

Análise de incertezas físicas em simulação computacional de edificações residenciais

Analysis of physical uncertainties in computer simulations of residential buildings

Arthur Santos Silva
Laiane Susan Silva Almeida
EneDir Ghisi

Resumo

O objetivo deste trabalho é analisar incertezas físicas em simulação computacional de uma edificação residencial e sua implicação no desempenho térmico. O experimento foi elaborado com o método de Monte Carlo, que envolve as propriedades térmicas e físicas dos materiais da edificação. Foi analisada a sensibilidade das variáveis com coeficientes de regressão e correlação. Considerou-se o critério de graus-hora de desconforto por calor e por frio para o clima de Florianópolis, SC, conforme limites de conforto térmico adaptativo. Os resultados mostraram que as incertezas obtidas nos graus-hora são relativamente grandes, sendo de 32% no desconforto por frio e de 53% no desconforto por calor. Grande parte da incerteza é decorrente da temperatura média mensal do solo. Outras variáveis, como a absorvância solar da cobertura e o calor específico da argamassa das paredes, resultam em impacto relevante no desconforto por calor, bem como a massa específica da argamassa e o calor específico da cerâmica das paredes no desconforto por frio. Essas variáveis precisam de maior precisão, seja por meio de bases de dados mais confiáveis, ou mesmo por medições em campo e/ou em laboratório.

Palavras-chaves: Simulação computacional. Desempenho térmico. Análise de incertezas. Análise de sensibilidade.

Abstract

Arthur Santos Silva
Universidade Federal de Santa
Catarina
Florianópolis - SC - Brasil

Laiane Susan Silva Almeida
Universidade Federal de Santa
Catarina
Florianópolis - SC - Brasil

EneDir Ghisi
Universidade Federal de Santa
Catarina
Florianópolis - SC - Brasil

Recebido em 29/02/16
Aceito em 05/05/16

The aim of this paper is to analyse physical uncertainties in a computer simulation of a residential building and the implications for its thermal performance. The simulation experiment was performed using the Monte Carlo method, involving the thermal and physical properties of materials. The sensitivity of the variables was also analysed using regression and correlation coefficients. The degree-hours of discomfort criterion for heating and cooling for the climate of Florianópolis-SC were considered, according to adaptive thermal comfort limits. The results showed that uncertainties in degree-hours are high, i.e., 32% for cooling discomfort and 53% for heating discomfort. The uncertainty is largely due to the average monthly temperature of the ground. Other variables, such as the solar absorptance of the roof and the specific heat of the mortar of the walls had a relevant impact on heat discomfort. The density of the mortar and the specific heat of the brickwork walls affected the cooling discomfort. These variables need proper accuracy, either through more reliable databases and/or through field or laboratory measurements.

Keywords: Building simulation. Thermal performance. Uncertainty analysis. Sensitivity analysis.

Introdução

A simulação computacional é um instrumento eficaz para analisar o consumo de energia de edificações bem como os fenômenos que regem o comportamento termoenergético de uma edificação. Esse instrumento é utilizado para diversas finalidades, principalmente visando determinar estratégias para o aperfeiçoamento do conforto térmico, reduzir o consumo de energia, melhorar a eficiência dos sistemas de condicionamento de ar, otimizar os diversos sistemas da edificação e permitir tomada de decisão em projeto.

Ao se utilizar essa ferramenta na área de avaliação térmica e energética de edificações, muitos parâmetros e variáveis são necessários para a configuração do modelo de experimento computacional para que apresente resultados coerentes. Como variáveis citam-se o clima, representado por dados meteorológicos representativos de determinada localidade; informações da própria edificação, como propriedades geométricas, físicas e térmicas dos materiais e componentes construtivos; geometria solar; cargas internas; equipamentos eletroeletrônicos; sistemas de condicionamento artificial; métodos passivos e ativos de resfriamento; etc.

Cada sistema adicionado a uma simulação dinâmica de edificações requer grande quantidade de informações e parâmetros, uso de diferentes métodos de cálculo e de convergência, e uso de diferentes bases de dados para as variáveis de entrada (que são, muitas vezes, genéricas). Esse fato torna evidente a necessidade de entender o quanto preciso deve ser o valor de cada variável inserido na simulação e quais são as consequências de prováveis imprecisões.

Em experimentos reais, como medições de absortância solar, ou mesmo ensaios de condutividade térmica de materiais, é comum a apresentação das incertezas (um intervalo de precisão seguido da confiabilidade adotada), que correspondem aos recursos do equipamento de medição. No entanto, no caso de experimentos teóricos, como a simulação computacional, é rara essa consideração (AUDE; TABARY; DEPECKER, 2000).

Furbringer e Roulet (1999) afirmam que, da mesma forma que não é correto considerar resultados experimentais como a “absoluta realidade”, também deveria haver maior cuidado no relato de resultados de experimentos numéricos. Devido à incerteza, os experimentos mostram somente uma “imagem” da realidade; e a

simulação, por sua vez, também depende de diversos dados com incertezas embutidas, de diferentes naturezas.

MacDonald e Strachan (2001) apresentam cinco fontes de incertezas em simulação:

- (a) realismo do modelo: quão bem o modelo representa a realidade?;
- (b) variáveis de entrada: que valores se utilizam na falta de dados precisos?;
- (c) processos estocásticos: como os processos tais como as projeções do clima, o uso de equipamentos e operação da edificação afetam os resultados?;
- (d) recursos dos programas: que incertezas estão associadas às escolhas particulares de algoritmos para os diferentes processos térmicos e energéticos da simulação?; e
- (e) variações em projeto: qual o efeito de se modificar uma variável de projeto específica?

Na literatura encontram-se alguns estudos considerando incertezas em variáveis de entrada e no realismo do modelo. Breesch e Janssens (2005) analisaram o conforto térmico dos ocupantes em uma edificação considerando incertezas nas propriedades térmicas dos materiais, variáveis de ventilação natural e cargas térmicas. Brohus *et al.* (2009) analisaram incertezas físicas e de uso e ocupação no consumo de energia de edificações, incorporando a análise de variáveis de entrada e processos estocásticos. Enquanto no primeiro trabalho os autores consideraram valores de incertezas oriundos de pesquisa na literatura, o segundo realizou medições de algumas propriedades (como infiltração de ar de portas e janelas, *set point* de temperaturas, carga interna horária e consumo de água quente) em uma amostra de edificações. A incerteza na carga térmica, por exemplo, mostrou-se bastante influente nos critérios analisados em ambos os estudos.

Em relação às variações em projeto, Capozzoli, Mechri e Corrado (2009) realizaram uma análise de incertezas em variáveis de projeto em um edifício comercial, combinada com uma análise de sensibilidade baseada em variância. Sob a mesma abordagem, Yildiz e Arsan (2011) também consideraram diferentes variáveis de projeto para um apartamento localizado na Turquia. No primeiro trabalho os autores constataram que a área envidraçada foi importante no consumo de energia com aquecimento e resfriamento. No segundo trabalho constataram que as taxas de infiltração de ar e o *set point* das temperaturas

internas foram variáveis importantes no consumo de energia com aquecimento e resfriamento.

Outros trabalhos analisaram o efeito de diferentes técnicas de análise de incertezas. Burhenne, Jacob e Henze (2011) analisaram incertezas em relação ao uso de sistemas de água quente por diferentes métodos de amostragem, como aleatória simples, estratificada, hipercubo latino e sequências de Sobol. As duas últimas mostraram convergência mais rápida da amostra aleatória, representando economia de tempo e esforço no experimento de simulação.

Tendo em vista a importância dessa área de pesquisa, o objetivo deste trabalho é analisar incertezas em variáveis térmicas e físicas de uma edificação residencial, de forma a avaliar seu desempenho térmico com maior confiabilidade.

Método

Este trabalho é parte de um estudo maior, que visa investigar as diversas fontes de incertezas em simulação dinâmica de edificações.

A análise de incertezas físicas demandou o desenvolvimento de um experimento de simulação computacional de edificações. Utilizou-se o programa de simulação EnergyPlus v. 8.2, disponível no sítio eletrônico do Departamento de Energia dos Estados Unidos (DEPARTMENT..., 2015), comumente utilizado em estudos que avaliam o desempenho térmico e energético de edificações em diversas vertentes (YILDIZ; ARSAN, 2011; ATTIA *et al.*, 2012; BUCKING; ZMEUREANU; ATHIENTIS, 2014; SILVA; GHISI, 2014).

O método é dividido em:

- explicação do modelo de simulação e do clima considerado;
- descrição das cargas internas e rotinas de operação da edificação;
- variáveis dependentes do experimento;
- variáveis de entrada, i.e., as variáveis cuja incerteza foi propagada; e
- o tratamento de dados para apresentação dos resultados.

Modelo de simulação e condições climáticas

O modelo de simulação é uma tipologia típica de habitação unifamiliar de interesse social de um pavimento para a cidade de Florianópolis, SC, originada de estudos de Rosa (2014). A Figura 1 mostra o modelo da edificação utilizado nas análises, o qual possui três dormitórios, sala e cozinha separadas. A Tabela 1 mostra as propriedades térmicas dos componentes construtivos calculadas conforme a norma brasileira NBR 15220-2 (ABNT, 2005).

As paredes são compostas de blocos cerâmicos de 6 furos (espessura igual a 9 cm), argamassa e reboco nas duas faces e pintura externa (α igual a 0,40); o piso é de concreto (espessura igual a 10 cm) com revestimento cerâmico, nas áreas secas e áreas molhadas, em contato com o solo. A cobertura é de telha cerâmica (α igual a 0,60) com forro de madeira. Aberturas de portas e janelas são de caixilho em madeira com vidro comum incolor (3 mm).

Figura 1 - Modelo base de edificação residencial considerado no estudo

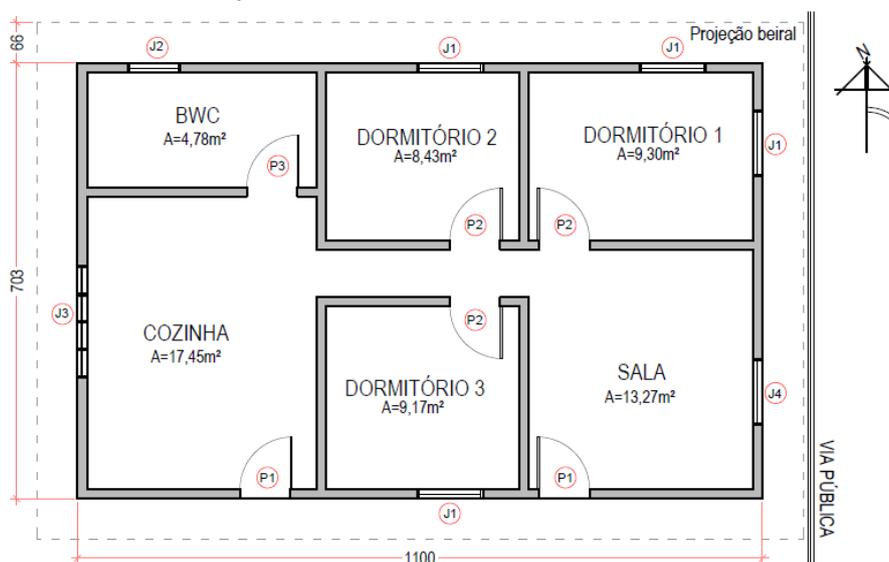
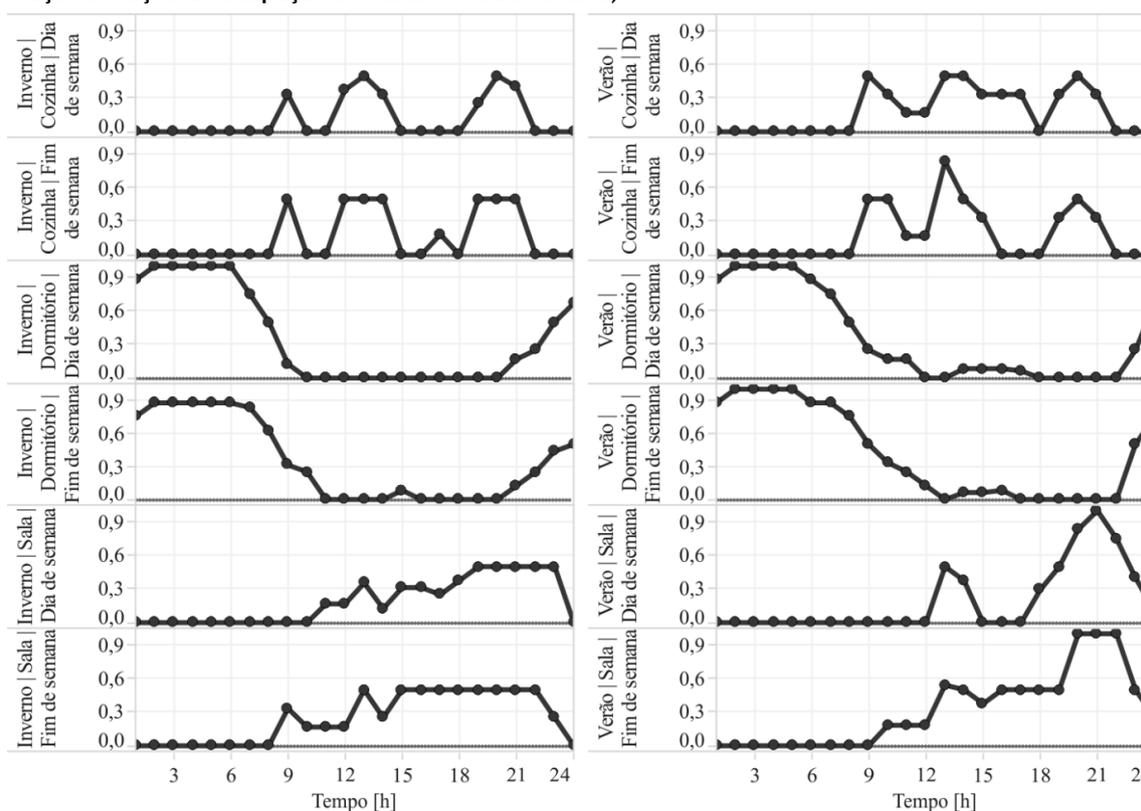


Tabela 1 - Propriedades térmicas de paredes, cobertura e piso para o modelo base

Propriedade térmica	ID	Unidade	Paredes	Cobertura	Piso*
Transmitância térmica	U	W/m ² K	2,42	2,01	4,93
Resistência térmica	RT	m ² K/W	0,414	0,498	0,203
Capacidade térmica	Ct	kJ/m ² K	121	29	231
Absortância solar	α	-	0,4	0,6	-
Fator solar	FS	%	3,86	4,82	-

Nota:*calculado conforme coeficientes de convecção apresentados na NBR 15220-2 (2005), com resistência superficial interna de 0,01 m²K/W e resistência externa de 0,04 m²K/W, mesmo o elemento estando em contato com o solo.

Figura 2 - Rotinas de ocupação dos ambientes (representam a mediana da amostra de habitações em relação à fração de ocupação em determinado horário)



Considerou-se o clima da cidade de Florianópolis por meio do arquivo climático *Test Reference Year* (TRY), originado de estudos de Goulart, Lamberts e Firmino (1998). A edificação foi simulada considerando-se apenas a ventilação natural, operada conforme as rotinas de operação de portas e janelas descritas na próxima seção.

Cargas internas e operação dos ambientes da edificação

No experimento de simulação as cargas internas e as rotinas de operação dos ambientes foram consideradas constantes. Seus valores foram obtidos por meio de auditoria em 53 habitações de interesse social da cidade de Florianópolis. Os dados são descritos com mais detalhes em Silva *et*

al. (2013) e Silva e Ghisi (2014). Nesses dois trabalhos foram elaborados intervalos de confiança para as rotinas de ocupação e operação de portas e janelas com 80% de confiabilidade em uma distribuição não paramétrica. Neste trabalho escolheu-se a mediana da distribuição para a configuração das rotinas.

As rotinas de ocupação são mostradas na Figura 3. Os valores são frações de ocupação em cada horário do dia, para cada ambiente (sala, cozinha e dormitórios), para dias de semana e fim de semana, no verão e no inverno. As mesmas informações são mostradas na Tabela 2 para as rotinas de operação de portas e janelas para fins de ventilação natural, para cada ambiente, e para verão e inverno. Essas rotinas foram interpretadas como

probabilidades de ocorrência para a construção de um perfil anual de ocupação, operação de portas e janelas, no qual cada dia possui comportamento diferente. Os perfis anuais foram gerados por meio de amostra aleatória.

De forma simplificada, a Tabela 2 mostra os valores indicativos das rotinas de ocupação, operação de portas, janelas e uso da iluminação,

bem como as potências instaladas com equipamentos e iluminação em cada ambiente. A rotina de uso de equipamentos é de 12% a 15% de fração da potência instalada total em cada ambiente durante todas as horas do dia. Foram consideradas cargas de equipamentos e iluminação em todos os ambientes (sala, cozinha e dormitórios).

Figura 3 - Rotinas de operação de portas e janelas (representam a mediana da amostra de habitações em relação à probabilidade de abertura da porta e janela em determinado horário)

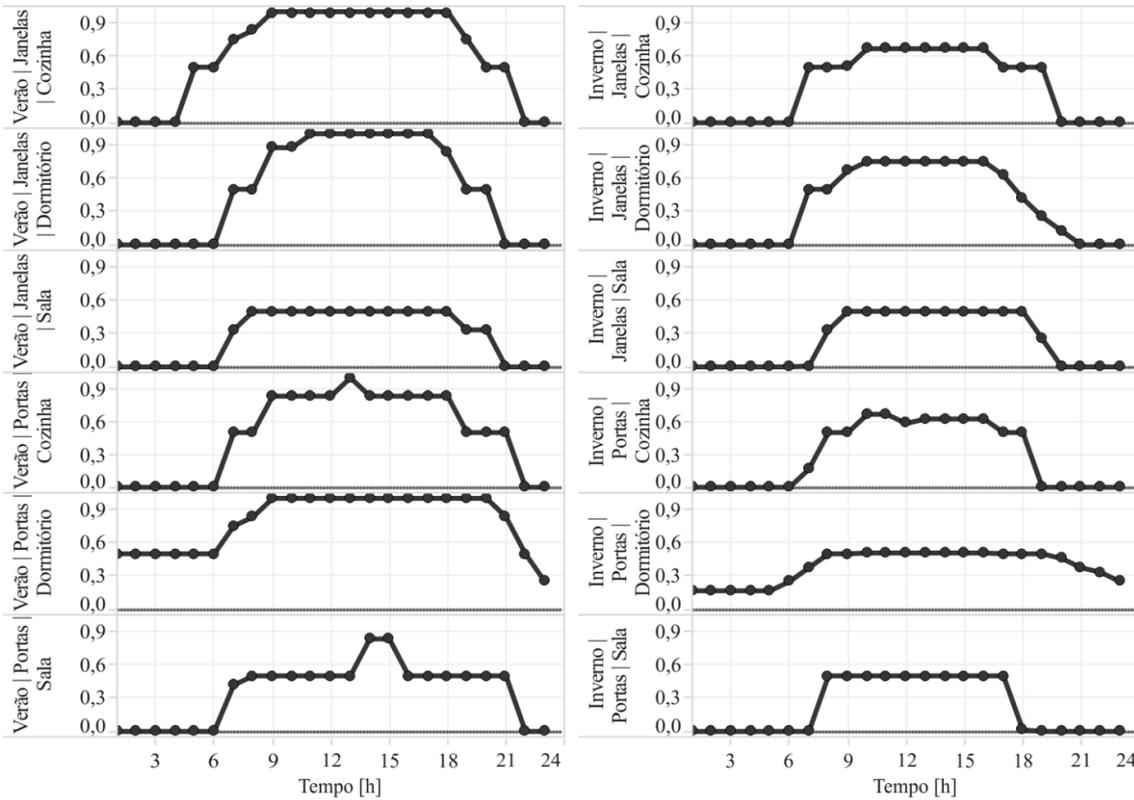


Tabela 2 - Variáveis utilizadas para a determinação das incertezas decorrentes do uso e ocupação e de potências instaladas

Variável	Unidade	Valor	Variável	Unidade	Valor
Ocupação dos dormitórios	h/ano	3229	Iluminação nos dormitórios	h/dia	1,17
Ocupação da cozinha	h/ano	1623	Iluminação na cozinha	h/dia	3,00
Ocupação da sala	h/ano	1785	Iluminação na sala	h/dia	2,00
Operação de janelas nos dormitórios	h/ano	3683	Equipamentos nos dormitórios	W/m ²	26,36
Operação de janelas na cozinha	h/ano	4058	Equipamentos na cozinha	W/m ²	84,47
Operação de janelas na sala	h/ano	2239	Equipamentos na sala	W/m ²	26,10
Operação de portas nos dormitórios	h/ano	5099	Iluminação nos dormitórios	W/m ²	4,3
Operação de portas na cozinha	h/ano	3255	Iluminação na cozinha	W/m ²	3,0
Operação de portas na sala	h/ano	2434	Iluminação na sala	W/m ²	2,4

Variáveis dependentes

As variáveis dependentes, ou seja, os critérios de desempenho da análise, foram os graus-hora de desconforto, de acordo com o modelo adaptativo da Standard 55 (AMERICAN..., 2013) para edificações naturalmente ventiladas.

A Figura 4a mostra o intervalo admissível de conforto térmico conforme o critério adaptativo da Standard 55 para edificações naturalmente ventiladas, com as equações dos limites com 80% de aceitabilidade (aplicado para análises típicas). A norma permite diferentes abordagens para o cálculo de índices de conforto térmico em longos períodos. Optou-se por utilizar o índice cumulativo de graus-hora de desconforto, que corresponde a um somatório do excesso de temperatura em relação aos limites de conforto ao longo do período analisado.

Há várias formas permitidas pela Standard 55 para se calcular a “temperatura do ar exterior prevalente”. Adotou-se a média mensal das temperaturas médias diárias para o clima de Florianópolis, como permitido pela norma. A Figura 4b mostra os limites inferior e superior mensais de conforto térmico. Dessa forma, sempre que as temperaturas horárias obtidas com as simulações estiverem acima do limite superior ou abaixo do limite inferior, será calculado o indicador de graus-hora de desconforto. As Equações 1 e 2 mostram os procedimentos de cálculo.

$$GHR = \sum_{i=1}^{8760} \begin{cases} se TO_i > LS \mid (LS - TO_i) \\ se TO_i < LI \mid (0) \end{cases} \quad \text{Eq. 1}$$

$$GHA = \sum_{i=1}^{8760} \begin{cases} se TO_i < LI \mid (LI - TO_i) \\ se TO_i > LS \mid (0) \end{cases} \quad \text{Eq. 2}$$

Onde:

TO_i é a temperatura operativa interna horária em cada ambiente da edificação [°C];

LS é o limite superior do intervalo de conforto térmico da Standard 55 para Florianópolis [°C];

LI é o limite inferior do intervalo de conforto térmico da Standard 55 para Florianópolis [°C];

GHR é o indicador de graus-hora de desconforto por calor (graus-hora de resfriamento em cada ambiente da edificação) [°Ch]; e

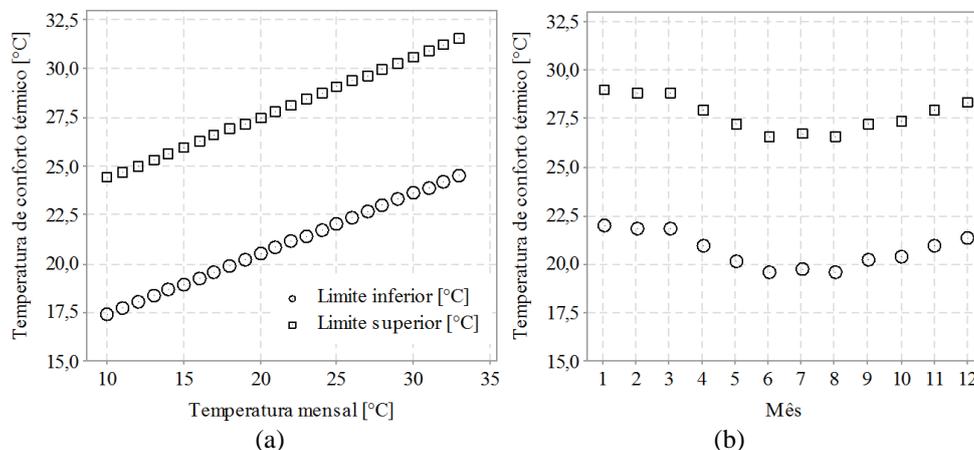
GHA é o indicador de graus-hora de desconforto por frio (graus-hora de aquecimento em cada ambiente da edificação) [°Ch].

Variáveis de entrada

Para o experimento de simulação selecionaram-se as variáveis que definem as propriedades térmicas dos elementos construtivos, bem como algumas variáveis que definem a ventilação natural pelas aberturas. Escolheram-se os materiais constituintes dos elementos da cobertura, paredes, piso e portas. Consideraram-se também a taxa de infiltração e o fator de área de ventilação das janelas.

A amplitude de incerteza foi definida por meio da atribuição de distribuições de probabilidades para cada variável, sendo os desvios em relação à média ou ao valor mais representativo originados de pesquisa bibliográfica. MacDonald (2002) definiu, através de diferentes bases de dados, propriedades térmicas para diferentes tipos de materiais em função de diferentes condições de ensaio técnico, diferentes idades e teor de umidade das amostras, bem como progressivas repetições de testes. As incertezas apontadas por ele em sua tese remetem tanto às fontes de incertezas aleatórias quanto às sistemáticas.

Figura 4 - Intervalo de conforto térmico adaptativo pelo critério da Standard 55 (2013) com 80% de aceitabilidade em função da temperatura mensal prevalente (a) e em função do mês para Florianópolis (b)



Para a condutividade térmica foram considerados 19% de coeficiente de variação em uma distribuição normal de probabilidades para todos os materiais. Para o calor específico foi considerada uma incerteza de 4% e um coeficiente de variação de 19% para materiais não higroscópicos e inorgânicos porosos respectivamente. Para as propriedades superficiais de absorvância solar foram utilizados 4% de coeficiente de variação para superfícies de concreto, cerâmica e madeira (MACDONALD, 2002). Para a massa específica adotou-se um valor

indicativo de 10% de coeficiente de variação na falta de dados mais precisos.

Para a taxa de infiltração das janelas considerou-se o intervalo de valores de Liddament (1987) para uma esquadria de madeira. A fração de área de ventilação adotada foi de 0,4 a 0,9 em função do percentual de abertura da janela em relação a sua área total. Para a temperatura do solo foi considerada uma incerteza de $\pm 0,5$ °C de desvio padrão na média mensal. A Tabela 3 mostra todas as variáveis físicas consideradas na propagação de incertezas e sua distribuição de probabilidades incluída.

Tabela 3 - Variáveis físicas de entrada e distribuição de probabilidades para propagação de incertezas

Fonte	Variável	Código	Unidade	Distribuição
Cobertura	Espessura da cerâmica	cob-ecer	m	N(0,012 0,0012) CV=10%
	Espessura da madeira	cob-emad	m	N(0,01 0,001) CV=10%
	Condutividade térmica da cerâmica	cob-lcer	W/m ² K	N(1,05 0,1995) CV=19%
	Condutividade térmica da madeira	cob-lmad	W/m ² K	N(0,15 0,0285) CV=19%
	Calor específico da cerâmica	cob-ccer	J/kgK	N(920 174,8) CV=19%
	Calor específico da madeira	cob-cmad	J/kgK	N(1340 53,6) CV=4%
	Massa específica da cerâmica	cob-pcer	kg/m ³	N(1900 190) CV=10%
	Massa específica da madeira	cob-pmad	kg/m ³	N(600 60) CV=10%
Paredes	Absortância solar da cerâmica	cob-acer	-	N(0,6 0,04) CV=6,67%
	Espessura da argamassa	par-earg	m	N(0,015 0,0015) CV=10%
	Espessura da cerâmica	par-ecer	m	N(0,0261 0,0026) CV=10%
	Condutividade térmica da argamassa	par-larg	W/m ² K	N(1,15 0,2185) CV=19%
	Condutividade térmica da cerâmica	par-lcer	W/m ² K	N(0,9 0,171) CV=19%
	Calor específico da argamassa	par-carg	J/kgK	N(1000 190) CV=19%
	Calor específico da cerâmica	par-ccer	J/kgK	N(920 174,8) CV=19%
	Massa específica da argamassa	par-parg	kg/m ³	N(2100 210) CV=10%
Piso	Massa específica da cerâmica	par-pcer	kg/m ³	N(1201,6 120,16) CV=10%
	Absortância solar da argamassa	par-aarg	-	N(0,4 0,04) CV=10%
	Espessura do concreto	pis-econ	m	N(0,1 0,01) CV=10%
	Espessura da cerâmica	pis-ecer	m	N(0,006 0,0006) CV=10%
	Condutividade térmica do concreto	pis-lcon	W/m ² K	N(1,75 0,3325) CV=19%
	Condutividade térmica da cerâmica	pis-lcer	W/m ² K	N(1,05 0,1995) CV=19%
	Calor específico do concreto	pis-ccon	J/kgK	N(1000 190) CV=19%
	Calor específico da cerâmica	pis-ccer	J/kgK	N(920 174,8) CV=19%
Portas	Massa específica do concreto	pis-pcon	kg/m ³	N(2200 220) CV=10%
	Massa específica da cerâmica	pis-pcer	kg/m ³	N(2000 200) CV=10%
	Absortância solar da cerâmica	pis-acer	-	N(0,7 0,04) CV=5,71%
	Espessura da madeira	por-emad	m	N(0,035 0,0035) CV=10%
	Condutividade térmica da madeira	por-lmad	W/m ² K	N(0,15 0,0285) CV=19%
Janelas	Calor específico da madeira	por-cmad	J/kgK	N(1340 53,6) CV=4%
	Massa específica da madeira	por-pmad	kg/m ³	N(600 60) CV=10%
	Absortância solar da madeira	por-amad	-	N(0,8 0,04) CV=5%
	Taxa de infiltração de ar	jan-infl	kg/s.m	T(0,00016 0,00028 0,00056)
Temperatura do solo	Fração de área de ventilação	jan-vent	-	T(0,4 0,5 0,9)
	Diferença média mensal	temp-solo	°C	N(0 0,5)

Nota: N significa distribuição normal de probabilidades, configurada por meio de uma média e desvio padrão; CV é o coeficiente de variação (somente para distribuição normal); e T significa distribuição triangular de probabilidades, configurada por meio de valor inferior, moda e superior.

Essas variáveis foram agrupadas em um experimento de Monte Carlo por meio de amostragem com o método do Hipercubo Latino, com o programa Simlab 2.2 (JOINT..., 2015). Esse método gera uma matriz de dados por meio de amostragem aleatória estratificada, com o mesmo número de pontos gerados em intervalos predefinidos de cada distribuição. De acordo com Helton *et al.* (2006), a amostragem pelo Hipercubo Latino é bastante utilizada devido a essa propriedade de estratificação, que permite obter grande quantidade de informações de incertezas por meio de baixa quantidade de avaliações, ou seja, poucas simulações.

Esse método foi utilizado com sucesso em diversos estudos para fins de análise de incertezas e sensibilidade em simulação dinâmica de edificações (PETR *et al.*, 2007; HOPFE; HENSEN; PLOKKER, 2007; BROHUS *et al.*, 2009).

Tratamento de dados

O tratamento de dados compreendeu a análise de incertezas juntamente com a análise de sensibilidade das variáveis de entrada. A incerteza nas variáveis dependentes, ou seja, nos graus-hora de desconforto foi analisada através de histogramas de frequência de ocorrência de valores em função da ordem de grandeza. Calcularam-se intervalos de confiança supondo-se a distribuição normal dos dados com a distribuição *t* de Student e 90% de confiabilidade. O desvio relativo também foi calculado com 90% de confiabilidade, sendo a relação entre o limite superior ou inferior (em valor absoluto) e média da distribuição (em valor percentual).

Calcularam-se índices de sensibilidade que indicam a influência de cada variável de entrada nas variáveis dependentes analisadas. Para este trabalho escolheram-se os índices de coeficiente de regressão padronizado (SRC, *standardized regression coefficient* em inglês) e coeficiente de correlação parcial (PCC, *partial correlation coefficient* em inglês), calculados com o programa Simlab 2.2 (JOINT..., 2015).

Quando se utilizam esses índices, deve-se levar em consideração o coeficiente de determinação do modelo (R^2). Quando o coeficiente de determinação é próximo de 1, pode-se afirmar que o modelo possui um comportamento simétrico e linear, e que os índices de sensibilidade podem representar com confiança a influência das variáveis. Quando o coeficiente de determinação é baixo (muito menor do que 1), deve-se procurar um indicador de sensibilidade que considere relações não lineares entre as entradas e as saídas,

ou mesmo utilizar métodos baseados na variância, o que iria demandar um experimento computacional distinto (SALTELLI *et al.*, 2008).

Analisaram-se também a média e o desvio padrão dos resíduos, de forma a verificar a eficácia da regressão linear.

Esses índices de sensibilidade (SRC e PCC) foram utilizados em outros estudos que abordavam incertezas de diversas fontes: físicas, carga interna e comportamento do usuário (HOPFE; HENSEN; PLOKKER, 2007; BROHUS *et al.*, 2009; BREESCH; JANSSENS, 2010; TIAN; DE WILDE, 2011; YILDIZ; ARSAN, 2011).

Os graus-hora de desconforto e os índices de sensibilidade foram calculados por ambiente. De forma a agregar os valores por ambiente em um indicador geral para toda a edificação, utilizou-se o recurso da média ponderada dos graus-hora em função da área útil de cada ambiente.

Resultados

Primeiramente são apresentados os resultados da análise de incertezas e, em seguida, a análise de sensibilidade das variáveis de entrada do experimento.

Análise de incertezas físicas

A Figura 5 mostra o histograma de frequência de ocorrência para os graus-hora de desconforto. Percebe-se que os valores obtidos para o desconforto por frio são maiores do que por calor. Isso ocorre em função principalmente do clima escolhido (o qual possui estação de inverno bem definida), do período de cálculo dos indicadores (o ano inteiro), e também das cargas internas da edificação e do potencial de resfriamento passivo com a ventilação natural.

As Tabelas 4 e 5 mostram a estatística descritiva das incertezas nos graus-hora de desconforto por calor e frio respectivamente. O indicador mais relevante para a análise deste trabalho é o desvio relativo com 90% de confiabilidade. Esse indicador aponta o percentual no qual o valor limite com determinada confiabilidade está distante da média da distribuição.

Percebe-se que, apesar de os valores médios de desconforto por frio serem relativamente maiores do que os de desconforto por calor, sua incerteza (desvio relativo) é menor, ou seja, a propagação das incertezas físicas nessa edificação residencial influenciou mais nos graus-hora de desconforto por calor do que por frio.

Para os graus-hora de desconforto por calor obteve-se um valor de incerteza de 53% (desvio

relativo, com 90% de confiabilidade) para a edificação. No caso do desconforto por frio obteve-se um valor de incerteza de 32% para toda a edificação.

Os valores de incertezas são relativamente elevados para situações de simulação computacional. O resultado do desempenho térmico para essa edificação seria de 521 a 1.697

°Ch (graus-hora de resfriamento), com 90% de confiabilidade. Para os graus-hora de aquecimento seria de 2.180 a 4.223 °Ch, com 90% de confiabilidade. Essa incerteza comprometeria a comparação com outro modelo de edificação, ou mesmo com um modelo de desempenho aperfeiçoado com alguma estratégia eficiente.

Figura 5 - Histograma de frequência de ocorrência para os graus-hora de desconforto por calor (GHR, graus-hora de resfriamento) e por frio (GHA, graus-hora de aquecimento) conforme o critério de conforto adaptativo da Standard 55 (2013) - o eixo horizontal está em unidade de graus-hora de desconforto (°Ch)

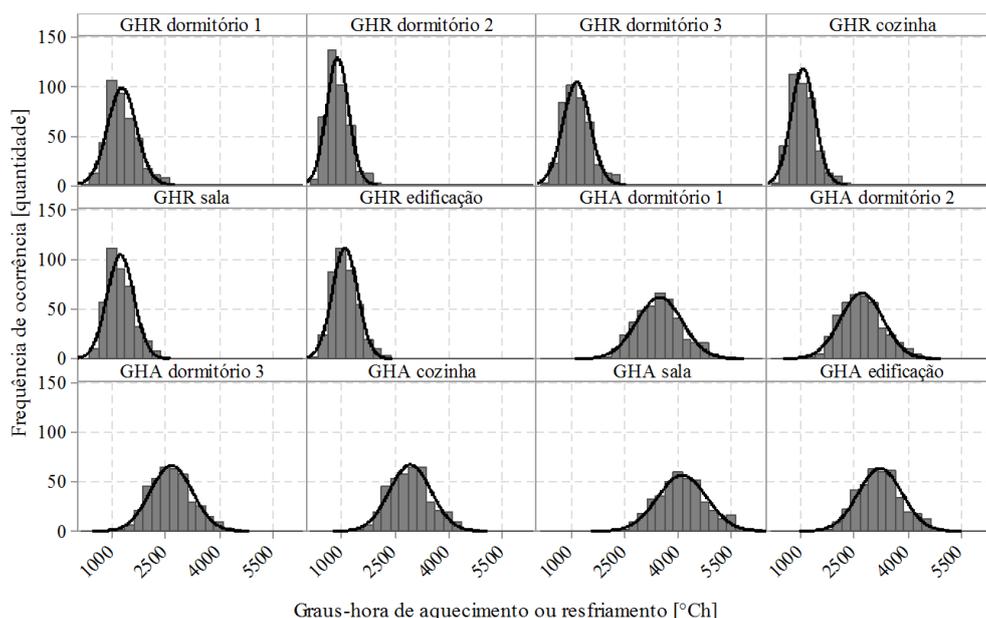


Tabela 4 - Estatística descritiva da propagação de incertezas da variável de graus-hora de desconforto por calor, o qual ocasiona graus-hora de resfriamento

Indicador	GHR dormitório 1	GHR dormitório 2	GHR dormitório 3	GHR cozinha	GHR sala	GHR edificação
Média [°Ch]	1.284	900	1.142	1.026	1.242	1.109
Desvio padrão [°Ch]	404	309	380	337	381	357
Limite inferior [°Ch]	619	391	514	471	614	521
Limite superior [°Ch]	1.950	1.409	1.769	1.582	1.869	1.697
Desvio (α) [°Ch]	665	509	627	555	628	588
Desvio relativo (α) [%]	52	57	55	54	51	53

Tabela 5 - Estatística descritiva da propagação de incertezas da variável de graus-hora de desconforto por frio, o qual ocasiona graus-hora de aquecimento

Indicador	GHA dormitório 1	GHA dormitório 2	GHA dormitório 3	GHA cozinha	GHA sala	GHA edificação
Média [°Ch]	3.482	2.685	2.679	2.937	4.123	3.202
Desvio padrão [°Ch]	642	601	593	587	694	620
Limite inferior [°Ch]	2.424	1.694	1.700	1.970	2.979	2.180
Limite superior [°Ch]	4.540	3.675	3.657	3.904	5.267	4.223
Desvio (α) [°Ch]	1.058	991	978	967	1.144	1.021
Desvio relativo (α) [%]	30%	37%	37%	33%	28%	32%

Análise de sensibilidade das variáveis físicas

As Tabelas 6 e 7 mostram a lista das dez variáveis mais influentes nos graus-hora de desconforto por calor e por frio, respectivamente. Percebe-se que os diferentes critérios de avaliação (coeficiente de regressão padronizado e coeficiente de correlação parcial) concordaram ao indicar a ordem de influência das variáveis. Isso ocorre devido ao alto valor do coeficiente de determinação obtido para os resultados do modelo (maior do que 0,96 no desconforto por calor e maior do que 0,98 no desconforto por frio).

No desconforto por calor a variável física cuja incerteza preponderou foi a absorvância solar das telhas cerâmicas da cobertura, seguida pela temperatura do solo e pelo calor específico da argamassa das paredes.

No desconforto por frio a diferença na média mensal da temperatura do solo foi a variável mais influente, ou seja, essa incerteza preponderou ante as demais incertezas (o coeficiente de regressão padronizado é cerca de quatro vezes maior do que nas demais variáveis). Tal fato mostra a importância da correta configuração da temperatura do solo nas simulações, tendo em vista que pode causar grande incerteza nos resultados de desconforto por frio; se o erro for positivo, reduzem-se os graus-hora, e se o erro for negativo, aumentam-se os graus-hora.

Ressalta-se que os sinais positivo ou negativo dos índices indicam a proporcionalidade com a respectiva variável dependente. Em outras palavras, de acordo com as Tabelas 6 e 7, ao se aumentar o valor da absorvância solar das telhas cerâmicas da cobertura, aumentam-se os graus-hora de desconforto por calor (sinal positivo, que indica proporcionalidade direta) e reduzem-se os graus-hora de desconforto por frio (sinal negativo, que indica proporcionalidade inversa).

Alguns trabalhos, como o de Ioannou e Itard (2015), também utilizaram índices de regressão para análise de sensibilidade. Eles verificaram que para uma edificação de bom desempenho (conforme os regulamentos do país) a variável mais influente é a transmitância térmica das janelas, enquanto para uma edificação de desempenho ruim a variável de maior influência é a condutividade térmica das paredes. A influência é em relação ao consumo de energia com aquecimento, por se tratar do clima frio de Rotterdam, na Holanda (temperado oceânico).

Hopfe e Hensen (2011) também analisaram a sensibilidade de variáveis por meio de índices de regressão. Verificaram que a taxa de infiltração foi a variável física mais influente no consumo total de energia de uma edificação no clima da Holanda. No mesmo sentido, De Wilde e Tian (2009) constataram que a taxa de infiltração foi a variável física mais influente em uma edificação para o clima do Reino Unido, mesmo considerando as mudanças climáticas.

Em clima quente e úmido, Yildiz e Arsan (2011) analisaram variáveis de projeto e sua influência no consumo de energia de uma edificação de apartamentos. Entre as variáveis físicas a taxa de infiltração de ar também foi a variável mais influente no consumo com aquecimento, e a largura da edificação e áreas de aberturas foram influentes no consumo com resfriamento (para o clima de Izmir, na Turquia).

A Figura 6 apresenta a análise da média e do desvio padrão dos resíduos, ou seja, do conjunto de dados representado pela diferença entre os valores observados e o estimado pela regressão. Calculou-se também o resíduo padronizado em função do erro padrão do modelo ajustado. Percebem-se alguns resíduos elevados, que caracterizam valores espúrios da amostragem (fora do intervalo -2 a +2 nos resíduos padronizados), ou seja, valores extremos, mas pouco representativos.

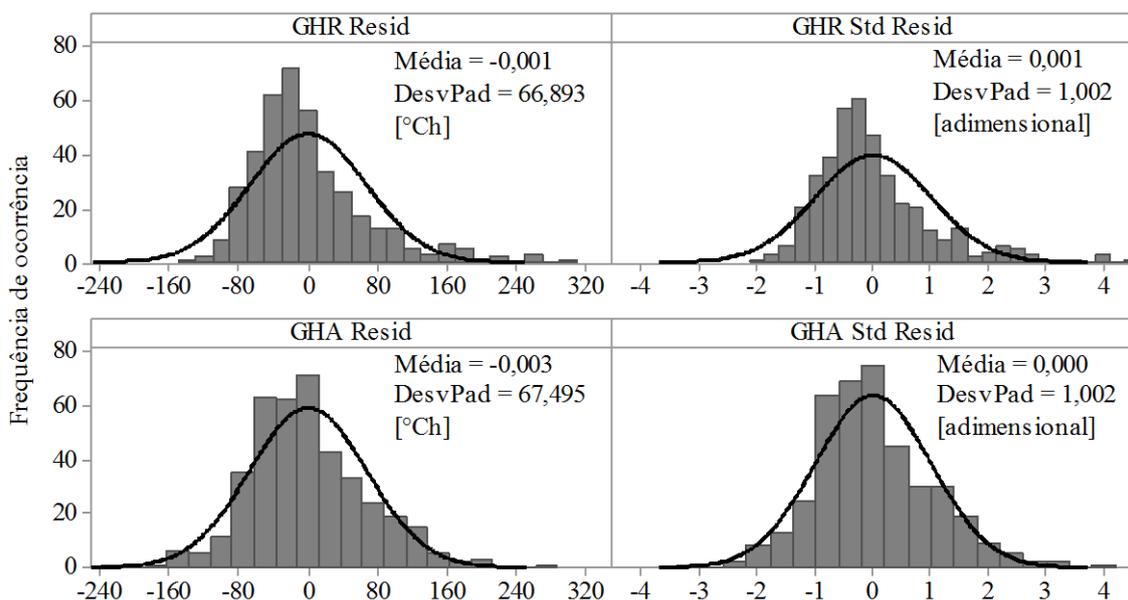
Tabela 6 - Variáveis mais influentes nos graus-hora de desconforto por calor através dos critérios SRC e PCC

Variável	ID	SRC	PCC
Cobertura - absorvância solar da cerâmica	cob-acer	0,446 1 ^o	0,917 1 ^o
Solo - diferença média mensal na temperatura	temp-solo	0,443 2 ^o	0,912 2 ^o
Paredes - calor específico da argamassa	par-carg	-0,336 3 ^o	-0,868 3 ^o
Piso - condutividade térmica do concreto	pis-lcon	-0,305 4 ^o	-0,841 5 ^o
Janela - fração de área de ventilação	jan-vent	-0,301 5 ^o	-0,842 4 ^o
Paredes - calor específico da cerâmica	par-ccer	-0,28 6 ^o	-0,822 6 ^o
Paredes - absorvância solar da argamassa	par-aarg	0,198 7 ^o	0,712 7 ^o
Paredes - espessura da argamassa	par-earg	-0,165 8 ^o	-0,644 8 ^o
Paredes - massa específica da argamassa	par-parg	-0,163 9 ^o	-0,641 9 ^o
Paredes - espessura da cerâmica	par-ecer	-0,157 10 ^o	-0,632 10 ^o
Coeficiente de determinação	R ²	0,9617	

Tabela 7 - Variáveis mais influentes nos graus-hora de desconforto por frio através dos critérios SRC e PCC

Variável	ID	SRC	PCC
Solo - diferença média mensal na temperatura	temp-solo	-0,867 1 ^o	-0,991 1 ^o
Paredes - massa específica da argamassa	par-carg	-0,246 2 ^o	-0,909 2 ^o
Paredes - calor específico da cerâmica	par-ccer	-0,232 3 ^o	-0,898 3 ^o
Paredes - espessura da cerâmica	par-ecer	-0,143 4 ^o	-0,786 4 ^o
Cobertura - absorvância solar da cerâmica	cob-acer	-0,135 5 ^o	-0,766 5 ^o
Paredes - espessura da argamassa	par-earg	-0,133 6 ^o	-0,757 6 ^o
Paredes - massa específica da argamassa	par-parg	-0,119 7 ^o	-0,722 7 ^o
Paredes - massa específica da cerâmica	par-pcer	-0,109 8 ^o	-0,691 8 ^o
Piso - condutividade térmica do concreto	pis-lcon	0,104 9 ^o	0,673 9 ^o
Paredes - absorvância solar da argamassa	par-aarg	-0,091 10 ^o	-0,622 10 ^o
Coefficiente de determinação	R ²	0,9869	

Figura 6 - Resíduos em unidade [°Ch] e resíduos padronizados para o modelo de regressão



As Figuras 7 e 8 ilustram as oito variáveis mais influentes detectadas no desconforto por calor e por frio respectivamente, por meio de gráficos de dispersão. Cada variável individual é relacionada com sua variável dependente, de forma a identificar as tendências para a perturbação de valores.

Pode-se perceber claramente a preponderância da incerteza da temperatura do solo, pois é bem maior do que as demais variáveis de entrada (Figura 8). Graficamente essa influência é indicada através da linha de tendência mais inclinada. As Figuras 7 e 8 mostram, adicionalmente, as distâncias de simulações individuais da média da distribuição, bem como o intervalo proposto de propagação conforme cada distribuição de probabilidades.

É interessante constatar que as configurações da absorvância, do calor específico e da massa específica dos materiais são variáveis importantes,

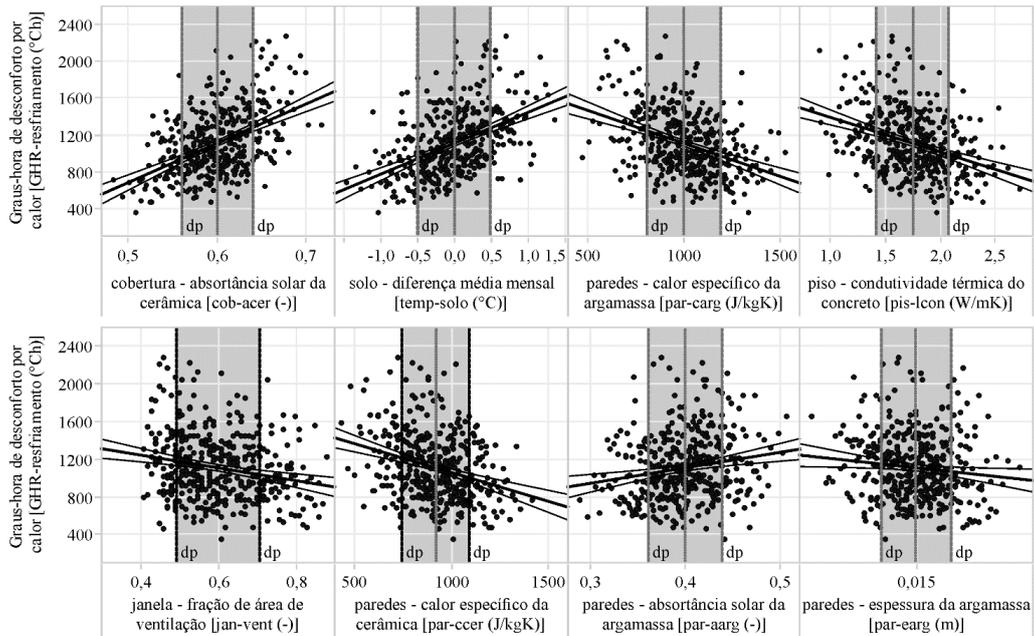
e esforços para determinar mais precisamente seus valores podem ser justificados com esta análise. Ao se configurar a absorvância solar ou a temperatura do solo com valor maior do que seu valor real (hipotético), os graus-hora de desconforto por calor serão maiores em função da maior quantidade de irradiação solar absorvida pelas superfícies e pela maior transferência de calor no sentido do solo para o piso da edificação. O contrário acontece com o erro no calor específico das paredes e na condutividade térmica do piso. Ao se utilizar um valor maior do que seu valor real (hipotético), reduzem-se os graus-hora de desconforto por calor, pois se aumenta a inércia térmica do elemento, atrasando os picos de temperatura, e aumenta-se a perda de calor no sentido do piso para o solo.

Poder-se-iam propor, por exemplo, medições em protótipos ou mesmo ensaios técnicos específicos

para melhor caracterização dessas variáveis, os resultados do desempenho térmico poderiam ser aprimorados, e a incerteza poderia ser reduzida consideravelmente. No entanto, sempre há uma incerteza referente à aleatoriedade da própria propriedade física e a heterogeneidade dos materiais existentes.

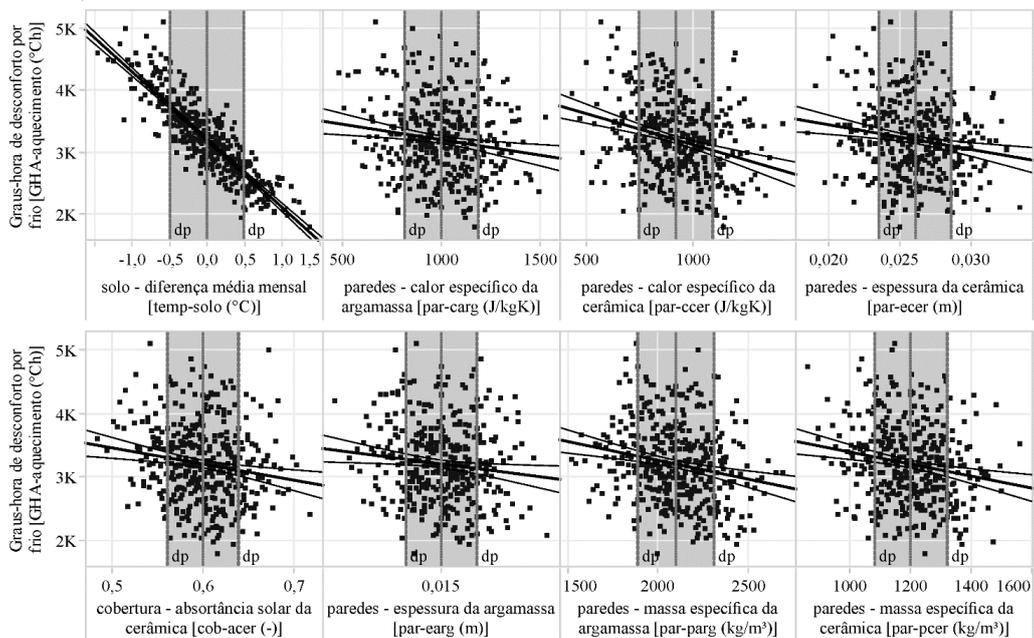
Em relação à temperatura do solo, sua quantificação mais precisa pode ser tema de futuros estudos, que poderiam abranger medições *in loco* e uso da simulação dinâmica com técnicas de calibração.

Figura 7 - Dispersão das variáveis mais influentes nos graus-hora de desconforto por calor (para resfriamento) conforme a maioria dos critérios de sensibilidade



Nota: 'dp' significa desvio padrão.

Figura 8 - Dispersão das variáveis mais influentes nos graus-hora de desconforto por frio (para aquecimento) conforme a maioria dos critérios de sensibilidade



Nota: 'dp' significa desvio padrão.

Conclusões

Investigou-se neste estudo como a propagação de incertezas físicas atua no desempenho térmico de edificações residenciais por simulação computacional. Os resultados do desempenho térmico foram obtidos por meio dos indicadores de graus-hora de desconforto por calor e por frio, conforme o método da Standard 55 (AMERICAN..., 2013) para edificações naturalmente ventiladas.

Por meio do método de Monte Carlo e amostragem com o Hipercubo Latino mostraram-se com rigor estatístico, através do experimento de simulação, as incertezas oriundas das variáveis físicas no desempenho térmico da edificação. Obteve-se um valor de coeficiente de determinação próximo de 1, o que comprova a grande confiabilidade na utilização de índices de sensibilidade baseados em regressão e correlação.

As incertezas nos resultados foram relativamente elevadas. Para o desconforto por calor a incerteza das variáveis físicas representou 53% de desvio relativo, com 90% de confiabilidade. No caso do desconforto por frio a incerteza foi um pouco menor, de 32%, o que indica que a incerteza física de forma geral é mais impactante no desconforto por calor.

A análise de sensibilidade ajudou a compreender melhor os efeitos da propagação de incertezas. Os dois índices utilizados (coeficiente de regressão padronizado e coeficiente de correlação parcial) concordaram na indicação da ordem de importância das variáveis físicas.

No desconforto por calor percebeu-se a influência da absorvância solar de materiais da cobertura, do calor específico da argamassa das paredes e da condutividade térmica do concreto do piso. No desconforto por frio as incertezas físicas dos materiais das paredes foram as mais influentes. Os valores para essas variáveis devem ser estimados com maior precisão, por meio de investigações mais profundas das propriedades termofísicas de materiais com medições em protótipos ou mesmo ensaios técnicos de laboratório.

A temperatura do solo foi uma variável influente nos dois critérios de desconforto. Sua consideração é inevitável e influencia principalmente no cálculo do desempenho térmico nos períodos frios.

Trabalhos futuros que utilizem a simulação computacional e pretendam incluir análise de incertezas devem atentar para as variáveis mais influentes indicadas neste trabalho, bem como investir na melhor quantificação da temperatura do solo por meio de diferentes métodos de cálculo e

estimativas, e, se possível, calibração com resultados de medições em edificações reais.

Este trabalho limitou-se a analisar somente uma configuração de uso e operação para uma edificação e para uma condição climática específica. Acredita-se que a influência da temperatura do solo esteja relacionada à tipologia da edificação adotada (unifamiliar de um pavimento), e essa influência pode ser diferente para outra tipologia. De qualquer forma, diferentes tipos de usuários, formas de operação da edificação, tipologia e cargas internas apontariam diferentes valores de desempenho térmico. Portanto, mais investigações devem ser realizadas no sentido de identificar se as variáveis físicas mais influentes no desempenho térmico são sensíveis a esses diferentes cenários alternativos.

Referências

- AMERICAN SOCIETY OF HEATING, REFRIGERATING AND AIR-CONDITIONING ENGINEERS. **Standard 55**: thermal environmental conditions for human occupancy. Atlanta, 2013.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15220-2**: desempenho térmico de edificações: parte 2: método 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.
- ATTIA, S. *et al.* Simulation-Based Decision Support Tool for Early Stages of Zero-Energy Building Design. **Energy and Buildings**, v. 49, p. 2-15, 2012.
- AUDE, P.; TABARY, L.; DEPECKER, P. Sensitivity Analysis and Validation of Buildings' Thermal Models Using Adjoint-Code Method. **Energy and Buildings**, v. 31, n. 3, p. 267-283. 2000.
- BREESCH, H.; JANSSENS, A. Building Simulation to Predict the Performances of Natural Night Ventilation: uncertainty and sensitivity analysis. In: BUILDING SIMULATION, Montréal, 2005. **Proceedings...** Montréal, 2005.
- BREESCH, H.; JANSSENS, A. Performance Evaluation of Passive Cooling in Office Buildings Based on Uncertainty and Sensitivity Analysis. **Solar Energy**, v. 84, n. 8, p. 1453-1467, 2010.
- BROHUS, H. *et al.* Uncertainty of Energy Consumption Assessment of Domestic buildings. In: BUILDING SIMULATION, Glasgow, 2009. **Proceedings...** Glasgow, 2009.

- BUCKING, S.; ZMEUREANU, R.; ATHIENTIS, A. A Methodology for Identifying the Influence of Design Variations on Building Energy Performance. **Journal of Building Performance Simulation**, v. 7, n. 6, p. 411-426, 2014.
- BURHENNE, S.; JACOB, D.; HENZE, G.P. Sampling Based on Sobol' Sequences for Monte Carlo Techniques Applied to Building Simulations. In: BUILDING SIMULATION, Sydney, 2011. **Proceedings...** Sydney, 2011.
- CAPOZZOLI, A.; MECHRI, H.; CORRADO, V. Impacts of Architectural Design Choices on Building Energy Performance Applications of Uncertainty and Sensitivity Techniques. In: BUILDING SIMULATION, Glasgow, 2009. **Proceedings...** Glasgow, 2009.
- DEPARTMENT OF ENERGY. **EnergyPlus Simulation Software**. Disponível em: <<http://apps1.eere.energy.gov/buildings/energyplus/>>. Acesso em: 10 jun. 2015.
- DE WILDE, P.; TIAN, W. Identification of Key Factors for Uncertainty in the Prediction of the Thermal Performance of an Office Building Under Climate Change. **Building Simulation**, v. 2, n. 3, p. 157-174, 2009.
- FURBRINGER, J.-M.; ROULET, C.-A. Confidence of Simulation Results: put a sensitivity analysis module in your MODEL - The IEA-ECBCS Annex 23 experience of model evaluation. **Energy and Buildings**, v. 30, n. 1, p. 61-71, 1999.
- GOULART, S.; LAMBERTS, R.; FIRMINO, S. **Dados Climáticos Para Projeto e Avaliação Energética de Edificações Para 14 Cidades Brasileiras**. Florianópolis: Núcleo de Pesquisa em Construção/UFSC, 1998.
- HELTON, J. C. *et al.* Survey of Sampling-Based Methods for Uncertainty and Sensitivity Analysis. **Reliability Engineering & System Safety**, v. 91, n. 10-11, p. 1175-1209, 2006.
- HOPFE, C. J.; HENSEN, J. L. M. Uncertainty Analysis in Building Performance Simulation for Design Support. **Energy and Buildings**, v. 43, n. 10, p. 2798-2805, 2011.
- HOPFE, C.; HENSEN, J. L. M.; PLOKKER, W. Uncertainty and Sensitivity Analysis for Detailed Design Support. In: BUILDING SIMULATION, Beijing, 2007. **Proceedings...** Beijing, 2007.
- IOANNOU, A.; ITARD, L. C. M. Energy Performance and Comfort in Residential Buildings: Sensitivity for building parameters and occupancy. **Energy and Buildings**, v. 92, p. 216-233, 2015.
- JOINT RESEARCH CENTRE. European Commission. **Simlab 2.2**. 2015. Disponível em: <ipsc.jrc.ec.europa.eu>. Acesso em: 26 mar. 2015.
- LIDDAMENT, M. **Air Infiltration Calculation Techniques: an applications guide**. Air Infiltration and Ventilation Centre, 1987. Disponível em: <<http://www.aivc.org/>>. Acesso em: 26 mar. 2015.
- MACDONALD, I. A. **Quantifying the Effects of Uncertainty in Building Simulation**. Thesis (PhD) - University of Strathclyde, 2002.
- MACDONALD, I. A.; STRACHAN, P. Practical Application of Uncertainty Analysis. **Energy and Buildings**, v. 33, n. 3, p. 219-227, 2001.
- PETR, K. *et al.* Technique of Uncertainty and Sensitivity Analysis for Sustainable Building Energy Systems Performance Calculations. In: BUILDING SIMULATION, Beijing, 2007. **Proceedings...** Beijing, 2007.
- ROSA, A.S. da **Determinação de Modelos de Referência de Habitações Populares Unifamiliares para Florianópolis Através de Análise de Agrupamento**. Florianópolis, 2014. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2014.
- SALTELLI, A. *et al.* **Global Sensitivity Analysis: the primer**. Hoboken: John Wiley and Sons, 2008.
- SILVA, A. S.; GHISI, E. Uncertainty Analysis of User Behaviour and Physical Parameters in Residential Building Performance Simulation. **Energy and Buildings**, v. 76, p. 381-391, 2014.
- SILVA, A. S. *et al.* Knowing Electricity End-Uses to Successfully Promote Energy Efficiency in Buildings: a case study in low-income houses in Southern Brazil. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON ENERGY & ENVIRONMENT, Porto, 2013. **Proceedings...** Porto, 2013.
- TIAN, W.; DE WILDE, P. Uncertainty and Sensitivity Analysis of Building Performance Using Probabilistic Climate Projections: a UK case study. **Automation in Construction**, v. 20, n. 8, p. 1096-1109, 2011.
- YILDIZ, Y.; ARSAN, Z. D. Identification of the Building Parameters that Influence Heating and Cooling Energy Loads for Apartment Buildings in Hot-Humid Climates. **Energy**, v. 36, n. 7, p. 4287-4296, 2011.

Agradecimentos

Os autores agradecem à Capes e ao CNPq, pela bolsa de estudos que possibilitou a realização do

trabalho, e à Financiadora de Estudos e Projetos (Finep).

Arthur Santos Silva

Laboratório de Eficiência Energética em Edificações, Departamento de Engenharia Civil, Centro Tecnológico | Universidade Federal de Santa Catarina | Campus Universitário Reitor João David Ferreira Lima, Trindade | Caixa Postal 476 | Florianópolis - SC - Brasil | CEP 88040-900 | Tel.: (48) 3721-2115 | E-mail: arthurssilva07@gmail.com

Laiane Susan Silva Almeida

Laboratório de Eficiência Energética em Edificações, Departamento de Engenharia Civil, Centro Tecnológico | Universidade Federal de Santa Catarina | E-mail: lai_almeida@hotmail.com

Enedir Ghisi

Laboratório de Eficiência Energética em Edificações, Departamento de Engenharia Civil, Centro Tecnológico | Universidade Federal de Santa Catarina | E-mail: enedir.ghisi@ufsc.br

Revista Ambiente Construído

Associação Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído
Av. Osvaldo Aranha, 99 - 3º andar, Centro
Porto Alegre - RS - Brasil
CEP 90035-190
Telefone: +55 (51) 3308-4084
Fax: +55 (51) 3308-4054
www.seer.ufrgs.br/ambienteconstruido
E-mail: ambienteconstruido@ufrgs.br