

ANÁLISE DA PRECISÃO DE METAMODELO DESENVOLVIDO PARA A AVALIAÇÃO DE EDIFÍCIOS VENTILADOS NATURALMENTE

Marcelo Olinger (1); Ana Paula Melo (2); Adams Rackes (3); Roberto Lamberts (4)

- (1) Graduado em Engenharia Civil, Mestrando do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, marcelo.salles@grad.ufsc.br, Universidade Federal de Santa Catarina, Laboratório de Eficiência Energética em Edificações, Florianópolis
- (2) Doutora em Engenharia Civil, Pós-Doutoranda do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, a.p.melo@posgrad.ufsc.br, Universidade Federal de Santa Catarina, Laboratório de Eficiência Energética em Edificações, Florianópolis
- (3) Master in Architectural Engineering, PhD candidate of Department of Civil, Architectural and Environmental Engineering, aer37@drexel.edu, Drexel University
- (4) PhD, Professor do Departamento de Engenharia Civil, roberto.lamberts@ufsc.br, Universidade Federal de Santa Catarina, Departamento de Engenharia Civil, Laboratório de Eficiência Energética em Edificações, Florianópolis

RESUMO

Este artigo apresenta a análise de um método para avaliar edifícios ventilados naturalmente. O estudo baseou-se no metamodelo desenvolvido por Rackes et al. (2016), que calcula a fração de horas de desconforto por calor em relação às horas de ocupação. O objetivo é avaliar a precisão deste metamodelo, comparando seus resultados com os do programa de simulação computacional *EnergyPlus*. Adotou-se um modelo de edificação, sendo este simulado para seis cidades brasileiras. Além de avaliar a precisão, aplicou-se a análise de sensibilidade para entender o comportamento dos dados de entrada no dado de saída do metamodelo. A maior diferença observada entre os resultados do metamodelo e do programa *EnergyPlus* foi 0,105, para o clima do Rio de Janeiro. A menor diferença entre os resultados do metamodelo e do programa *EnergyPlus* foi observada para o clima de São Paulo, com diferença de 0,003. Observou-se que o método estatístico de Regressão por Vetores de Suporte adotado para o desenvolvimento do metamodelo foi capaz de entender a influência dos dados de entrada no dado de saída. O parâmetro mais representativo para a cidade de São Paulo foi a densidade de ocupação, e para a cidade de Cuiabá foi a velocidade delta do ventilador.

Palavras-chave: metamodelo, simulação computacional, análise de sensibilidade

ABSTRACT

This work presents the analysis of a method for evaluation of naturally ventilated buildings. The study is based on a metamodel developed by Rackes et al. (2016) that calculates the average annual fraction of occupied hours that exceeded the upper limit of an adaptive comfort zone. The aim of the study is to evaluate the precision of this metamodel, comparing its results with the results from the program *EnergyPlus*. The model of a building was adopted and simulated for six Brazilian cities. A sensitivity analysis was applied to understand the behavior of the input data on the output data of the metamodel. The largest difference between the outputs of the metamodel and the program *EnergyPlus* is for Rio de Janeiro, with 0.105. The smallest difference is for the climate of São Paulo, with the difference of 0.003. The results indicate that the statistical method of Support Vector Regression adopted for the metamodel development was able to understand the influence of the input data on the output data. The most representative parameter for the city of São Paulo was the occupation density, and for the city of Cuiaba, it was the fan delta air speed.

Keywords: metamodel, building energy simulation, sensitivity analysis

1. INTRODUÇÃO

O desenvolvimento econômico e o crescimento populacional geram aumento no consumo de energia. A previsão é que o uso de energia em países em desenvolvimento crescerá a uma taxa de 3,2% ao ano, e até 2020 ultrapassará o uso de energia dos países desenvolvidos (IBGE, 2017). Em países desenvolvidos, as edificações são responsáveis por 20 a 40% do total da energia final consumida, ultrapassando o consumo da indústria e dos transportes (PÉREZ-LOMBARD et al., 2008). Cada vez mais, o uso indiscriminado de energia causa grande impacto ambiental, como poluição, alterações climáticas e esgotamento de recursos naturais.

Para garantir a melhora na qualidade de vida de forma sustentável, busca-se políticas de incentivo à eficiência energética. No Brasil, após a crise do setor elétrico em 2001, foram estabelecidas ações para estimular o uso eficiente da energia elétrica. Em dezembro de 2001, a Lei Nº 10.295 (BRASIL, 2001a) foi regulamentada pelo Decreto Nº 4.059 (BRASIL, 2001b), estabelecendo um programa de etiquetagem de edificações voltado para padrões de eficiência energética de edificações.

Uma solução passiva para a questão da eficiência energética de edificações é o uso da ventilação natural. Além de assegurar a qualidade do ar, a ventilação natural ajuda a promover o resfriamento da edificação, proporcionando conforto térmico aos usuários quando as condições do clima externo são favoráveis (SORGATO, 2009). A aceitabilidade quanto à temperatura de conforto difere para ocupantes de edifícios ventilados naturalmente. Nessas condições, a tolerância em relação à variação de temperatura é maior, e o conforto térmico depende diretamente da temperatura do ar externo (ASRHAE 55, 2013).

Para que o conforto térmico dos usuários seja garantido sem grandes gastos de energia, é importante entender como ocorrem as variações térmicas em um edifício antes de construí-lo. Atualmente, a simulação computacional vem sendo utilizada mundialmente para a predição do desempenho energético de edificações (HENSEN; LAMBERTS, 2011). Porém, a utilização desses programas de simulação enfrenta diversos problemas, associados principalmente às informações necessárias para os dados de entrada.

Os metamodelos são elaborados a partir de modelagens estatísticas de grandes bancos de dados obtidos de resultados de simulação computacional. O uso de metamodelos permite obter resultados próximos aos resultados de simulações de desempenho energético de forma simples e rápida, facilitando sua aplicação em diversas áreas. O desenvolvimento de metamodelos geralmente adota suposições quanto aos dados de entrada e ao clima.

O Regulamento Brasileiro de eficiência energética de edificações adota um metamodelo para a predição de edifícios condicionados artificialmente, mas não para edifícios ventilados naturalmente. Frente a isso, Rackes et al. (2016) desenvolveram um metamodelo para a predição de desempenho térmico de edificações comerciais ventiladas naturalmente, utilizando o método de predição de máquina de vetores de suporte. Esse método foi desenvolvido com um banco de dados de aproximadamente 50.000 amostras para calcular o impacto das características do edifício e da sua localização sobre os aspectos de conforto térmico. O foco do trabalho foi em edifícios de poucos pavimentos (*low-rise buildings*), principalmente escolas e escritórios, em climas quentes e amenos. O desenvolvimento deste metamodelo busca simplificar as análises de edifícios ventilados naturalmente para possibilitar a sua aplicação no Regulamento Técnico da Qualidade para o Nível de Eficiência Energética de Edificações Comerciais (RTQ-C, 2010).

Apesar de os metamodelos fornecerem uma ferramenta rápida para a avaliação do desempenho da edificação, é importante analisar a precisão dos dados de saída do modelo para que se possa validá-lo. A análise de sensibilidade permite apontar as variáveis que mais contribuem na variação das respostas do modelo, além de ser utilizada para a simplificação do modelo, identificando variáveis para quais o modelo é mais sensível (MARA; TARANTOLA, 2008). Frente a isso, busca-se avaliar a precisão do metamodelo desenvolvido por Rackes et al. (2016) através da comparação de seus resultados com os do programa de simulação computacional *EnergyPlus*.

2. OBJETIVO

O objetivo deste artigo é avaliar a precisão do metamodelo desenvolvido por Rackes et al. (2016) para avaliação de edifícios ventilados naturalmente, frente a comparação entre os resultados do metamodelo e do programa de simulação computacional *EnergyPlus*.

3. MÉTODO

3.1. O metamodelo desenvolvido por Rackes et al. (2016)

O *Natural Comfort* é um metamodelo desenvolvido em linguagem *Python* por Rackes et al. (2016), para a predição de conforto térmico em edifícios comerciais de poucos pavimentos ventilados naturalmente,

especialmente escolas. A partir da combinação de 38 variáveis de entrada, apresentadas na Tabela 1, o metamodelo retorna a fração de horas de desconforto por calor em relação às horas de ocupação (E_{hot}).

Tabela 1 – Variáveis de entrada do metamodelo, com valores máximos e mínimos admissíveis.

Variáveis de entrada	Unidade	Valores		
		Mínimo	Máximo	Adotado
Temperatura média externa anual	°C	10	30	De acordo com a cidade
Média anual das diferenças entre as temperaturas máximas e mínimas de cada dia	°C	3	15	De acordo com a cidade
Diferença entre o valor máximo e mínimo das temperaturas externas anuais	°C	3	28	De acordo com a cidade
Graus-dia de arrefecimento para temperatura base de 18°C (CDD18)	K.dia	0	3800	De acordo com a cidade
Graus-dia de arrefecimento para temperatura base de 25°C (CDD25)	K.dia	0	1600	De acordo com a cidade
Média anual da radiação solar direta normal	W/m ²	40	200	De acordo com a cidade
Média anual da radiação solar difusa no plano horizontal	W/m ²	70	130	De acordo com a cidade
Velocidade média do ar externo anual	m/s	0	50	De acordo com a cidade
Altitude	m	0	2000	De acordo com a cidade
Comprimento total (maior dimensão entre os lados da edificação)	m	13	200	55,2
Profundidade total (menor dimensão entre os lados da edificação)	m	8	50	23,9
Altura entre pavimentos	m	2,75	4,25	3,5
Número de pavimentos	-	1	5	1
Área média das salas ocupadas	m ²	9	400	89,24
Fração total da área do edifício destinada às escadas	-	0	0,28	0
Fração de abertura da fachada (WWR)	-	0,05	0,7	0,457
Ângulo de sombreamento vertical	°	0	45	0
Absortância solar das paredes externas	-	0,2	0,8	0,4
Transmitância térmica das paredes	W/m ² .K	0,1	5	2,2
Capacidade térmica das paredes	kJ/ m ² .K	40	500	166,97
Absortância solar da cobertura	-	0,2	0,8	0,6
Transmitância térmica da cobertura	W/m ² .K	0,1	5	2,0
Capacidade térmica da cobertura	kJ/ m ² .K	10	400	26,44
Coefficiente de ganho solar do vidro (SHGC)	-	0,2	0,8	0,8
Transmitância térmica do vidro	W/m ² .K	1	6	5,7
Combinação entre as densidades de potência de iluminação e de equipamentos nas salas de permanência prolongada	W/ m ² .K	1	25	13
Combinação entre as densidades de potência de iluminação e de equipamentos nas áreas de permanência transitória (corredores e escadas)	W/ m ² .K	1	15	8
Densidade de ocupação	peessoa/m ²	0,01	1	0,35
Hora de início de ocupação	h	6	10	8
Hora final de ocupação	h	14	22	18
Fator de correção da velocidade do ar externa (ver tabela de Rackes et al., 2016)	-	0,1	0,4	0,33
Obstáculos do entorno (ver tabela de Rackes et al., 2016)	-	0,3	1	1
Fator de abertura da janela (fração máxima de abertura)	-	0,2	1	0,6
Fração de abertura na fachada das janelas destinadas à ventilação noturna (abertas 24h)	-	0	0,17	0
Relação entre a largura e a altura das janelas primárias	-	0,1	50	3
Coefficiente de descarga das janelas primárias	-	0,4	0,8	0,6
Área efetiva de vazão entre os espaços ocupados e as áreas de permanência compartilhada, por comprimento de parede compartilhada (ver tabela de Rackes et al., 2016)	-	0,0001	0,4	0,21
Velocidade delta do ventilador (incremento da velocidade do ar a partir de ventiladores de teto)	m/s	0	0,9	0

Para o desenvolvimento do metamodelo, Rackes et al. (2016) definiram 55 parâmetros para explorar amplamente o potencial de características de edifícios comerciais de poucos pavimentos (*low-rise buildings*) ventilados naturalmente em climas amenos e quentes. Esses parâmetros estão relacionados: às dimensões do edifício; geometria das janelas e sombreamento; propriedades construtivas; ganhos internos; padrão de uso; ventilação natural; e temperatura do solo. Os detalhamentos dos 55 parâmetros encontram-se no artigo de Rackes et al. (2016). A divisão entre os climas quente e ameno foi definida pelo valor de 2267 K.dia para o número de graus-dia de arrefecimento para temperatura base de 18°C (*Cooling Degrees Days with base 18°C*, ou CDD18).

Em seguida, determinou-se um banco de dados de aproximadamente 50.000 amostras. As amostras foram elaboradas em formato IDF através da Sequência de Sobol, método quase-aleatório. Os valores

atribuídos aos parâmetros adotados foram distribuídos de forma que se abrangesse uma gama de amostras representativa para qualquer edifício comercial brasileiro de poucos pavimentos (*low-rise buildings*). Esses valores definiram os limites máximos e mínimos do metamodelo. Os padrões de uso não foram alterados ao longo do dia. Devido ao foco do trabalho, definiu-se maior peso para características de escolas e escritórios. Apesar de ser um modelo genérico, a intenção foi de que as amostras representassem grande parte dos edifícios públicos sem o uso de sistema de condicionamento de ar. O objetivo do desenvolvimento do metamodelo é permitir observar a possibilidade do uso de ventilação natural nas edificações, refletindo na redução do uso do sistema de condicionamento de ar. Por ter foco em escolas, considerou-se que os prédios não seriam ocupados nos fins de semana, e no período de férias (mês de janeiro e os dias entre 1 e 14 de julho). Apesar do padrão de uso adotado, torna-se possível analisar o impacto do uso da ventilação natural em escritórios.

O programa de simulação computacional *EnergyPlus* versão 8.3 foi utilizado para a modelagem termo energética dos edifícios, utilizando o *Airflow Network*. O conforto adaptativo foi baseado nos limites de 80% de aceitabilidade da ASRHAE 55 (2013).

Devido à alta correlação entre o conforto térmico em edificações ventiladas naturalmente e o clima, buscou-se grande variação de climas, de forma que representasse geograficamente o território brasileiro. O primeiro terço das simulações foi realizado com 13 arquivos climáticos do tipo TRY (*Test Reference Year*), distribuídos igualmente entre as amostras. Os outros dois terços foram simulados utilizando arquivos climáticos INMET de 414 locais (LABEEE, 2017).

O método de aprendizagem adotado para o desenvolvimento do metamodelo foi o método da máquina de vetores de suporte, através do pacote LIBSVM (CHANG; LIN, 2011). Este método foi adotado por possuir melhor desempenho com funções de base radial, em relação a outros métodos. Para a aplicação do método, inicialmente 93 parâmetros preditores foram definidos. Em muitos casos, eram simplesmente os parâmetros de entrada definidos para a elaboração dos modelos do banco de dados, mas também incluíam transformações, normalizações ou funções destes. Depois, iniciou-se o processo iterativo removendo os parâmetros preditores e avaliando o impacto no desempenho do metamodelo. Ao fim do processo, um total de 53 parâmetros preditores foram selecionados. Esses parâmetros são obtidos a partir de 38 variáveis de entrada, das quais 9 são obtidas do arquivo climático. A comparação dos resultados das simulações do programa *EnergyPlus* com as previsões do metamodelo apresentou a raiz quadrada do erro quadrático médio (RMSE) igual a 0,059 e o erro absoluto do 95º percentil (AE95) igual a 0,126. A validação do metamodelo, testado com outros 2000 casos não utilizados no seu treinamento, apresentaram o RMSE de 0,060 e o AE95 de 0,129.

Os autores observaram que os parâmetros mais decisivos no resultado do desempenho térmico foram: CDD18; densidade de ocupação; velocidade delta do ventilador; área útil do edifício. Dentre os parâmetros listados, apenas a área útil do edifício não é uma variável de entrada do programa, e sim o resultado da multiplicação entre as variáveis de comprimento e profundidade da edificação. A velocidade delta do ventilador é a velocidade do ar acima de 0,3 m/s (ar parado). Ou seja, é a velocidade do ar gerada pelos ventiladores de teto ou de parede, menos 0,3 m/s. A ASHRAE Standard 55 permite o aumento da temperatura limite superior para conforto térmico em 1,2°C para a velocidade de 0,6 m/s, 1,8°C para a velocidade de 0,9 m/s, e 2,2°C para a velocidade de 1,2 m/s.

3.2. Aplicação do metamodelo de Rackes et al. (2016)

Para a aplicação do metamodelo *Natural Comfort*, foi utilizado uma tipologia de edifício desenvolvido a partir dos *layouts* e parâmetros utilizados por Rackes et al. (2016). A tipologia é de um edifício térreo, retangular, com 12 salas, divididas por um corredor central. A Figura 1 apresenta a planta baixa do edifício e a Figura 2, o modelo computacional em 3D. As características do modelo do edifício foram definidas para que atribuíssem um valor para cada variável de entrada do metamodelo, atendendo seus limites mínimos e máximos. Para a locação da edificação, considerou-se área urbana, sem obstáculos no entorno.

Para representar diferentes zonas bioclimáticas brasileiras, o modelo foi simulado para seis cidades: Belém; Brasília; Cuiabá; Porto Alegre; Rio de Janeiro; e São Paulo. Os dados climáticos foram obtidos dos arquivos climáticos INMET (LABEEE, 2017). A Tabela 2 apresenta os valores das variáveis climáticas usados para cada cidade no metamodelo. As simulações foram realizadas no programa *EnergyPlus* versão 8.6 (ENERGYPLUS, 2016).

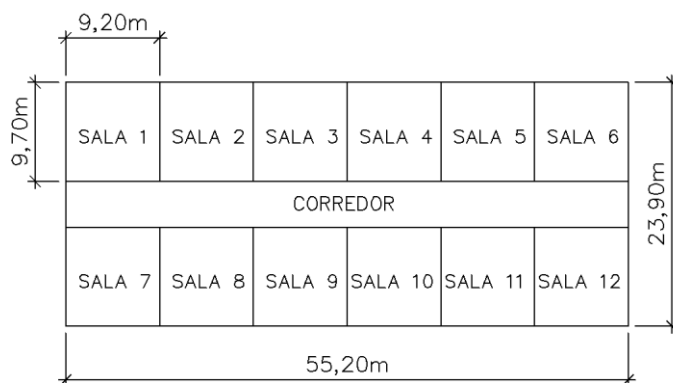


Figura 1 – Planta baixa do edifício.

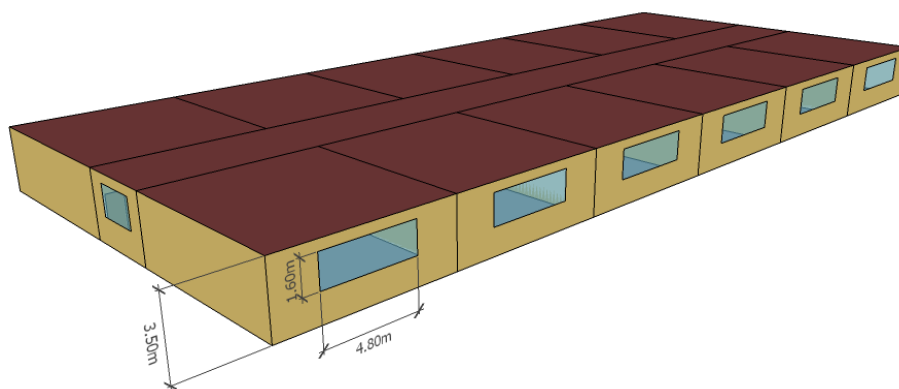


Figura 2 – Modelo computacional do edifício em 3D.

Tabela 2 – Valores das variáveis climáticas utilizadas para cada cidade no *Natural Comfort*.

Nome	Tar (°C)	TarMD (°C)	TarMA (°C)	CDD18 (K.dia)	CDD25 (K.dia)	RadDirN (W/m ²)	RadDifH (W/m ²)	Var (m/s)	Altitude (m)
São Paulo	19,6	8,3	15,1	918,6	97,2	60,3	86,3	2,1	792
Porto Alegre	20,0	9,2	21,5	1217,1	216,3	66,5	82,6	1,5	47
Belém	27,2	8,3	4,8	3343,3	867,2	63,3	103,9	1,0	24
Cuiabá	26,3	10,7	20,0	3052,7	939,5	86,9	98,6	2,0	151
Rio de Janeiro	23,2	9,1	13,6	1962,5	359,2	72,8	84,1	1,4	45
Brasília	21,1	9,3	10,2	1224,9	98,7	89,2	95,2	2,5	1160

* Tar = Temperatura média externa anual

* TarMD = Média anual das diferenças entre as temperaturas máximas e mínimas de cada dia

* TarMA = Diferença entre o valor máximo e mínimo das temperaturas externas anuais

* CDD18 = Graus-dia de arrefecimento para temperatura base de 18°C

* CDD25 = Graus-dia de arrefecimento para temperatura base de 25°C

* RadDirN = Média anual da radiação solar direta normal

* RadDifH = Média anual da radiação solar difusa no plano horizontal

* Var = Velocidade média do ar externo anual

3.3. Comparação entre os resultados do metamodelo versus o programa *EnergyPlus*

A comparação entre os resultados do metamodelo e do programa *EnergyPlus* baseiam-se na fração de horas de desconforto por calor em relação às horas de ocupação (EHF_{hot}). Observou-se as diferenças absolutas entre os resultados, assim como as diferenças relativas com base nos resultados do programa *EnergyPlus*.

O modelo de conforto adaptativo adotado foi o da ASHRAE Standard 55 (2013). Ele depende da temperatura externa do ar, da qual se obtém uma média ponderada chamada *prevailing mean outdoor air temperature* ($T_{pma,o}$). De acordo com o modelo adaptativo, a temperatura operativa neutra (T_{neut}), é a temperatura onde a minoria dos ocupantes se sentirão desconfortáveis, e varia de acordo a Equação 1:

$$T_{neut}(t) = 0,31 * T_{pma,o}(t) + 17,8^{\circ}C \quad \text{Equação 1}$$

A *prevailing mean outdoor air temperature*, assim como a T_{neut} , varia como o tempo. A janela de tempo para definir a $T_{pma,o}$ pode variar de 7 a 30 dias (para o metamodelo considerou-se 7). Para 80% de

aceitabilidade, os limites definidos pela ASHRAE Standard 55 (2013) são $T_{\min}(t) = T_{\text{neut}}(t) - 3.5 \text{ }^{\circ}\text{C}$ e $T_{\max}(t) = T_{\text{neut}}(t) + 3.5 \text{ }^{\circ}\text{C}$. Para definir se uma zona térmica está dentro dos limites de conforto, a temperatura operativa interna (T_{op}), que depende da temperatura do ar e da temperatura de radiação, deve estar entre os valores de T_{\min} e T_{\max} .

A métrica de performance de conforto térmico adotada foi a *hot exceedance hour fraction* (E_{hot}): o número de horas em que a temperatura T_{\max} foi excedida, dividido pelo total de horas ocupadas. O E_{hot} varia de 0 a 1, ou de 0% a 100% de horas ocupadas desconfortáveis. Para o cálculo do E_{hot} , primeiramente é definido um indicador E_{hot} , que se refere a uma zona ocupada z , em uma hora i do ano (Equação 2):

$$E_{hot}(z, i) \begin{cases} 1, & T_{op}(i) > T_{max} \\ 0, & T_{op}(i) \leq T_{max} \end{cases} \quad \text{Equação 2}$$

O E_{hot} é então calculado a partir da média do E_{hot} entre todas as zonas ocupadas para cada hora, dividido pelas horas ocupadas do ano, de acordo com a Equação 3. Corredores e escadarias não foram considerados.

$$EHF_{hot} = \frac{\sum_{i=1}^{8760} \left(\frac{\sum_z E_{hot}(i,z)}{N_{ZonasOc}} \right) f_{oc}(i)}{\sum_{i=1}^{8760} f_{oc}(i)} = \frac{\sum_{i=1}^{8760} \sum_z E_{hot}(i,z) f_{oc}(i)}{N_{ZonasOc} N_{HorasOc}} \quad \text{Equação 3}$$

Onde $f_{oc}(i)$ é a fração de horas i em que o edifício é ocupado. É possível determinar uma média entre todas as zonas, já que todas as zonas têm o mesmo tamanho e densidade de ocupação.

3.4. Análise de sensibilidade

Para o modelo de edificação analisado, observou-se a influência das variáveis de entrada apontadas por Rackes et al. (2016) como as mais influentes no conforto térmico, em relação ao comportamento do dado de saída. Dentre as variáveis, destacam-se: velocidade delta do ventilador; densidade de ocupação; absorvância da cobertura; combinação entre as densidades de potência de iluminação e de equipamentos nas salas de permanência prolongada; fator de abertura das janelas; coeficiente de ganho solar do vidro; fração de abertura na fachada das janelas destinadas à ventilação noturna; hora de início de ocupação; hora final de ocupação; capacidade térmica da cobertura; ângulo de sombreamento vertical; e altura entre pavimentos.

Esses dados de entrada tiveram 20 valores interpolados variados entre o mínimo e máximo admissíveis pelo metamodelo, avaliando-se os resultados de E_{hot} obtidos. Enquanto uma variável tinha seus valores variados, as demais permaneceram com valores constantes, iguais ao do modelo simulado no *EnergyPlus*. A análise de sensibilidade foi realizada para as cidades de Cuiabá e São Paulo. A primeira, de clima quente ($CDD18 > 2267 \text{ K.dia}$) e a segunda, de clima ameno ($CDD18 < 2267 \text{ K.dia}$).

Observou-se a influência das variáveis de entrada no dado de saída do metamodelo, e também o impacto que estas têm sobre o resultado. Também foi realizada uma análise crítica para observar se as influências dos dados de entrada estão de acordo com o esperado em relação ao comportamento termofísico do modelo.

4. ANÁLISE DE RESULTADOS

4.1 Comparação entre os resultados do metamodelo versus o programa EnergyPlus

Os resultados da comparação entre o metamodelo e o programa *EnergyPlus* são apresentados na Tabela 3. Observou-se que os resultados de E_{hot} pelo *Natural Comfort* variaram de 0,185 para a cidade de São Paulo a 0,954, para a cidade de Belém. Ao comparar os resultados obtidos pelo metamodelo com o programa *EnergyPlus*, as diferenças no E_{hot} variam de 0,003, para a cidade de São Paulo, a 0,105, para a cidade do Rio de Janeiro. Quando observadas as diferenças relativas, adotando como base os resultados do *EnergyPlus*, os percentuais variam de 1,75%, para a cidade de São Paulo, a 23,86%, para a cidade de Brasília.

Todos os resultados do *Natural Comfort* resultaram em valores superiores comparados com os obtidos pelo programa *EnergyPlus*. Os resultados do *Natural Comfort* para os climas mais amenos foram os que mais se aproximaram dos resultados do *EnergyPlus*: para São Paulo a diferença foi de 0,003, e para Porto Alegre a diferença foi de 0,016. Para os outros climas, os resultados do *Natural Comfort* tiveram diferenças entre 0,076, para Brasília, e 0,105, para o Rio de Janeiro.

Apesar de diferentes tipologias e características construtivas influenciarem no conforto térmico, o clima é um fator decisivo para edifícios ventilados naturalmente. O metamodelo analisado apresenta uma fração maior de horas de desconforto por calor para climas quentes, como esperado. Ao observar os E_{hot} ,

percebe-se que o CDD18 (indicado como parâmetro mais decisivo nos resultados), assim como a temperatura média anual, variam em ordem crescente, conforme os resultados. Outros parâmetros climáticos relacionados à radiação solar, velocidade do vento, amplitude térmica e elevação não indicam influência tão impactante nos resultados.

Tabela 3 – Comparação entre o metamodelo e o *EnergyPlus*.

Climas	EHF _{hot}		Diferença absoluta	Diferença relativa
	Metamodelo	<i>EnergyPlus</i>		
São Paulo	0,185	0,182	0,003	1,75%
Porto Alegre	0,262	0,246	0,016	6,35%
Brasília	0,392	0,317	0,076	23,86%
Rio de Janeiro	0,578	0,472	0,105	22,24%
Cuiabá	0,894	0,806	0,088	10,92%
Belém	0,954	0,870	0,084	9,68%

As diferenças entre os resultados do metamodelo e do *EnergyPlus* foram maiores para as cidades de climas mais quentes. Uma possível explicação para esse comportamento seria um ganho de calor superestimado no metamodelo devido à radiação direta normal. As cidades com radiação direta normal média inferior a 70 W/m² (São Paulo, Porto Alegre e Brasília) tiveram diferenças absolutas inferiores a 0,08 nos resultados do EHF_{hot}, enquanto as cidades com radiação direta normal média superior a 70 W/m² (Rio de Janeiro, Cuiabá e Belém) apresentam diferenças absolutas entre 0,084 e 0,105.

O *Natural Comfort* obteve resultados com boa precisão, especialmente para os climas mais frios. O comportamento do metamodelo apresentou uma tendência de comportamento similar à do programa *EnergyPlus*, com diferenças absolutas menores do que o AE95 calculado por Rackes et al. (2016), variando entre 0,003 e 0,105. Na comparação dos resultados, a diferença absoluta é mais relevante do que a relativa, pois os valores de EHF_{hot} já são uma fração das horas ocupadas ao longo do ano, variando entre 0 e 1.

Ressalta-se que as diferenças encontradas podem também estar relacionadas com a versão do programa de simulação computacional adotado. O metamodelo *Natural Comfort* foi desenvolvido com base em simulações computacionais utilizando a versão 8.3 do programa *EnergyPlus*, e as simulações no *EnergyPlus* do presente trabalho foram realizadas com a versão 8.6.

4.2. Análise de sensibilidade

A Figura 3 apresenta os gráficos com os valores do EHF_{hot} para cada uma das variáveis de entrada definidas por Rackes et al. (2016) como as mais influentes no desempenho térmico da edificação analisada. Todas as variáveis tiveram seus valores variados entre os mínimos e máximos admissíveis pelo metamodelo. Os pontos marcados com um “x” vermelho indicam o valor da variável no modelo simulado pelo *EnergyPlus*.

Com base nos resultados, observou-se que os valores de EHF_{hot} para a cidade de Cuiabá são superiores, pois seu clima é mais quente. No entanto, as variações nos dados de entrada apresentaram maior influência nos resultados para o clima ameno, da cidade de São Paulo. No clima ameno a variável mais representativa foi a densidade de ocupação. Com a densidade de ocupação mínima (0,01 pessoa/m²) o valor de EHF_{hot} foi 0,081, e com a densidade máxima (1,00 pessoa/m²) o valor de EHF_{hot} subiu para 0,491. Esse resultado foi o maior observado para a cidade de São Paulo. A segunda variável mais representativa foi a absorvância da cobertura. Com o valor mínimo de absorvância 0,2, obteve-se o valor de EHF_{hot} 0,047, o menor resultado para São Paulo. Para o valor máximo de absorvância 0,8, o resultado de EHF_{hot} foi 0,300. A variável de entrada com menor impacto foi a altura entre pavimentos. Essa variável foi alterada entre 2,75 m e 4,25 m, modificando o resultado do EHF_{hot} de 0,208 para 0,177. A segunda variável menos representativa foi a hora de início de ocupação. Variando entre 6h00 e 10h00, alterou o resultado do EHF_{hot} de 0,154 para 0,184.

Para o clima quente (Cuiabá), a variável de entrada mais influente foi a velocidade delta do ventilador (variada entre 0,0m/s e 0,9m/s). Com a velocidade máxima, o EHF_{hot} reduziu para 0,643. Esta variável foi a que apresentou a maior redução do EHF_{hot} para a cidade de Cuiabá. A segunda variável mais representativa foi a absorvância da cobertura, variando de 0,934 para o valor máximo de 0,8 a 0,686 para o valor mínimo de 0,2. A variável que mais aumentou o EHF_{hot} foi o fator de abertura da janela. Para o fator de abertura igual a 0,2, o resultado foi 0,945. A altura entre pavimentos também foi o fator menos impactante para Cuiabá, variando os resultados em apenas 0,011. No entanto, ao contrário de São Paulo, o aumento da altura entre pavimentos aumentou o EHF_{hot}, que variou de 0,892 a 0,903. A segunda variável de entrada menos representativa foi o coeficiente de ganho solar do vidro. Variada entre 0,2 e 0,8, alterou o resultado do EHF_{hot} de 0,865 para 0,894.

O metamodelo se mostrou sensível à variação da velocidade delta do ventilador, indicando grande

potencial de redução no calor por ventilação, principalmente para o clima de Cuiabá. Para a cidade de São Paulo, a redução foi de 0,102, com variações pouco expressivas no EHF_{hot} para velocidades a partir de 0,6m/s. O aumento do fator de abertura das janelas diminui o EHF_{hot} para os dois climas analisados, evidenciando novamente o potencial da ventilação. Para o clima quente de Cuiabá, o metamodelo se mostrou mais sensível às variações no fator de abertura da janela quando os valores do fator de abertura das janelas são menores.

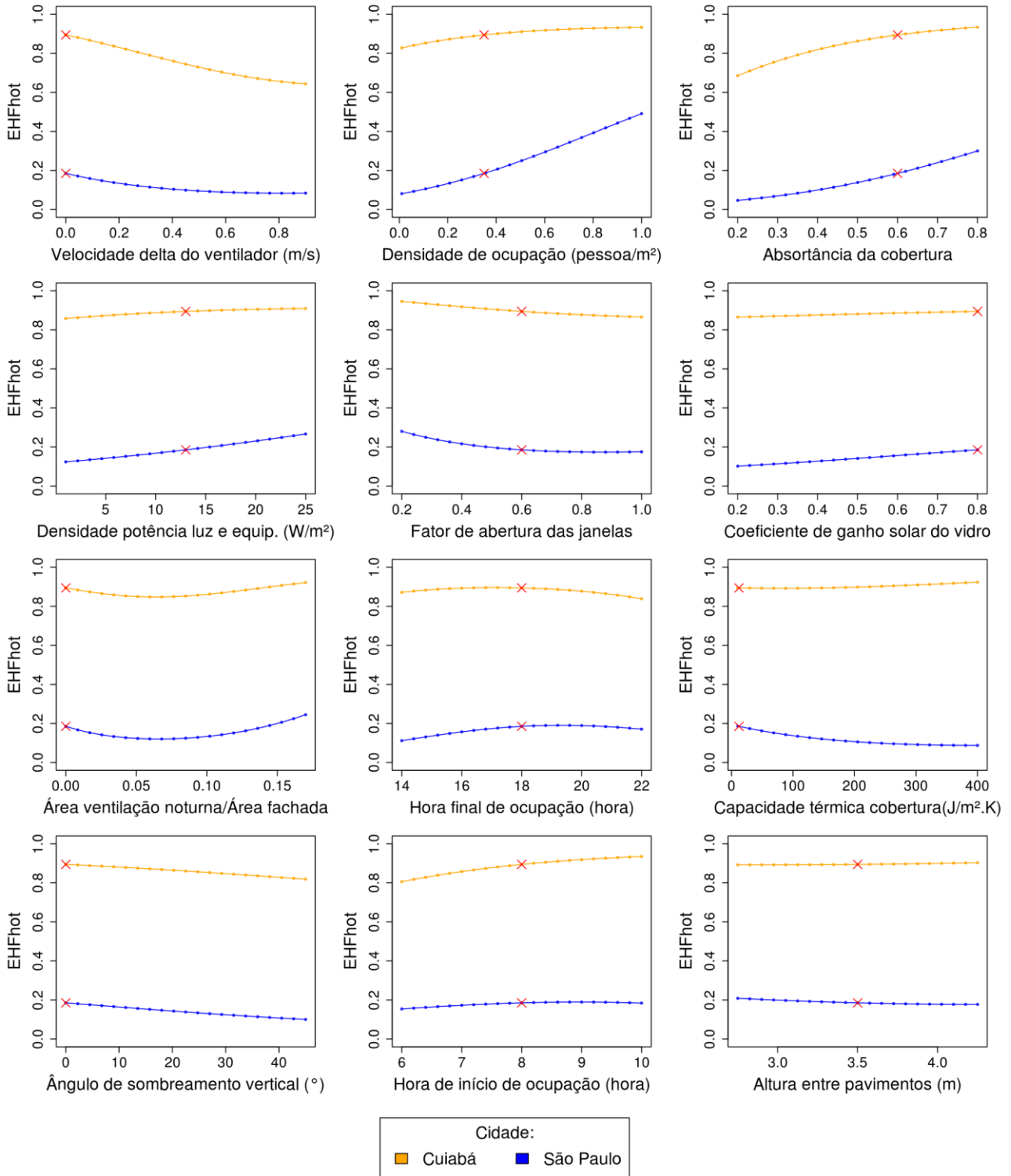


Figura 3 – Influência das variáveis de entrada nos resultados do metamodelo.

A fração de abertura na fachada das janelas destinadas à ventilação noturna apresentou comportamento similar para o clima quente e o ameno. Para ambos, os resultados apresentaram curvas convexas, com maior

sensibilidade para variações próximas do zero, chegando ao seu valor mínimo quando a fração é igual a 0,068. O aumento no EHF_{hot} quando a área da ventilação noturna continua a crescer pode ser pela facilitação da entrada do ar quente durante o dia.

A variável ângulo de sombreamento vertical variou de forma aproximadamente linear. O impacto foi mais expressivo para a cidade de São Paulo, reduzindo 0,085 do EHF_{hot} , comparando o valor máximo de 90 graus com o valor mínimo de 0 graus. Para a cidade de Cuiabá, esta redução foi de 0,076.

A variação do dado de entrada coeficiente de ganho solar do vidro apresentou maior sensibilidade para o clima de São Paulo, que reduziu o EHF_{hot} em 0,083 quando teve seu valor alterado de 0,8 para 0,2. A redução observada para o clima de Cuiabá foi de 0,029.

A absorvância da cobertura teve grande impacto para ambos os climas. Os valores de absorvância térmica da cobertura variaram de 0,8 a 0,2, reduzindo o EHF_{hot} em 0,248 para o clima de Cuiabá, e 0,254 para o clima de São Paulo. Os resultados do metamodelo são diferentes para os climas analisados. Em Cuiabá, a curva é côncava, indicando maior sensibilidade para os valores de absorvância térmica próxima de 0,2; enquanto que em São Paulo a curva é convexa, com sensibilidade maior para valores de absorvância térmica mais próximos de 0,8. A redução na absorvância das coberturas é uma medida que se mostra uma solução eficiente para ambos os climas.

Observa-se que a variável capacidade térmica da cobertura também apresenta comportamentos diferentes para os diferentes climas. Em Cuiabá, a variação na capacidade térmica da cobertura de 10 kJ/m²K para 400 kJ/m²K aumentou o EHF_{hot} em 0,032. Já para a cidade de São Paulo, essa variação possibilitou a redução de 0,099 no EHF_{hot} , apresentando maior sensibilidade para capacidades térmicas menores.

O resultado de EHF_{hot} do metamodelo se mostrou mais sensível à densidade de ocupação para o clima de São Paulo, conforme mencionado anteriormente. Para o clima de Cuiabá, a taxa de variação do EHF_{hot} diminui à medida que a densidade de ocupação aumenta, enquanto que, para São Paulo, a taxa de variação do EHF_{hot} aumenta à medida que a densidade de ocupação aumenta. O calor gerado pelos ocupantes é algo de influência relevante na temperatura dos ambientes.

Para variação nos dados de entrada referentes à densidade de potência do sistema de iluminação e equipamentos nas salas, o metamodelo apresentou comportamento semelhante ao resultado da variação da densidade de ocupação, mas com um menor impacto. As diferenças entre o máximo de 25W/m² e mínimo de 1W/m² foram 0,052 para a cidade de Cuiabá e de 0,143 para a cidade de São Paulo.

As variações realizadas nos horários de ocupação foram das 6h00 às 10h00 para início e das 14h00 às 22h00 para fim. Cuiabá apresentou maior sensibilidade para variações na hora de início de ocupação (6h00 às 10h00). Para esse clima, iniciar o expediente mais cedo pode diminuir consideravelmente a fração final de horas de calor. Devido à forte irradiação solar, horários de ocupação mais afastados do meio dia garantem maior conforto térmico. A variação nesse dado de entrada para Cuiabá apresentou uma diferença no EHF_{hot} de 0,129. Para São Paulo, essa diferença foi 0,035. Para a hora final de ocupação (14h00 às 22h00), a cidade de São Paulo apresentou maior sensibilidade, com diferença de 0,079, enquanto que a cidade de Cuiabá apresentou uma diferença de 0,057. Ambos os climas apresentaram comportamento semelhante para a hora final de ocupação. Próximo das 14 horas, têm EHF_{hot} menor, porém a medida que a hora final de ocupação aumenta, o EHF_{hot} cresce. No entanto, estender o horário de expediente para após às 20 horas diminui o EHF_{hot} , devido às temperaturas mais baixas no período da noite.

Variando os dados de entrada entre os limites mínimos e máximos, observou-se que o metamodelo se comporta de acordo com o esperado na predição do desempenho térmico de edificações. Para o edifício modelado, as variáveis mais impactantes nos resultados foram a densidade de ocupação, a velocidade delta do ventilador e a absorvância da cobertura.

Os metamodelos para a predição de desempenho térmico de edificações são ferramentas de grande utilidade, sendo de fácil aplicação e possibilitando amplamente seu uso. Além disso, permite que os usuários analisem como as características dos edifícios e do clima podem influenciar no conforto dos usuários. Observa-se que o método estatístico de Regressão por Vetores de Suporte adotado para o desenvolvimento do metamodelo foi capaz de entender a influência dos dados de entrada no dado de saída. A aplicação deste método estatístico permitiu abranger diferentes combinações de dimensões de tipologia e dados de entrada em uma única equação.

5. CONCLUSÕES

O objetivo principal deste trabalho foi avaliar a precisão de um método para avaliação de edifícios ventilados naturalmente. Com base nos resultados é possível ressaltar as seguintes conclusões:

- o método estatístico de Regressão por Vetores de Suporte adotado para o desenvolvimento do metamodelo foi capaz de entender a influência dos dados de entrada no dado de saída, gerando resultados com boa precisão;
- o clima da cidade de São Paulo apresentou a menor diferença entre os resultados do metamodelo e do programa *EnergyPlus* (0,3%), seguido do clima de Porto Alegre (1,6%). As maiores diferenças foram observadas para as cidades de Rio de Janeiro (10,5%) e Cuiabá (8,8%);
- a variável de entrada mais representativa no dado de saída do metamodelo para a cidade de São Paulo é a densidade de ocupação, com um aumento do EHF_{hot} de 0,410, comparando o valor de densidade mínimo de 0,01 pessoas/m² com o máximo de 1 pessoas/m²;
- a variável de entrada mais representativa para a cidade de Cuiabá foi a velocidade delta do ventilador, com um aumento do EHF_{hot} de 0,251, comparando o valor mínimo de 0 m/s com o máximo de 0,9 m/s;
- os resultados do metamodelo se apresentaram menos precisos para climas mais quentes, possivelmente devido ao comportamento da radiação solar no metamodelo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ASHRAE – AMERICAN SOCIETY OF HEATING, REFRIGERATING AND AIR-CONDITIONING ENGINEERS. **ASHRAE 55-2013: Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy**, ASHRAE. Atlanta, 2013.
- BRASIL. **Decreto n. 4.059, de 19 de dezembro de 2001**. Regulamenta a Lei no 10.295, de 17 de outubro de 2001, que dispõe sobre a Política Nacional de Conservação e Uso Racional de Energia, e dá outras providências. Brasília, DF, 2001a. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/decreto/2001/d4059.htm Acesso em: 21 março 2017.
- BRASIL. **Lei n. 10.295, de 17 de outubro de 2001**. Dispõe sobre a Política Nacional de Conservação e Uso Racional de Energia. Brasília, DF, 2001b. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/LEIS_2001/L10295.htm Acesso em: 21 março 2017
- BRASIL. Instituto Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial (INMETRO). **Portaria nº 18, de 16 de janeiro de 2012**. Regulamento Técnico da Qualidade do Nível de Eficiência Energética de Edifícios Residenciais. Rio de Janeiro, 2012. Disponível em: <http://www.inmetro.gov.br/legislacao/rtac/pdf/RTAC001788.pdf> Acesso em: 01 mar. 2017
- BRASIL. Ministério do desenvolvimento, indústria e comércio exterior. Instituto Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial – INMETRO. **Portaria nº 18, de 16 de janeiro de 2012**. Regulamento Técnico da Qualidade para o Nível de Eficiência Energética de Edificações Residenciais (RTQ-R). Rio de Janeiro, 2012. Disponível em: <http://www.inmetro.gov.br/legislacao/rtac/pdf/RTAC001788.pdf> Acesso em: 22 de setembro 2014
- CHANG C-C.; LIN C-J. LIBSVM: a library for support vector machines. **ACM Transactions on Intelligent Systems and Technology**, v. 2, p. 1–27, abril de 2011.
- ENERGYPLUS - D.O.E.- U.S. **Department of Energy**. Whole Building Simulation Program, 2013. Disponível em: <http://apps1.eere.energy.gov/buildings/energyplus>. Acesso em: 21 de outubro 2014.
- HENSEM, J. L.M.; LAMBERTS, R. **Introduction to building performance simulation**. In: Building performance simulation for design and operation. New York: Spon Press, 2011. p. 1–14.
- IBGE – INDICE BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA - IBGE. **Projeção da população do Brasil e das Unidades da Federação**. Disponível em <http://www.ibge.gov.br/apps/populacao/projecao> Acesso em: 15 de Fevereiro de 2017.
- LABEEE – Laboratório de Eficiência Energética em Edificações. **Arquivos climáticos INMET 2016**. Disponível em: <http://www.labeee.ufsc.br/downloads/arquivos-climaticos/inmet2016> Acesso em: 19 de outubro 2016.
- MARA, T., TARANTOLA, S. Application of global sensitivity analysis of model output to building thermal simulations, **Building Simulation**. v. 1, p. 290–302, 2008.
- MELO, A. P., VERSAGE, R. S., SAWAYA, G., LAMBERTS, R. A novel surrogate model to support building energy labelling system: A new approach to assess cooling energy demand in commercial buildings, **Energy and Buildings**. v. 131, p. 233–247, 2016.
- PÉREZ-LOMBARD, L.; OTIZ J.; POUT, C. A review on buildings energy consumption information, **Energy and Buildings**. v. 40, p. 394–398, 2008.
- RACKES, A.; MELO; A. P.; LAMBERTS, R. Naturally comfortable and sustainable: Informed design guidance and performance labeling for passive commercial buildings in hot climates, **Applied Energy**, v. 174, p. 256–274, Julho de 2016.
- SORGATO, M. J. Desempenho Térmico De Edificações Residenciais Unifamiliares Ventiladas Naturalmente. Florianópolis: **Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil**, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2009.

AGRADECIMENTOS

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