

PROPOSTA DE CALIBRAÇÃO DE UM MODELO COMPUTACIONAL DE UMA TIPOLOGIA DE RESIDÊNCIA UNIFAMILIAR EM GOIÂNIA

Kácia H. Barbosa (1); EneDir Ghisi (2)

(1) Arquiteta, Mestranda do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, kacia.hb@gmail.br

(2) PhD, Professor do Departamento de Engenharia Civil, enedir@labeec.ufsc.br

Universidade Federal de Santa Catarina, Departamento de Engenharia Civil, Laboratório de Eficiência Energética em Edificações, Cx Postal 476, Florianópolis-SC, 88040-900, Tel.: (48) 3721 5184

RESUMO

As simulações computacionais permitem analisar o comportamento térmico e energético das edificações; entretanto, os dados de entrada utilizados nos modelos computacionais podem gerar imprecisão dos resultados e simplificação dos modelos. Através da calibração do modelo de simulação é possível obter resultados mais confiáveis e que representam a edificação estudada. Este trabalho apresenta a calibração de um modelo de simulação computacional que foi realizada a partir dos valores de temperatura do ar obtidos no monitoramento de uma edificação residencial. A edificação analisada se encontra na cidade de Goiânia e faz parte de um condomínio residencial horizontal que possui edificações com mesmas tipologias arquitetônicas. Para obter os valores de temperatura do ar, a residência foi monitorada entre 21 de dezembro de 2015 e 30 de janeiro de 2016. Utilizou-se o programa computacional EnergyPlus, versão 8.4, para a simulação e calibração do modelo analisado. Cinco variáveis foram modificadas no modelo de referência: geometria da cobertura, entorno, absorvância dos materiais, resistência térmica dos materiais e infiltração de ar. Para verificar se a variável analisada ajudou na calibração do modelo, foram comparados o erro quadrático médio, desvio médio, amplitude térmica e a correlação entre os valores da temperatura do ar simulada e monitorada. Os resultados finais indicaram boa correlação entre os dados monitorados e simulados. Destaca-se a correta definição do entorno, que foi o parâmetro de maior influência na calibração.

Palavras-chave: calibração, simulação computacional, desempenho térmico, residência unifamiliar.

ABSTRACT

Computer simulations analyze the thermal and energy behavior of buildings; however, the input data used in the computational models can generate inaccuracy of the results and simplification of the models. Through the calibration of the simulation model, it is possible to obtain more reliable results that represent the building. This work presents the calibration of a computer simulation model that was performed based on air temperature obtained in the monitoring of a single-family house. The house analyzed is located in the city of Goiânia and is part of a horizontal residential condominium that has houses with the same architectural typologies. To obtain the air temperature values, the house was monitored between December 21, 2015 and January 30, 2016. The EnergyPlus computer program, version 8.4, was used for the calibration of the model. Five variables were modified in the reference model: roof geometry, surrounding, absorptance of surfaces, thermal resistance of materials and air infiltration. In order to verify the influence of each variable in the calibration of the model, the mean square error, the mean deviation, the thermal amplitude and the correlation between simulated and monitored air temperature values were compared. The final results indicated a positive correlation between the monitored and simulated data; and showed that the surrounding was the parameter of greatest influence in the calibration.

Keywords: calibration, computer simulation, thermal performance, single-family house.

1. INTRODUÇÃO

Ao longo dos anos, estudos mostraram a importância da construção de edifícios energeticamente, que prezam pelo conforto térmico dos usuários e visam reduzir o consumo energético. O desempenho térmico da edificação é uma das formas para uma edificação tornar-se eficiente energeticamente, visto que as decisões de projeto em relação à escolha dos materiais e implantação da edificação, por exemplo, influenciam na redução do consumo de energia elétrica destinado ao aquecimento ou resfriamento do ambiente (SANTIN; ITARD; VISSCHER, 2009; BEKKOUCHE et al., 2013; KAVOUSIAN; RAJAGOPAL; FISCHER, 2013). Nesse contexto, O'Brien (2013) afirma que os projetistas podem ajudar a reduzir o consumo energético ao projetar uma edificação mais adequada termicamente, pois a caracterização da edificação exerce impacto no desempenho térmico durante toda a vida útil.

Para Corbella e Yannas (2003) existem poucas edificações nas regiões tropicais que são capazes de garantir um ambiente confortável termicamente sem a utilização de sistemas de refrigeração ou aquecimento. Isso ocorre devido à desatualização do projetista ou falta de rigor no cumprimento das normas de desempenho. Cuidados como a orientação das superfícies externas, emprego da iluminação natural e o controle da radiação solar incidente nas paredes e aberturas das fachadas são medidas que ajudam a minimizar o fluxo térmico e, conseqüentemente, tornam o ambiente interno mais agradável termicamente (CORBELLA; CASTANHEIRA, 2001; BATISTA, 2006). Portanto, atentando a esses parâmetros, é possível obter edificações com melhores condições térmicas internas e com menor consumo de energia elétrica.

Os projetistas podem fazer a avaliação do desempenho térmico das edificações por monitoramento ou simulação computacional. O monitoramento permite avaliar as condições reais da edificação construída e, também, calibrar os modelos utilizados nas simulações computacionais. A simulação computacional tem como vantagem determinar os dados de entrada e variar somente um parâmetro e, assim, entender a influência de tal parâmetro. Entretanto, a simulação possui algumas limitações, uma vez que os dados de entrada utilizados podem não ser fieis à realidade, gerando resultados divergentes da condição real da edificação analisada. Portanto, a definição dos parâmetros utilizados nos modelos computacionais pode acarretar na simplificação dos modelos e imprecisão dos resultados. Logo, faz-se necessário calibrar o modelo computacional a fim de obter resultados confiáveis que representem fielmente o comportamento da edificação real (PEREIRA; GHISI, 2015).

O trabalho visa calibrar um modelo a partir dos dados de entrada que mais influenciam em um sobrado residencial unifamiliar, conforme alguns estudos já realizados (SILVA; GHISI, 2013; PEREIRA; GHISI, 2015; MONETTI et al., 2015; PALIOURAS et al., 2015). Dessa forma, o trabalho tem como contribuição a verificação de qual desses dados mais influenciam na calibração do caso analisado e indicar uma nova metodologia para análise dos dados.

2. OBJETIVO

Este trabalho tem como objetivo apresentar uma proposta de calibração de um modelo computacional de uma tipologia de residência unifamiliar localizada na cidade de Goiânia.

3. MÉTODO

O método deste trabalho foi desenvolvido em três etapas principais. Na primeira etapa realizou-se o monitoramento de uma residência unifamiliar com a finalidade de obter os valores de temperatura do ar. Na segunda etapa foi definido o modelo computacional para representar a residência monitorada. Por fim, a última etapa corresponde à análise dos dados monitorados e simulados para que o modelo simulado represente o comportamento térmico da edificação real.

3.1. Monitoramento da edificação

A residência monitorada está localizada na cidade de Goiânia e faz parte do condomínio horizontal Privê dos Girassóis, composto por 250 residências com a mesma tipologia arquitetônica. As edificações são unifamiliares e geminadas, sendo que somente uma das laterais externas da edificação está em contato com a parede da edificação vizinha. A Figura 1 indica a localização da residência monitorada dentro do condomínio. A Figura 2 apresenta as plantas baixas da edificação monitorada, indica a parede geminada com a edificação adjacente e a localização dos sensores de monitoramento nos ambientes internos, em rosa, e externo, em azul. Ressalta-se que, em virtude da disponibilidade dos moradores, apenas dois ambientes da edificação foram monitorados, que são o quarto 1 e o quarto 2.



Figura 1 - Localização da residência monitorada.



Figura 2 - Planta baixa da residência monitorada.

A residência é composta por cobertura de telha cerâmica e laje de concreto de aproximadamente 12cm de espessura. As paredes são de tijolo cerâmico de seis furos com 9cm de espessura, argamassa dos dois lados. A pintura externa é em textura acrílica na cor branco gelo, sendo que o peitoril da sacada é pintado na cor amarela. O material das janelas varia conforme o ambiente, ou seja, os quartos possuem janelas de correr com três folhas, sendo uma de vidro de 4mm e duas de alumínio anodizado na cor bronze liso, os demais ambientes apresentam janela de correr com duas folhas de vidro de 4mm. A Figura 3 mostra a fachada frontal da edificação monitorada.

A Figura 4 apresenta a fachada frontal de uma das residências do condomínio, a qual permite identificar a composição das mesmas. As edificações são geminadas e a distância entre cada edificação é de 2,0m.



Figura 3 - Fachada frontal da residência monitorada.



Figura 4 - Composição das edificações do condomínio.

Foram utilizados *dataloggers* do modelo HOB0 Launch Dialog ONSET (Figura 5) para medir a temperatura do ar. O HOB0 possui uma precisão de 0,7°C de temperatura, considerando uma temperatura de 21°C (ONSET, 1999). Foram utilizados dois *dataloggers* na residência, sendo um em cada quarto (quarto 1 e quarto 2, ver Figura 2), e um locado em área externa à edificação.



Figura 5– HOB0 da Onset®.

O monitoramento da edificação ocorreu entre 21 de dezembro de 2015 e 30 de janeiro de 2016. A data do monitoramento foi determinada em função da disponibilidade dos moradores. Destaca-se que entre 28 de dezembro de 2015 e 13 de janeiro de 2016 a edificação estava desocupada, enquanto os demais dias houve ocupação como de costume. Os equipamentos foram programados para medir as variáveis a cada 15 minutos. No quarto 1 o equipamento foi locado no centro do ambiente, enquanto no quarto 2 foi deslocado em relação ao eixo central e ficou mais próximo da parede externa frontal, uma vez que o layout do quarto 2 não permitiu que o equipamento ficasse centralizado.

Os equipamentos internos e externo foram fixados no teto e pendurados por um fio a 1,9m de altura em relação ao piso do segundo pavimento, que corresponde à altura segura que permite que os usuários circulem no ambiente. O equipamento externo foi posicionado embaixo de um beiral, por ser um local seguro; e para protegê-lo dos efeitos da radiação solar foi construída uma barreira radiante. A barreira radiante constituiu-se em envolver o equipamento com um papelão revestido por papel alumínio e com pequenas aberturas nas laterais para permitir ventilação.

Para a aferição dos equipamentos, eles foram colocados em uma caixa de isopor e monitorados por três dias para medir valores de temperatura. Após a coleta dos dados de cada equipamento calcularam-se a média obtida de cada equipamento e a média geral dos três equipamentos. A diferença entre as médias corresponde ao coeficiente de adição que deve ser aplicado para corrigir a medição do equipamento.

3.2 Calibração do modelo

Como a análise deste trabalho é destinada à avaliação do desempenho térmico, para realizar a calibração comparam-se os valores de temperatura do ar obtidos na simulação do modelo com os valores obtidos no monitoramento da edificação. O modelo simulado deve sofrer variações dos dados de entrada até que o valor de temperatura obtido por simulação fique igual ou o mais próximo possível da temperatura monitorada. Neste trabalho, as análises foram feitas no programa computacional EnergyPlus, versão 8.4, que é um programa validado pela ASHRAE *Standard* 140 para a avaliação de desempenho térmico por simulação. Para realizar a calibração, foi criado um arquivo climático com os dados reais, referente aos meses do monitoramento da edificação, que foram registrados na estação meteorológica da cidade de Goiânia e adquiridos no site do INMET (2016).

Foram modificados cinco dados de entrada no modelo de referência, que, segundo Silva e Ghisi (2013), Pereira e Ghisi (2015), Monetti *et al.* (2015) e Paliouras *et al.* (2015), correspondem aos dados que mais influenciam em um sobrado residencial unifamiliar: geometria da cobertura, adição do entorno, absorvância das superfícies, resistência térmica dos materiais e infiltração de ar. Os fatores foram alterados individualmente e a modificação era mantida nas simulações posteriores quando a alteração era considerada satisfatória.

A alteração foi considerada satisfatória quando o (i) desvio médio e o erro quadrático médio foram inferiores aos valores da simulação anterior, até então considerada a mais calibrada; (ii) o coeficiente de determinação (R^2) era próximo de 1; e (iii) a amplitude térmica próxima do valor monitorado. As Equações 1 e 2 mostram como calcular o desvio médio e o erro quadrático médio.

$$Dm = \left| \frac{\sum_{i=1}^N (y_i - x_i)}{N} \right| \quad \text{Equação 1}$$

$$EQ = \left[\frac{\sum_{i=1}^N (y_i - x_i)^2}{N} \right]^{\frac{1}{2}} \quad \text{Equação 2}$$

Onde:

Dm é o desvio médio entre temperaturas (°C);

Yi é a temperatura horária simulada (°C);

Xi é a temperatura horária monitorada (°C);

N é o número de observações (dimensional);

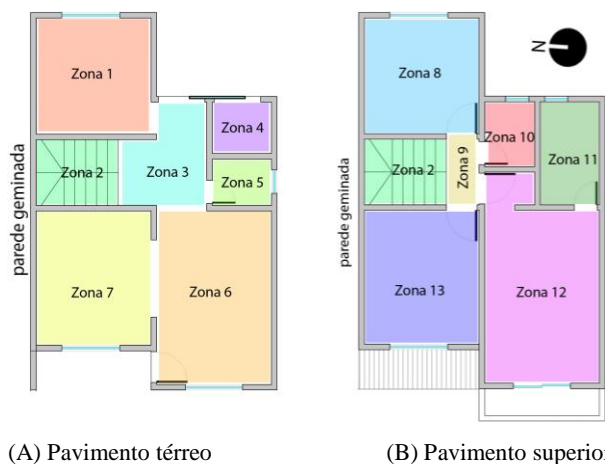
EQ é o erro quadrático médio (°C).

A análise de correlação foi realizada entre a temperatura do ar monitorada e simulada. A correlação entre os elementos foi considerada forte quando o coeficiente de determinação (R^2), que varia de 0 a 1, estava mais próximo de 1 e a linha de tendência mais próxima da bissetriz. Os cálculos dos coeficientes de determinação e os gráficos de correlação foram feitos a partir de planilhas eletrônicas.

As análises dos dados foram feitas com base em três dias consecutivos representativos do período monitorado, que correspondem aos dias com temperatura mais próxima da média das temperaturas médias diárias (GOULART, 1993).

3.2.1 Caso Base

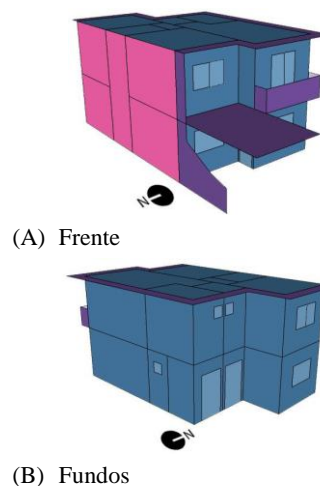
A simulação ocorreu em terreno de subúrbio, que caracteriza a área em que a edificação monitorada está inserida. O modelo que representa a residência unifamiliar monitorada possui 104,24m² de área e treze zonas térmicas, conforme mostra a Figura 6. A cobertura foi modelada considerando uma câmara de ar com resistência térmica igual a 0,21m²K/W, que é utilizado em superfícies com alta emissividade (ABNT, 2005). Por se tratar de uma edificação geminada, uma das paredes externas foi considerada adiabática, ao passo que as outras correspondem a paredes voltadas para o exterior. A Figura 7 destaca a parede adiabática que está demarcada com cor rosa.



(A) Pavimento térreo

(B) Pavimento superior

Figura 6 - Planta baixa dos pavimentos com a localização das zonas térmicas.



(A) Frente

(B) Fundos

Figura 7 - Perspectivas volumétricas.

A Tabela 1 apresenta os parâmetros adotados na composição da envoltória da edificação. As propriedades físicas dos materiais utilizados correspondem aos valores indicados pela NBR 15.220-2 (ABNT, 2005). A edificação é pintada nas cores branco gelo, fosco pérola e amarelo claro, por isso foi adotada uma absorvância padrão de 0,3 para a pintura. A composição da parede corresponde à argamassa, tijolo furado, resistência térmica da câmara de ar, tijolo furado e argamassa. A resistência térmica da câmara de ar do tijolo furado é de $0,16\text{m}^2\text{K/W}$, conforme indicado por Ordenes *et al.* (2003). A cobertura é composta por telha cerâmica, câmara de ar com resistência térmica de $0,21\text{m}^2\text{K/W}$ e laje de concreto. O piso é modelado como piso cerâmico, argamassa, laje de concreto e argamassa. Foi adotada uma espessura de 4mm e condutividade de $0,9\text{W/mK}$ para o vidro da janela. Foram adotados os valores indicados na biblioteca do *EnergyPlus* para os demais valores das propriedades físicas do vidro.

Tabela 1 - Propriedades físicas dos materiais.

Elemento	Rugosidade	Espessura (m)	Condutividade (W/mK)	Densidade (kg/m ³)	Calor específico (J/kgK)	Transmitância (W/m ² .K)	Absorvância solar das superfícies externas	Resistência térmica (m ² .K/W)
Argamassa	Média rugosidade	0,025	1,15	2000	1000	2,28 ¹	-	0,022
Tijolo 6 furos circ. 10cm	Média rugosidade	0,03	0,90	1232	920		-	0,033
Laje de concreto	Rugoso	0,12	1,75	2200	1000	-	-	0,069
Telha de barro	Média rugosidade	0,01	1,05	1764	920	1,93 ²	0,4	0,010
Madeira para porta	Lisa	0,03	0,29	900	1340	-	0,3	0,103
Piso cerâmico	Lisa	0,01	0,90	1600	920	-	-	0,011
Alumínio anodizado cor bronze	Lisa	0,03	0,23	2700	880	-	0,8	0,043

Notas:

¹ Composição parede externa: argamassa, tijolo seis furos, argamassa.

² Composição cobertura: telha de barro, resistência térmica de $0,21\text{m}^2\text{K/W}$, forro de concreto.

O padrão de uso utilizado nas simulações tem as características de uma edificação desocupada indicadas na Tabela 2. Sabe-se que calibrar um modelo com ocupação usual traz melhores resultados, uma vez que leva em consideração o funcionamento da ventilação natural; entretanto, quando a casa ficou ocupada, não houve modificações na abertura das janelas, o que impossibilitou a análise da ventilação. Por isso, o processo de calibração foi feito adotando o padrão de uso informado na Tabela 2, pois calibrar uma edificação sem uso simplifica o processo de calibração.

Tabela 2 - Parâmetros utilizados para simulação no Energy Plus.

Parâmetros	Característica do padrão de uso
Ocupação	0%
Iluminação	0%
Abertura de janelas	Fechadas. Somente as janelas dos banheiros abertas
Abertura de portas	Portas internas abertas e externas fechadas
Equipamentos elétricos	Desligados, inclusive desconectados das tomadas

3.2.2 Alteração geometria da cobertura

Nesta etapa foi alterada a modelagem da cobertura, transformando-a em uma zona térmica e adotando as inclinações reais do telhado. A cumeeira possui altura de 1,50m e no limite da parede externa da edificação a altura equivale a aproximadamente 15cm. A inclinação da cobertura foi definida a partir da altura da cumeeira. O modelo utilizado está ilustrado na Figura 8.

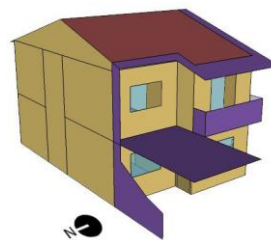
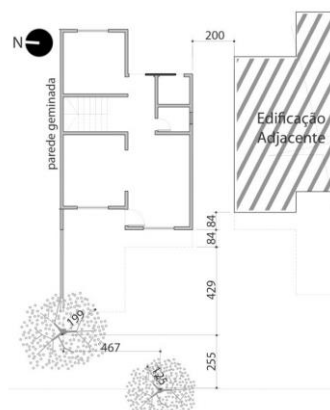


Figura 8 - Perspectiva volumétrica.

3.2.3 Adição do entorno

No caso base a edificação foi modelada isoladamente, sem a presença do entorno. Como existem alguns objetos do entorno que sombreiam a edificação e que podem influenciar na carga térmica interna da edificação, fez-se necessário modelar as vegetações de grande porte e a residência próxima para a calibração do modelo. O entorno e as distâncias dos objetos que causam sombreamento na edificação monitorada estão indicados na Figura 9. Ressalta-se que a delimitação do quintal nos fundos da residência é feita com alambrado e, por isso, não provoca sombreamento na edificação.



*Nota: unidade de medida em centímetros.

Figura 9 - Planta baixa do pavimento térreo com o entorno.

3.2.4 Alteração da infiltração de ar

A infiltração de ar é um parâmetro difícil de medir e, por isso, os pesquisadores em geral adotam 1 troca/h para uma boa vedação, que corresponde ao valor utilizado no caso base (TOMMERUP; ROSE; SVEDSEN, 2007; SORGATO *et al.*, 2014; PEREIRA; GHISI, 2015). Considerando que as janelas dos quartos são do tipo veneziana, optou-se por aumentar a infiltração para 1,50 trocas/h em todos os quartos, pois segundo Tommerup, Rose e Svendsen (2007) é um valor apropriado para ambientes que não possuem boa vedação das portas e janelas.

3.2.5 Alteração da resistência térmica

Os valores das resistências térmicas adotados no caso base foram obtidos da NBR 15.220-2 (ABNT, 2005), a qual informa que se trata de valores indicativos. Portanto, optou-se pela variação da resistência térmica em 15% para mais e para menos, acarretando em duas análises nessa etapa. Conforme Santana (2006) e Pereira e Ghisi (2015), a alteração em 15% da resistência térmica é suficiente, uma vez que a influência da variação da transmitância térmica dos materiais é linear em relação ao desempenho térmico, sendo desnecessário avaliar outras variações.

3.2.6 Alteração da absorvância da superfície

O valor de absorvância solar utilizado no caso base se trata de um indicador estabelecido pela NBR 15.220-2 (ABNT, 2005), portanto esta etapa envolve a modificação da absorvância. Foi utilizado o espectrômetro Alta II (Figura 10) para medir a refletância dos materiais e, conseqüentemente, definir o valor da absorvância solar dos materiais do envelope. Devido à imprecisão do equipamento, foi adotado um erro de $\pm 0,10$ no valor de refletância (PEREIRA *et al.*, 2015). Portanto, nesta etapa foram avaliados três valores de absorvância para cada material, com erros iguais a 0, +0,1 e -0,1.



Figura 10 - Espectrômetro Alta II.

Para reduzir os erros de medição, foram feitas três medições para cada comprimento de onda e, assim, foram utilizadas as voltagens médias obtidas nas três medições para o cálculo da refletância. Foi utilizado um papel branco dobrado de 75g/m² como amostra de referência. As medições ocorreram durante a noite e o equipamento foi protegido por um tecido preto, para evitar que a irradiação interferisse nos valores medidos.

4. ANÁLISE DE RESULTADOS

Nesta seção, analisam-se os resultados da pesquisa. As análises são referentes aos dois ambientes monitorados, quarto 1 e quarto 2, indicados na Figura 2, e aos três dias consecutivos representativos do período monitorado, que correspondem aos dias 28, 29 e 30 de dezembro de 2015. Como a diferença entre as médias foi maior que a faixa de precisão do equipamento, a Tabela 3 apresenta os coeficientes de adição para correção dos valores obtidos no monitoramento.

Tabela 3 - Aferição dos equipamentos.

Variável analisada	Quarto1	Externo	Quarto 2
Temperatura (°C)	Média	25,46	24,93
	Média geral	25,34	
	Coefficiente de adição	-0,12	0,41
			-0,29

A Tabela 4 indica os valores de desvio médio, erro quadrático e amplitude térmica dos dados monitorados e simulados em cada etapa de calibração e se o dado de entrada modificado foi mantido nas simulações seguintes.

Tabela 4 - Valores para comparação dos dados e verificação se a alteração é adotada para as simulações posteriores.

Caso	Caracterização dos dados de entrada	Desvio médio (°C)		Erro quadrático (°C)		Amplitude térmica (°C)		Dado mantido
		Quarto 1	Quarto 2	Quarto 1	Quarto 2	Quarto 1	Quarto 2	
-	Monitorado	-	-	-	-	0,96	1,83	-
1	Caso Base	0,32	0,13	0,22	0,09	2,22	2,51	-
2	1 + Cobertura	0,39	0,26	0,18	0,10	1,89	2,26	Não
3	1 + Entorno	0,28	0,10	0,20	0,08	2,18	2,44	Sim
4	3 + Infiltração 1,5	0,12	0,01	0,24	0,10	2,47	2,73	Não
5	3 + 15% Resistência térmica	0,30	0,12	0,20	0,08	2,15	2,38	Sim
6	3 + -15% Resistência térmica	0,25	0,08	0,19	0,08	2,21	2,51	Não
7	5 + Absortância com erro=0	0,76	0,48	0,47	0,20	2,31	2,57	Não
8	5 + Absortância com erro = +0,1	1,23	0,95	0,98	0,57	2,52	2,83	Não
9	5 + Absortância com erro = -0,1	0,27	0,01	0,18	0,07	2,09	2,30	Sim

A Figura 11 apresenta a correlação entre temperaturas monitorada e simulada nos quartos 1 e 2. O coeficiente de determinação (R^2) indica o quanto o modelo é capaz de explicar os dados monitorados. Quanto mais próximo o coeficiente de determinação (R^2) é de 1 e a linha de tendência é da bissetriz, maior é a correlação entre os dados e, portanto, mais calibrado está o modelo.

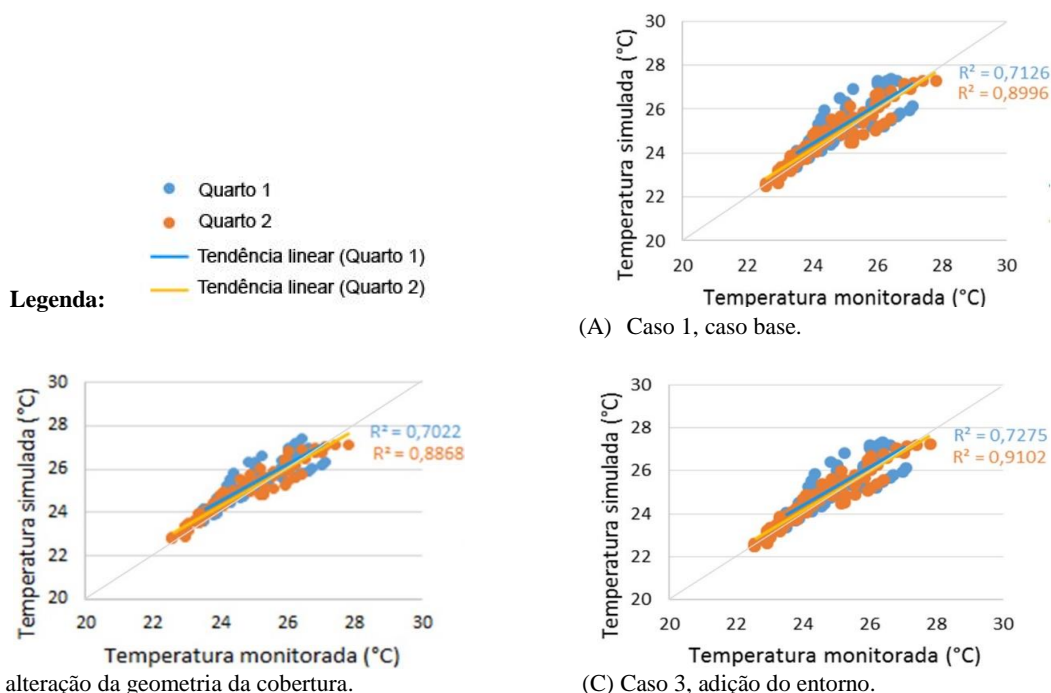
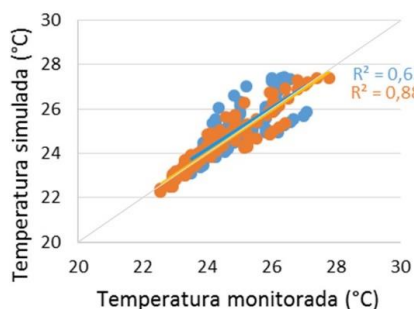
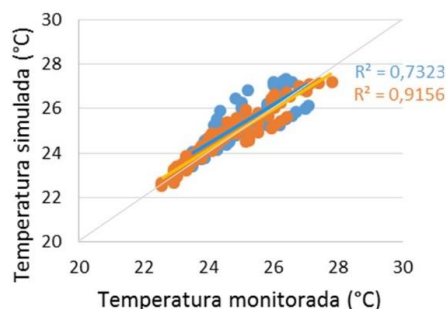


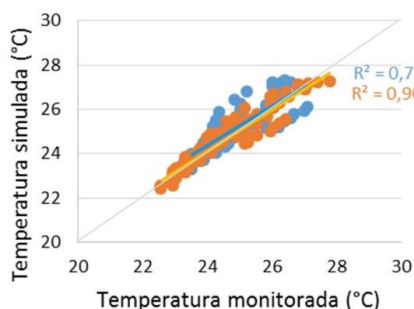
Figura 11 - Correlação entre temperaturas monitorada e simulada nos quartos 1 e 2.



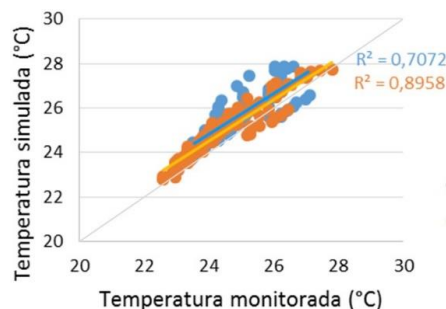
(D) Caso 4, alteração da infiltração do ar.



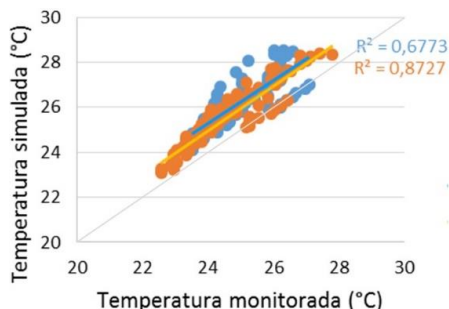
(E) Caso 5, alteração da resistência térmica da envoltória em +15%.



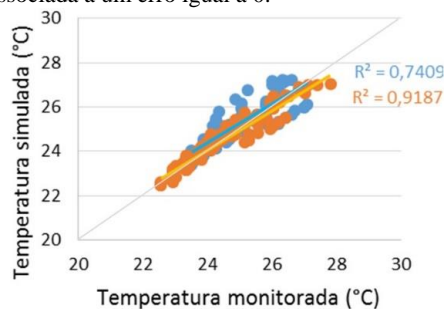
(F) Caso 6, alteração da resistência térmica da envoltória em -15%



(G) Caso 7, alteração da absorvância da envoltória associada a um erro igual a 0.



(H) Caso 8, alteração da absorvância da envoltória associada a um erro igual a +0,10.



(I) Caso 9, alteração da absorvância da envoltória associada a um erro igual a -0,10.

Figura 11 - Correlação entre temperaturas monitorada e simulada nos quartos 1 e 2 (continuação).

Ressalta-se que a alteração da absorvância foi dividida em três etapas, pois foi utilizado um equipamento que possui um erro de $\pm 0,10$ e, portanto, foi necessário simular os valores de absorvância com erros iguais a zero, +0,10 e -0,10. A Tabela 5 apresenta os valores de absorvância estabelecidos após o processo de medição e cálculos matemáticos e os valores adotados nas simulações quando considerados erros iguais a +0,10 e -0,10.

Tabela 5 - Valores de absorvância solar após a medição com equipamento Alta II.

Elemento	Absorvância	Absorvância (com erro = +0,1)	Absorvância (com erro = -0,1)
Telha de barro	0,60	0,70	0,50
Porta de madeira	0,50	0,60	0,40
Pintura	0,15	0,25	0,05
Alumínio da janela	0,86	0,96	0,76

Dos nove casos avaliados, três foram considerados satisfatórios, pois obtiveram influências significativas e positivas no processo de calibração do modelo, que são: a adição do entorno, o aumento em 15% no valor da resistência térmica da envoltória e a alteração da absorvância da envoltória associada a um erro de -0,10. Os três casos considerados satisfatórios obtiveram o coeficiente de determinação (R^2) mais próximo de 1 e a linha de tendência ficou mais próxima da bissetriz, quando comparados com a simulação anterior mais calibrada, o que indica maior correlação entre os dados.

A alteração da geometria da cobertura, caso 2, aumentou o desvio médio e tornou a correlação entre as temperaturas mais fraca e, por isso, essa alteração não foi adotada nas simulações posteriores. Portanto, a geometria da cobertura estabelecida no caso base, caso 1, representa melhor a edificação real. É possível que

a geometria da cobertura definida no caso 2 não represente a edificação real, uma vez que a altura da cumeeira foi determinada a olho nu, sem o uso de instrumento de medição. Por esse motivo, pode-se dizer que a mudança da geometria da cobertura trouxe um resultado aquém das expectativas.

No caso 3, referente à adição do entorno, todos os parâmetros utilizados para comparar os dados monitorados e simulados mostraram que a adição do entorno foi satisfatória no processo de calibração. Dentre os casos simulados, a alteração do entorno foi o parâmetro que mais aumentou a correlação entre os dados simulados e monitorados, tanto para o quarto 1 quanto para o quarto 2.

Dentre os casos avaliados, a alteração do valor da infiltração de ar, caso 4, foi a que obteve resultados mais insatisfatórios. A alteração reduziu o desvio médio nos dois ambientes, em relação à simulação anterior, entretanto, aumentou o erro quadrático e a amplitude térmica. A análise de correlação mostrou que o comportamento da temperatura simulada se distanciou da temperatura monitorada, principalmente para o quarto 1, uma vez que o coeficiente de determinação reduziu. Nesse sentido, essa alteração não foi considerada satisfatória e, por isso, não foi mantida nas simulações seguintes.

Em relação à alteração do valor da resistência térmica, nota-se que cada critério de avaliação indicou diferentes casos em que o resultado simulado foi o mais próximo do medido. Entretanto, o aumento em 15%, caso 5, foi o mais satisfatório, pois trouxe melhores resultados em relação à amplitude térmica e o coeficiente de determinação (R^2) mostrou que há maior correlação entre os valores monitorados e simulados, tanto para o quarto 1 quanto para o quarto 2.

A alteração da absorvância associada a um erro de -0,10, caso 9, foi o único caso na modificação da absorvância que obteve melhoria nos quatro parâmetros avaliados, indicando que a alteração foi significativa. É preciso destacar que, segundo a NBR 15.220-2 (ABNT, 2005), o valor de absorvância de 0,05 adotado para a pintura, indicada na Tabela 5, é recomendado para chapa de alumínio nova. Entretanto, como no processo de calibração essa alteração se mostrou satisfatória, o valor de absorvância foi mantido no modelo de referência.

Ressalta-se que, durante o monitoramento da edificação, a localização e a altura em que o equipamento foi posicionado difere do local que o EnergyPlus obtém os valores de temperatura no modelo simulado. Portanto, existe uma dificuldade e divergência na comparação entre os valores monitorados e simulados, o que dificulta o processo de calibração. Os valores de amplitude térmica entre o caso monitorado e o caso calibrado, caso 9, são distintos; existe uma diferença de 1,12°C para o quarto 1 e 0,47°C para o quarto 2. Os valores de desvio médio e erro quadrático obtidos no caso 9 são considerados satisfatórios, uma vez que são bem próximos de zero. Os coeficientes de determinação indicam uma correlação forte entre os valores monitorados e simulados, principalmente para o quarto 2 cujo valor foi 0,92.

Outros trabalhos que calibraram uma residência (SILVA; GHISI, 2013; PEREIRA; GHISI, 2015; MONETTI et al., 2015; PALIOURAS et al., 2015) indicaram as propriedades térmicas das superfícies, temperatura do solo e o comportamento do usuário como os dados de entrada que mais influenciam na calibração. No caso analisado, o entorno foi o parâmetro de maior influência e, em seguida, as propriedades térmicas das superfícies. Ressalta-se que não foi possível avaliar os efeitos da temperatura do solo e do comportamento do usuário, uma vez que os ambientes analisados não têm contato direto com o solo e a residência estava desocupada.

5. CONCLUSÕES

Essencialmente, os resultados mostram a influência que os dados de entrada exercem nos resultados das simulações. Dentre os parâmetros avaliados, a definição do entorno foi a que mais influenciou no processo de calibração e, portanto, destaca-se a importância e influência da modelagem dos elementos do entorno que possam sombrear a edificação avaliada. As propriedades térmicas das superfícies se mostraram importantes no processo de calibração, uma vez que os dois parâmetros analisados, resistência térmica e absorvância, sofreram alterações significativas no processo de calibração. Dos cômodos analisados, o quarto 2 foi o que obteve melhor resultado no processo de calibração.

Nota-se que a localização e a altura em que o equipamento foi posicionado durante o processo de monitoramento da edificação difere do local que o EnergyPlus obtém os valores de temperatura no modelo simulado. Portanto, existe divergência na comparação entre os valores monitorados e simulados, o que compromete o processo de calibração. Contudo, considerando que o equipamento HOBO utilizado no monitoramento da edificação possui uma imprecisão de 0,7°C, o processo de calibração realizado foi considerado satisfatório.

Este estudo serve de base para a calibração de uma residência unifamiliar desocupada. Destaca-se que a análise foi feita em relação ao sombreamento, não levando em consideração os aspectos de ventilação. Ressalta-se que quando houver ocupação e contato direto do ambiente com o solo, o comportamento do

usuário e a temperatura do solo devem ser analisados no processo de calibração, uma vez que outros estudos comprovaram que são parâmetros importantes na calibração.

Como limitações da pesquisa, têm-se a avaliação com a casa desocupada e a análise de somente dois ambientes da edificação. Essas condições podem simplificar o processo de calibração, uma vez que deixam de considerar parâmetros de ventilação, ou outras características específicas dos outros ambientes da edificação.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 15220-2**: Desempenho térmico de edificações – Parte 2: Métodos de cálculo da transmitância térmica, da capacidade térmica, do atraso térmico e do fator solar de elementos e componentes de edificações. Rio de Janeiro, 2005.
- BATISTA, J. O. **Arquitetura e seu desempenho térmico no contexto do semiárido alagoano**: estudos de caso em Santana do Ipanema. Florianópolis, 2006. Dissertação (Mestrado). Programa de Pós Graduação em Arquitetura e Urbanismo. Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2006.
- BEKKOUCHE, S. M. E. A.; BENOUAZ, T.; CHERIER, M. K.; HAMDANI, M.; YAICHE, R. M.; KHANNICHE, R. Influence of Building Orientation on internal temperature in saharian climates, building located in Ghardaia region (Algeria). **Thermal Science**, [S.I.], v. 17, n. 2, p. 349-364, 2013.
- CORBELLA, O. D.; CASTANHEIRA, R. G. Sobre a necessidade de proteção da radiação solar incidente nas fachadas, para edifícios entre as latitudes 10° e 35°. In: Encontro Nacional sobre o Conforto no Ambiente Construído, 6, 2001. Encontro Latino-Americano sobre o Conforto no Ambiente Construído, 3, 2001. **Anais...** São Pedro: ANTAC, 2001.
- CORBELLA, O.; YANNAS, S. **Em Busca de uma Arquitetura Sustentável para os Trópicos: Conforto Térmico**. Rio de Janeiro: Revan, 2003.
- GOULART, S. **Dados climáticos para avaliação de desempenho térmico de edificações em Florianópolis**. Florianópolis, 1993. Dissertação (Mestrado). Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 1993.
- INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA (INMET). **Estações e dados**. Disponível em: <inmet.gov.br> Acesso em janeiro de 2016.
- KAVOUSIAN, A.; RAJAGOPAL, R.; FISCHER, M. Determinants of residential electricity consumption: Using smart meter data to examine the effect of climate, building characteristics, appliance stock, and occupants' behavior. **Energy**, [S.I.], v. 55, p. 184-194, 2013.
- MONETTI, V.; DAVIN, E.; FABRIZIO, E.; ANDRE, P.; FILIPPI, M. Calibration of building energy simulation models based on optimization: a case study. **Energy Procedia**, 6th International Building Physics Conference, v. 78, p. 2971–2976, 2015.
- O'BRIEN, W. Occupant-proof building: can we design buildings that are robust against occupant behavior?. In: Conference of international building performance simulation association, 13th. **Proceedings...** Chambéry, 2013.
- ONSET COMPUTER CORPORATION. **Manual HOBO Datalogger RH-Temp**. ONSET, [S.I.], 1999.
- ORDENES, M.; PEDRINI, A.; GHISI, E.; LAMBERTS, R. **Metodologia utilizada na elaboração da biblioteca de materiais e componentes construtivos brasileiros para simulações no Visualdoe-3.1**. (Relatório Interno) – Departamento de Engenharia Civil, UFSC, Florianópolis, 2003.
- PALIOURAS, P.; MATZAFLARAS, N.; PEUHKURI, R. H.; KOLARIK, J. Using measured indoor environment parameters for calibration of building simulation model- a passive house case study. 6th International Building Physics Conference. **Energy Procedia**, [S.I.], v. 78, p. 1227-1232, 2015.
- PEREIRA, C. D.; GHISI, E. **Calibração de um modelo computacional de uma residência unifamiliar localizada em Florianópolis**. Encontro Nacional e Encontro Latino-americano de Conforto no Ambiente Construído, Campinas, 2015.
- PEREIRA, C. D.; MARINOSKI, D. L.; LAMBERTS, R.; GUTHS, S.; GHISI, E. **Relatório de avaliação do espectrômetro portátil ALTA II**. Centro brasileiro de eficiência energética (CB3E), Florianópolis, 2015.
- SANTANA, M. V. **Influência de parâmetros construtivos no consume de energia de edifícios de escritório localizados em Florianópolis**. Florianópolis, 2006. Dissertação (Mestrado). Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2006.
- SANTIN, O. G.; ITARD, L.; VISSCHER, H. The effect of occupancy and building characteristics on energy use for space and water heating in Dutch residential stock. **Energy and Buildings**, v. 41, p. 1223–1232, 2009.
- SILVA, A. S.; GHISI, E. Uncertainty analysis in building simulation: a case study in low-income dwellings in Brazil. Conference of International Building Performance Simulation Association, 13th. **Proceedings...** Chambéry, France, August 26-28. 2013.
- SORGATO, M. J.; MELO, A. P.; MARINOSKI, D. L.; LAMBERTS, R. Análise do procedimento de simulação da NBR 15575 Para avaliação do desempenho térmico de edificações residenciais. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 14, n. 4, p. 83-101, 2014.
- TOMMERUP, H.; ROSE, J.; SVENDSEN, S. Energy-efficient houses built according to the energy performance requirements introduced in Denmark in 2006. **Energy and Buildings**, v.39, n.1, p 1123-1130, 2007.