CALIBRAÇÃO DE UM MODELO COMPUTACIONAL DE HIS LOCALIZADA NA CIDADE DE LONDRINA-PR

Guilherme Vilela Sanches (1); Guilherme Natal Moro (2); Thalita Gorban Ferreira Giglio (3)
(1) Engenheiro civil, mestrando do Programa de Pós-graduação em Engenharia civil, gvilela.sanches@uel.br
(2) Graduando em Engenharia civil, guilherme.natal@uel.br
(3) Doutora, professora do Departamento de Engenharia civil, thalita@uel.br
Universidade Estadual de Londrina, Centro de Tecnologia e Urbanismo, Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Cx. Postal 6001, Londrina-PR, 86051-990, Tel.: (43) 3371-4649

RESUMO
Programas de simulação de desempenho termoenergético de edificações levam em consideração uma grande quantidade de parâmetros, e alguns podem ter grande influência nos resultados. Incertezas associadas a tais parâmetros podem ser responsáveis por eventuais erros nos indicadores de desempenho termoenergético obtidos. Neste sentido, a calibração do modelo computacional é fundamental para reduzir erros, uma vez que permite promover o ajuste dos dados de entrada relativos à edificação analisada. Este trabalho tem como objetivo apresentar o procedimento de calibração do modelo computacional de uma habitação de interesse social localizada na zona bioclimática 3, simulado no programa *EnergyPlus*. A calibração envolveu 32 dias de análise. Sensores instalados na parte externa da edificação registraram a temperatura e umidade relativa do ar. Radiação solar, velocidade e direção do vento foram monitorados na estação meteorológica do IAPAR, enquanto pressão barométrica foi coletada no banco de dados do INMET. Sensores instalados na edificação registraram a temperatura do solo, utilizada como dado de entrada na simulação. A temperatura média do ar interno foi monitorada por sensores instalados em cada um dos ambientes e comparada com a temperatura simulada. A RMSD obtida na primeira versão do modelo computacional foi 5,36 °C para o ambiente sala. A versão calibrada apresentou, para o mesmo ambiente, RMSD igual a 0,75 °C. O procedimento de calibração permitiu identificar pontos que merecem especial atenção na configuração do modelo computacional de uma edificação, como a utilização de dados confiáveis de temperatura do solo e a consideração detalhada da incidência solar nas fachadas.

Palavras-chave: monitoramento, calibração, simulação computacional.

ABSTRACT
Building energy simulation software consider many parameters, some of which may have great influence on the results. Uncertainties associated with such parameters may be responsible for possible errors in the energy performance indicators obtained. In this regard, the calibration of the computational model is fundamental to reduce errors since it allows to promote the adjustment of the input data relative to the analyzed building. The objective of this paper is to present the calibration procedure of the computational model of a social housing located in bioclimatic zone 3, simulated on *EnergyPlus* software. Calibration involved 32 days of analysis. Sensors installed outside the building recorded air temperature and relative humidity. Solar radiation, wind direction and speed were monitored at the IAPAR weather station. Barometric pressure was collected in INMETs database. Sensors installed inside the building recorded ground temperature, which was used as input data in the simulation. Indoor air temperature was monitored by sensors installed in each of the rooms and compared to simulated temperature. The RMSD obtained in the first version of the computational model was 5.36 °C, for the living room. The calibrated version presented, for the same room, RMSD equal to 0.75 °C. The calibration procedure allowed us to identify points that deserve special attention when configuring the computational model of a building, such as the use of reliable ground temperature data and the detailed consideration of solar incidence on the facades.

Keywords: monitoring, calibration, computational simulation.

1. INTRODUÇÃO

A eficiência energética foi incorporada pelo Ministério de Minas e Energia como estratégia de atendimento da crescente demanda energética pelos edifícios (BRASIL, 2019). De acordo com dados da Empresa de Pesquisa Energética, o setor de edificações foi responsável por 52% do consumo final de energia elétrica no Brasil, sendo responsável por 26,1% do crescimento total do consumo em relação ao ano anterior (BRASIL, 2020). Neste contexto, torna-se cada vez maior a preocupação com o desempenho térmico das edificações, que pode ser analisado, dentre outras maneiras, por meio de simulações computacionais.

Os programas de simulação permitem a análise do modelo computacional de uma edificação quanto ao seu desempenho termoenergético considerando diferentes parâmetros, como propriedades térmicas do envelope, características das aberturas e contato das superfícies com o meio exterior (SILVA; GHISI, 2013). Alguns destes parâmetros podem ter grande influência nos resultados. Desta maneira, qualquer incerteza associada a tais parâmetros pode resultar em erros significativos nas simulações.

Neste contexto, a calibração do modelo computacional é importante para diminuir os erros existentes nas simulações, sendo realizada em diversas pesquisas (PEREIRA, 2009; BATISTA, LAMBERTS, GÜTHS, 2011). De acordo com Westphal (2007), no caso em que se estudam edificações existentes, a calibração envolve o ajuste dos dados de entrada de maior incerteza no modelo, de modo a obter resultados próximos ao desempenho da edificação real, que pode ser medido através de parâmetros, como a temperatura interna dos ambientes. No caso da edificação analisada neste estudo, a calibração é especialmente importante pois ela está submetida a características particulares que podem influenciar significativamente o resultado das simulações.

Uma das formas de se calibrar um modelo computacional é por meio da comparação entre valores medidos e valores simulados. Pereira e Ghisi (2008) calibraram o modelo computacional de uma habitação unifamiliar. Os autores utilizaram análise de sensibilidade para determinar os parâmetros mais influentes no comportamento do modelo e identificaram a importância da correta definição da temperatura do solo. No ambiente com maiores diferenças entre medição e simulação, os autores conseguiram reduzir a diferença média de 1,3 °C para 1,1 °C (PEREIRA; GHISI, 2008). Galvarro *et al*. (2013) calibraram o modelo computacional de uma habitação unifamiliar em um processo que envolveu mais de 40 simulações. Os autores concluíram que o detalhamento dos dados de entrada da edificação é importante para o resultado do processo (GALVARRO *et al*., 2013). Santos, Lobo e Barata (2019) calibraram o modelo de uma HIS multifamiliar e ressaltaram a importância de se utilizar dados recentes no arquivo climático para caracterizar de maneira mais real as condições climáticas às quais a edificação está submetida, de modo a obter uma calibração mais precisa. Araújo, Scalco e Batista (2020) calibraram o modelo computacional de um edifício educacional público e, assim como Pereira e Ghisi (2008), identificaram que a modelagem das trocas de calor entre a edificação e o piso exerce grande influência no processo de calibração. Além disso, os autores obtiveram diferenças inferiores a 1 °C no modelo calibrado (ARAÚJO; SCALCO; BATISTA, 2020).

Neste contexto, este estudo se mostra relevante ao apresentar um procedimento de calibração que leva em conta a medição e observação in loco de importantes variáveis para a simulação, em especial a temperatura do solo. Além disso, contribui ao apresentar um período de calibração contínuo e mais longo do que os realizados pelos estudos citados anteriormente. Dessa maneira, pode contribuir com o desenvolvimento de metodologias de calibração de modelos computacionais para o uso em estudos de desempenho termoenergético de edificações.

2. OBJETIVO

O objetivo deste artigo é apresentar o procedimento de calibração do modelo computacional de uma habitação de interesse social unifamiliar localizada na cidade de Londrina, Paraná, por meio da comparação da temperatura do ar monitorada na edificação e valores simulados no programa *EnergyPlus*.

3. MÉTODO

Para cumprir com o objetivo proposto, os procedimentos metodológicos adotados foram divididos em três etapas principais: monitoramento; modelagem computacional; e simulação computacional e calibração.

3.1. Monitoramento da edificação

O monitoramento durou 36 dias, 19/03/2020 e 23/04/2020. A edificação monitorada é um protótipo habitacional de interesse social, unifamiliar isolado, construído de acordo com os padrões do programa

Minha Casa Minha Vida, no sistema construtivo em *wood-frame* – DATec 020-C (BRASIL, 2017). É sede do Laboratório de Eficiência Energética e Sustentabilidade em Edificações (E3sLab) e está localizado no campus da Universidade Estadual de Londrina (UEL). Está situada em uma área com arborização abundante, que promove grande sombreamento nas fachadas durante grande parte do ano. A cidade de Londrina está localizada na zona bioclimática 3, caracterizada por apresentar clima ameno, com verões quentes e úmidos, e invernos pouco secos e frios, de acordo com a NBR 15220-3 (ABNT, 2005b). Os detalhes da edificação podem ser vistos na Figura 1.

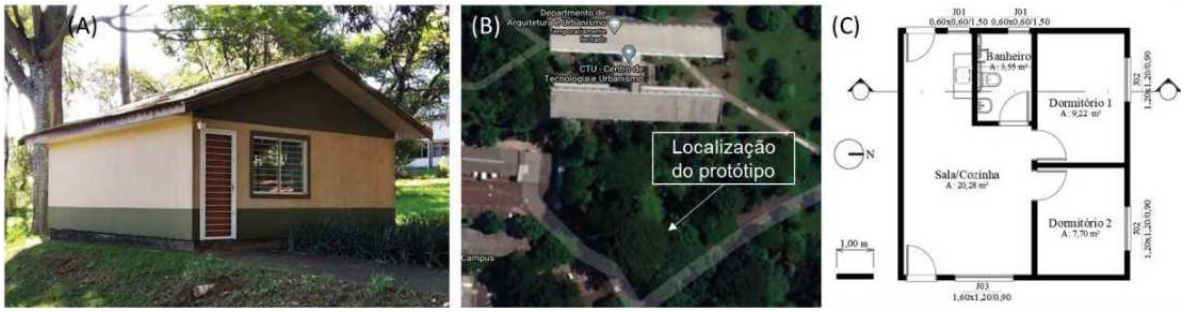


Figura 1 – HIS em estudo: (A) fachada; (B) localização; (C) leiaute.

Sensores indicados para imersão em solo foram instalados sob o piso dos dormitórios e da sala da edificação, na interface da laje de piso com o solo, para monitorar os valores da temperatura do solo durante o período de análise. Para isso, o piso dos ambientes foi perfurado e, após a inserção dos sensores, os furos foram isolados com tampas de EPS. Os sensores foram ligados a um sistema de aquisição e armazenamento de dados, que foi configurado para registrar os valores de temperatura do solo medidos a cada minuto. O esquema de monitoramento da temperatura do solo está apresentado na Figura 2 (A). A temperatura do solo monitorada foi utilizada como dado de entrada na simulação.

A temperatura do ar dos ambientes internos também foi monitorada durante o período. Foram utilizados registradores de temperatura HOBO, modelo U12-012, apresentados na Figura 2 (B). Os registradores foram instalados no centro dos dormitórios e da sala, a uma distância aproximada de 1,80 m do piso, e configurados para medir e registrar as temperaturas do ar a cada 15 minutos. A temperatura e umidade relativa do ar externo foram monitoradas por meio de um registrador de temperatura HOBO, modelo U10-003, instalado no exterior da edificação, protegido da incidência direta da radiação solar por um abrigo que permitia a circulação do ar ao redor do sensor, conforme apresentado na Figura 2 (C).

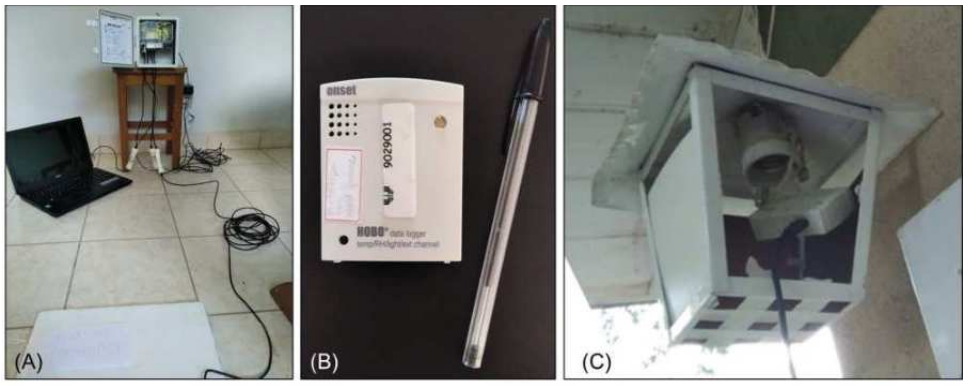


Figura 2 – (A) monitoramento da temperatura do solo; (B) HOBO U12-012; (C) abrigo externo com HOBO U10-003.

Durante o período de calibração, os eventos relativos à ocupação da edificação foram monitorados, bem como a utilização de equipamentos, iluminação artificial e manuseio de aberturas. Devido à pandemia do novo coronavírus, o laboratório que funciona na edificação esteve fechado durante todo o período de calibração, o que permitiu controlar todos os eventos relativos ao uso da edificação. O único ambiente com ocupação e uso de iluminação artificial foi a sala, com duas lâmpadas LED de 12 W. Houve dois dias de utilização de ventilação natural pela abertura da janela da sala, além de um evento de ventilação pelo postigo da porta da cozinha, no dia 20/03, das 10h às 11h. Nos demais ambientes, não houve eventos de utilização de iluminação artificial, nem de abertura de janelas, como pode ser observado na Tabela 1. As portas dos dormitórios ficaram abertas, enquanto a porta do banheiro foi mantida fechada durante o período. Em relação aos equipamentos, permaneceram ligados durante a calibração um frigobar (70 W) e um filtro de água (154 W) na cozinha, um registrador de dados ligado a uma fonte de alimentação (25 W) no dormitório 1, e um

aparelho roteador wireless (30 W) no dormitório 2. Além destes, foi utilizado um notebook (95 W) durante os dias de coleta de dados.

Tabela 1 – Eventos da calibração.

Data e hora	Ocupação	Iluminação artificial	Equipamentos	Ventilação
20/03 10h-11h	Sim	Sim	Sim*	Sim
23/03 9h-10h	Sim	Sim	Sim*	Não
25/03 16h-18h	Sim	Sim	Sim*	Sim (16h-17h)
27/03 08h-10h	Sim	Sim	Sim*	Não
31/03 08h-09h	Sim	Sim	Sim*	Não
03/04 16h-17h	Sim	Sim	Sim*	Não
06/04 09h-10h	Sim	Sim	Sim*	Não
07/04 9h-10h	Sim	Não	Sim*	Não
10/04 15h-16h	Sim	Não	Sim*	Não
13/04 9h-10h	Sim	Não	Sim*	Não
15/04 9h-10h	Sim	Não	Sim*	Não
17/04 16h-17h	Sim	Não	Sim*	Não
21/04 10h-11h	Sim	Não	Sim*	Não

*equipamentos permanentes ligados todo o período

Todas as informações obtidas nesta etapa de monitoramento foram utilizadas nas etapas que serão descritas a seguir.

3.2. Modelagem computacional

A primeira versão do modelo computacional, chamada de caso base, foi modelada com base nas informações das propriedades termofísicas dos materiais constituintes da edificação presentes no DATec 020-C (BRASIL, 2017). A envoltória é constituída por sistema construtivo em *wood-frame*, cujas paredes são formadas por quadros estruturais de madeira, fechadas na parte externa com placa cimentícia com revestimento de textura acrílica e chapa OSB estrutural. Na parte interna, o fechamento se dá por placa OSB estrutural e gesso acartonado. A edificação possui piso cerâmico assentado sobre radier, construído sobre camada de saibro compactado. A cobertura é de telhas cerâmicas sobre estrutura de madeira, com forro em PVC. As janelas são de caixilho metálico com 2 folhas de correr, sem presença de venezianas. A configuração dos elementos da envoltória está apresentada na Figura 3.

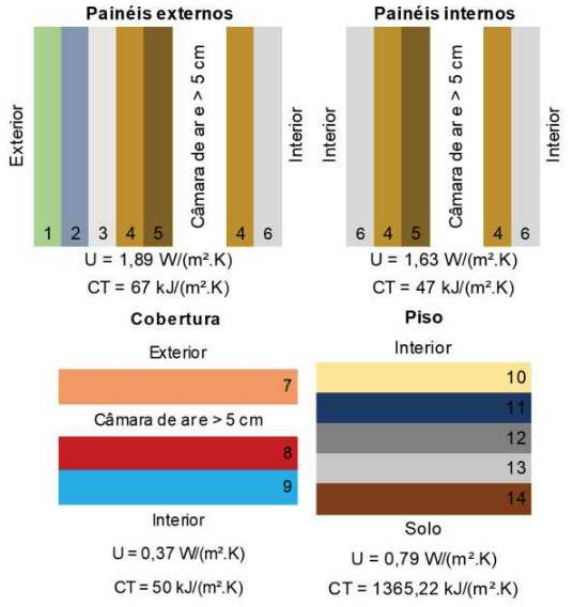


Figura 3 – Configuração dos elementos da envoltória

Vale ressaltar que as camadas heterogêneas do sistema em *wood-frame* foram transformadas em camadas homogêneas de resistência equivalente, conforme Zara, Santos e Giglio (2018). A absortância solar da cobertura foi definida como 0,75 para a cor de cerâmica, e a absortância solar das paredes foi adotada como 0,46, considerando as áreas pintadas com a cor bege e com a cor verde escuro. Na impossibilidade de realizar medições no local, os valores de absortância foram consultados na NBR 15220-2 (ABNT, 2005).

As propriedades termofísicas dos materiais constituintes do sistema são apresentados na Tabela 2, juntamente com a espessura de cada material. Para a madeira Pinus, existem duas espessuras diferentes, referentes aos painéis externos e aos painéis internos.

A edificação foi modelada de acordo com suas características geométricas e componentes construtivos no programa *SketchUp* 2017. O *plugin OpenStudio* v. 2.9 permitiu a configuração de zonas térmicas e a interface com o programa *EnergyPlus* v. 9.3.

Tabela 2 – Propriedades termofísicas dos componentes das paredes, cobertura e piso.

Material		Espessura [m]	Condutividade térmica [W/(m·K)]	Calor específico [kJ/(kg·K)]	Densidade [kg/m³]
1	Acabamento em textura acrílica	0,003	1,15	1,00	2.000,00
2	Argamassa polimérica *base coat*	0,003	1,15	1,00	2.000,00
3	Placa cimentícia	0,008	1,75	1,00	1.700,00
4	Placa OSB	0,0095	0,17	2,30	681,00
5	Madeira Pinus (equivalente)	0,0019/ 0,0023	0,15	1,34	664,00/ 831,00
6	Gesso acartonado	0,0125	0,35	0,84	750,00
7	Telha cerâmica	0,02	0,90	0,92	2.000,00
8	Lã de vidro	0,089	0,045	0,70	10,53
9	Forro PVC	0,01	0,20	0,96	1.300,00
10	Piso cerâmico	0,01	0,90	0,92	1.600,00
11	Argamassa de assentamento do piso	0,025	1,15	1,00	2.000,00
12	Concreto do radier	0,15	1,75	1,00	2.200,00
13	Brita	0,03	0,70	0,80	1250,00
14	Saibro	0,3	0,30	2,09	1500,00

No *EnergyPlus*, o caso base foi configurado para os dias da calibração por meio do objeto *SizingPeriod:DesignDay*. Nele, foram inseridos os dados horários de temperatura e umidade relativa do ar monitorados pelo HOBO U10-003. Além disso, foram inseridos dados de pressão barométrica, em média diária, obtidos a partir de medição em estação meteorológica convencional na cidade de Londrina, cujos dados são disponibilizados pelo banco de dados do Instituto Nacional de Meteorologia – INMET. Foram inseridos dados de velocidade e direção do vento e radiação solar, disponibilizados pelo Instituto Agronômico do Paraná - IAPAR, que possui uma estação meteorológica automática localizada a 4,5 km do local da edificação. Como o IAPAR monitora a radiação solar global no plano horizontal, foi preciso obter as parcelas direta e difusa, exigidas pelo objeto *SizingPeriod:DesignDay*. Devido ao sombreamento das fachadas, decidiu-se arbitrar para o caso base uma relação de 80/20 para radiação difusa/direta.

Para a consideração do contato da edificação com o piso, foi utilizado o objeto *Site:GroundTemperature:BuildingSurface*. Nele, foram inseridas as temperaturas médias mensais do solo monitoradas no período de calibração: 24,72 °C para março e 23,53 °C para abril. Por fim, os eventos de ocupação, utilização de equipamentos, iluminação artificial e manuseio de aberturas foram inseridos no modelo computacional.

3.3. Simulação computacional e calibração

A simulação do modelo computacional descrito no tópico anterior foi realizada no programa *EnergyPlus*. O programa possui um processo de checagem de convergência integrado à sua rotina de cálculos. Ainda assim, nessa pesquisa optou-se por adotar uma sequência de quatro dias de monitoramento que antecedem o período de calibração, a fim de minimizar erros provenientes de problemas de convergência. Dessa maneira, o período efetivo de calibração contempla 32 dias, entre 23/03/2020 e 23/04/2020.

A variável de saída adotada foi a temperatura operativa do ar interno dos ambientes. Como essa variável representa o valor médio entre a temperatura do ar e a temperatura radiante média do ambiente, foi escolhida para a análise, uma vez que os sensores HOBO U12-012 instalados na edificação não foram protegidos da energia radiante. A temperatura operativa simulada foi comparada com a temperatura do ar interno monitorada por meio da Raiz do Erro Quadrático Médio (RMSD), descrita na Equação 1. A RMSD é frequentemente utilizada para expressar a acurácia de resultados numéricos de simulações e possui a vantagem de apresentar valores do erro na mesma dimensão da variável analisada (HALLAK; PEREIRA FILHO, 2011).

$$RMSD = \sqrt{\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}(X_{sim} - X_{obs})^2}$$ Equação 1

Onde:

X_{sim} é o valor da temperatura operativa do ar, obtido por simulação;

X_{obs} é o valor da temperatura média do ar interno, obtido por medição;

N é o número de amostras.

O caso base foi simulado e, com as temperaturas internas obtidas, foram calculadas as RMSD para cada ambiente da edificação. O processo de calibração, esquematizado na Figura 4, consistiu na alteração de parâmetros do modelo computacional e na realização de uma nova simulação, avaliando a RMSD obtida. Alterações que resultaram em elevação da RMSD foram descartadas, ao passo que alterações que reduziram a RMSD foram mantidas no modelo calibrado. Para nortear as alterações nas primeiras etapas de calibração, foi feita a adequação do modelo computacional a partir de vistoria no protótipo habitacional em estudo. Particularidades do entorno e especificidades construtivas presentes na edificação e não contempladas no projeto foram incluídas ao modelo computacional, e o resultado foi avaliado. A hierarquia para a alteração dos parâmetros seguiu a confiabilidade dos dados, conforme sugerido por Raftery, Keane e Costa (2011). Ou seja, parâmetros que podem ser medidos ou observados com precisão no modelo real foram alterados inicialmente.

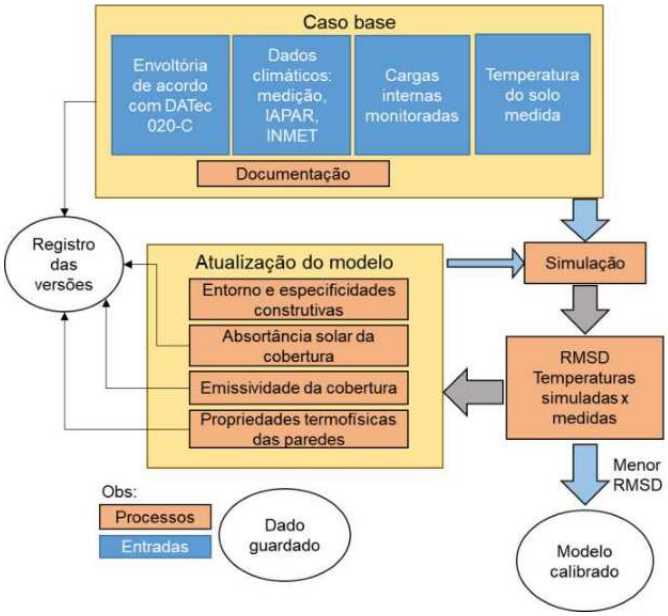


Figura 4 – Esquema do processo de calibração

Além disso, as demais alterações foram baseadas em estudos que apontaram quais parâmetros são mais influentes no resultado de simulações termoenergéticas. Silva e Ghisi (2014) estudaram 15 parâmetros termofísicos por meio de análise de sensibilidade e concluíram que a absortância solar da cobertura e sua emissividade foram os parâmetros mais influentes. Silva, Almeida e Ghisi (2017) analisaram incertezas físicas na simulação computacional de edificações e seu impacto no desempenho térmico e encontraram que a absortância solar da cobertura e o calor específico da argamassa das paredes foram influentes no desconforto por calor, e as propriedades termofísicas das paredes foram influentes no desconforto por frio.

Dessa maneira, o processo de calibração envolveu também a modificação dos parâmetros citados. As modificações ocorreram de forma isolada e conjunta.

De acordo com os valores de RMSD obtidos para cada etapa, decidiu-se sobre a manutenção ou não das alterações realizadas. Além da RMSD, também se analisou a porcentagem de temperaturas simuladas que se encontraram dentro do intervalo de acurácia do registrador de dados utilizado para monitorar a temperatura do ar, ou seja, temperaturas simuladas que podem ser consideradas iguais às temperaturas monitoradas. Este indicador ajudou a mostrar a capacidade do modelo computacional simular o comportamento da edificação. Por fim, o modelo calibrado foi aquele cuja combinação dos parâmetros modificados proporcionou o menor valor de RMSD e a maior porcentagem de temperaturas simuladas dentro do intervalo de acurácia do registrador de dados.

4. RESULTADOS

O caso base foi denominado de v_0. Serão apresentados os gráficos apenas para o ambiente sala, uma vez que não houve diferença significativa entre os ambientes. A partir de v_0, as modificações foram realizadas e os resultados foram analisados. A representação esquemática das alterações, desde o modelo inicial até o modelo calibrado, com todos os parâmetros modificados, está apresentada na Figura 5.

A primeira alteração realizada foi a análise da parcela de radiação solar difusa/direta. Nesta etapa, observou-se que a configuração inicial 80/20 apresentou melhor resultado. Na etapa seguinte, foi realizada a vistoria na edificação, na qual foram constatados problemas na vedação das portas e janelas. Sendo assim, foram realizadas modificações nas configurações de infiltração das aberturas.

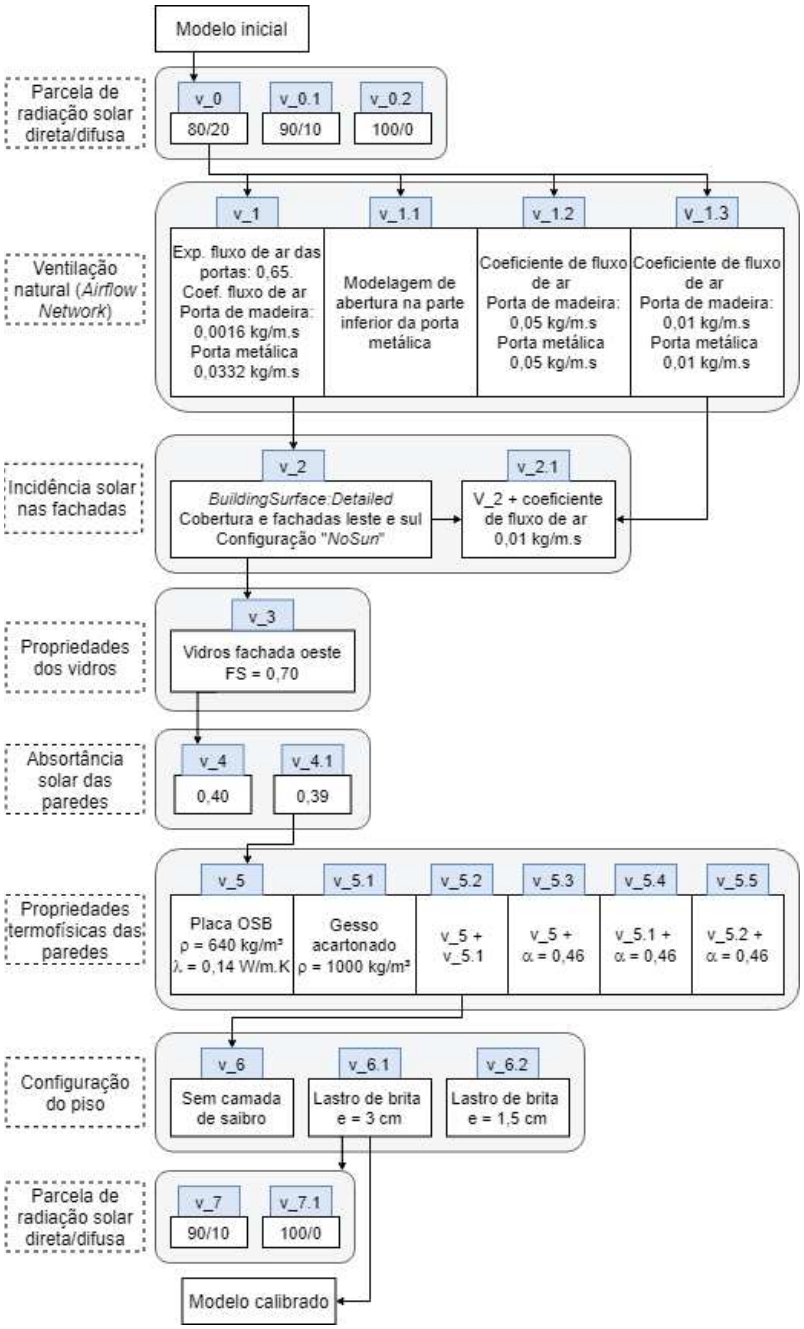


Figura 5 – Resultado do processo de calibração

Em seguida, a incidência solar nas fachadas foi analisada. Esse parâmetro apresentou grande influência e promoveu o maior impacto na calibração, proporcionando grande redução na RMSD e um acréscimo na porcentagem de temperaturas simuladas dentro do intervalo de acurácia do sensor. Isso se deve ao intenso sombreamento promovido pelas árvores no entorno da edificação, que protegeu as fachadas em grande parte do período de calibração. Essa particularidade foi configurada no modelo desconsiderando a incidência de radiação solar na cobertura e nas fachadas leste e sul, por meio do objeto *BuildingSurface:Detailed*.

Em seguida, o fator solar dos vidros do banheiro e da cozinha foi alterado. Nas etapas posteriores, a absortância solar das paredes e suas propriedades termofísicas foram modificadas isolada e conjuntamente, porém houve pouca modificação no RMSD.

Também foram analisadas diferentes configurações de piso. Por fim, encontrou-se que o modelo computacional mais ajustado foi o v_6.1. Este modelo foi simulado com diferentes parcelas de radiação solar direta/difusa para garantir que a parcela inicial era realmente a mais adequada.

Em uma análise de todo o procedimento, verificou-se que a consideração da incidência solar independente para cada fachada apresentou o maior impacto nos resultados.

Os resultados da simulação comparados com os valores monitorados são apresentados na Figura 6. Como os resultados foram graficamente semelhantes entre os ambientes da edificação, optou-se por mostrar apenas os resultados para o ambiente sala. Pode-se observar que o modelo v_0 retornou valores mais altos do que os monitorados, especialmente nos horários de temperaturas mais elevadas, embora o comportamento tenha se mostrado semelhante, com pontos de máximo e mínimo acontecendo nos mesmos horários.

No modelo calibrado (v_6.1), apresentado na Figura 7, observa-se que a curva das temperaturas simuladas se ajustou à das temperaturas monitoradas, com grande redução da diferença nos picos. Isso também pode ser observado no gráfico de temperaturas medidas x simuladas, no qual o R^2 é igual a 0,89.

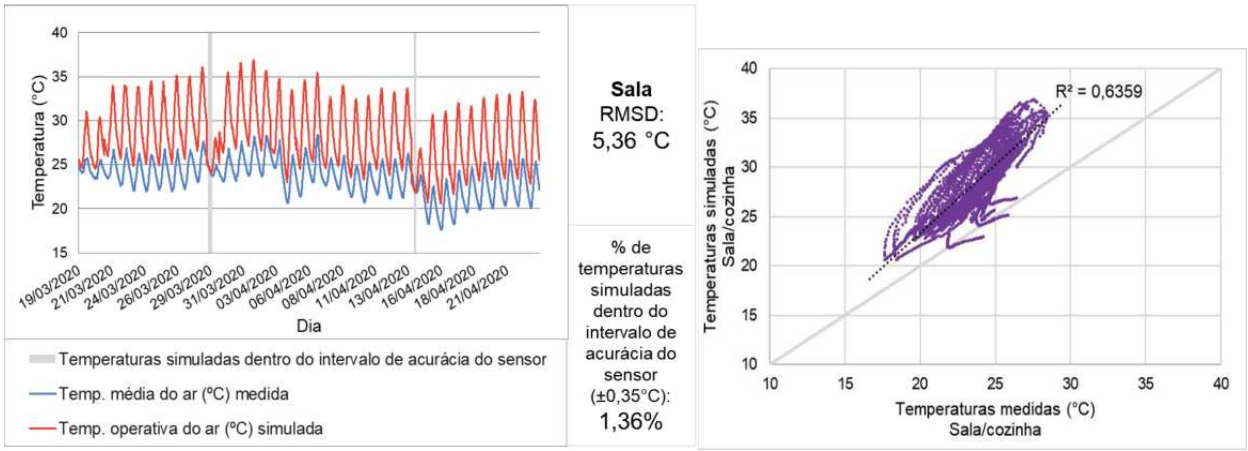


Figura 6 – Resultados do modelo v_0

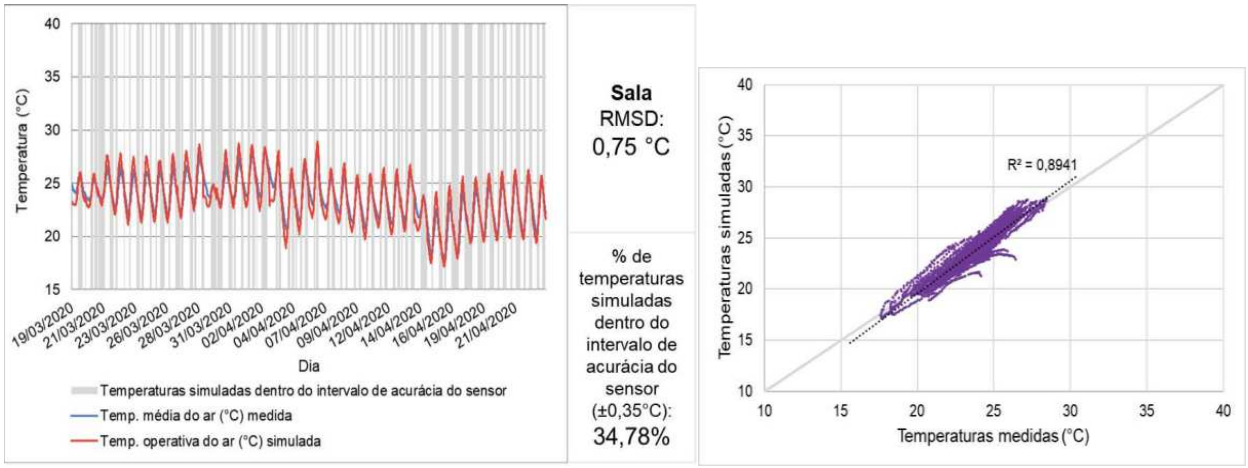


Figura 7 – Resultados do modelo calibrado v_6.1

Na Figura 8 é apresentado o resumo do procedimento de calibração, com as RMSD obtidas para cada versão analisada, bem como com as porcentagens de temperaturas simuladas dentro do intervalo de acurácia do sensor. A maior RMSD foi de 5,90 °C, e a menor, para o modelo calibrado, foi igual a 0,75 °C. Além disso, em mais de um terço do período de calibração o modelo computacional retornou valores de temperatura do ar que podem ser considerados iguais aos valores monitorados.

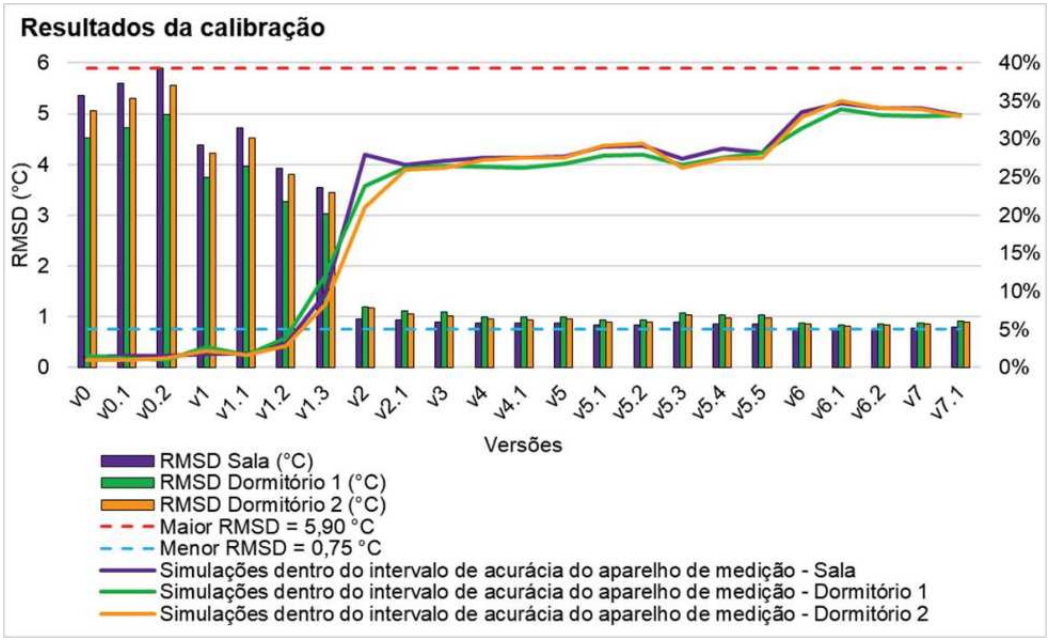


Figura 8 – Resultados da calibração

5. CONCLUSÕES

As simulações computacionais para análises de desempenho termoenergético de edificações levam em conta muitos parâmetros. O correto ajuste de tais parâmetros nem sempre é simples, e pode influenciar no resultado da simulação. Com esta pesquisa, conclui-se que o ajuste dos parâmetros no procedimento de calibração foi satisfatório para a edificação em estudo, atingindo valores de RMSD abaixo de 1,0 °C e apresentando mais de 30% das temperaturas simuladas dentro do intervalo de acurácia do aparelho de medição. Há de se levar em consideração que a calibração envolveu 32 dias, período longo quando comparado a outras pesquisas, e que a possibilidade de controlar os eventos de ocupação, utilização de ventilação natural, iluminação artificial e equipamentos foi fundamental para o sucesso do procedimento.

Além disso, a utilização de temperaturas do solo monitoradas no local auxilia na obtenção de resultados mais próximos do comportamento real da edificação, como já citado em estudos referenciados neste artigo.

A maior contribuição deste estudo, porém, está no efeito proporcionado pela consideração da incidência de radiação solar de formas diferentes na fachada. A edificação está sob grande sombreamento devido às árvores em seu entorno, e apenas algumas fachadas recebem diretamente a luz solar. A definição no modelo computacional de que a cobertura e as fachadas leste e sul da edificação não estariam submetidas à incidência de radiação solar proporcionou a maior redução relativa na RMSD entre todas as versões simuladas. Isto pode indicar que o entorno exerce influência significativa no resultado das simulações para análise de desempenho termoenergético de edificações e que, no caso de procedimentos de calibração, merece atenção especial dos pesquisadores.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **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.

_____. 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, 2005b.

ARAÚJO, M. L. T. de; SCALCO, V. A.; BATISTA, J. O. Calibração de um modelo computacional para análise de desempenho térmico. In: XVII Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído. **Anais...** Porto Alegre, 2020.

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**. Porto Alegre, v. 11, n. 4, p. 79-97, out./dez. 2011.

BRASIL. Ministério das Cidades, Programa Brasileiro da Qualidade e Produtividade no Habitat -PBQP-H. Sistema Nacional de Avaliações Técnicas – SiNAT. **Sistema estruturado em peças leves de madeira maciça serrada – TecVerde (tipo light wood framing), DATec N° 020-C**. Brasília, 2017.

_____. Ministério de Minas e Energia. Empresa de Pesquisa Energética. **Relatório Síntese**. Brasília, 2019.

_____. Ministério de Minas e Energia. Empresa de Pesquisa Energética. **Balanço Energético Nacional**. Brasília, 2020.

GALVARRO, S. F. S.; CARLO, J. C.; GUIMARÃES, I. B. B.; TIBIRIÇÁ, A. C. G. Calibração de simulação térmica de uma unidade habitacional em edifício multifamiliar. In: XII Encontro Nacional de Conforto no Ambiente Construído. **Anais...** Brasília, 2013.

HALLAK, R.; PEREIRA FILHO, A. J. Metodologia para análise de desempenho de simulações de sistemas convectivos na região metropolitana de São Paulo com o modelo ARPS: sensibilidade a variações com os esquemas de advecção e assimilação de dados. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 26, n. 4, p. 591-608, dez. 2011.

LAMBERTS, R.; DUTRA, L.; PEREIRA, F. O. R. **Eficiência Energética na arquitetura**. 3 ed. Rio de Janeiro: Eletrobras/PROCEL, 2014.

PEREIRA, C. D.; GHISI, E. Calibração de um modelo computacional de uma residência unifamiliar localizada em Florianópolis. In: XII Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído, **Anais...** Fortaleza, 2008.

PEREIRA, C. D. **A Influência do Envelope no Desempenho Térmico de Edificações Residenciais Unifamiliares Ocupadas e Ventiladas Naturalmente**. Dissertação (Mestrado em Engenharia civil) – Universidade Estadual de Santa Catarina. Florianópolis, 2009.

RAFTERY, P.; KEANE, M.; O'DONNEL, J. Calibrating whole building energy models: An evidence-based methodology. **Energy and Buildings**, v. 43, p. 2356-2364, 2011.

SANTOS, K. M.; LOBO, E. B. de C.; BARATA, M. S. Calibração de um modelo computacional de uma habitação de interesse social multifamiliar em Belém-PA. In: XV Encontro Nacional de Conforto no Ambiente Construído, p. 1726-1735. **Anais...** João Pessoa, 2019.

SILVA, A. S.; GHISI, E. Uncertainty analysis of the computer model in building performance simulation. **Energy and Buildings**, v. 76, p. 258-269, 2014.

SILVA, A. S.; ALMEIDA, L. S. S.; GHISI, E. Análise de incertezas físicas em simulação computacional de edificações residenciais. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v.17, n.1, p. 289-303, jan./mar. 2017.

WESTPHAL, F. S. **Análise de incertezas e de sensibilidade aplicadas à simulação de desempenho energético de edificações comerciais**. Tese (Doutorado em Engenharia civil) – Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2007.

ZARA, R. B.; SANTOS, V. C.; GIGLIO, T. G. F. Análise do nível de eficiência energética de uma habitação em wood frame pelos métodos prescritivo e simulação do RTQ-R. In: XVII Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído, p. 457-466. **Anais...** Foz do Iguaçu, 2018.

AGRADECIMENTOS

À CAPES, pela bolsa concedida.