises.

Na cidade de Campo Grande, situada na zona bioclimática 6, verificou-se que os maiores consumos de energia não se correlacionaram aos maiores coeficientes internos e externos simultaneamente. O mesmo ocorreu para o menor consumo de energia. Isso pode ser verificado na Tabela 12.

Tabela 12: Energia necessária para manter a temperatura entre 20 °C e 26 °C na edificação simulada em Campo Grande.

Consumo anual de energia (kWh/ano)				
		h _c interno W/(m ² K)		
		5,5	7,6	10,0
h _c externo W/(m ² K)	8,0	2239,13	2282,82	2319,14
	16,0	2116,54	2156,34	2193,36
	25,0	2070,10	2110,19	2150,14
	40,0	2038,70	2079,99	2124,01

Foi constatado que a energia necessária para resfriamento foi superior com relação às demais zonas analisadas até aqui, e a energia para aquecimento foi quase nula. Na Figura 7, foi verificado que a energia para resfriamento não variou com os diferentes valores de coeficientes convectivos. Isso evidenciou que os coeficientes maiores ou menores não influenciaram tanto no consumo de energia, quando em comparação com as demais zonas.

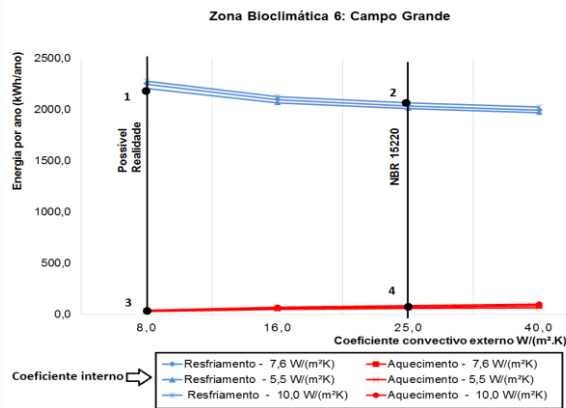


Figura 7: Energia de aquecimento e resfriamento necessários manter a temperatura entre 20 °C e 26 °C.

Na Tabela 13, foi verificado que no resfriamento, diferentes métodos resultaram em semelhantes valores de potência, o que evidenciou ainda mais a pouca influência do uso de diferentes coeficientes convectivos.

Tabela 13: Potência máxima para manter a temperatura entre 20 °C e 26 °C na edificação simulada.

	Potência térmica máxima necessária na climatização		
	MÍNIMA SIMULAÇÃO 7	NBR 15220 SIMULAÇÃO 8	MÁXIMA SIMULAÇÃO 3
POTÊNCIA MÁXIMA DE RESFRIAMENTO	1052,0 W	1085,0 W	1095,0 W
POTÊNCIA MÁXIMA DE AQUECIMENTO	802,0 W	916,0 W	769,0 W

Para a zona 7, na cidade de Cuiabá, os resultados indicaram o mesmo comportamento da cidade de Campo Grande. O mesmo ocorreu para as simulações da cidade de Belém, na zona bioclimática 8. A única ressalva é que, na cidade de Belém, não houve necessidade de energia para o aquecimento.

5 Conclusões

Foi encontrado e detalhado o método que resultou nos valores de coeficientes térmicos convectivos sugeridos pela norma brasileira NBR 15220-2 [11]. O método é o mesmo utilizado pela norma internacional ISO 6946 [10]. Foi constatado, pela análise da ISO 6946 [10], que os valores utilizados nos cálculos dos coeficientes convectivos correspondem a locais tipicamente frios, pois a temperatura externa utilizada foi de 0 °C, e no ambiente interno foi de 20 °C. Com isso, sistemas de aquecimento seriam importantes e teriam de ser bem dimensionados a favor da segurança. Logo, seria natural que os coeficientes convectivos na norma estivessem superestimados. Contudo, é importante ressaltar que, em algumas regiões do Brasil, no ambiente externo, pode ocorrer temperatura mínima de 20 °C, o que significa que sistemas de aquecimento não seriam necessários. Então, impunha-se uma análise do impacto da hipotética superestimação dos coeficientes para climas comuns no Brasil.

Assim, após os cálculos, verificou-se que as estimativas de consumo de energia de climatização variaram consideravelmente de acordo com o modelo adotado para a determinação do coeficiente convectivo. Para os coeficientes convectivos externos, foram encontradas estimativas variando entre 8 W/(m²K) e 60 W/(m²K), sendo o valor sugerido pela norma NBR 15220-2 o de 25 W/(m²K). Com relação aos coeficientes convectivos internos, a variação entre os modelos ficou entre 0,5 W/(m²K) e 10 W/(m²K). Para uma cidade em cada zona bioclimática do Brasil, foram percorridas tais faixas de coeficientes convectivos, sempre procurando saber o que ocorreria se em cada uma dessas faixas (interna e externa) o valor possivelmente mais realista diferisse daquele sugerido pela NBR 15220-2[11].

Constatou-se que entre as oito cidades simuladas, aquelas com clima mais frio, Curitiba e Santa Maria, zonas 1 e 2 respectivamente, realmente apresentariam superdimensionamento para sistemas de aquecimento, quando aplicada a norma NBR 15220-2 [11], caso os modelos com coeficientes convectivos inferiores fossem os mais fieis à realidade brasileira. Ressalta-se que para as zonas 1 e 2, o maior consumo de energia para manter o conforto térmico foi estimado quando os coeficientes convectivos internos e externos foram os maiores simultaneamente.

As cidades de Brasília, Belo Horizonte e Vitória da Conquista apresentaram comportamentos semelhantes entre si (zonas 3, 4 e 5). Nelas, o consumo de energia estimado foi predominantemente para refrigeração, caso os coeficientes mais baixos fossem mais fieis à realidade. Outra constatação foi que o maior consumo de energia ocorreu quando ambos os coeficientes externos e internos foram os menores possíveis simultaneamente, ao contrário das zonas 1 e 2. Para as cidades de Campo Grande, Cuiabá e Belém (zonas 6, 7 e 8) os resultados demonstraram que toda a energia foi usada para o resfriamento. Também não houve variação significativa entre os resultados, ou seja, a variação dos coeficientes internos e externos não teria muito impacto para o resfriamento.

Com isso, percebeu-se que os resultados foram semelhantes em algumas zonas, sendo possível definir três grupos bem distintos de zonas bioclimáticas, com comportamentos semelhantes. Grupo 1 (zonas 1 e 2), Grupo 2 (zonas 3, 4 e 5) e Grupo 3 (zonas 6, 7 e 8). A análise demonstrou que, para o Grupo 1, os coeficientes convectivos podem apresentar estimativas de consumo de energia bastante distintos dependendo de qual valor foi utilizado. Para o Grupo 2, foi sensível o projeto de resfriamento, pois os valores da norma NBR 15220-2 [11] podem estar subdimensionando os sistemas, necessitando um estudo mais aprofundado. Para o Grupo 3, os valores de diferentes coeficientes convectivos analisados não tiveram muita influência no consumo de energia. Assim, ficou evidenciado que houve pouco impacto com relação à utilização de diferentes modelos de cálculo de coeficientes convectivos nesse grupo.

Constatou-se, portanto, que os impactos dos coeficientes convectivos no Brasil variaram de região para região, ressaltando, assim, a importância de se levar em consideração as características ambientais no local onde a edificação será construída, para definir os coeficientes

convectivos. Com isso será possível obter uma representação mais acurada das edificações, quanto ao seu comportamento térmico, acarretando em dimensionamentos mais ajustados dos sistemas de condicionamento de ar.

É importante observar que a NRB 15220-2 [11] apresenta valores fixos de coeficientes convectivos, mas ela também alerta que eles podem variar dependendo das condições ambientais. Logo, a norma não é omissa a esse comportamento; faltam apenas o detalhamento e a implementação.

Um possível avanço para esse tema seria a sugestão na norma NBR 15220-2 [11] de valores de coeficientes convectivos separados por região. Como constatado neste trabalho, houve evidências de existência de três regiões distintas, nas quais seria possível definir valores médios de coeficientes. Isso tornaria o sistema de condicionamento de ar mais eficiente nessas regiões. Assim, seriam evitados gastos iniciais excessivos com equipamentos superdimensionados e também poder-se-ia evitar o subdimensionamento, que prejudica o conforto térmico.

Referências

- [1] FROTA, A. B.; SCHIFFER, S. R. **Manual de conforto térmico: arquitetura, urbanismo**. 5ª edição. São Paulo. Studio Nobel, 2001.
- [2] MIRSADEGHI, M.; CÓSTOLA, D.; BLOCKEN, B.; HENSEN, J. L. M. **Review of external convective heat transfer coefficient models in building energy simulation programs: Implementation and uncertainty**. Energy and Buildings, Elsevier 2013. p. 134-151.
- [3] EVANGELISTI, L.; GUATTARI, C.; GORI, P.; BIANCHI F. **Heat transfer study of external convective and radiative coefficients for building applications**. Energy and Buildings. Elsevier. 2017. p. 429-438.
- [4] EVANGELISTI, L.; GUATTARI, C.; GORI, P. **Experimental investigation of the influence of convective and radiative heat transfers on thermal transmittance measurements**. International Communications in Heat and Mass Transfer. 2016. p. 214 – 223.
- [5] MISYURA, S.Y. **The influence of convection on heat transfer in a water layer on a heated structured wall**. International Communications in Heat and Mass Transfer. 2019. p. 214–223.
- [6] OBYN, S.; MOESEKE, V. G. **Variability and impact of internal surfaces convective heat transfer coefficients in the thermal evaluation of office buildings**. Applied Thermal Engineering. Elsevier. 2015. p. 258 e 272.
- [7] COLUCCI, C.; GRIGNAFFINI, S.; MAURI, L. Roamagna, M. **Influence of the façades convective heat transfer coefficients on the thermal energy demand for an urban street canyon building**. 72nd Conference of the Italian Thermal Machines Engineering Association. Elsevier. 2017.
- [8] SHAO, J. LIU J.; ZHAO J.; ZHANG W.; SUN D.; FU Z. **A novel method for full-scale measurement of the external convective heat transfer coefficient for building horizontal roof**. Energy and Buildings. Elsevier. 2009. p. 840–847.
- [9] PEETERS, L.; BEAUSOLEIL-MORRISON B., I.; NOVOSELAC, A. **Internal convective heat transfer modeling: Critical review and discussion of experimentally derived correlations**. Energy and Buildings. Elsevier. 2011. p. 2227–2239.
- [10] ISO INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 6946 – Building components and building elements – Thermal resistance and thermal transmittance – Calculation method**. British, 1997
- [11] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, ABNT. (1997). **NBR 15220-2:2005 Parte 2 Método de cálculo da transmitância térmica, capacidade térmica, atraso térmico e fator solar para edificações**. Rio de Janeiro. Brasil.
- [12] BIRD, R. Byron; STEWART, Warren E; LIGHTFOOT, Edwin N. **Fenômenos de transporte**. 2ª edição. Rio de Janeiro: LTC, 2004.
- [13] HOLLMAN, J. P. **Heat Transfer**, 5th ed, McGraw-Hill Book, 1981.
- [14] FOSSATI, M.; SCALCO, V. A. **Building energy efficiency: An overview of the Brazilian residential labeling scheme**. Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2016. p. 1216–1231.
- [15] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, ABNT. **NBR15220-3. Desempenho térmico de edificações - Parte 3: Zoneamento bioclimático brasileiro e diretrizes construtivas para habitações unifamiliares de interesse social**. 2005.
- [16] INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA – INMET. **Banco de Dados Meteorológicos para Ensino e Pesquisa BDMEP**. Disponível em <http://www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=bdmep/bdmep>. Acessado em 06/05/2017
- [17] SCHMID, A. L.; GRAF, H. F. **Validation of MESTRE Building Simulation System according to Best-Test Multi-Zone, Non-Airflow, In-Depth Diagnostic Cases**. In: BUILDING SIMULATION 2011, Sydney. Anais. Sydney, 2011
- [18] BRASIL. MINISTÉRIO DA SAÚDE. **Portaria nº 3.523, de 28 de agosto de 1998**. Disponível em http://bvsms.saude.gov.br/bvs/saudelegis/gm/1998/prt3523_28_08_1998.html. Acessado em 06/05/2017.