



CALIBRAÇÃO DE SIMULAÇÃO TÉRMICA DE UMA UNIDADE HABITACIONAL EM EDIFÍCIO MULTIFAMILIAR

Skarlen Fialho Soria Galvarro (1); Joyce Correna Carlo (2); Ítalo Bruno Baleeiro Guimarães (3); Antônio Cléber Gonçalves Tibiriçá (4)

(1) Arquiteta e Urbanista, Mestranda do Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo, skarlensoria@gmail.com (2) Departamento de Arquitetura e Urbanismo, joycecarlo@ufv.br (3) Graduando de Arquitetura e Urbanismo, italo.guimaraes@ufv.br (4) Departamento de Arquitetura e Urbanismo, tibirica@ufv.br

DAU, Avenida Peter Henry Rolfs, s/n - Campus Universitário, UFV 36570-000, Tel.: (31) 3899-3530.

RESUMO

O processo de calibração consiste em comparar resultados da simulação com valores de referência visando corrigir erros e reduzir incertezas do modelo. Este artigo tem como objetivo apresentar os resultados do processo de calibração térmica pelo programa *EnergyPlus*, de uma unidade habitacional multifamiliar da cidade de Viçosa (MG), a fim de validar um modelo computacional baseado em medições em uma edificação real. O método foi composto por duas fases: o levantamento de campo com a realização de medições das variáveis térmicas e verificação do uso da unidade, e calibração. As análises foram realizadas por meio do erro quadrático médio (EQM) e pelo viés médio (viesM) para amostras de representatividade sazonal, por ambiente de permanência prolongada e para a unidade habitacional. Partiu-se de um caso-base que apresentou EQM percentuais baixos: temperatura radiante média (T_r) de 0,06, temperatura de bulbo seco (TBS) de 0,04 e umidade relativa (UR) de 0,14. Para o caso calibrado, a T_r e a TBS não apresentaram mudanças significativas na unidade habitacional como um todo, mas houve reduções nas análises parciais sazonais e por ambiente avaliado. Já o EQM da umidade relativa da unidade habitacional foi reduzido em 1%, com maior impacto nos EQMs sazonais e por ambiente. Além dos resultados quantitativos, foi discutido o planejamento da calibração e das variáveis a serem alteradas no modelo, uma vez que estas dependem do desempenho da etapa anterior e, portanto, torna-se pouco previsível.

Palavras-chave: levantamento de campo, simulação computacional térmica, *energyplus*, calibração.

ABSTRACT

The calibration process consists on comparing simulation results with reference values to correct errors and reduce model uncertainties. The present paper aims to calibrate a thermal model using the software *EnergyPlus*, of a multifamily dwelling unit in the city of Viçosa (MG), in order to validate a computer model based on measurements in a real building. Two stages were developed: a local survey based on measurements of thermal variables and gathering of the building use and the model calibration. Analyses were performed using the squared mean error (SME) and the mean bias (viesM) for seasonal representative samples, for long term periods rooms and for the dwelling unit. The base-case SME were low: mean radiant temperature (T_r) of 0.06, 0.04 of dry-bulb temperature (WBT), and air relative humidity (RH) of 0.14. For the calibrated case, T_r and WBT showed no significant change in the dwelling unit, but there were reductions on the partial analysis of seasonal results and of each room. Still, the SME of relative humidity of the dwelling unit was reduced in 1%, with the highest impact in seasonal SME and room SME. Besides the quantitative results, the planning of the calibration and of the design variables to be implemented in the model was discussed. They depend on the performance of the previous step and, therefore, they are not possible to be correctly previewed.

Keywords: local survey, thermal simulation, *EnergyPlus*, calibration.

1. INTRODUÇÃO

Nos últimos anos, várias ferramentas computacionais de simulação termo-energética de edificações têm sido desenvolvidas. Por meio dessas ferramentas pode-se avaliar o impacto de alternativas de projeto quanto ao seu comportamento energético, térmico, acústico, de iluminação, etc. A simulação computacional é multidisciplinar, envolvendo áreas de arquitetura, engenharia mecânica, fenômenos comportamentais e de climatologia, e que por isso se destaca como uma importante ferramenta de avaliação energética (PEREIRA e GHISI, 2011).

Dentre essas ferramentas um dos programas de simulação de edificações mais conhecido no Brasil é o *EnergyPlus* (CRAWLEY *et al.*, 2008), que realiza simulações horárias usando o método do balanço térmico. Além disso, realiza a análise das cargas térmicas decorrente dos fechamentos da envoltória, dos equipamentos, do sistema de iluminação, dos usuários e das trocas de ar (PEREIRA e GHISI, 2011). Dentre os dados que o programa *EnergyPlus* calcula para os edifícios condicionados naturalmente, tem-se: as temperaturas internas e as trocas de calor. Já para os edifícios condicionados artificialmente, ele pode calcular a demanda de cargas de aquecimento e resfriamento para manter temperaturas de conforto, definindo o consumo energético dos sistemas (SORGATO, 2012).

Entretanto, o uso destas ferramentas nos escritórios ainda é pouco utilizado. Alguns dos fatores que dificultam os projetistas o seu uso são: a complexidade das ferramentas, a necessidade de tornar mais clara a apresentação dos resultados ao usuário e de reduzir o tempo gasto tanto no processo de simulação quanto na etapa de modelagem e calibração dos modelos (WESTPHAL e LAMBERTS, 2005). Para melhor entendimento do processo de calibração, metodologias e estudos de calibração tem sido elaborados nos últimos anos, a exemplo, o estudo de Westphal e Lamberts (2005), Pereira (2009), Goffart e Wurtz (2011).

Segundo Westphal (2007, p.2), “a calibração consiste no processo interativo no qual o usuário ajusta os parâmetros de seu modelo para que o programa simule adequadamente o desempenho térmico e energético da edificação”, mas para isso, é preciso manipular diversas variáveis de entrada por meio de ferramentas de simulação detalhadas. Assim, o processo de calibração consiste em comparar resultados da simulação com valores de referência visando corrigir erros e reduzir incertezas do modelo.

De fato, Goffart e Wurtz (2011) observaram como o uso de dados de entrada imprecisos podem gerar um significativo sobreaquecimento em uma edificação. Nesse estudo analisaram dois fatores de incertezas na simulação de edifícios eficientes, um relativo as proteções solares e outra a parâmetros de simulação, como por exemplo, o albedo. Para isso foram usados dados medidos e simulados, cujos fatores citados eram alterados para análise dos efeitos dessa mudança. Como resultado, identificaram erros na modelagem geométrica e uso de dados de entrada imprecisos como os responsáveis por um aumento das horas de sobreaquecimento, o que evidenciou como as incertezas na simulação afetam os resultados quando se compara dados medidos e simulados. Por meio de um modelo de casa geminada cuja parede era na realidade de 35 cm, demonstrou-se que o modelo geométrico é o primeiro fator que pode gerar impacto na simulação, o próprio programa de modelagem usado pode induzir a erros. Observou-se tal fato pela comparação dos resultados entre os modelos com e sem as aletas que representavam a espessura das paredes: o modelo que não considera a espessura real das paredes apresentou temperaturas de 5 a 10% maiores do que o modelo com aletas. Ao alterar o albedo de 0,2 para 0,4, encontraram uma diferença de 147% nas horas com sobreaquecimento. Estudos como este evidenciam a importância do processo de calibração na simulação, a fim de minimizar o grau de incerteza do modelo. Mas há diversos outros fatores que devem ser analisados e melhor detalhados para evitar erros nos resultados da simulação e assim, poder ter uma simulação mais confiável (GOFFART e WURTZ, 2011).

Westphal e Lamberts (2005) propõem uma metodologia de apoio para a etapa de calibração de modelos de edificações numa simulação termo-energética, o que foi feito a partir do uso de técnicas de análise de incertezas e sensibilidade dos dados de entrada dos modelos computacionais pelo programa *EnergyPlus*. Para avaliar o modelo na calibração, os dados de saída mais usados são os de consumo de energia elétrica (horário, mensal e anual) e a temperatura interna. O ajuste dos dados de entrada são realizados sobre aqueles que se tem maior incerteza ou não foram definidas inicialmente no modelo e que, por isso, utilizou-se de valores *defaults* (valores padronizados fornecidos pelo próprio programa) para dar início à simulação. Entende-se como “dados de entrada”, como exemplos, os valores relativos a geometria da edificação, as propriedades térmicas dos materiais, a potência de equipamentos elétricos, padrões de uso e ocupação da edificação. Raramente o projetista tem acesso a tais com precisão logo no início da modelagem e posteriormente devem ser revistos a partir da observação dos primeiros resultados da simulação que diferem do real (WESTPHAL e LAMBERTS, 2005).

Pereira e Ghisi (2011) analisaram a influência que os materiais construtivos da envoltória das

edificações residenciais unifamiliares ocupadas e ventiladas naturalmente, tem sobre o seu desempenho térmico. Antes da simulação efetiva para encontrar o número de horas de conforto e desconforto, foi realizada a calibração do modelo inicial. Para isso foram alterados alguns parâmetros, comparando-se os resultados da simulação com os dados medidos, a fim de obter um modelo de simulação o mais próximo possível da unidade real. Os autores fazem a análise estatística de dados horários ao longo de um ano de temperatura do ar por meio do erro quadrático médio (EQM em °C), que indica o erro absoluto entre as grandezas analisadas, e que apresentou EQM para o caso calibrado de 0,6 para sala e 0,7 para quartos, no caso das simulações com ventilação natural.

Diante de tais fatos, fica evidente como o processo de calibração é uma importante etapa a ser realizada numa análise termo-energética, uma vez que possibilita obter modelos mais próximos da realidade e assim gerar resultados mais confiáveis.

2. OBJETIVO

Este artigo visa apresentar o processo de calibração térmica para validar um modelo computacional de unidade habitacional multifamiliar da cidade de Viçosa (MG), ventilada naturalmente com o programa computacional *EnergyPlus*.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

Os materiais usados neste estudo abrangem instrumentos de medição de variáveis ambientais, conforme listados a seguir:

1. Termômetro de globo: foi utilizado um globo negro de plástico com pintura preta, que conforme testes realizados por Valadão (2011) apresentam o mesmo efeito do globo negro metálico, o que permite o uso em maior número concomitantemente. Foram usados três termômetros negros, um ao centro de cada ambiente de permanência prolongada (sala e dois quartos), a uma altura de 1,10 m que, segundo norma ISO 7726 (1996), é adequada para as medições na posição sentada ou em pé;

2. *Data loggers* HOBO U12: registradores de temperatura do ar e umidade relativa do ar, no ambiente interno e externo. Foram usados no total, quatro *data loggers*;

3. Anemômetro de fio quente: indicado para baixas velocidades. Foi usado apenas um equipamento para a medição nos três ambientes,

4. Espectrômetro portátil modelo Alta II: para refletâncias das superfícies em comprimentos de onda entre 470 e 940 nm (região visível e a infravermelho). Foram coletadas as refletâncias da superfície das paredes internas e pisos, para cálculo das absorptâncias.

O método é composto basicamente de duas fases principais:

1º Fase: Estudo e levantamento de campo de uma unidade habitacional real, por meio da caracterização dos materiais, componentes da sua envoltória e do seu interior, e a medição de variáveis ambientais dos ambientes de permanência prolongada (sala de estar e dois quartos). As variáveis medidas foram: a) umidade relativa, b) temperatura de globo negro, c) temperatura de bulbo seco, d) velocidade do ar. Posteriormente foi calculada a temperatura radiante média, conforme ASHRAE *Fundamentals Handbook* (ASHRAE, 2005). Os procedimentos de medição foram orientados pela ISO 7726 (ISO, 1996) em três dias de monitoramento, correspondente a três estações do ano: inverno, primavera e verão.

2º Fase: Realização da calibração térmica por meio da simulação computacional pelo programa *EnergyPlus*, a partir dos dados coletados na primeira etapa, cujo modelo é o caso-base da unidade habitacional medida. Embora o programa simule o ano completo, somente os dados gerados nos três dias do levantamento em campo foram utilizados no processo de calibração. Para tanto, os dados externos medidos foram inseridos no arquivo climático TMY, *Test Meteorological Year*, de Viçosa, ano de 2005 a 2010 (GUIMARÃES e CARLO, 2011), nos dias correspondentes.

3.1. Caracterização da unidade habitacional

Foi selecionada uma unidade habitacional (UH) ventilada naturalmente em edifício multifamiliar, localizada na cidade de Viçosa (MG), latitude 20,75 °S e longitude 42,88 °O, 649 m acima do nível do mar e

na Zona Bioclimática 3. De clima tropical de altitude, tem temperaturas médias mensais variando entre 15,4 °C à 22,3 °C e umidade relativa média entre 76,2% e 84%.

A unidade habitacional foi selecionada conforme indicações de Telles e Carlo (2012). A residência possui 38,23 m² de área construída, com dois moradores ocupando dois quartos, sala de estar, banheiro e copa/cozinha. As aberturas dos quartos estão localizadas em orientações diferentes: o quarto 1 para o nordeste, mesma orientação da sala, e o quarto 2 para o sudeste (Figura 1).



Figura 1 – Planta da unidade habitacional com o mobiliário.

3.2. Levantamento de campo.

Os dados relativo às variáveis ambientais (temperatura radiante média - T_r , temperatura de bulbo seco - TBS e umidade relativa - UR) foram coletados no intervalo de 9h às 20h no inverno, primavera e verão, desconsiderando o horário de verão, nas datas de 20 de agosto de 2012 (inverno), 9 de outubro de 2012 (primavera) e 23 de janeiro de 2013 (verão). As datas de medição são decorrentes da disponibilidade dos moradores, e não foi possível realizar as medições em solstícios e equinócios. Foram identificadas as potências dos equipamentos e lâmpadas, bem como medida as refletâncias das superfícies segundo Dornelles e Roriz (2007) e Santos *et al.*(2009).

Este procedimento refere-se a uma situação de observação do real uso de uma unidade habitacional, cujas condições de levantamento *in loco* não possibilitaram o controle ou interferência no uso da unidade habitacional pelo pesquisador.

Os registradores de temperatura do ar e umidade relativa foram programados para coletar dados a cada 15 minutos. Para as medições internas, os registradores foram posicionados no centro dos três ambientes de permanência prolongada (sala e dois quartos), já para a medição externa, o registrador foi posicionado no centro da janela do quarto orientado para o sudeste, uma vez que o equipamento não poderia receber radiação direta. O termômetro de globo também foi posicionado no centro dos três ambientes citados e o anemômetro foi posicionado no mesmo local e altura.

Como havia usuários ocupando a UH durante as medições, não foi possível intervir na manipulação das aberturas e controle da ocupação dos ambientes, o que ficou a cargo dos moradores da residência. No entanto, todas as alterações ao longo do dia foram registradas (abertura e fechamento das janelas, vestimentas, acionamento de equipamentos, condição do céu, ocorrência de chuvas e ocupação dos ambientes), bem como o horário de sua ocorrência.

3.3. Procedimentos de calibração

Para a análise estatística dos dados medidos e simulados, utilizou-se o erro quadrático médio (EQM) e o viés médio (viesM).

O erro quadrático médio evidencia o erro absoluto entre as grandezas analisadas (Equação 1). Assim, quanto menor o EQM, mais próximos são os dados simulados dos dados medidos. O viés médio é usado para identificar qual a tendência que o modelo em estudo tem para superestimar ou subestimar os valores coletados (Equação 2). Caso viesM seja positivo, os dados simulados são maiores que os dados medidos, e vice-versa. Ele não foi utilizado para identificar o grau de melhoria do modelo, mas para indicar as ações de calibração (característica da edificação ou parâmetros do modelo computacional/numérico) a serem adotadas na etapa seguinte.

$$EQM = \sqrt{\frac{\sum_i^N ((y_i - x_i) / x_i)^2}{N}}$$

Equação 1

$$viesM = \frac{\sum_i^N (y_i - x_i) / x_i}{N}$$

Equação 2

Onde:

EQM = erro quadrático médio, em porcentagem;

ViesM = viés médio, em porcentagem;

Y_i = dado estimado (simulado);

X_i = dado medido *in loco*,

N = número de valores analisados, adimensional.

As variáveis analisadas por meio dos índices (viesM e EQM) foram: a) temperatura radiante média (Tr), b) temperatura de bulbo seco (TBS), c) umidade relativa (UR). O viesM e o EQM foram utilizados para três situações:

1. Avaliação sazonal: o viesM e o EQM foram calculados por dia medido em cada estação, em cada ambiente e por variável (Tr, TBS e UR); o que gera 12 amostras, uma vez que para cada dia medido, foram realizadas 12 medições no intervalo de 9h às 20h, a cada uma hora.

2. Avaliação por ambiente: o viesM e EQM foram calculados por ambiente e por variável (Tr, TBS e UR); sendo assim, cada viesM ou EQM foi calculado com um número total de 36 amostras (1 dia para cada uma das três estações medidas, com 12 horas de medição em cada dia),

3. Avaliação por variável-total: o viesM e EQM foram calculados por variável (Tr, TBS e UR), logo, cada viesM ou EQM foi calculado com um número de 108 amostras (1 dia para cada uma das três estações medidas, com 12 horas de medição em cada dia, para os 3 ambientes).

A calibração foi realizada de duas maneiras distintas: o processo paralelo e processo em série. No processo de calibração paralelo, as características que apresentavam incertezas foram ajustadas individualmente e casos de calibração¹ foram criados para análise individual de seus impactos no desempenho da UH. Depois de confirmado que os resultados da simulação aproximavam-se individualmente dos dados medidos - pela redução do EQM - todas as alterações foram incorporadas em uma única alternativa (Figura 2a). No processo de calibração em série, as características foram incorporadas gradualmente a cada caso que já continha uma melhoria no EQM pela inserção de uma característica em etapa anterior (Figura 2b)².

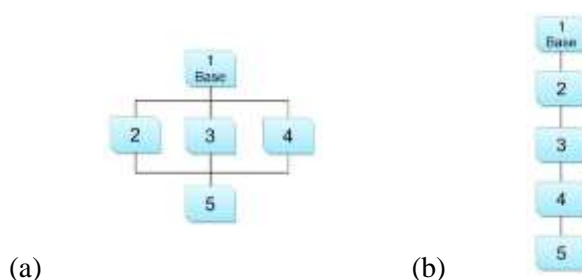


Figura 2 – Dois processos de calibração: (a) paralela; (b) em série.

¹ Casos de calibração: definidos neste trabalho como os modelos computacionais originados a partir do caso-base ou de modelos decorrentes deste, que tiveram alguma característica alterada ou incorporada para verificação de redução no EQM.

² Rosenfeld já discutia em 1996, o método de prioridade para incorporar gradualmente medidas de conservação de energia para otimização do modelo simulado, que se baseava na simulação individual de cada medida. Em seu estudo, entretanto, ele já tinha conhecimento das medidas que poderiam ser viáveis para elevar a eficiência do modelo. No caso de calibração, os resultados da etapa anterior são essenciais para a definição da próxima medida razão pela qual os dois métodos foram avaliados.

4. Caso-base

O caso-base para a simulação computacional térmica no *EnergyPlus* é ventilado naturalmente, composto por nove zonas térmicas internas, sendo cinco zonas correspondentes a cada um dos cinco cômodos do apartamento conforme mostra a Figura 3 (Zona 1 à Zona 5). As outras quatro zonas correspondem aos ambientes que circundam a unidade habitacional: corredor do edifício (Zona Corredor), cozinha da UH vizinha (Zona Lateral), a UH vizinha do pavimento superior (Zona Superior) e a UH do pavimento inferior (Zona Inferior).

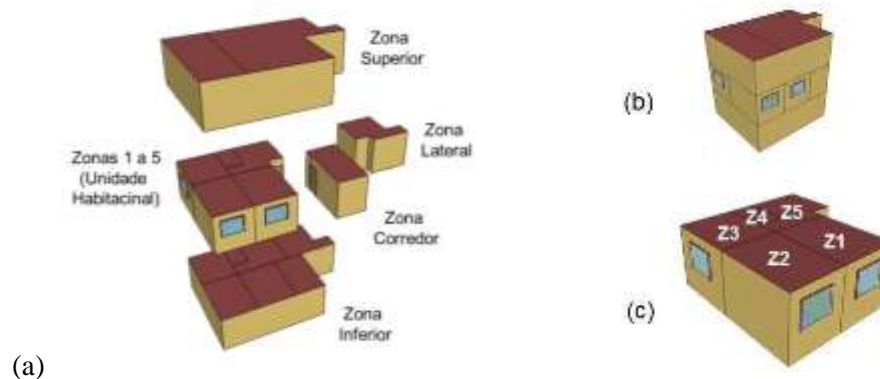


Figura 3 – (a) As nove zonas térmicas do caso-base, separadas para melhor visualização, (b) perspectiva da fachada sudeste e nordeste e (c) as respectivas zonas de 1 a 5 da unidade habitacional do caso-base.

A edificação é de construção recente, cerca de três anos, mas não foi possível ter acesso às especificações de projeto com o construtor. Portanto, utilizou-se o período de construção para considerar que sua envoltória é constituída por paredes internas e externas composta por bloco cerâmico (9x14x24cm), argamassa e pintura clara (parede com transmitância térmica de 2,43 W/(m²K) e capacidade térmica de 152 kJ/m²K), conforme indicado por Telles e Carlo (2012). O piso da unidade foi considerado de espessura 10 cm, composto por três camadas: uma laje de concreto maciço(8 cm), contra-piso e piso cerâmico (2 cm). As janelas não possuem proteções solares e suas esquadrias são de alumínio, com vidros simples transparentes, duas folhas e bandeira, sendo que apenas uma folha se movimenta. As portas são compostas por duas camadas de painel de madeira de placa prensada e uma camada de ar de 2cm. Os dados das propriedades térmicas inseridas na modelagem (condutividade térmica, densidade, calor específico, absorvância para radiação solar) foram consultadas nos seguintes documentos: NBR 15220 (ABNT, 2003), Ordenes *et al* (2003), Pereira (2009), catálogo de propriedades térmicas de paredes e coberturas (2011) e Telles e Carlo (2012).

Os ganhos internos, relativos à ocupação, equipamentos e iluminação, foram estabelecidos de acordo com o registrado nos três dias de medição, assim como o padrão de uso. A iluminação artificial foi utilizada apenas a partir das 18h nos dias de medição de inverno e primavera e no verão a partir das 19h a lâmpada utilizada era do tipo fluorescente compacta de 127V e 20 W de potência. Os equipamentos elétricos considerados ligados durante as medições e suas respectivas potências foram: a) geladeira com potência média de 33 W, b) notebook 150 W, c) televisão 100 W e d) roteador de internet 6 W. A taxa metabólica dos ocupantes são para a sala de 108 W/pessoa, para os quartos de 81 W/pessoa e para a cozinha de 171 W/pessoa (ASHRAE, 2005).

Os parâmetros de ventilação natural foram adotados conforme Sorgato (2012) e Versage (2009), tais como o coeficiente de pressão (Cp) calculados pelo método TNO, coeficientes de pressão indicados pelos autores para diferentes tipos de janelas, portas externas da UH fechadas e portas internas 100% do tempo abertas. O padrão de uso de ventilação pelas aberturas para os dias de medição foi adotado conforme registrado no levantamento de campo.

5. RESULTADOS

Para a calibração térmica da unidade habitacional analisou-se o caso-base, quanto às variáveis ambientais: a) temperatura radiante média (Tr); b) temperatura de bulbo seco (TBS), c) umidade relativa (UR) (Figuras 4 à 6). O EQM da Tr foi de 0,06, da TBS foi de 0,04 e da UR foi de 0,14. O viesM das três variáveis foram respectivamente 0 (zero), 0 (zero) e 0,03, o que indica que a Tr e a TBS tem distâncias simétricas entre o simulado e o medido, enquanto a UR apresenta dados simulados maiores que o medido.

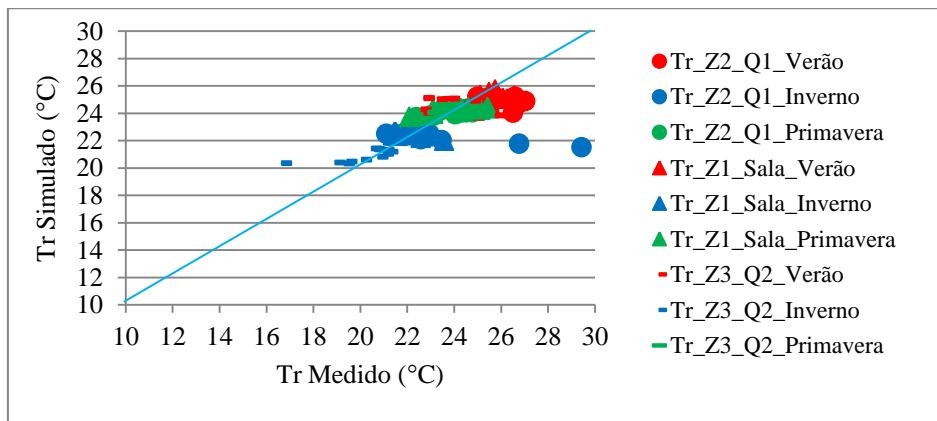


Figura 4 – Tr dos ambientes de permanência prolongada para as três estações medidas.

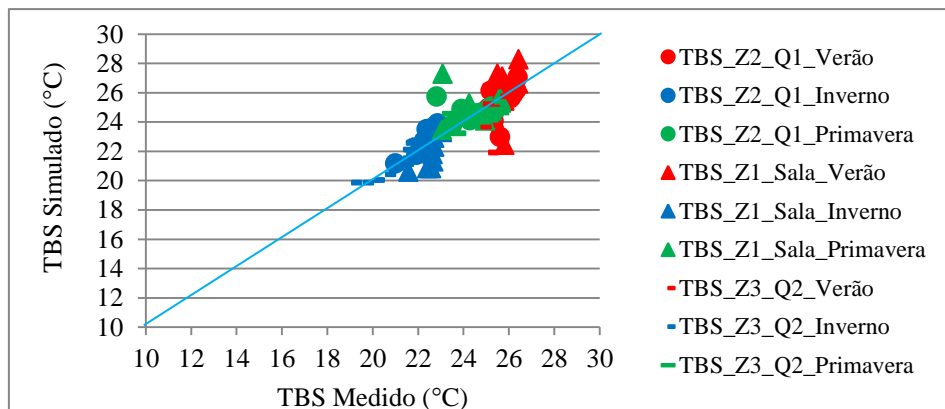


Figura 5 – TBS dos ambientes de permanência prolongada para as três estações medidas.

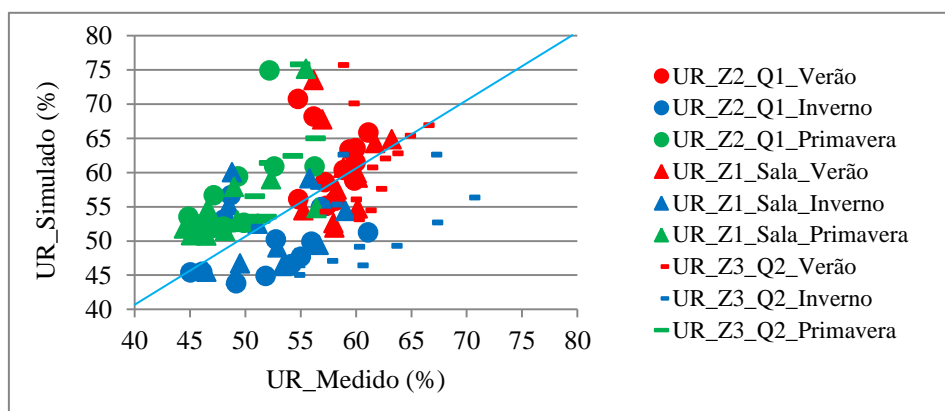


Figura 6 – UR dos ambientes de permanência prolongada para as três estações medidas.

Foram realizadas mais de 40 simulações no processo de calibração. Os casos cujos ajustes realizados indicaram uma redução no EQM e, portanto, suas características alteradas foram incorporadas nos subsequentes casos ao longo do processo de calibração, são apresentados no Quadro 1. Vê-se como poucas ações de fato reduziram as incertezas do modelo: mesmo que os resultados dos casos simulados fossem sensíveis às alterações, foi surpreendente como poucos melhoraram efetivamente o modelo.

Quadro 1 – Casos cujos ajustes foram incorporados nas simulações subsequentes

Caso 1	Caso-Base
Caso 10	Aumento do coeficiente de descarga de 0,78 para 0,88 (+10%)
Caso 13	Redução da densidade e condutividade do tijolo da parede.
Caso 14	Alteração da densidade e condutividade da cerâmica de revestimento da fachada externa.
Caso 38	Inserção das absorptâncias medidas <i>in loco</i> do piso.
Caso 39	Inserção das absorptâncias medidas <i>in loco</i> das paredes internas.

As simulações dos casos da Tabela 1 foram executadas em paralelo e em série, conforme mostrado na Figura 7. Vê-se que os casos 10A e 10B são idênticos, e a partir deles os resultados da calibração se tornam diferentes. O caso 10, tanto no processo em paralelo quanto no em série, foi o primeiro caso que apresentou redução no EQM. Como o caso 13B do processo em série, não teve redução no EQM, ele foi desconsiderado na modelagem seguinte, no caso 14B, embora ele tenha indicado resultados positivos no processo em paralelo (13A). O mesmo ocorreu com o caso 38, que no processo em paralelo o 38A apresentou resultados positivos, mas o mesmo não ocorreu no 38B. Assim, o melhor caso foi o 39C, por apresentar os menores EQMs.

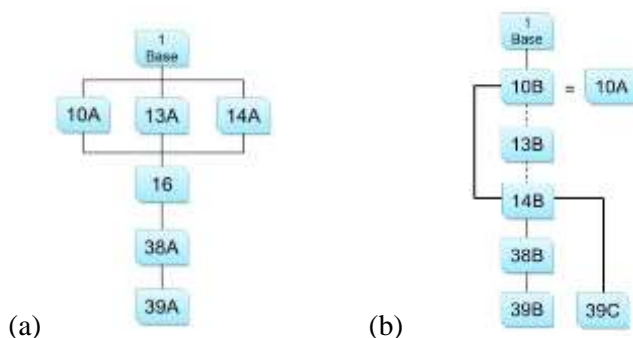


Figura 7 – Processo em paralelo (a) e processo em série (b) realizados com os casos simulados que apresentaram êxito no processo de calibração.

Os EQMs das variáveis ambientais são apresentados nos seus três tipos de avaliação: sazonal, por ambiente e da unidade habitacional para cada variável na Tabela 1. Estão assinalados na coloração vermelha os EQM que aumentaram com a alteração realizada e em verde os EQM que se reduziram, ou seja, respectivamente, aqueles que pioraram e aqueles que melhoraram, tanto para o processo em paralelo quanto para o processo em série. Dessa forma foi possível observar as diferenças existentes entre esses dois tipos de processo de calibração, como pode ser observado para o caso 13A e 13B (Tabela 1).

O processo de calibração em série mostra, na Tabela 1, que o caso 13B (10B + propriedade do tijolo) não apresentou resultados positivos (EQM da UR do quarto 1 no verão aumentou). Caso a calibração fosse realizada somente pelo processo em paralelo, erros seriam admitidos no caso seguinte sem haver efetiva melhoria, e esse erro seria acumulado até o final da calibração, o que ocorreu com o caso do 39A. Portanto, o processo de incorporação gradativa em série inclui as interações de desempenho decorrentes da inserção das novas características que o processo em paralelo desconsidera. Assim, a Figura 7b mostra uma correção que era esperada entre o caso 10B e o caso 14B, passando pelo 13B, que não foi de fato realizada: o processo em série determinou que a característica de alteração das propriedades térmicas do tijolo não poderia fazer parte do caso final. A Tabela 1 mostra que o caso 39C, caso calibrado, o Tr e TBS não apresentaram mudanças de fato no EQM da UH, mas houve reduções no EQM por estação e por ambiente. O EQM da umidade relativa da UH reduziu em 1%.

Por meio da Figura 8, é possível observar as diferenças entre os EQMs dos dados simulados e medidos. Em geral, o processo de calibração é realizado com a TBS, como Pereira e Ghisi (2009) o fizeram. Nesse estudo, viu-se que a temperatura de bulbo seco (TBS), encontrada no caso 1 (caso-base) e o caso 39C (caso calibrado) apresentou as características mais próximas às características da edificação real. Como exemplo, a Figura 8 apresenta apenas os dados de verão para todos os ambientes medidos (sala e dois quartos).

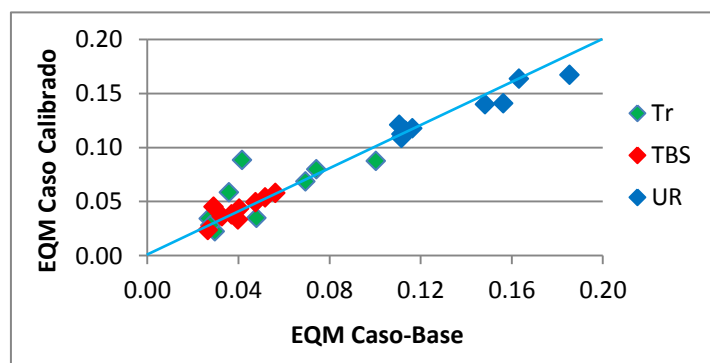


Figura 8 – EQM do caso-base e do caso calibrado.

Tabela 1- EQMs dos casos que apresentaram melhorias na relação dados simulados x dados medidos

Caso	Amb.	Temperatura radiante média (Tr)					Temperatura de bulbo seco (TBS)					Umidade relativa (UR)						
		Sazonal			Amb.	UH	Sazonal			Amb.	UH	Sazonal			Amb.	UH		
		Inv	Pri	Ver			Inv	Pri	Ver			Inv	Pri	Ver				
1	Sala	0,04	0,04	0,03	0,04	0,06	0,06	0,04	0,06	0,05	0,05	0,04	0,04	0,11	0,16	0,12	0,13	0,14
	Quarto 1	0,10	0,03	0,05	0,07			0,03	0,04	0,04	0,04			0,11	0,19	0,11	0,14	
	Quarto 2	0,07	0,03	0,07	0,06			0,03	0,03	0,05	0,04			0,16	0,15	0,11	0,14	
10A = 10B	Sala	0,04	0,04	0,03	0,04	0,06	0,06	0,04	0,05	0,05	0,05	0,04	0,04	0,11	0,15	0,12	0,13	0,14
	Quarto 1	0,10	0,03	0,05	0,07			0,03	0,04	0,04	0,04			0,11	0,18	0,11	0,14	
	Quarto 2	0,07	0,03	0,07	0,06			0,03	0,03	0,05	0,04			0,16	0,15	0,12	0,14	
13A	Sala	0,04	0,04	0,03	0,04	0,06	0,06	0,04	0,06	0,05	0,05	0,04	0,04	0,11	0,15	0,12	0,13	0,14
	Quarto 1	0,10	0,03	0,05	0,07			0,03	0,04	0,04	0,04			0,11	0,18	0,11	0,14	
	Quarto 2	0,07	0,03	0,07	0,06			0,03	0,03	0,05	0,04			0,16	0,15	0,11	0,14	
13B	Sala	0,04	0,04	0,03	0,04	0,06	0,06	0,04	0,05	0,05	0,05	0,04	0,04	0,11	0,15	0,12	0,13	0,14
	Quarto 1	0,10	0,03	0,05	0,07			0,03	0,04	0,04	0,04			0,11	0,18	0,12	0,14	
	Quarto 2	0,07	0,03	0,07	0,06			0,03	0,03	0,05	0,04			0,16	0,15	0,12	0,14	
14A	Sala	0,04	0,04	0,03	0,04	0,06	0,06	0,04	0,06	0,05	0,05	0,04	0,04	0,11	0,15	0,12	0,13	0,14
	Quarto 1	0,10	0,03	0,05	0,07			0,03	0,04	0,04	0,04			0,11	0,18	0,11	0,14	
	Quarto 2	0,07	0,03	0,07	0,06			0,03	0,03	0,05	0,04			0,16	0,15	0,11	0,14	
14B	Sala	0,04	0,04	0,03	0,04	0,06	0,06	0,04	0,05	0,05	0,05	0,04	0,04	0,11	0,15	0,12	0,13	0,14
	Quarto 1	0,10	0,03	0,05	0,07			0,03	0,04	0,04	0,04			0,11	0,18	0,11	0,14	
	Quarto 2	0,07	0,03	0,07	0,06			0,03	0,03	0,05	0,04			0,16	0,15	0,12	0,14	
16A	Sala	0,04	0,04	0,03	0,04	0,06	0,06	0,04	0,05	0,05	0,05	0,04	0,04	0,11	0,15	0,12	0,13	0,14
	Quarto 1	0,10	0,03	0,05	0,07			0,03	0,04	0,04	0,04			0,11	0,18	0,12	0,14	
	Quarto 2	0,07	0,03	0,07	0,06			0,03	0,03	0,05	0,04			0,16	0,15	0,12	0,14	
38A	Sala	0,05	0,03	0,03	0,04	0,06	0,06	0,04	0,06	0,05	0,05	0,04	0,04	0,11	0,15	0,12	0,13	0,14
	Quarto 1	0,10	0,03	0,05	0,07			0,03	0,04	0,04	0,04			0,11	0,17	0,12	0,14	
	Quarto 2	0,05	0,03	0,07	0,06			0,03	0,02	0,05	0,04			0,16	0,14	0,12	0,14	
38B	Sala	0,05	0,04	0,03	0,04	0,06	0,06	0,04	0,06	0,05	0,05	0,04	0,04	0,11	0,15	0,12	0,13	0,14
	Quarto 1	0,10	0,03	0,05	0,07			0,03	0,04	0,04	0,04			0,11	0,18	0,12	0,14	
	Quarto 2	0,08	0,03	0,07	0,06			0,03	0,02	0,05	0,04			0,16	0,14	0,12	0,14	
39A	Sala	0,08	0,05	0,02	0,06	0,06	0,06	0,04	0,06	0,05	0,05	0,04	0,04	0,11	0,14	0,12	0,13	0,13
	Quarto 1	0,09	0,03	0,04	0,06			0,05	0,04	0,04	0,04			0,12	0,17	0,11	0,14	
	Quarto 2	0,08	0,02	0,07	0,06			0,04	0,02	0,05	0,04			0,16	0,14	0,12	0,14	
39B	Sala	0,08	0,05	0,02	0,06	0,06	0,06	0,03	0,06	0,05	0,05	0,04	0,04	0,11	0,14	0,12	0,12	0,13
	Quarto 1	0,09	0,03	0,04	0,06			0,04	0,04	0,04	0,04			0,12	0,17	0,11	0,14	
	Quarto 2	0,08	0,02	0,07	0,06			0,04	0,02	0,05	0,04			0,16	0,14	0,12	0,14	
39C	Sala	0,09	0,06	0,03	0,06	0,06	0,06	0,03	0,06	0,05	0,05	0,04	0,04	0,11	0,14	0,12	0,12	0,13
	Quarto 1	0,09	0,03	0,03	0,06			0,05	0,04	0,04	0,04			0,12	0,17	0,11	0,13	
	Quarto 2	0,08	0,02	0,07	0,06			0,04	0,02	0,05	0,04			0,16	0,14	0,12	0,14	

6. CONCLUSÕES

Os resultados deste estudo evidenciaram a importância de registrar ao máximo possível as características da unidade habitacional estudada e de seu uso para o processo de calibração, permitindo assim uma precisão dos dados de entrada.

Embora se saiba que a calibração em série é a mais indicada, a calibração em paralelo, mesmo que apenas para o caso base, pode ajudar a indicar as alterações a se fazer ao longo do processo em série. O método de Rosenfeld (1996) implica em maior precisão do resultado, mas demanda muito tempo, o que inviabilizaria a calibração. Assim, a integração dos processos em paralelo e em série otimizou o tempo despendido na calibração.

O processo de calibração iniciou-se com um caso-base cujos EQMs da UH foram 0,06 para Tr, 0,04 para TBS e 0,14 para UR. O caso calibrado apresentou os mesmos valores para Tr e TBS, e uma redução de 1% para UR. Poucas alterações foram de fato efetivas na melhoria do modelo, embora os casos tenham sido sensíveis a elas. Acredita-se que o cuidado no registro de informações do levantamento tenha auxiliado nesse processo. Os EQMs sazonais e por ambiente foram determinantes na calibração, e detiveram grande parte da atenção ao longo do processo, devido ao fato do caso-base já apresentava baixos EQMs. Logo, o processo de calibração consistiu em um refinamento do caso-base, a fim de garantir e constatar sua maior proximidade com as características da edificação real.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15220**: Desempenho térmico de edificações. Rio de Janeiro, 2003.
- ANSI - AMERICAN NATIONAL STANDARDS INSTITUTE; AMERICAN SOCIETY OF HEATING, REFRIGERATING AND AIR-CONDITIONING ENGINEERS. (ASHRAE). *ASHRAE Fundamentals Handbook*. Atlanta, 2005.
- CRAWLEY, Drury B.; HAND, Jon W.; KUMMERT, Michael, GRIFFITH, Brent T. Contrasting the capabilities of building energy performance simulation programs. **Building and Environment**. V.43, 2008. p. 661-673.
- DORNELLES, Kelen Almeida; RORIZ, Maurício. Métodos alternativos para identificar a absorvância solar de superfícies opacas. *Ambiente Construído*, Porto Alegre, v.7, n.3, p.109-127, jul/set. 2007.
- GOFFART, Jeanne; WURTZ, Etienne. Impact and source of uncertainties in high efficiency building simulation: some samples. **Proceedings of Building Simulation 2011**: 12th Conference of International Building Performance Simulation Association, Sydney, 14-16 November.
- GUIMARAES, Ítalo Bruno Baleeiro; CARLO, Joyce Correna. **Caracterização bioclimática da cidade de Viçosa – MG**. In: XI Encontro Nacional e VII Encontro Latino-americano de Conforto no Ambiente Construído, Búzios, 2011, Anais... Búzios, ENCAC-ELACAC 2011. CDROM
- 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, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2003.
- PEREIRA, Cláudia Donald; GHISI, Eneidr. The influence of the envelope on the thermal performance of ventilated and occupied houses. **Energy and Buildings**. V.43, Dezembro, 2011. p. 3391-3399.
- ROSENFELD, A. Energy efficiency US commercial successful and emerging strategies. In: Energy Efficiency Workshop, **Proceedings...** Rio de Janeiro: CEPTEL, 1996. 11 p
- SORGATO, Marcio José; LAMBERTS, Roberto. **Análise de sensibilidade dos parâmetros utilizados para a simulação computacional de ventilação natural, no desempenho térmico de uma edificação residencial unifamiliar**. In: XIV ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO, Juiz de Fora, 2012. Anais... Minas Gerais: ENTAC, 2012
- SANTOS, Elisiane I. Dos; MARINOSKI, Deivis L.; LAMBERTS, Roberto. **Influência do ambiente de medição sobre a verificação da absorvância de superfícies opacas utilizando um espectrômetro portátil**. In: X Encontro Nacional e VI Encontro Latino-americano de Conforto no Ambiente Construído, Natal, 2009, Anais... Natal, 16 a 18 de setembro, ENCAC-ELACAC 2009.
- TELLES, Carolina de Paula; CARLO, Joyce Correna. Comparative Analysis of Energy Efficiency and Sustainable Building Certification in Brazil. **PLEA 2012**: Perú, Novembro, 2012.
- VALADÃO, Júlia Barros. **A avaliação do conforto térmico de uma biblioteca universitária pela ASHRAE Standard 55 e EN 15251**. Dissertação (mestrado). Universidade Federal de Viçosa, Departamento de Engenharia Civil. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Orientador, Antônio Cleber Gonçalves Tibiriça. - Viçosa, MG, 2011.
- WESTPHAL, F. S.; LAMBERTS, R. Building Simulation Calibration Using Sensitivity Analysis. In: **BUILDING SIMULATION**, 9., 2005, Montreal. **Proceedings...** Montreal: IBPSA, 2005. p. 1331-1338.
- WESTPHAL, Fernando Simon; LAMBERT, Roberto. **Análise de incertezas e de sensibilidade aplicadas à simulação de desempenho energético de edificações comerciais**. Tese de Doutorado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil – PPGEC da Universidade Federal de Santa Catarina - UFSC, 2007.

AGRADECIMENTOS

À CAPES, pela bolsa de mestrado no Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo da UFV e à FAPEMIG, pelo apoio financeiro para a apresentação no evento.