

CALIBRAÇÃO DE UM MODELO COMPUTACIONAL DE UMA RESIDÊNCIA UNIFAMILIAR LOCALIZADA EM FLORIANÓPOLIS

Cláudia D. Pereira (1); Enedir Ghisi (2)

(1) Mestranda do Departamento de Engenharia Civil – e-mail: claudia@labeee.ufsc.br

(2) PhD, Professor do Departamento de Engenharia Civil – e-mail: enedir@labeee.ufsc.br

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

RESUMO

Diversas são as ferramentas computacionais de simulação disponíveis como importantes instrumentos para análise do comportamento energético, térmico, acústico e de iluminação de edifícios. Porém, a complexidade dos programas no que diz respeito à definição de certos parâmetros, tem provocado a simplificação dos modelos e imprecisão dos resultados. Assim, para que o programa computacional apresente resultados confiáveis, considera-se essencial que o modelo seja calibrado. Este trabalho teve como objetivo a realização da calibração de um modelo computacional, para análise de desempenho térmico da edificação residencial denominada “Casa Eficiente”, construída na cidade de Florianópolis, em uma parceria entre Eletrobrás, Eletrosul e LabEEE/UFSC. Para isso, a edificação foi monitorada, registrando-se dados de temperatura do ar no interior de três cômodos, e dados climáticos tais como radiação solar, velocidade e direção do vento, temperatura e umidade do ar. Utilizando o programa EnergyPlus versão 2.0.0, criou-se um modelo computacional para a “Casa Eficiente”, que foi simulado com um arquivo climático produzido a partir dos dados ambientais medidos durante o mesmo período de monitoramento da edificação. Foram comparados os valores de temperatura do ar obtidos nas simulações com os obtidos no monitoramento dos ambientes da edificação. Os resultados finais apresentaram uma boa proximidade, permitindo admitir a confiabilidade dos dados obtidos pela simulação. Os testes realizados para a calibração destacaram em especial a importância da correta definição do valor de temperatura do solo, comumente relegado.

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

ABSTRACT

There are several computer programmes available as important instruments for analysis of lighting, acoustic, thermal and energy performance of buildings. However, the complexity of the programmes concerning the definition of certain input data may result in a model simplification and inaccurate results. Thus, to obtain accurate results from the computer programme, it is essential that the model be calibrated. The main objective of this work is to calibrate a computer model of a house, taking into account its thermal performance. The house is called “Efficient House”, and is located in the city of Florianópolis, in a partnership between Eletrobrás, Eletrosul and LabEEE/UFSC. Therefore, air temperature inside three rooms, and external climatic data such as solar radiation, wind speed and direction, air temperature and relative air humidity were measured. By using the EnergyPlus computer programme, version 2.0.0, a computer model for the “Efficient House” was built. Such a model was simulated considering a climatic data file that was produced from measurements performed during the same time period as the house monitoring. Air temperatures obtained from simulations were compared with those obtained from measurements in the house. They were similar and therefore the computer programme was considered to produce accurate results. Tests performed for the calibration of the model highlighted the importance of using the correct soil temperature in the simulation.

Keywords: computer simulation, calibration, thermal performance.

1 INTRODUÇÃO

Nas últimas décadas foi possível observar uma série de discussões sobre economia de energia e eficiência energética, não apenas entre profissionais da área, mas atingindo toda a sociedade. Para Lamberts et al. (2004), um edifício é considerado energeticamente mais eficiente que outro quando proporciona as mesmas condições ambientais de conforto ao seu usuário, com menor consumo de energia.

Nesse sentido, é crescente também a discussão sobre o desempenho térmico de edificações, tanto no setor residencial quanto no comercial e público, responsáveis por uma grande parte do consumo de energia elétrica na maioria dos países (MENDES et al., 2005). Tem se destacado a aplicação de estratégias passivas de condicionamento, entendidas como a construção e organização de edifícios de forma que as propriedades térmicas de seus componentes, contribuam para a criação de ambientes agradáveis e estáveis climaticamente (WONG; LI, 2007), evitando ou diminuindo a necessidade de equipamentos elétricos para esse fim.

Ao mesmo tempo, de acordo com Mendes et al. (2005), a avaliação do desempenho térmico e energético de edificações constitui-se numa tarefa complexa, envolvendo muitas variáveis interdependentes e conceitos multidisciplinares. Dessa forma, o uso do computador tornou-se fundamental para o desenvolvimento de modelos físicos que representem o comportamento termo-energético de edifícios.

Vários países, nas últimas décadas, têm desenvolvido diferentes programas na busca por edifícios mais eficientes. O Departamento de Energia dos Estados Unidos tem disponível na Internet (DOE, 2007) uma lista com 347 programas de simulação de edificações, para análises de eficiência energética, energias renováveis e sustentabilidade em edifícios. As diversas ferramentas computacionais de simulação são importantes instrumentos para verificação e análise de edifícios em relação ao seu comportamento tanto energético quanto térmico, acústico e de iluminação, entre outros.

No Brasil, ainda são poucos os profissionais de engenharia e arquitetura que utilizam tais programas como ferramenta de trabalho. As principais causas disto são a complexidade dos programas e a conseqüente dificuldade e demora no aprendizado pelos usuários. Westphal e Lamberts (2005) destacam que a complexidade dos fenômenos envolvendo o comportamento térmico de edifícios implica em uma grande quantidade de dados de entrada nas simulações, o que requer conhecimentos multidisciplinares dos usuários.

As principais dificuldades na modelagem das simulações costumam ocorrer na definição dos padrões de uso e das trocas de ar da edificação, o que tem provocado a sua desconsideração em muitas simulações. A inclusão desses fatores é de grande importância, principalmente tratando-se de edificações residenciais, pois eles exercem grande influência sobre as trocas de calor do edifício.

Para a definição de um modelo computacional confiável, que represente bem o comportamento térmico e energético de determinado edifício analisado, é essencial que esse modelo seja corretamente calibrado (WESTPHAL; LAMBERTS, 2005). Para isso, uma das opções é comparar dados obtidos por simulação com dados de medições no edifício.

Um dos programas de simulação de edificações mais utilizados no mundo é o EnergyPlus, desenvolvido pelo Departamento de Energia dos Estados Unidos. Ele foi desenvolvido para estimar trocas térmicas, índices de iluminação e consumo energético de edifícios, a partir da modelagem física do edifício e seus sistemas de ventilação, iluminação, aquecimento e resfriamento. Esse foi o programa escolhido para realizar as simulações deste trabalho.

2 OBJETIVO

O objetivo deste artigo é apresentar a calibração de um modelo computacional (para análise de desempenho térmico) de uma edificação residencial unifamiliar localizada na cidade de Florianópolis, a partir da comparação entre valores de temperatura e umidade relativa do ar medidos na residência e valores obtidos por meio da simulação do modelo.

3 METODOLOGIA

O método deste trabalho está dividido em três etapas principais:

1. Monitoramento de uma edificação residencial, realizando medições de temperatura do ar.
2. Definição de um modelo computacional representativo para a edificação monitorada, utilizando o programa EnergyPlus versão 2.0.0.
3. Análises de sensibilidade para calibrar o modelo computacional, para que este represente com a máxima fidelidade o comportamento térmico da residência.

3.1 Monitoramento de uma Edificação

A edificação monitorada é uma residência unifamiliar construída na cidade de Florianópolis, em uma parceria entre a Eletrosul, a Eletrobrás e o Laboratório de Eficiência Energética em Edificações (LabEEE) da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC). Seu projeto foi desenvolvido pelas arquitetas Alexandra Albuquerque Maciel e Suely Ferraz de Andrade. Esta residência está localizada no bairro Pantanal, no pátio da sede da Eletrosul, ao lado do campus da UFSC, conforme a indicação da Figura 1. A Figura 2 mostra uma planta baixa da edificação.



Figura 1 – Localização da residência monitorada.

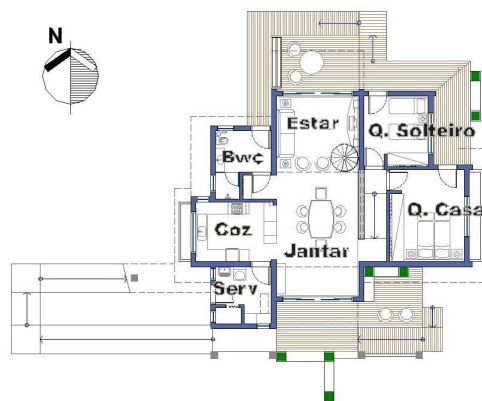


Figura 2 – Planta baixa da residência monitorada.

3.1.1 Caracterização do Envelope

A residência possui paredes duplas, de tijolos cerâmicos maciços, com camada de manta de lã de rocha no interior, fazendo o isolamento térmico. Apenas algumas paredes internas da residência não são duplas, possuindo uma camada de tijolos cerâmicos maciços. As esquadrias das portas externas e de todas as janelas são de PVC, e os vidros são duplos. Elas possuem persianas externas também de PVC.

Na cobertura desta residência são utilizadas quatro diferentes soluções:

1. Telha cerâmica clara, camada interna de manta de lã de rocha e isolamento refletivo, forro de madeira e laje horizontal (sobre a cozinha e o corredor);
2. Telha cerâmica clara, camada interna de manta de lã de rocha e isolamento refletivo, e forro de madeira (sobre o quarto de casal);
3. Telha metálica, camada interna de manta de lã de rocha, e forro de madeira (sobre as salas de jantar e estar, que possuem pé-direito duplo);
4. Laje horizontal com isolamento térmico de poliestireno extrudado, coberta total ou parcialmente por área ajardinada – teto-jardim (sobre o quarto de solteiro, banheiro e área de serviços).

3.1.2 Medições na Edificação

Para o monitoramento da edificação, utilizaram-se equipamentos armazenadores de dados (data loggers) do tipo HOBO, modelo U12 (Figura 3), para medir e armazenar dados de temperatura do ar.

Os valores armazenados foram transferidos para computador através do programa HOBOWare (Software for HOBO U-Series Data Loggers & Devices), versão 2, para Windows.

Utilizaram-se três HOBOS, instalados nos seguintes cômodos da residência: quarto de casal, sala de jantar e banheiro. Eles foram posicionados aproximadamente no centro do cômodo, a 1,80 metros do piso. Os HOBOS foram programados para adquirir as informações em intervalos de 5 minutos e, com estes dados, calcularam-se médias horárias de cada variável. Tais médias foram calculadas para permitir as comparações com os dados obtidos nas simulações computacionais.



Figura 3 – Medidores do tipo HOBO.

A edificação foi monitorada entre os dias 24 e 30 de dezembro de 2007. O período de monitoramento foi limitado pelo fato desta casa funcionar tanto como laboratório de estudo e pesquisas, quanto como ambiente para visitação e divulgação de tecnologias, restringindo a possibilidade de controle da ocupação da casa para as medições. Durante os dias de medição, a

casa permaneceu sem ocupação e com janelas e portas externas fechadas (sem ventilação).

Foi ainda utilizado um sensor do tipo termopar, para medição de temperatura, instalado no solo abaixo da sala da residência estudada. Com este sensor foram adquiridos dados da temperatura do solo para serem utilizados na simulação computacional.

As variáveis ambientais externas foram obtidas pela estação meteorológica do Laboratório de Engenharia de Processos de Conversão e Tecnologia de Energia (LEPTEN) do Departamento de Engenharia Mecânica da UFSC. Essa estação está localizada a aproximadamente 550 metros da edificação estudada.

3.2 Definição de um Modelo Computacional

Definiu-se o modelo de simulação inicial com características semelhantes às da residência monitorada, tanto no que diz respeito à volumetria e orientação solar, quanto aos materiais, componentes e aberturas. Para a simulação de edificações no programa computacional EnergyPlus, é necessária a definição de zonas térmicas do modelo. Assim, a residência foi modelada com nove zonas térmicas, cada uma representando os seguintes ambientes: área de serviços, cozinha, banheiro, salas, corredor, quarto de casal, quarto de solteiro, área da caixa d'água acima da cozinha e área do boiler acima do corredor. A Figura 4 mostra a planta desse modelo, com suas dimensões, e a Figura 5 mostra uma perspectiva externa. Este modelo inicial foi construído com todas as coberturas horizontais, de forma a simplificar a entrada de dados.

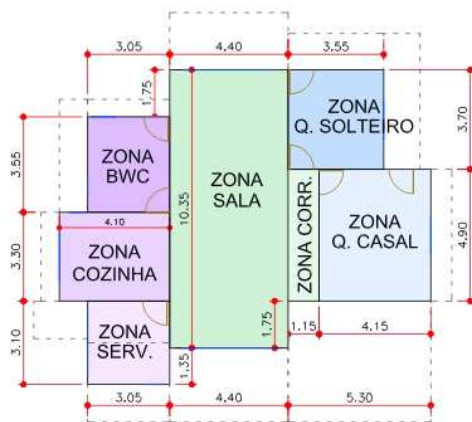


Figura 4 – Planta baixa do modelo de simulação.

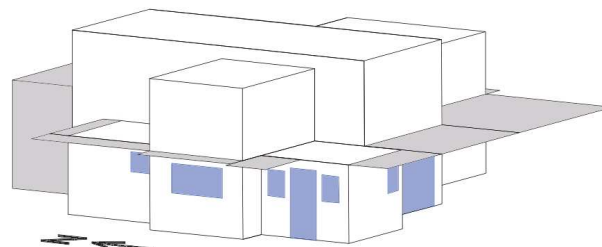


Figura 5 – Perspectiva do modelo de simulação.

As simulações utilizaram um arquivo climático com dados da cidade de Florianópolis, medidos na estação meteorológica do LEPTEN – UFSC durante o mês de dezembro de 2007. Apesar das análises deste trabalho se basearem em dados de uma semana (24 a 30 de dezembro/2007), as simulações

ocorreram para todo o mês de dezembro, para garantir que os seus resultados considerassem a influência das variações climáticas dos dias anteriores sobre a edificação.

Para a temperatura do solo desta primeira simulação, foi utilizado o valor existente no arquivo climático TRY de Florianópolis, que diz respeito a 1963, ano de referência da cidade.

Todos os materiais utilizados no modelo de simulação foram definidos de acordo com o existente na casa, conforme o descrito no item 3.1.1. As propriedades térmicas da maior parte dos materiais usados, tais como condutividade térmica, densidade, calor específico, absorvância para radiação solar e resistência térmica, foram obtidas na norma NBR 15220 (ABNT, 2005a; 2005b). Apenas as características utilizadas para o tijolo cerâmico maciço foram obtidas em Ordenes et al. (2003), de forma que fosse considerada a influência da argamassa de assentamento, adotando valores para um material equivalente. Estes dados são apresentados nas Tabelas 1 e 2.

Tabela 1 – Características dos materiais utilizados na simulação computacional.

Material	Condutividade térmica [W/m.K]	Densidade [kg/m ³]	Calor específico [J/kg.K]	Absortância
Tijolo cerâmico maciço, com argamassa de assentamento	0,90	1764	920	0,30
Argamassa reboco	1,15	2000	1000	0,20
Concreto maciço	1,75	2200	1000	0,30
Telha cerâmica	1,05	2000	920	0,40
Telha de alumínio	230	2700	880	0,20
Madeira para forro	0,14	600	2300	0,70
Madeira para porta	0,15	600	1340	0,20
PVC para porta	0,20	1350	960	0,20

Tabela 2 – Características dos materiais utilizados na simulação computacional.

Material	Resistência térmica [m ² .K/W]
Manta de lã de rocha	0,44
Poliestireno extrudado	0,57
Câmara de ar com superfície de alta emissividade, espessura 6,0 cm - fluxo descendente	0,21
Câmara de ar com superfície de alta emissividade, espessura 6,0 cm - fluxo ascendente	0,14
Câmara de ar com superfície de baixa emissividade, espessura 4,0 cm - fluxo descendente	0,43
Câmara de ar com superfície de baixa emissividade, espessura 4,0 cm - fluxo ascendente	0,25

Quanto aos ganhos de calor internos da edificação, tendo em vista que, no período considerado, a edificação não foi ocupada por usuários e não houve uso de lâmpadas, em todas as simulações deste trabalho não se incluiu ganhos de calor pela iluminação e por pessoas. Em relação aos equipamentos elétricos, foram considerados dois aparelhos: uma geladeira e um computador. Ambos permaneceram ligados 24 horas por dia, todos os dias, sendo a geladeira na zona da cozinha e o computador na zona do quarto de casal. Para a geladeira considerou-se uma potência média de 50 W, e para o computador 130 W. Estes valores foram obtidos a partir de medições de consumo desses eletrodomésticos da casa, utilizando um medidor portátil de consumo, marca Yokogawa. Adotou-se o valor 0,5 para a fração radiante de ganho de calor pelos equipamentos.

No período de monitoramento todas as janelas e portas externas permaneceram fechadas. Por isso foram incluídas apenas trocas de ar por infiltração. Edificações são consideradas com alto nível de vedação quando apresentam taxas entre 0,30 e 0,61 troca de ar a cada hora (TOMMERUP et al., 2007). Considerando que a residência estudada possui boa vedação, adotou-se uma taxa de 0,5 troca de ar/hora, para todas as zonas. Outro item modelado foram as persianas existentes em algumas janelas e portas externas. Elas foram inseridas no EnergyPlus como do tipo “Shade”, sendo o material de PVC branco. Todas as persianas permaneceram fechadas 24 horas em todos os dias monitorados.

Para comparação dos resultados desta simulação com os valores medidos na edificação real, foi requerida como dado de saída do modelo a temperatura média do ar no interior [°C], nas zonas do quarto de casal, sala e banheiro. Os dados obtidos por medição e simulação foram comparados, verificando-se o erro, ou seja, as diferenças entre os valores.

3.3 Calibração do Modelo - Análises de Sensibilidade

Para a calibração do modelo, seis parâmetros foram analisados: temperatura do solo, geometria da edificação, resistência térmica dos materiais do envelope, absorvância dos materiais do envelope, ganhos internos de calor por equipamentos e infiltração de ar. Eles foram escolhidos por se tratarem dos dados de entrada utilizados para a simulação no programa EnergyPlus. Cada um desses parâmetros foi alterado individualmente nas simulações, permitindo a verificação da sua influência no comportamento do modelo.

3.3.1 Temperatura do Solo

Nesta análise, o modelo foi simulado alterando-se o valor de temperatura do solo. Aqui foi utilizada a média mensal dos valores medidos no solo do terreno estudado, durante o mês de dezembro de 2007. Com isso foi possível comparar os resultados e verificar a influência deste dado nas temperaturas internas do edifício. Todas as demais simulações descritas a seguir utilizaram também esse valor medido no terreno da residência.

3.3.2 Geometria da Edificação

Tendo em vista que o modelo inicial foi construído com todas as coberturas horizontais, uma primeira alteração foi realizada definindo as coberturas com as inclinações existentes na edificação estudada. Este modelo é mostrado na Figura 6. Com isso foi possível verificar a influência da simplificação da geometria nos resultados da simulação.

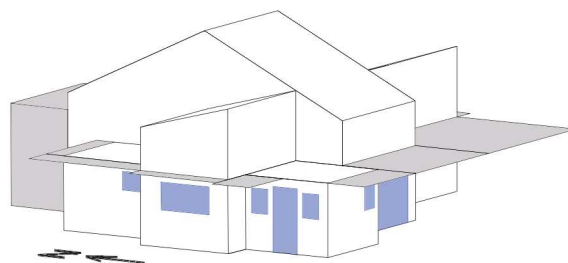


Figura 6 – Perspectiva do modelo alterado.

3.3.3 Resistência Térmica dos Materiais

As propriedades térmicas dos materiais utilizados no modelo inicial, obtidas em norma, são apontadas pela própria norma como sendo apenas indicativos, porque eles podem variar em função da matéria prima e da forma de fabricação. Para verificar a influência de diferenças nos valores da resistência térmica dos materiais, foi realizada uma simulação aumentando em 15% a resistência térmica de todos os materiais, e outra simulação diminuindo esses valores em 15%. Santana (2006) trabalhou com a variação da transmitância térmica dos materiais e constatou uma influência linear desta sobre o desempenho da edificação. Por isso, é desnecessária a análise de muitas opções de variação.

3.3.4 Absorvância dos Materiais

No modelo inicial, os valores de absorvância dos materiais foram definidos pela observação das cores na edificação estudada. Porém, esta observação não define tais valores com precisão, mesmo porque a sujeira pode provocar alterações nessa propriedade. Assim, para considerar a influência de sujeiras nas superfícies, foi realizada a simulação aumentando em 0,1 o valor da absorvância de todos os materiais.

3.3.5 Ganhos Internos de Calor por Equipamentos

Para a simulação inicial adotou-se o valor 0,5 para a fração radiante de ganho de calor pelos equipamentos, resultando, conseqüentemente, em 0,5 para a fração convectiva. Este é um valor comumente utilizado por grande parte dos pesquisadores. Porém, segundo a ASHRAE (2005), a divisão entre as parcelas radiante e convectiva (de ganho de calor) para grande parte dos equipamentos é geralmente uniforme, mas há uma importante diferença no caso de equipamentos que possuem ventilador para resfriamento, como no caso de computadores. Sendo assim, foi realizada uma simulação adotando, para a fração radiante de ganho de calor, o valor 0,20 para o computador e o valor 0,35 para a geladeira, baseado no apresentado pela ASHRAE (2005).

3.3.6 Infiltração de Ar

A infiltração de ar é definida no programa EnergyPlus com base em uma taxa de fluxo, dada em m^3/s , podendo variar para cada zona de simulação. Pela dificuldade em caracterizar esse parâmetro, muitas simulações adotam uma taxa fixa de troca de ar por hora, independente das condições da edificação. Foi então realizada aqui uma simulação alterando para 1,5 trocas de ar/hora as taxas de infiltração dos quartos de casal e solteiro, que são os cômodos com mais frestas e para 1,0 troca de ar/hora nos demais cômodos, que possuem boa vedação.

4 ANÁLISE DE RESULTADOS

A seguir serão apresentados os resultados obtidos nesta pesquisa. Todos os gráficos são referentes aos dias 27 a 29 de dezembro de 2007, ou seja, três dias compreendidos entre o período total de monitoramento da edificação. Esses dias foram escolhidos por estarem em uma sequência de dias com comportamento semelhante, proporcionando uma estabilidade no comportamento térmico da casa. Os gráficos mostram os valores de temperatura média do ar medidos e simulados.

4.1 Teste da Temperatura do Solo

As duas primeiras simulações realizadas utilizaram o modelo descrito no item 3.2, alterando apenas o valor de temperatura do solo para o mês simulado. Os Gráficos 1 e 2 apresentam os resultados dessas simulações. A primeira adotou o valor de temperatura do solo igual a $21,01^\circ\text{C}$, indicado no arquivo climático TRY de Florianópolis para dezembro de 1963. A segunda utilizou o valor $25,2^\circ\text{C}$, média mensal dos valores medidos no solo do terreno estudado, durante dezembro de 2007.

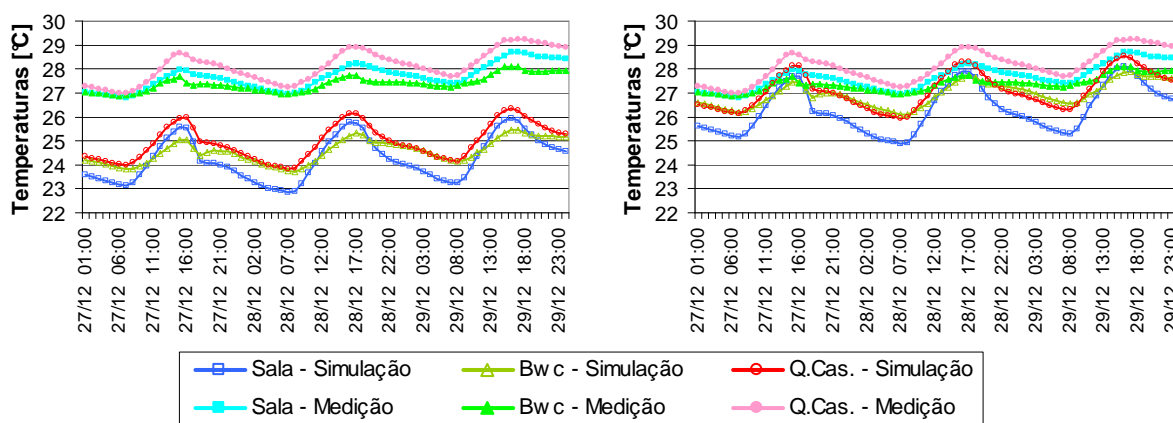


Gráfico 1 – Simulação inicial com temperatura do solo do arquivo TRY.

Gráfico 2 – Simulação com temperatura do solo medida no terreno.

Através desses gráficos, é possível verificar a grande influência da temperatura do solo nos resultados. Com o valor de temperatura do solo medido no local, as temperaturas do ar obtidas na simulação ficam bem mais próximas das medidas. Comparando, no Gráfico 2, os valores simulados com os medidos é possível ver uma diferença média entre as temperaturas de $1,3^\circ\text{C}$ na sala, $1,0^\circ\text{C}$ no quarto de casal e $0,4^\circ\text{C}$ no banheiro. Nos três cômodos, as maiores diferenças são nos momentos de temperatura mínima do dia, onde o erro chega a $2,1^\circ\text{C}$ na sala, $1,4^\circ\text{C}$ no quarto de casal e $0,9^\circ\text{C}$ no banheiro. Todas as demais simulações utilizaram o valor de temperatura do solo medido no terreno da residência.

4.2 Teste da Geometria da Edificação

O Gráfico 3 mostra os resultados da simulação com as coberturas definidas com as inclinações existentes na edificação estudada. Comparando-a com o Gráfico 2, é possível perceber que houve algumas leves alterações nos valores de temperatura. Na sala, a temperatura do ar diminuiu em média $0,1^\circ\text{C}$ com a mudança. Já o quarto de casal teve sua temperatura aumentada em cerca de $0,1^\circ\text{C}$ no momento de temperatura máxima. No banheiro praticamente não houve mudanças nas temperaturas,

mesmo porque este cômodo manteve sua geometria, pois sua cobertura é horizontal (cobertura ajardinada).

Comparando os valores simulados com os medidos, verifica-se uma diferença que chega a 2,3°C na sala, 1,4°C no quarto de casal e 0,9°C no banheiro, sempre nos momentos de menor temperatura do dia.

4.3 Teste da Resistência Térmica dos Materiais

Foi realizada uma simulação aumentando e outra diminuindo o valor da resistência térmica dos

materiais do modelo em 15%. Os Gráficos 4 e 5 mostram os resultados dessas simulações. É possível verificar que em ambos os casos a principal alteração foi na amplitude das curvas de temperatura. No caso do aumento da resistência, ocorreu uma diminuição na amplitude, e com a diminuição da resistência, houve um aumento da amplitude. O primeiro caso é o que mais se assemelha aos valores medidos. Porém nas duas situações, as alterações foram bem pequenas, de menos de 0,1°C.

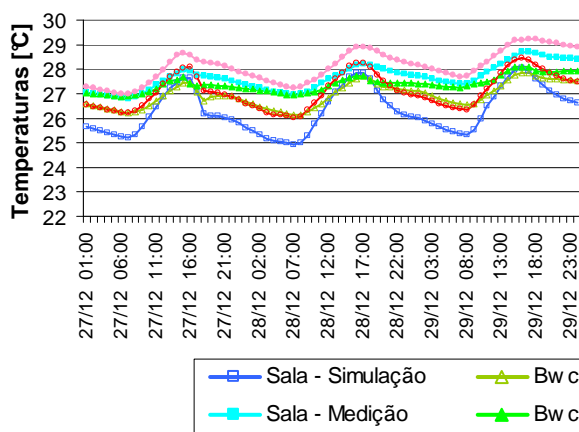


Gráfico 4 – Simulação com aumento de 15% na resistência dos materiais.

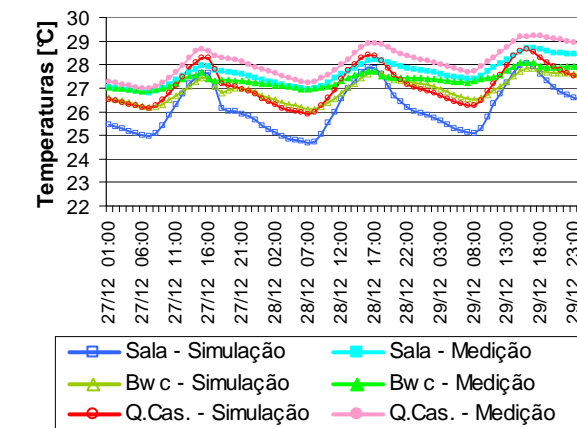


Gráfico 3 – Simulação com alteração na geometria do modelo.

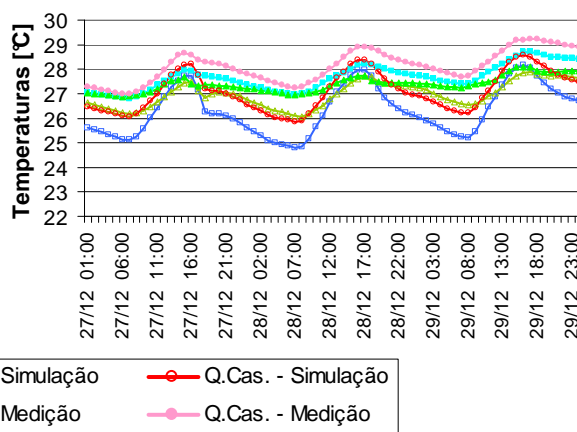


Gráfico 5 – Simulação com diminuição de 15% na resistência dos materiais.

4.4 Teste da Absortância dos Materiais

Nesta simulação os valores de absortância de todos os materiais foram aumentados. Isso resultou numa elevação da temperatura no interior de todos os cômodos, conforme verifica-se no Gráfico 6. Na sala e no quarto de casal o aumento da temperatura foi de cerca de 0,3°C. No banheiro, o aumento foi menor que nos outros cômodos, cerca de 0,1°C, provavelmente devido à cobertura ajardinada.

Comparando esta simulação com as medições, verifica-se uma diferença média de 1,0°C na sala, 0,8°C no quarto de casal e 0,3°C no banheiro. Os maiores erros continuam sendo nos momentos de temperatura mínima: 1,9°C na sala, 1,2°C no quarto de casal e 0,7°C no banheiro.

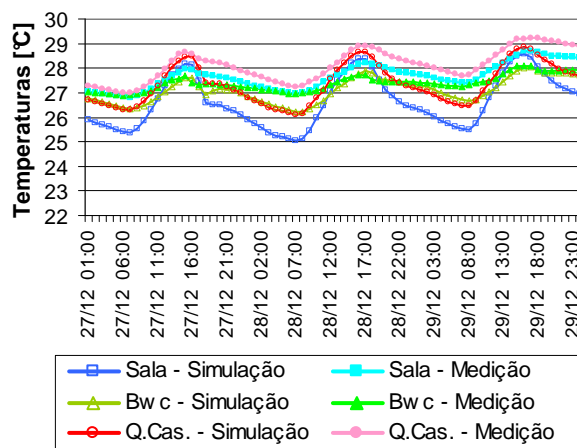


Gráfico 6 – Simulação com aumento das absortâncias.

4.5 Teste dos Ganhos Internos de Calor por Equipamentos

O Gráfico 7 apresenta os resultados da simulação com aumento do ganho de calor por convecção pelos equipamentos. Dos três cômodos analisados apenas o quarto de casal possui equipamento, e por isso este foi o único que sofreu alterações nos valores de temperatura.

Comparando tais valores com os do Gráfico 2, percebe-se um aumento de cerca de $0,2^{\circ}\text{C}$ na temperatura do ar do quarto de casal. Quando comparada com as medições, esta simulação apresenta uma diferença média de $0,8^{\circ}\text{C}$ na temperatura do quarto. O erro máximo no quarto é de $1,2^{\circ}\text{C}$, no momento de temperatura mínima.

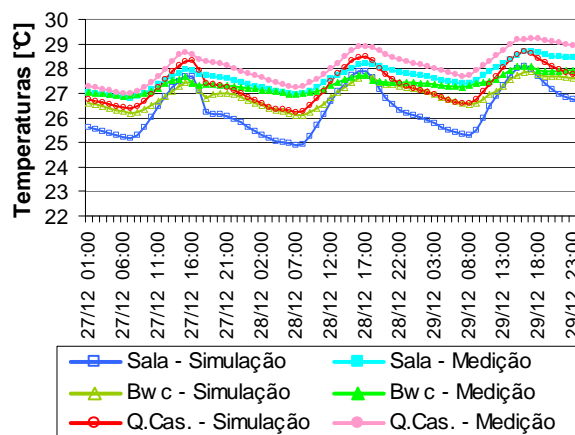


Gráfico 7 – Simulação com aumento do ganho de calor por convecção pelos equipamentos.

4.6 Teste da Infiltração de Ar

Nesta simulação aumentou-se a taxa de infiltração de ar. Conforme o Gráfico 8, verifica-se que, quando comparado com o Gráfico 2, houve um aumento na amplitude térmica diária, sendo as principais diferenças nos momentos de maior temperatura.

Comparando esta simulação com as medições, verifica-se que, apesar das diferenças médias de temperatura terem diminuído, o aumento na amplitude torna as curvas de temperatura menos semelhante às medições que o caso inicial. O erro máximo aumentou em todos os cômodos: $2,2^{\circ}\text{C}$ na sala, $1,8^{\circ}\text{C}$ no quarto e $1,0^{\circ}\text{C}$ no banheiro, todos no momento de menor temperatura.

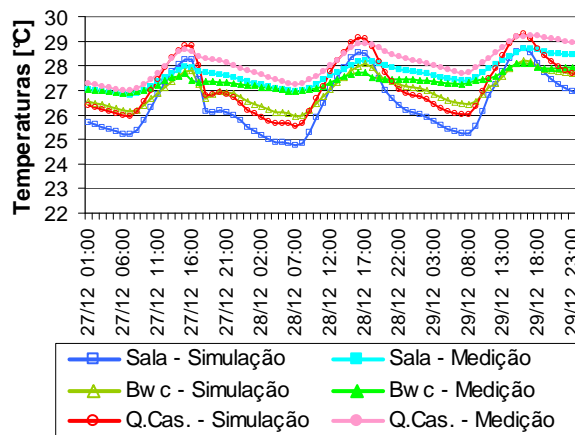


Gráfico 8 – Gráfico da simulação com alteração na infiltração de ar.

4.7 Alterações Combinadas

Nesta última simulação, foram combinadas as alterações que propiciaram uma proximidade dos valores de temperatura simulados com os medidos. Foi utilizado o modelo com as modificações para

cobertura inclinada, aumento de 15% na resistência térmica dos materiais, aumento das absorvâncias e dos ganhos internos de calor por equipamentos.

Conforme verifica-se no Gráfico 9, as temperaturas aumentaram em cerca de $0,2^{\circ}\text{C}$ na sala, $0,5^{\circ}\text{C}$ no quarto de casal e $0,1^{\circ}\text{C}$ no banheiro, quando comparadas com o Gráfico 2.

Em relação aos valores medidos, as diferenças médias de temperatura foram de $1,1^{\circ}\text{C}$ na sala, $0,5^{\circ}\text{C}$ no quarto de casal e $0,3^{\circ}\text{C}$ no banheiro. O erro máximo para todos os cômodos ocorreu no momento de temperatura mínima, sendo de $2,0^{\circ}\text{C}$ na sala, $0,9^{\circ}\text{C}$ no quarto de casal e $0,7^{\circ}\text{C}$ no banheiro.

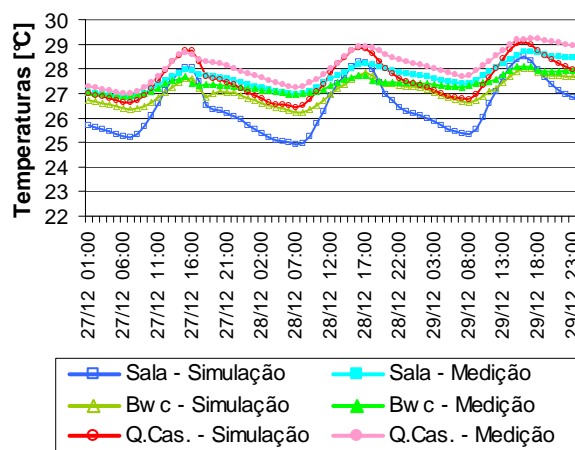


Gráfico 9 – Gráfico da simulação com alterações combinadas.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A partir dos resultados obtidos é possível verificar a importância de determinar com cuidado os parâmetros dos modelos de simulação. Destaca-se a importância da correta definição dos valores de temperatura do solo, que provocam grandes alterações nos resultados. Os valores de temperatura do solo que constam nos arquivos climáticos TRY são obtidos, geralmente, em estações meteorológicas localizadas fora da área urbana da cidade e, portanto, diferentes do que se obteria no terreno estudado.

A sala foi o ambiente que manteve as maiores diferenças de temperatura entre simulação e medição. Com a calibração foi possível diminuir a diferença média de 1,3°C no início para 1,1°C no caso final. O erro máximo foi diminuído de 2,1°C para 2,0°C. Essa diferença de 2,0°C nos momentos de menor temperatura do dia ainda não é um resultado satisfatório. Ela significa que o modelo permite que ocorram mais perdas de calor que o real. Isso será investigado na continuação da pesquisa.

Dos cômodos analisados, o quarto de casal e o banheiro foram os que apresentaram melhor resultado final. A diferença média de temperatura entre simulação e medição diminuiu de 1,0°C (no caso inicial) para 0,5°C (no caso final) no quarto, e de 0,4°C para 0,3°C no banheiro. Nos momentos de temperatura mínima do dia, onde as diferenças eram as maiores, o erro diminuiu de 1,4°C para 0,9°C no quarto, e de 0,9°C para 0,7°C no banheiro. Com esses valores, considera-se que os resultados finais apresentaram uma boa proximidade, com erro sempre menor que 1,0°C, permitindo admitir uma confiabilidade dos dados obtidos por simulação. Como continuidade deste trabalho, novas simulações serão realizadas, incluindo a ocupação da edificação e a ventilação natural.

6 REFERÊNCIAS

- 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, 2005a.
- _____. **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.
- ASHRAE – AMERICAN SOCIETY OF HEATING, REFRIGERATING AND AIR-CONDITIONING ENGINEERS. **2005 ASHRAE Handbook – Fundamentals**. p. 30.12. Atlanta, 2005.
- DOE – U. S. DEPARTMENT OF ENERGY. **Building Energy Software Tools Directory**. Disponível em: <http://www.eere.energy.gov/buildings/tools_directory/alpha_list.cfm>. Acesso em: 24 abr. 2007.
- LAMBERTS, R.; DUTRA, L.; PEREIRA, F. O. R. **Eficiência Energética na Arquitetura**. 2ª edição. São Paulo: ProLivros, 2004.
- MENDES, N.; WESTPHAL, F. S.; LAMBERTS, R.; NETO, J. A. B. C. Uso de Instrumentos Computacionais para Análise do Desempenho Térmico e Energético de Edificações no Brasil. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v.5, n.4, p. 47-68, out./dez. 2005.
- ORDENES, M.; PEDRINI, A.; GHISI, E.; LAMBERTS, R. **Metodologia Utilizada na Elaboração da Biblioteca de Materiais e Componentes Construtivos Brasileiros para Simulações no Visualdoe-3.1**. Relatório Interno – Departamento de Engenharia Civil, UFSC, Florianópolis, 2003.
- SANTANA, M. V. **Influência de parâmetros construtivos no consume de energia de edifícios de escritório localizados em Florianópolis – SC**. 2006. Dissertação – Departamento de Engenharia Civil, UFSC, Florianópolis, 2006.
- TOMMERUP, H.; ROSE, J.; SVENDSEN, S. Energy-efficient houses built according to the energy performance requirements introduced in Denmark in 2006. **Energy and Buildings**, v.39, n.1, p 1123-1130, 2007.
- WESTPHAL, F. S.; LAMBERTS, R. Building Simulation Calibration Using Sensitivity Analysis. In: BUILDING SIMULATION, 9., 2005, Montreal. **Proceedings...** Montreal: IBPSA, 2005. p. 1331-1338.
- WONG, N.H.; LI, S. A Study of the Effectiveness of Passive Climate Control in Naturally Ventilated Residential Buildings in Singapore. **Building and Environment**, v.42, n.1, p 1395-1405, 2007.

7 AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à ELETROBRAS/PROCEL e à ELETROSUL pelos recursos financeiros aplicados no financiamento do projeto.