

ANÁLISE DE PROPAGAÇÃO DE INCERTEZAS FÍSICAS EM SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL DINÂMICA DE EDIFICAÇÕES RESIDENCIAIS

Arthur Santos Silva (1); Laiane Susan Silva Almeida (2); EneDir Ghisi (3)

(1) Doutorando em eng. civil, arthurssilva07@gmail.com

(2) Doutoranda em eng. civil, lai_almeida@hotmail.com

(3) PhD, Professor do Departamento de Engenharia Civil, enedir.ghisi@ufsc.br

Laboratório de Eficiência Energética em Edificações, Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina. Campus Universitário Reitor João David Ferreira Lima
Cx. Postal 476, Florianópolis-SC, 88040-900. Contato: +55 (48) 3721-5184.

RESUMO

A simulação computacional dinâmica é um instrumento eficaz para avaliar o desempenho térmico e energético de edificações. No entanto, um experimento de simulação demanda grande quantidade de parâmetros de entrada, muitas vezes não disponíveis ou de precisão desconhecida. O objetivo deste trabalho é, portanto, analisar a propagação de incertezas físicas em simulação dinâmica de uma edificação residencial e sua implicação na determinação de desempenho térmico. O experimento de simulação foi elaborado com o método de Monte Carlo analisando-se as propriedades térmicas e físicas dos materiais da edificação, como a condutividade térmica, massa específica, calor específico, absorptância solar, espessura e coeficientes de ventilação. A análise de incertezas foi realizada para o critério de graus-hora de desconforto por calor e por frio para o clima de Florianópolis-SC, conforme limites de conforto adaptativo. Foi realizada análise de sensibilidade das variáveis com coeficientes de regressão padronizados e coeficientes de correlação parcial. 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 incerteza na absorptância solar da cobertura e o calor específico da argamassa das paredes no desconforto por calor são importantes, 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-chave: simulação computacional, desempenho térmico, análise de incertezas.

ABSTRACT

Dynamic building simulation is a useful tool for evaluating thermal and energy performance of buildings. However, a simulation experiment demands a high amount of input parameters, that are often unavailable or of unknown accuracy. Thus, the objective of this study is to analyse the propagation of physical uncertainties in dynamic simulation of a residential building and its implication in determining the thermal performance. The simulation experiment was performed with the Monte Carlo method, by analysing the thermal and physical properties of materials, such as thermal conductivity, density, specific heat, solar absorptance, thickness and ventilation coefficients. The uncertainty analysis was performed using degree-hours of discomfort criterion for heating and cooling for the climate of Florianópolis-SC, and adaptive comfort limits. A sensitivity analysis of variables was carried out by standardized regression coefficients and partial correlation coefficients indices. Results show that uncertainties in degree-hours are high, i.e., 32% in the discomfort for cooling and 53% in the discomfort for heating. The major part of the uncertainty is due to the average monthly temperature of the ground. Other variables, such as the uncertainty in the solar absorptance of roofs and the specific heat of the mortar of the walls affect discomfort for heating. The density of mortar and the specific heat of the brickwork walls affect discomfort for cooling. These variables need proper accuracy, either through more reliable databases and/or through field or laboratory measurements.

Keywords: building simulation, thermal performance, uncertainty analysis.

1. INTRODUÇÃO

A simulação computacional dinâmica 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 aperfeiçoamento do conforto térmico, redução do consumo de energia, melhoria da eficiência dos sistemas de condicionamento de ar, otimizar os diversos sistemas da edificação, e para tomada de decisão em projeto.

Na área da simulação dinâmica muitos parâmetros são necessários para a configuração de um modelo de experimento computacional, de forma que o mesmo apresente resultados coerentes e úteis para análises térmicas e energéticas. Como parâmetros cita-se o clima, representado por dados meteorológicos representativos de uma determinada localidade; a edificação, com as suas propriedades geométricas, físicas e térmicas de materiais e componentes construtivos; a 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, muitas vezes genéricas. Este fato torna evidente a necessidade de entender o quão preciso é o valor de cada parâmetro inserido na simulação e quais são as consequências dessa imprecisão. Assim como mencionado por Furbringer e Roulet (1999), não é correto considerar resultados experimentais como a “absoluta realidade”; devido à incerteza, os experimentos mostram somente uma “imagem” da realidade. Sua fidelidade pode ser conhecida pelo uso apropriado de intervalos de confiança.

MacDonald e Strachan (2001) apresentam cinco fontes de incertezas em simulação dinâmica de edificações: (i) realismo do modelo: quão bem o modelo representa a realidade? (ii) parâmetros de entrada: que valores se utilizam na falta de dados precisos? (iii) processos estocásticos: como os processos como as projeções do clima, o uso de equipamentos e operação da edificação afetam os resultados? (iv) recursos dos programas: que incertezas estão associadas às escolhas particulares de algoritmos para os diferentes processos térmicos e energéticos da simulação? (v) variações em projeto: qual o efeito de se variar um parâmetro específico de projeto?

Há alguns estudos na literatura que tratam do assunto, os quais analisam diversos aspectos de uma simulação dinâmica. Breesch e Janssens (2005) analisaram incertezas relativas à predição de conforto térmico; Brohus et al. (2009) analisaram incertezas físicas e de uso e ocupação no consumo de energia de edificações; Burhenne, Jacob e Henze (2011) analisaram incertezas em relação ao uso de sistemas de água quente por diferentes métodos de amostragem; Capozzoli, Mechri e Corrado (2009) realizaram uma análise de incertezas em variáveis de projeto em um edifício comercial.

No entanto, há muito a ser investigado em relação às incertezas nos parâmetros de entrada em simulações computacionais nas diferentes fontes citadas por MacDonald e Strachan (2001). Apesar da preocupação com os processos estocásticos (como o uso e operação da edificação), os próprios parâmetros físicos têm suas incertezas e são, de certa forma, inevitáveis de se considerar em uma simulação dinâmica.

2. OBJETIVO

O objetivo do trabalho é analisar a propagação de incertezas em variáveis de entrada físicas em um experimento de simulação dinâmica para determinação do desempenho térmico de uma edificação residencial.

3. 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 propagação de incertezas físicas demandou o desenvolvimento de um experimento de simulação dinâmica. Utilizou-se o programa de simulação *EnergyPlus* v. 8.2 disponível no sítio eletrônico do Departamento de Energia dos Estados Unidos (DOE, 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; ATHIENITIS, 2014; SILVA; GHISI, 2014).

3.1. Modelo de simulação e condições climáticas

O modelo de simulação é uma tipologia típica de habitações de interesse social da cidade de Florianópolis-SC oriunda de estudos de Schaefer (2014). A Figura 1 mostra o modelo utilizado nas análises, o qual possui três dormitórios, sala e cozinha separadas.

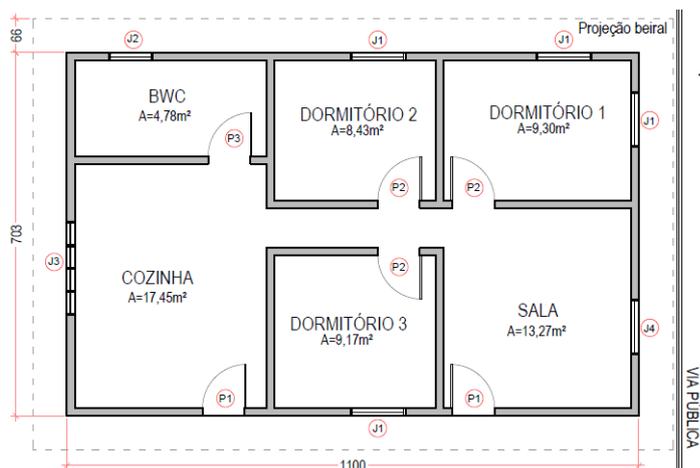


Figura 1 – Modelo base de edificação residencial considerado no estudo.

As paredes são de blocos cerâmicos de 6 furos (espessura = 9cm), argamassa e reboco nas duas faces e pintura externa ($\alpha = 40\%$); o piso é de concreto (espessura = 10cm) com revestimento cerâmico, nas áreas secas e áreas molhadas, em contato com o solo. A cobertura é de telha cerâmica ($\alpha = 60\%$) com forro de madeira. Aberturas de portas e janelas são de caixilho em madeira com vidro comum incolor (3mm). A Tabela 1 mostra as propriedades térmicas dos componentes construtivos para o modelo base calculadas conforme a norma brasileira NBR 15220-2 (ABNT, 2005).

Considerou-se o clima da cidade de Florianópolis-SC por meio do arquivo climático *Test Reference Year* (TRY) originado de estudos de Goulart, Lamberts e Firmino (1998). A edificação foi simulada considerando apenas a ventilação natural, operada conforme as rotinas de operação de portas e janelas descritas na seção 3.2.

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	-

* Calculado conforme coeficientes de convecção apresentados na NBR 15220-2, 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.

3.2. Cargas internas e operação dos ambientes

Considerou-se as cargas internas obtidas por meio de auditoria e pesquisa em edificações de interesse social da cidade de Florianópolis-SC descrita em Silva et al. (2013) e Silva e Ghisi (2014).

As rotinas de ocupação, operação de portas e janelas, uso de equipamentos e iluminação foram obtidas por pesquisas com moradores em 53 habitações. As rotinas de ocupação, operação de portas e janelas foram consideradas com base nas probabilidades de ocorrência dos valores na amostra de habitações.

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 em cada ambiente durante todas as horas do dia. Foi considerada carga de equipamentos e iluminação em todos os ambientes (sala, cozinha e dormitórios).

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

3.3. Variáveis dependentes

Como critério de desempenho térmico escolheu-se a avaliação dos graus-hora de desconforto por meio do método adaptativo da ASHRAE *Standard* 55 (2013). Sabe-se que índices de avaliação de conforto térmico em

longos períodos (como períodos anuais, no caso de simulações computacionais) podem ser utilizados como indicadores de desempenho térmico comparativo entre edificações, principalmente quando se trata da avaliação de estratégias de projeto.

A Figura 2-a 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 (para análises típicas, segundo a norma) denotadas próximas às retas. 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 prevalecente”. Adotou-se a média mensal das temperaturas médias diárias para o clima de Florianópolis-SC, como permitido pela norma. A Figura 2-b mostra os limites inferior e superior mensais de conforto térmico. Desta 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.

$$GHR = \sum_{i=1}^{8760} \begin{cases} se\ TO_i > LS & | (LS - TO_i) \\ se\ TO_i < LS & | (0) \end{cases} \quad \text{Equação 1}$$

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

No qual:

- TO_i é a temperatura operativa interna horária em cada ambiente da edificação;
- LS é o limite superior do intervalo de conforto térmico da *Standard 55* para Florianópolis-SC;
- LI é o limite inferior do intervalo de conforto térmico da *Standard 55* para Florianópolis-SC;
- GHR é o indicador de graus-hora de desconforto por calor (graus-hora de resfriamento em cada ambiente da edificação);
- GHA é o indicador de graus-hora de desconforto por frio (graus-hora de aquecimento em cada ambiente da edificação).

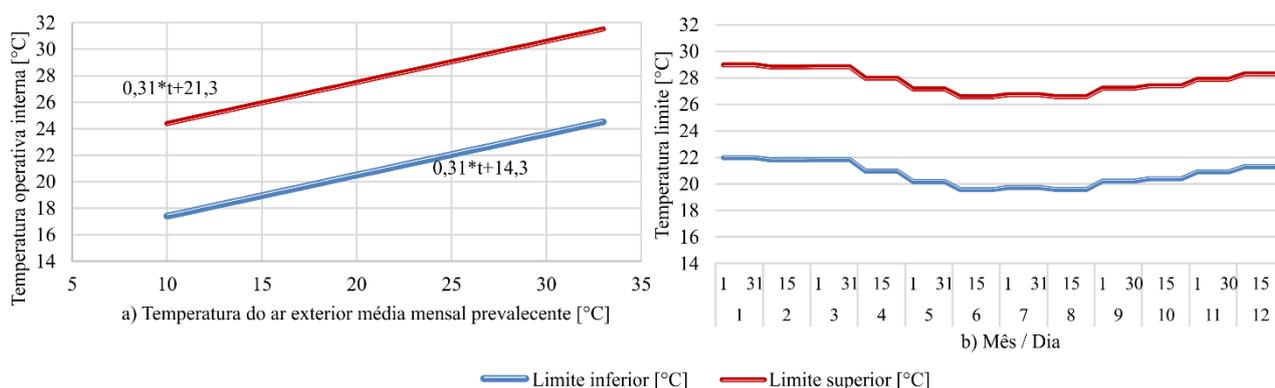


Figura 2 – Intervalo de conforto térmico adaptativo com o critério da *Standard 55* (2013) com 80% de aceitabilidade em função da temperatura mensal prevalecente (a) e em função do mês para Florianópolis-SC (b).

3.4. 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 janelas. Escolheram-se os materiais constituintes dos elementos da cobertura, paredes, piso e das portas. Considerou-se também a taxa de infiltração e o fator de área de ventilação das janelas.

A incerteza foi definida por meio da atribuição de distribuições de probabilidades para cada variável, sendo que os desvios em relação à média ou ao valor mais representativo foram 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 aleatórias quanto sistêmicas de incertezas.

Para a condutividade térmica foi considerado 19% de coeficiente de variação em uma distribuição normal de probabilidades, para todos os materiais. Para o calor específico, foram consideradas incerteza de 4% e 19% de coeficiente de variação 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 à sua área total. Para a temperatura do solo foi considerada uma incerteza na média mensal de $\pm 0,5^{\circ}\text{C}$ de desvio padrão. 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)
	Fração de área de ventilação	jan-vent	-	T(0,4 0,5 0,9)
Temperatura do solo	Diferença média mensal	temp-solo	°C	N(0 0,5)

Obs.: 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). 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 (JRC, 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 (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; STRUCK; KOTEK, 2007; BROHUS et al., 2009).

3.5. 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.

Calcularam-se índices de sensibilidade que indicam a influência de cada variável de entrada nas variáveis dependentes analisadas. Para este trabalho, escolheu-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* (JRC, 2015).

Quando se utiliza 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 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 outro índice que considere relações não lineares entre as variáveis independentes e a variável dependente, ou mesmo utilizar métodos baseados na variância, o que iria demandar outro experimento computacional distinto (SALTELLI et al., 2008). Analisou-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 abordando 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 bem como 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.

4. RESULTADOS

Os resultados são apresentados por análise realizada. Primeiramente relata-se os resultados da análise de incertezas, e em seguida, a análise de sensibilidade das variáveis de entrada do experimento.

4.1. Análise de propagação de incertezas

A Figura 3 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, 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 da propagação 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 dos valores médios de desconforto por frio serem relativamente maiores do que o desconforto por calor, a 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.

Obteve-se um valor de incerteza de 53% (desvio relativo com 90% de confiabilidade) para a edificação nos graus-hora de desconforto por calor. No caso do desconforto por frio, para toda a edificação, obteve-se um valor de incerteza de 32%. As Tabelas 4 e 5 também mostram as estatísticas para todos os ambientes internos.

Os valores de incertezas são relativamente elevados para situações de simulação computacional. O resultado do desempenho térmico para essa edificação seria de 521 a 1697°C_h (graus-hora de resfriamento) com 90% de confiabilidade e para os graus-hora de aquecimento seria de 2180 a 4223°C_h 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.

4.2. Análise de sensibilidade das variáveis

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.

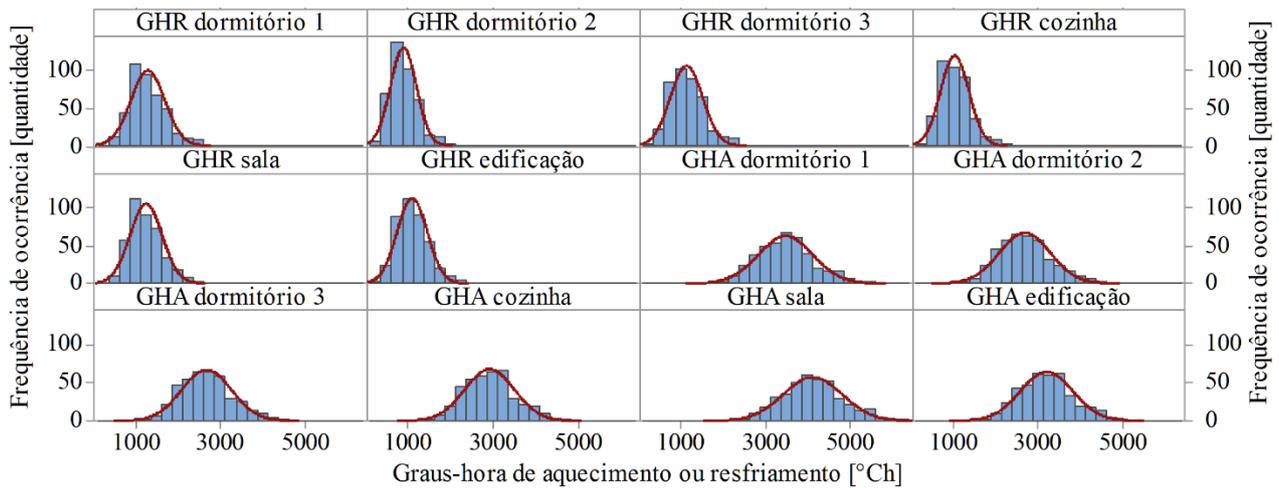


Figura 3 – Histograma de frequência de ocorrência para os graus-hora de desconforto por calor (GHR, graus-hora de resfriamento) e por frio (GHA, graus-hora de aquecimento) conforme o critério de conforto adaptativo da *Standard 55* (2013). O eixo horizontal está em unidade de graus-hora de desconforto ($^{\circ}\text{Ch}$).

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 ($^{\circ}\text{Ch}$)	1284	900	1142	1026	1242	1109
Desv. Pad. ($^{\circ}\text{Ch}$)	404	309	380	337	381	357
Limite Inf. ($^{\circ}\text{Ch}$)	619	391	514	471	614	521
Limite Sup. ($^{\circ}\text{Ch}$)	1950	1409	1769	1582	1869	1697
Desv. (α) ($^{\circ}\text{Ch}$)	665	509	627	555	628	588
Desv. Rel. (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 ($^{\circ}\text{Ch}$)	3482	2685	2679	2937	4123	3202
Desv. Pad. ($^{\circ}\text{Ch}$)	642	601	593	587	694	620
Limite Inf. ($^{\circ}\text{Ch}$)	2424	1694	1700	1970	2979	2180
Limite Sup. ($^{\circ}\text{Ch}$)	4540	3675	3657	3904	5267	4223
Desv. (α) ($^{\circ}\text{Ch}$)	1058	991	978	967	1144	1021
Desv. Rel. (α)	30%	37%	37%	33%	28%	32%

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	cobacer	0,446 1 $^{\circ}$	0,917 1 $^{\circ}$
Solo - diferença média mensal na temperatura	tempsolo	0,443 2 $^{\circ}$	0,912 2 $^{\circ}$
Paredes - calor específico da argamassa	parcarg	-0,336 3 $^{\circ}$	-0,868 3 $^{\circ}$
Piso - condutividade térmica do concreto	pislcon	-0,305 4 $^{\circ}$	-0,841 5 $^{\circ}$
Janela - fração de área de ventilação	janvent	-0,301 5 $^{\circ}$	-0,842 4 $^{\circ}$
Paredes - calor específico da cerâmica	parccer	-0,28 6 $^{\circ}$	-0,822 6 $^{\circ}$
Paredes - absorvância solar da argamassa	paraarg	0,198 7 $^{\circ}$	0,712 7 $^{\circ}$
Paredes - espessura da argamassa	parearg	-0,165 8 $^{\circ}$	-0,644 8 $^{\circ}$
Paredes - massa específica da argamassa	parparg	-0,163 9 $^{\circ}$	-0,641 9 $^{\circ}$
Paredes - espessura da cerâmica	parecer	-0,157 10 $^{\circ}$	-0,632 10 $^{\circ}$
Coefficiente de determinação	R 2	0,9617	

No desconforto por frio a diferença na média mensal da temperatura do solo foi a variável mais influente, ou seja, essa incerteza preponderou frente às demais incertezas (o coeficiente de regressão padronizado é cerca de quatro vezes maior do que nas demais variáveis). Este 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. Ou seja, 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).

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	tempsolo	-0,867 1º	-0,991 1º
Paredes - massa específica da argamassa	parcarg	-0,246 2º	-0,909 2º
Paredes - calor específico da cerâmica	parccer	-0,232 3º	-0,898 3º
Paredes - espessura da cerâmica	parecer	-0,143 4º	-0,786 4º
Cobertura - absorvância solar da cerâmica	cobacer	-0,135 5º	-0,766 5º
Paredes - espessura da argamassa	parearg	-0,133 6º	-0,757 6º
Paredes - massa específica da argamassa	parparg	-0,119 7º	-0,722 7º
Paredes - massa específica da cerâmica	parpcer	-0,109 8º	-0,691 8º
Piso - condutividade térmica do concreto	pislcon	0,104 9º	0,673 9º
Paredes - absorvância solar da argamassa	paraarg	-0,091 10º	-0,622 10º
Coeficiente de determinação	R ²	0,9869	

A Figura 4 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.

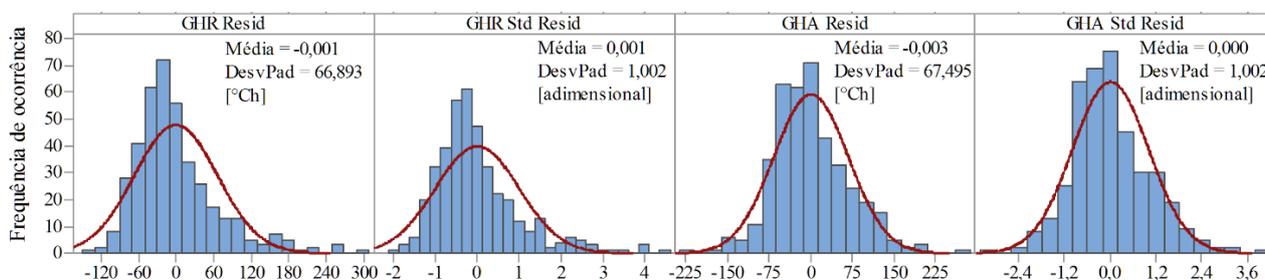


Figura 4 – Resíduos em unidade [°Ch] e resíduos padronizados para o modelo de regressão.

As Figuras 5 e 6 ilustram as quatro 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 a qual é bem maior do que as demais variáveis de entrada. Graficamente essa influência é indicada através da linha de tendência mais inclinada. As Figuras 5 e 6 também 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 a configuração 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. Ao se errar na configuração da absorvância solar ou da temperatura do solo para mais, 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 errar para mais reduzem-se os graus-hora de desconforto por calor, pois aumenta-se 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-ia propor, por exemplo, medições em protótipos ou mesmo ensaios técnicos específicos para melhor caracterização dessas variáveis, sendo que os resultados do desempenho térmico poderiam ser aprimorados, e a incerteza poderia ser reduzida consideravelmente.

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.

5. CONCLUSÕES

Este estudo tratou de investigar como a propagação de incertezas físicas atua no cálculo do desempenho térmico de edificações residenciais por simulação dinâmica. 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* (2013) para edificações naturalmente ventiladas.

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

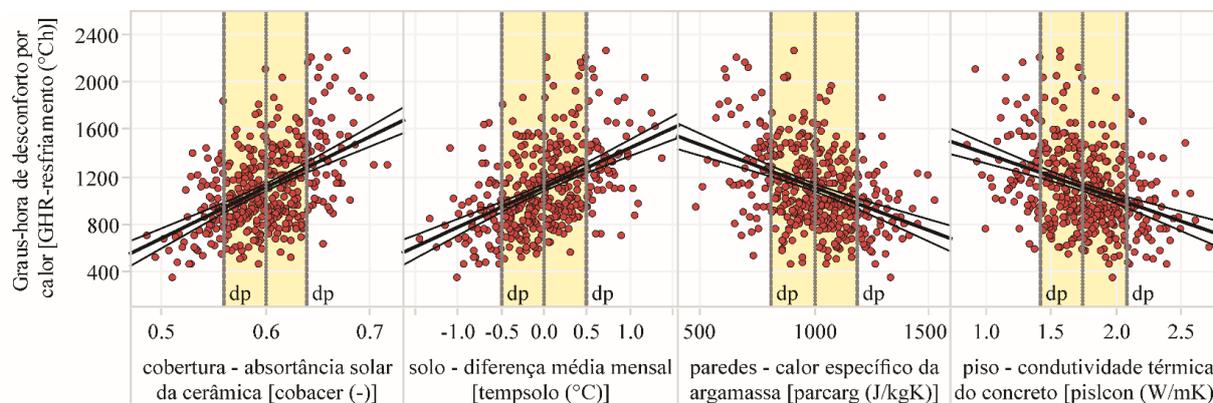


Figura 5 – Dispersão das variáveis mais influentes nos graus-hora de desconforto por calor (para resfriamento) conforme a maioria dos critérios de sensibilidade. Observação: ‘dp’ significa desvio padrão e ‘qt’ significa quartil.

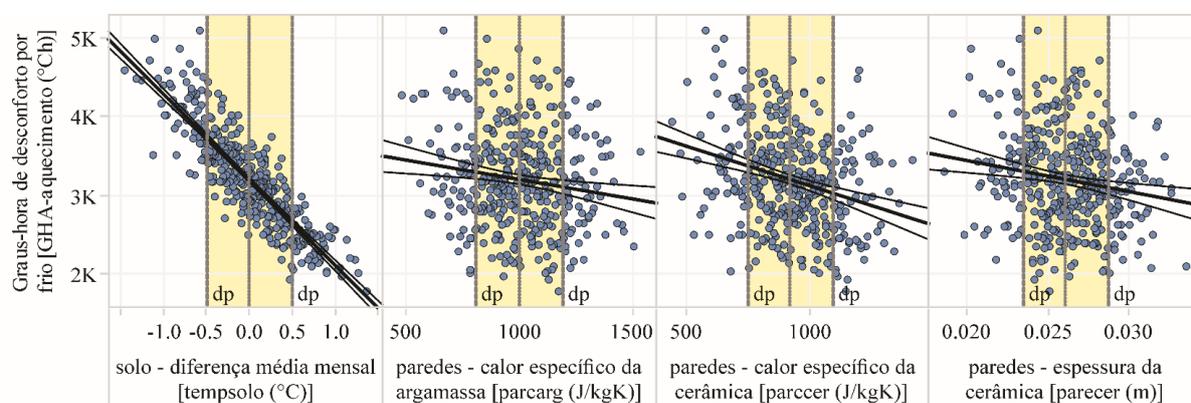


Figura 6 – Dispersão das variáveis mais influentes nos graus-hora de desconforto por frio (para aquecimento) conforme a maioria dos critérios de sensibilidade. Observação: ‘dp’ significa desvio padrão.

As incertezas nos resultados foram relativamente elevadas. Para o desconforto por calor, a incerteza das variáveis físicas ocasionou 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. Ambos 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 absorptância 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 em ambos critérios de desconforto. Sua consideração é inevitável e influencia principalmente no cálculo do desempenho térmico nos períodos frios.

Trabalhos futuros que utilizem a simulação dinâmica e pretendem 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. Diferentes tipos de usuários, formas de operação da edificação e cargas internas apontariam diferentes valores de desempenho térmico. No entanto, mais investigações devem ser realizadas no sentido de identificar se as variáveis físicas mais influentes no desempenho térmico são sensíveis aos diferentes padrões de uso e ocupação da edificação.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ASHRAE. AMERICAN SOCIETY OF HEATING, REFRIGERATING AND AIR-CONDITIONING ENGINEERS. **Standard 55 - Thermal environmental conditions for human occupancy**, 2013. Atlanta, GA. ASHRAE, Inc.
- ABNT. 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, 2005. Rio de Janeiro.
- ATTIA, S.; GRATIA, E.; DE HERDE, A.; HENSEN, J.L.M. Simulation-based decision support tool for early stages of zero-energy building design. **Energy and Buildings**, v. 49, p. 2–15, 2012.
- BREESCH, H.; JANSSENS, A. Building simulation to predict the performances of natural night ventilation: uncertainty and sensitivity analysis. Building Simulation 2005. **Proceedings...** Montréal, Canada, p.115–122, 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.; HEISELBERG, P.; SIMONSEN, A.; SØRENSEN, K.C. Uncertainty of energy consumption assessment of domestic buildings. Building Simulation. **Proceedings...** Glasgow, Scotland, p.1022–1029, 2009.
- BUCKING, S.; ZMEUREANU, R.; ATHIENITIS, 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. Building Simulation 2011. **Proceedings...** Sydney, Australia, p.14–16, 2011.
- CAPOZZOLI, A.; MECHRI, H.; CORRADO, V. Impacts of architectural design choices on building energy performance applications of uncertainty and sensitivity techniques. Building Simulation 2009. **Proceedings...** Glasgow, Scotland, p.1000–1007, 2009.
- DOE. Department of Energy. EnergyPlus Simulation Software. Disponível em < <http://apps1.eere.energy.gov/buildings/energyplus/> > acesso em 10 de junho de 2015.
- 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**, Núcleo de Pesquisa em Construção/UFSC, Florianópolis, 1998.
- HELTON, J. C.; JOHNSON, J. D.; SALLABERRY, C. J.; STORLIE, C. B. 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.; HENSEN, J.; PLOKKER, W. Uncertainty and sensitivity analysis for detailed design support. Building Simulation 2007, **Proceedings...** Beijing, China, p. 1799–1804, 2007.
- HOPFE, C.; STRUCK, C.; KOTEK, P.; et al. Uncertainty analysis for building performance simulation – a comparison of four tools. Building Simulation 2007. **Proceedings...** Beijing, China, p.1383–1388, 2007.
- JRC. Joint Research Centre. European Commission. **Simlab 2.2**, 2015. Disponível em < ipsc.jrc.ec.europa.eu > Acesso em 26 de março de 2015.
- LIDDAMENT, M. **Air Infiltration Calculation Techniques** - an applications guide. Air Infiltration and Ventilation Centre, 1987. Disponível em: < <http://www.aivc.org/> > Acesso em 26/03/2015.
- MACDONALD, I. A. **Quantifying the Effects of Uncertainty in Building Simulation**. PhD Thesis. 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.; FILIP, J.; KAREL, K.; JAN, H. Technique of uncertainty and sensitivity analysis for sustainable building energy systems performance calculations. Building Simulation 2007. **Proceedings...** Beijing, China, p.629–636, 2007.
- SALTELLI, A.; RATTO, M.; ANDRES, T.; CAMPOLONGO, F.; CARIBONI, J.; GATELLI, D.; SAISANA, M.; TARANTOLA, S. **Global Sensitivity Analysis: The Primer**. John Wiley and Sons, Ltd; 2008.
- SCHAEFER, A. **Determinação de modelos de referência de habitações populares unifamiliares para Florianópolis através de análise de agrupamento**. Dissertação (Mestrado em Eng. Civil). Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, 2014.
- 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.; LUIZ, F.; MANSUR, A. C.; VIEIRA, A.S.; SCHAEFER, A.; GHISI, E. Knowing electricity end-uses to successfully promote energy efficiency in buildings: a case study in low-income houses in Southern Brazil. International Conference on Energy & Environment. **Proceedings...** Porto – Portugal, 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).