2020 ENTAC
XVIII Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído

Futuro da Tecnologia do Ambiente Construído e os Desafios Globais

Porto Alegre, 4 a 6 de novembro de 2020

Calibração de um modelo computacional para análise de desempenho térmico[1]

ARAÚJO, Mayna Lais Tenório de (1); SCALCO, Veridiana Atanasio (2); BATISTA; Juliana Oliveira (3)

(1) Universidade Federal de Alagoas, mayna.araujo@fau.ufal.br

(2) Universidade Federal de Santa Catarina, veridi@gmail.com

(3) Universidade Federal de Alagoas, juliana.batista@fau.ufal.br

RESUMO

A modelagem computacional apresenta-se como uma atividade complexa devido ao grande número de variáveis de entrada necessárias para obtenção de resultados precisos e por isso se trata de um processo que envolve muitas incertezas. Nesse sentido, a calibração é indicada como uma forma de conferir maior confiabilidade aos modelos. Verifica-se que poucos estudos realizaram calibrações para análises de desempenho térmico e por isso a presente pesquisa tem como objetivo calibrar um modelo a ser utilizado em simulações computacionais para análise de desempenho térmico, a partir de dados de temperatura do ar monitorados em uma edificação real. Para isso, foram feitos monitoramentos de temperatura do ar em situações com infiltração e com ventilação natural, em salas de aula de um projeto padrão de creche localizado em Maceió-AL. A calibração resultou em desvios médios de 0,71 e soma dos erros quadráticos das quatro salas de 3,64, com diferenças entre temperaturas monitoradas e simuladas de 0,7°C, em média. Tais resultados indicam a acurácia do modelo calibrado, que obteve desvios inferiores a precisão dos data loggers usados no monitoramento in loco. Dentre os parâmetros ajustados, a modelagem das trocas de calor entre o piso e o solo foi o parâmetro que mais influenciou no processo de calibração.

Palavras-chave: *Monitoramento. Simulação computacional. Calibração. Desempenho térmico.*

ABSTRACT

The construction of computational models is a process that requires a large number of input variables. Therefore, the search for accurate results in building thermal simulation is a process involving many uncertainties. In this sense, the calibration is indicated as a way to provide greater safety to the models, but it was verified that few studies carried out calibrations for better accuracy of data related to thermal performance analysis. This paper presents the results of a calibration process based in infiltration and natural ventilation periods monitored in a standard kindergarten classrooms located in Maceió-AL. Comparing monitored and simulated temperatures after calibration, it was obtained a mean error equal to 0,71 and the sum of the squared errors of the various rooms it was 3,64, while the average difference between hourly temperatures was equal to 0,7°C. This results indicates a good accuracy of the model, because deviations are lower than precision of data loggers used during monitoring. Among the adjusted variables, thermal exchanges through the ground corresponds to the parameter that most influenced the calibration process.

[1] ARAÚJO, Mayna Lais Tenório de; SCALCO, Veridiana Atanasio; BATISTA; Juliana Oliveira. Calibração de um modelo computacional para análise de desempenho térmico. In: ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 18., 2020, Porto Alegre. **Anais...** Porto Alegre: ANTAC, 2020.

***Keywords**: Monitoring. Computational Simulation. Calibration. Thermal Performance.*

1 INTRODUÇÃO

A simulação computacional é considerada uma ferramenta eficaz para avaliação de desempenho térmico. Entretanto, a modelagem computacional é complexa, pois envolve grande número de variáveis de entrada, relativas ao regime dinâmico de trocas de calor e massa entre os ambientes internos e externos, das edificações. O simulador deve inserir os parâmetros de entrada que melhor representem a situação real, para isso, a calibração é indicada como uma forma de conferir maior confiabilidade aos modelos computacionais (PEDRINI; WESTPHAL; LAMBERTS, 2002; FABRIZIO; MONETTI, 2015).

Roberti, Oberegger e Gasparella (2015) definem a calibração como um processo de ajuste que minimiza o erro entre dados medidos e simulados. Para cada ajuste de parâmetros de entrada é verificada a sua influência nos dados de saída do programa. Esse tipo de análise é chamado de análise de sensibilidade e se baseia na análise estatística dos dados. Bertagnolio et al. (2010) destacam como principais parâmetros estatísticos: desvio médio, erro médio quadrático e coeficiente de variação do erro médio quadrático.

Alguns estudos realizaram a calibração de modelos para análises de desempenho térmico (PEREIRA; GHISI, 2011; BATISTA; LAMBERTS; GÜTHS, 2011; BARBOSA; GHISI, 2017), a partir do monitoramento de dados de temperatura do ar em edificações com e sem ocupação, com ventilação natural e também com infiltração por aberturas fechadas. Para tal, foram utilizados *data loggers* e dados das estações automáticas do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), mais próximas das edificações. Com a calibração, os estudos obtiveram desvios entre dados medidos e simulados inferiores a 1°C.

Tendo em vista a importância do monitoramento de edificações para a validação dos modelos computacionais, o objetivo da pesquisa é calibrar um modelo utilizado em simulações computacionais de desempenho térmico, a partir de dados de temperatura do ar monitorados em uma edificação real. Assim, pretende-se obter uma melhor correspondência entre dados medidos e simulados, conferindo precisão e maior confiabilidade às simulações de edificações reais.

2 MÉTODO

O método aqui proposto divide-se em caracterização do objeto de estudo, monitoramento da edificação de análise, simulações computacionais para calibração e análise dos resultados.

2.1 Caracterização do objeto de estudo

A edificação escolhida para análise consiste em um projeto padrão de um Centro Municipal de Educação Infantil (CMEI) do programa Proinfância, localizado na cidade de Maceió-AL (Figura 1). Trata-se de uma edificação térrea com capacidade para 224 crianças que segue os padrões construtivos determinados pelo Fundo Nacional de Desenvolvimento (FNDE): paredes em alvenaria de tijolo de 6 furos, pintada na cor branca, cobertura em laje pré-moldada e telha de cerâmica e piso em granilite na cor cinza claro. As janelas são de alumínio e vidro de 3mm e as portas são de madeira.

A setorização do CMEI pode ser observada na 2, assim como a indicação das salas avaliadas, demarcadas na cor rosa. O bloco pedagógico foi escolhido para as

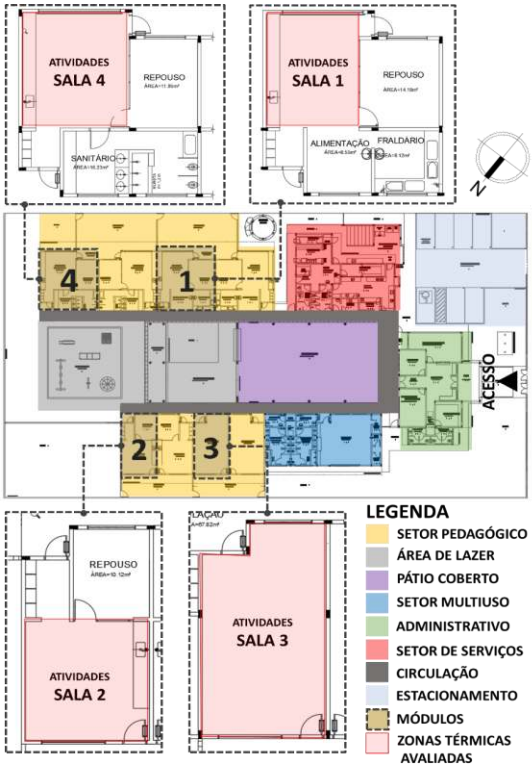
análises, por ser o setor de maior permanência.

Figura 1- CMEI Rodrigues Alves, em Maceió-AL.



Fonte: Autora (2018).

Figura 2- Setorização do projeto padrão com identificação das salas avaliadas.



Fonte: FNDE, adaptado pela autora (2019).

2.2 O contexto climático

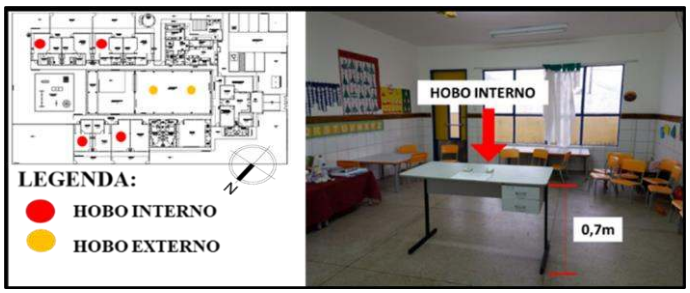
Maceió-AL está localizada sob a latitude -09° 39' 57'' e longitude -35° 44' 07''. Apresenta 24% de horas de desconforto ao longo do ano, não sendo registrado desconforto por frio considerável. Está inserida na ZB8, para a qual NBR 15220 (ABNT, 2005) recomenda a ventilação cruzada permanente, uso de aberturas grandes e sombreadas, paredes e coberturas leves refletoras. O clima de Alagoas é caracterizado como tropical quente e úmido do tipo As' segundo a classificação de Koppen, com verão mais seco e chuvas concentradas no outono e inverno.

A temperatura média anual é de 25,5°C, umidade relativa média anual de 78%. Observa-se baixa amplitude térmica, baixa variação de umidade relativa do ar ao longo do ano, sendo a ventilação predominante na cidade é proveniente do quadrante leste, com velocidades que atingem os 4m/s (LABEEE, 2018). As direções com maiores ocorrências são a leste, ocorrendo durante 15% do ano, seguida das orientações sudeste e nordeste.

2.3 Monitoramento da edificação

Nessa etapa, foram utilizados *data loggers* modelo HOBO, previamente aferidos, para monitorar dados de temperatura de bulbo seco e umidade relativa do ar nas salas. Já para os dados externos, utilizou-se os dados da estação do INMET mais próxima. No dia 22/12/2017 os hobos foram instalados nos ambientes em estudo, efetuando registros em intervalos de 5 minutos. Como observado na Figura 3, os mesmos foram posicionados no centro dos ambientes sobre uma mesa com 70 cm de altura (altura do usuário: crianças).

Figura 3- Localização dos HOBOS nas salas de aula.



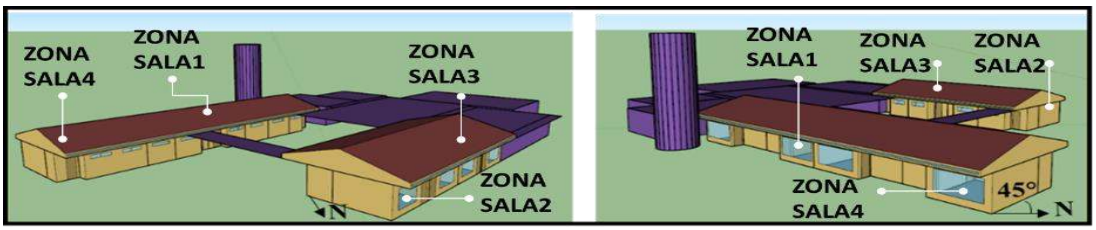
Fonte: Autora (2017).

O monitoramento foi realizado em períodos sem atividades letivas nas salas de aula, a fim de obter a menor variação no padrão de uso: o primeiro em dezembro de 2017 (24/12/2017 à 30/12/2017), com ventilação natural das 8:30h às 11:30h e outro em fevereiro de 2018, com esquadrias fechadas sempre (09/02/2018 à 16/02/2018).

2.4 Simulações computacionais para calibração

A geometria do modelo foi confeccionada no programa *Sketchup*, com o auxílio do *plugin Euclid* (versão 9.3) e as simulações computacionais foram efetuadas com o programa *EnergyPlus* v.8.8 (DOE, 2017), utilizando o arquivo climático EPW de Maceió. Na Figura 4 é possível observar o modelo e as zonas térmicas simuladas. A edificação foi simulada conforme orientação da edificação real.

Figura 4- Geometria do modelo computacional.



Fonte: Autora (2018).

A calibração foi dividida em duas etapas. A primeira com o ambiente fechado, considerando apenas as infiltrações por frestas. A segunda, com o ambiente naturalmente ventilado. Foi criado um arquivo climático editado com dados do período de monitoramento. Para isso, foram estimadas as radiações direta normal e difusa horizontal com base nas equações apresentadas em Muneer (2004), tendo em vista que as estações automáticas do INMET disponibilizam apenas os dados de radiação global horizontal.

2.4.1 Modelo base

O entorno da edificação foi definido como terreno de subúrbio e as propriedades térmicas dos componentes construtivos foram obtidas em Weber et al (2017), sendo as transmitâncias das paredes, piso e cobertura respetivamente iguais a 2,39 W/m²K; 2,64 W/m²K e 2,02 W/m²K. As paredes são compostas por alvenaria de tijolo cerâmico de 6 furos, o piso composto por granilite e a cobertura por laje de concreto e telha cerâmica. Utilizou-se absortância de 0,2 nas paredes externas, conforme indicado na NBR 15220 (ABNT, 2005) para pinturas claras e de 0,9 para o telhado cerâmico que encontra-se coberto por lodo escuro. Para modelagem do

solo utilizou-se o objeto *Site: Ground Domain*, com base em Mazzaferro; Melo; Lamberts (2016).

Em relação ao cálculo da convecção nos ambientes internos, utilizou-se o algoritmo *TARP*, e ao cálculo de condução o algoritmo *Conduction Transfer Functio-CTF*. Para ventilação adotou-se coeficiente de descarga padrão do *EnergyPlus* (0,6) e infiltração com valores padrões fornecidos pelo programa: k= 0,001kg/s.m e n=0,65, conforme indicado em Pereira et al. (2011). O cálculo dos coeficientes de pressão (Cp) do vento nas superfícies, foi feito de forma simplificada através da equação de Swami e Chandra (1988), recomendada para edificações retangulares. O modelo BASE não apresenta ocupação nem cargas internas, pois durante o monitoramento as luzes foram mantidas apagadas e não havia nenhum equipamento nas salas. As simulações para calibração foram feitas seguindo o período de monitoramento, conforme descrito no item 2.2, sendo a primeira etapa com infiltração nas salas e a segunda etapa com portas e janelas abertas.

2.4.1 Ajustes no modelo base

Na revisão de literatura foi possível identificar os dados de entrada de simulações que mais influenciavam no desempenho térmico de edificações térreas. Inicialmente foi calibrado o modelo com infiltração. Em seguida, tal modelo teve as esquadrias abertas das 08h30 às 11h30 da manhã, obtendo-se um novo modelo calibrado, com ventilação. As alterações no dados de entrada em cada etapa da calibração serão descritas nos tópicos a seguir:

a) Testes realizados no modelo com infiltração:
   - Solo: algoritmo *Slab* (COSTA, 2017);
   - Algoritmos de convecção: *Adaptive* e *Simple* (BATISTA, 2011);
   - Infiltração: coeficientes mínimos, máximos e médios, indicados em Liddament (1986) para o tipo de esquadria do projeto.
   - Absortância: medições de Barbosa (2017) com os seguintes valores de absortância: 0,05 (margem de erro -0,1), 0,15 (valor medido) e 0,25 (margem de erro +0,1).

b) Testes realizados no modelo com ventilação:
   - Coeficiente de descarga: 0,6, empregado no modelo base, aplicando-se margens de erro de $\pm$ 0,1; 0,5 e 0,7.
   - Rugosidade do entorno: 0,33 (entorno com obstruções, devido ao muro existente) e 0,14 (entorno com pouca ou nenhuma obstrução).

Os critérios utilizados na calibração foram os parâmetros estatísticos desvio médio e erro médio quadrático, indicados por Bertagnolio et al. (2010).

3 RESULTADOS

Os resultados das primeiras simulações foram comparados às medições no período com infiltração (fevereiro de 2018). As últimas simulações foram comparadas ao monitoramento no período com ventilação natural (dezembro de 2017).

3.1 Modelo com infiltração

Os resultados da primeira etapa da calibração podem ser observados no quadro 1. Quando a alteração no modelo oferecia melhoria ao conjunto de salas, com redução no somatório dos desvios e erros, a mesma era considerada satisfatória e incorporada nas simulações seguintes.

Quadro 1- Simulações realizadas para calibração do modelo com infiltração.

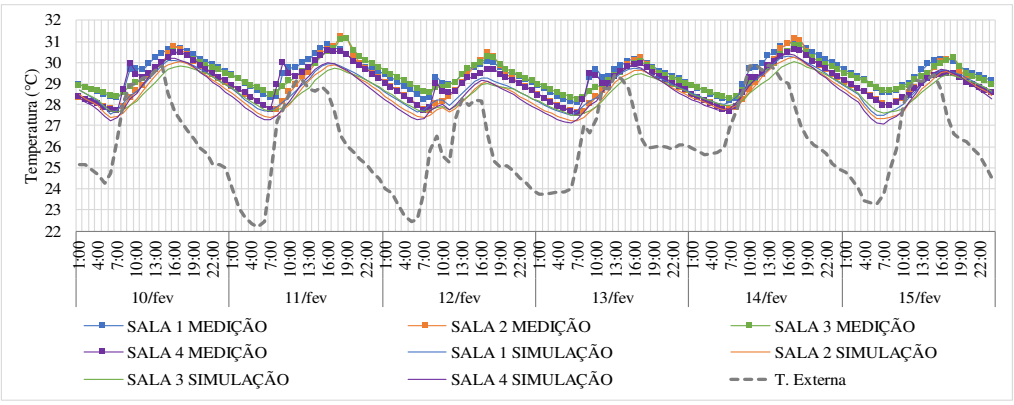
CASO	DESCRIÇÃO DOS DADOS DE ENTRADA	DESVIO MÉDIO (°C)				MÉDIA DOS DESVIOS	ERRO QUADRÁTICO (°C)				SOMA DOS ERROS	DADOS DE ENTRADA MANTIDOS
		SALA 1	SALA 2	SALA 3	SALA 4		SALA 1	SALA 2	SALA 3	SALA 4		
1	**CASO BASE_TARP_ABS02_SLAB**	1,88	1,65	1,97	1,59	**1,77**	1,90	1,68	1,99	1,64	**7,21**	NÃO
2	**CASO 1+ADAPTIVE**	1,83	1,61	1,93	1,54	**1,73**	1,85	1,64	1,95	1,59	**7,03**	NÃO
3	**CASO 1+SIMPLE**	2,02	1,79	2,12	1,73	**1,92**	2,04	1,82	2,14	1,77	**7,77**	NÃO
4	**CASO BASE_TARP_ABS02_GD**	0,80	0,57	0,82	0,59	**0,69**	0,84	0,65	0,86	0,69	**3,04**	SIM
5	**CASO 4+ADAPTIVE**	0,78	0,55	0,80	0,58	**0,68**	0,81	0,64	0,85	0,68	**2,98**	SIM
6	**CASO 4+SIMPLE**	0,98	0,77	1,02	0,77	**0,88**	1,01	0,83	1,05	0,85	**3,74**	NÃO
7	**SIMULAÇÃO5+0.05 (-0.1)**	0,89	0,72	0,90	0,74	**0,81**	0,92	0,80	0,94	0,82	**3,49**	NÃO
8	**SIMULAÇÃO5+0.15 (0)**	0,81	0,61	0,93	0,63	**0,75**	0,85	0,69	0,99	0,73	**3,25**	NÃO
9	**SIMULAÇÃO5+0.25 (+0,1)**	0,74	0,49	0,77	0,52	**0,63**	0,78	0,59	0,81	0,64	**2,81**	SIM
10	**SIMULAÇÃO9+INFILTRAÇÃO MÁX LIDDAMENT**	0,81	0,62	0,90	0,58	**0,73**	0,85	0,71	0,94	0,70	**3,21**	NÃO
11	**SIMULAÇÃO9+INFILTRAÇÃO MED LIDDAMENT**	0,72	0,51	0,78	0,50	**0,63**	0,76	0,60	0,82	0,63	**2,81**	NÃO
12	**SIMULAÇÃO9+INFILTRAÇÃO MIN LIDDAMENT**	0,68	0,47	0,74	0,47	**0,59**	0,72	0,57	0,79	0,61	**2,68**	SIM

Fonte: Autora (2019).

A modelagem do solo com o *Slab* resultou em maiores erros e desvios, independentemente do algoritmo de convecção utilizado, quando comparado aos testes com o objeto *GroundDomain*. Em relação aos algoritmos de convecção, os menores erros e desvios foram observados com o algoritmo *Adaptive*, confirmando o que foi constatado por Batista (2011) e Pereira (2015) que apontam esse algoritmo como sendo apropriado para edificações térreas em climas quentes e úmidos. Assim, o Caso 5 apresentou os menores desvios e erros, sendo adotado como base para os testes de absortância, realizados nos Casos 7, 8 e 9. A alteração da absortância de 0,2 para 0,25 alcançou melhoria nos parâmetros avaliados, sendo o Caso 9 adotado nos testes seguintes.

Já nos testes com infiltração, correspondentes aos casos 10, 11 e 12, os valores mínimos de coeficientes e expoentes de fluxo de ar fornecidos por Liddament (1986) reduziram os desvios e erros quadráticos em relação Caso 9. Logo, o Caso 12 foi considerado calibrado, com a média dos desvios igual a 0,59 e soma dos erros igual a 2,68. Ou seja, foi alcançada uma redução de 37% nos erros e de 33% na média dos desvios, em relação ao Caso 1- BASE, com diferenças entre temperaturas medidas e simuladas de em média 0,58° C (Gráfico 1).

Gráfico 1- Temperaturas simuladas e medidas: calibração do modelo com infiltração



Fonte: Autora (2019).

3.1 Modelo com ventilação natural

A partir do modelo calibrado com infiltração, prosseguiu-se incluindo a ventilação natural no período de 24/12/2017 à 30/12/2017, com esquadrias abertas das 8:30h às 11:30h. Os resultados são apresentados no Quadro 2, e a variação das temperaturas monitoradas e simuladas pode ser vista no Gráfico 2.

Os coeficientes de descarga das esquadrias foram testados nos casos 13, 14 e 15. Verificou-se que o coeficiente de descarga de 0,7 foi o que ofereceu a maior redução nos somatórios dos desvios e dos erros. Também foi feito um teste com a correção do entorno para um terreno de cidade (Caso 16), entretanto verificou-se que essa alteração não favoreceu a calibração, aumentando os desvios e erros em todas as salas. Desse modo, o Caso 15 foi definido como modelo calibrado.

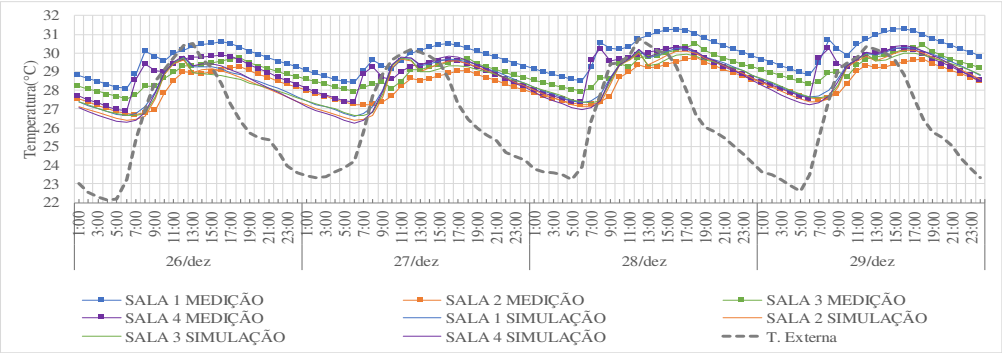
O Caso 15, apresentou desvios de em média 0,71 e soma dos erros quadráticos de 3,64, o que implica em reduções de 23% e 27%, respectivamente, em relação ao Caso 13 (BASE VENTILADO). No Gráfico 2, observa-se que, após calibrado, o modelo ventilado apresentou diferenças de temperatura entre dados medidos e simulados de em média 0,7°C.

Quadro 1- Simulações realizadas para calibração do modelo com ventilação,

CASO	DESCRIÇÃO DOS DADOS DE ENTRADA	DESVIO MÉDIO (°C)				MÉDIA DOS DESVIOS	ERRO QUADRÁTICO (°C)				SOMA DOS ERROS	DADOS DE ENTRADA MANTIDOS
		SALA 1	SALA 2	SALA 3	SALA 4		SALA 1	SALA 2	SALA 3	SALA 4		
1	**CASO BASE_CD06**	1,01	0,80	1,10	0,80	**0,93**	1,28	1,18	1,40	1,19	**5,04**	NÃO
2	**CASO BASE_CD05**	0,83	0,71	0,59	0,90	**0,76**	1,07	0,85	0,74	1,17	**3,84**	NÃO
3	**CASO BASE_CD07**	0,76	0,67	0,54	0,86	**0,71**	1,01	0,82	0,70	1,12	**3,64**	SIM
4	**CASO X_ENTORNO DE CIDADE**	1,25	1,15	1,04	1,31	**1,19**	1,44	1,24	1,15	1,51	**5,34**	NÃO

Fonte: Autora (2019).

Gráfico 2- Temperaturas simuladas no Caso 15- MODELO CALIBRADO, com ventilação, e temperaturas monitoradas *in loco*, nas quatro salas.



Fonte: Autora (2019).

5 CONCLUSÕES

Os dados de entrada exercem grande influência nos resultados das simulações. No modelo com infiltração, foram obtidas as maiores reduções nos erros e na média dos desvios, em relação ao modelo não calibrado. Dentre os parâmetros ajustados, a modelagem das trocas de calor entre o piso e o solo foi o parâmetro que mais influenciou no processo de calibração.

Já na calibração com ventilação natural foram observados os maiores erros e desvios. Tal fato pode estar relacionado com a imprecisão nos coeficientes de pressão do vento calculados pelo programa *EnergyPlus*.

Por fim, o modelo resultante da calibração apresentou diferenças entre dados medidos e simulados inferiores a 1°C, sendo, portanto destinado as análises de desempenho. O método aplicado na pesquisa mostrou-se satisfatório e evidenciou a possibilidade de obter modelos computacionais que gerem dados de temperatura interna semelhantes ao de uma edificação real. Assim, é possível reduzir os erros nas simulações e, consequentemente, obter resultados mais precisos.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS**. NBR 15220-3**: Desempenho térmico de edificações – Parte 3: Zoneamento bioclimático brasileiro e estratégias de condicionamento térmico passivo para habitações de interesse social. Rio de Janeiro: ABNT, 2005b.

BARBOSA, K. H.; GUISI, E. **Proposta de calibração de um modelo computacional de uma tipologia de residência unifamiliar em Goiânia**. Encontro Nacional de conforto no ambiente construído. XIV ENCAC. **Anais**...2017

BATISTA, J. O.; LAMBERTS, R.; GÜTHS, S. Influências dos algoritmos de condução e convecção sobre os resultados de simulações do comportamento térmico de edificações. **Ambiente Construído**, v. 11, n. 4, p. 79–97, dez. 2011

COSTA, V. A. C. **Trocas de calor entre edificações térreas e o solo e sua modelagem no pré-processador *Slab*.** São Carlos, 2017. 237p. Dissertação (mestrado) Programa de pós-graduação em Arquitetura e Urbanismo, Universidade de São Paulo, 2017.

DOE. **EnergyPlus**. Disponível em: <https://energyplus.net/>. Acesso em: 1 mar. 2017.

FABRIZIO, E.; MONETTI, V. Methodologies and Advancements in the Calibration of Building Energy Models. **Energies**, [s.l.], v. 8, n. 4, p.2548-2574, 31 mar. 2015. MDPI AG. http://dx.doi.org/10.3390/en8042548.

FNDE, Fundo Nacional de Desenvolvimento da Educação -. **Proinfância.** Disponível em: <http://www.fnde.gov.br/programas/proinfancia/proinfancia-apresentacao>. Acesso em: 31 jan. 2019.

INMET- INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA (Org.). **Estações Automáticas**. Disponível em: <http://www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=estacoes/estacoesautomaticas>. Acesso em: 17 maio 2018

LABEEE, LABORATÓRIO DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA EM EDIFICAÇÕES. Downloads. **Arquivos climáticos INMET em formato EPW.** Disponível em http://labeee.ufsc.br/downloads/arquivos-climaticos/inmet2016. Acesso em: 10 jan 2018

LIDDAMENT, M. W. **Air infiltration calculation techniques - an applications guide**. Bracknell, UK: AIVC. 1986.

MAZZAFERRO, L.; MELO, A. P.; LAMBERTS, R. **Manual de simulação computacional de edifícios com o uso do objeto Ground Domain no programa EnergyPlus**. Disponível em: <http://www.labeee.ufsc.br/sites/default/files/disciplinas/Manual_Ground_Domain.pdf>. Acesso em: 1 jan. 2016

MUNEER, T. (Ed.), 2004. **Solar radiation and daylight models**, 2° edição. Elsevier.

PEDRINI, A.; WESTPHAL, F.S.; LAMBERTS, R. A methodology for building energy modelling and calibration in warm climates. **Building and Environment**, [S.l.], v. 37, p. 903-912, 2002.

PEREIRA, C. D.; GHISI, E. The influence of the envelope on the thermal performance of ventilated and occupied houses. **Energy and buildings**, [S.l.], v. 43, p. 3391–3399, 2011.

WEBER, F. et al. **Elaboração de uma biblioteca de componentes construtivos brasileiros para o uso no programa EnergyPlus**. Florianópolis: [s.n.]. Disponível em: <http://labeee.ufsc.br/node/714>.