

ANÁLISE DE SENSIBILIDADE DO METAMODELO DA ETIQUETAGEM BRASILEIRA: EDIFICAÇÕES RESIDENCIAIS¹

ELI, L. G., Universidade Federal de Santa Catarina, e-mail: leticia.eli@hotmail.com;
MAZZAFERRO, L., Universidade Federal de Santa Catarina, e-mail:
leonardo.mazzaferro@gmail.com; OLINGER, M. S., Universidade Federal de Santa Catarina,
e-mail: marcelo.olinger@gmail.com; MACHADO, R. M. S., Universidade Federal de Santa
Catarina, e-mail: rmauricio.eng@gmail.com; MELO, A. P., Universidade Federal de Santa
Catarina, e-mail: apaula_melo@hotmail.com; FOSSATI, M., Universidade Federal de Santa
Catarina, e-mail: michele.fossati@ufsc.br; LAMBERTS, R., Universidade Federal de Santa
Catarina, e-mail: roberto.lamberts@ufsc.br

ABSTRACT

The main objective of this study is to verify the relation between input parameters and thermal load output of a metamodel, based on sensitivity analysis. The study is based on a metamodel developed to assess the thermal load of residential buildings. One residential typology, located in the cities of São Paulo, Belém and Curitiba was adopted. Maximum and minimum values of input data were determined to represent the different combinations among the Brazilian residential buildings. The analysis was carried out by changing one parameter per time, according to a base case pre-determined. The sensitivity analysis was able to describe the influence of each parameter on the metamodel output – cooling and heating thermal load. The results show that the metamodel was able to describe the relation between inputs and output parameter. Therefore, it was observed that the influence of each input data depends on the case and climate analyzed.

Keywords: Surrogate model. Sensitivity analysis. Building parameters.

1 INTRODUÇÃO

O desenvolvimento de metamodelos tem o objetivo de facilitar às análises desejadas pelo usuário. Tais ferramentas podem ser elaboradas através de um banco de dados de simulações computacionais. Os métodos de amostragem e estatísticos adotados para o seu desenvolvimento variam, e a sua complexidade depende do uso final à qual são destinados.

No Brasil ressalta-se o desenvolvimento de metamodelos para iniciativas de eficiência energética de edificações, como o Regulamento Técnico da Qualidade para o Nível de Eficiência Energética de Edifícios Residenciais (RTQ-R) (INMETRO, 2012) e Comerciais, de Serviços e Públicos (RTQ-C) (INMETRO, 2010). O metamodelo do RTQ-R foi baseado em estudos que utilizaram métodos estatísticos para compreender o comportamento de milhares de simulações computacionais e chegar em uma regressão linear múltipla, capaz de avaliar a envoltória da edificação.

Devido às limitações abordadas na literatura frente a aplicação do metamodelo, viu-se a necessidade de aprimorá-lo, trazendo maior precisão para a avaliação da envoltória (SILVA *et al.*, 2016; SORGATO *et al.*, 2016). Com

¹ ELI, L. G., *et al.* Análise de sensibilidade do metamodelo da etiquetagem brasileira: edificações residenciais. In: ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 17., 2018, Foz do Iguaçu. Anais... Porto Alegre: ANTAC, 2018.

base nas limitações observadas, o CB3E (2018) desenvolveu um novo metamodelo para o regulamento brasileiro, que nomeado Instrução Normativa do Inmetro (INI-R e INI-C), por meio da aplicação de redes neurais artificiais, para a análise da eficiência energética da envoltória. O novo metamodelo considera o uso da ventilação natural e do sistema de condicionamento de ar, resultando na análise da carga térmica de aquecimento, resfriamento e horas de conforto.

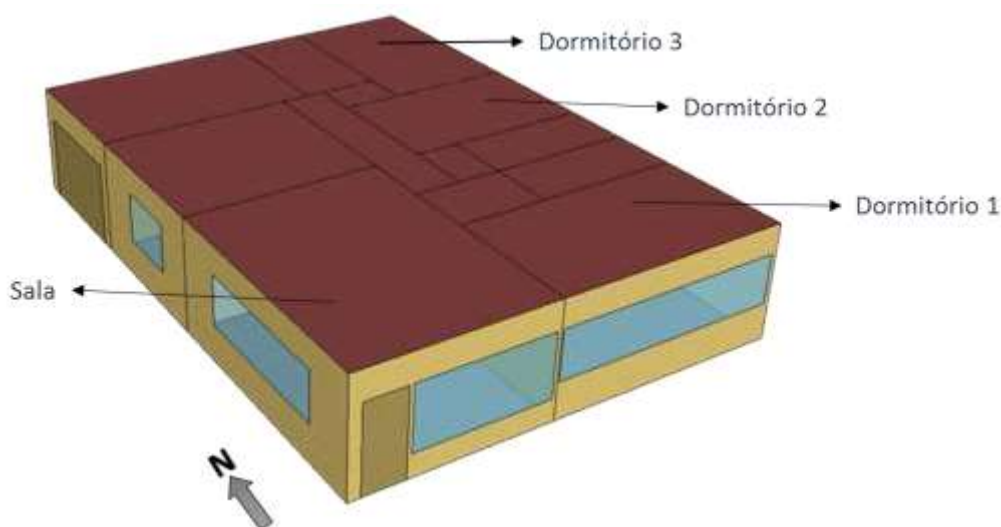
Rede neural é um método estatístico de inteligência artificial recomendado para predição de casos não-lineares, como as edificações (AHMAD et. al, 2014). Esse método é capaz de, com a inserção de diversas combinações de entradas e resultados, aprender com os casos expostos e predizer um valor, como por exemplo, carga térmica. Sendo possível desenvolver metamodelos. Porém, devido simplificações e o comportamento do modelo, a análise da precisão do metamodelo é necessária para entender o seu comportamento. Frente a isso, este artigo apresenta a análise de sensibilidade da precisão do novo metamodelo, considerando os limites máximos e mínimos dos dados de entrada e seus valores extrapolados. Foram analisadas as cidades: Curitiba, São Paulo e Belém.

2 MÉTODO

2.1 Dados de entrada

O método consiste em analisar parametricamente os dados de entrada do metamodelo, verificando os dados de saída. O caso base escolhido foi uma edificação unifamiliar de três dormitórios, com áreas de 18,75 m², 13,73 m² e 15,25 m², e sala com 30,90 m². A edificação não tem sombreamento, sendo o fator de abertura para ventilação 50% da área vão. O piso tem contato com o solo e a cobertura é exposta. As fachadas dos APPs com abertura são: D1: sul; D2 e D3: leste; e Sala: sul e oeste. A porcentagem de abertura nas fachadas varia de 25% a 49%. A perspectiva da tipologia é apresentada na Figura 1.

Figura 1 – Caso Base



Fonte: Autor (2018)

O estudo adotou três cidades: Belém Curitiba e São Paulo.

O metamodelo tem 32 entradas, sendo 4 climáticas. Os demais parâmetros são características geométricas e dos componentes da envoltória.

As 28 entradas abrangeram valores, entre um limite máximo e mínimo, definido para a aplicação do metamodelo. Estes limites são os valores treinados na rede neural. Para entender o comportamento da rede, buscou-se extrapolar os limites máximo e mínimo. Os valores estudados estão na Tabela 2.

Tabela 2 – Valores analisados no estudo

Parâmetro	Valores Mínimos		Valores Médios		Valores Máximos	
	Análise	INI-R	Análise	INI-R	Análise	INI-R
Absortância cobertura/parede	0,05 0,10	0,30	0,55	0,50	0,90 0,95	0,80
Área útil (m ²)	5,00	8,00	-	154,00	305,00 350,00	300,00
Capacidade térmica da cobertura/parede (kJ/m ² .K)	Leve (CT ≤ 50)		Média (50 < CT ≤ 200)		Pesada (200 < CT)	
Situação cobertura	Não exposta		-		Exposta	
Situação piso	Não exposto		-		Exposto	
Fator solar do vidro	0,12	0,22	-	0,55	0,97	0,87
Fator de ventilação aberturas	0,25	0,50	-	0,75	-	1,00
Altura da janela	-	-	-	0,50	-	1,00
Altura do pavimento (m)	-	0,00	-	25,00	55,00 75,00	50,00
Projeção - sombreamento (m)	-	0,00	-	1,00	2,50	2,00
Área de parede exposta (m ²)	-	-	-	75,00	200,00	150,00
Pé-direito (m)	2,00	2,50	-	3,75	5,50	5,00
Pilotis	Não possui		-		Possui	
Veneziana	Não possui		-		Possui	
Tipo de Pavimento	Madeira		-		Cerâmica	
Transmitância térmica cobertura/paredes (W/m ² .K)	0,25	0,50	-	2,00	3,75 4,00	3,50
Transmitância térmica do vidro (W/m ² .K)	2,00	2,80	-	4,25	6,00	5,70
Percentual de abertura em relação a fachada	0,05	0,10	-	0,50	0,95	0,90

Fonte: Autor (2018)

2.2 Dados de saída

O metamodelo apresenta os resultados em carga térmica (kWh/m².ano) para aquecimento e resfriamento, e a porcentagem das horas ocupadas em conforto para cada ambiente de permanência prolongada (APP). No item Resultados estão os valores de carga térmica de resfriamento para as três cidades adotadas, e os resultados de carga térmica de aquecimento para Curitiba e São Paulo.

3 RESULTADOS

Dentre os dados de entrada analisados, são apresentados os resultados para o parâmetro transmitância e capacidade térmica das paredes externas, exposição do piso (contato com o solo) e uso de venezianas.

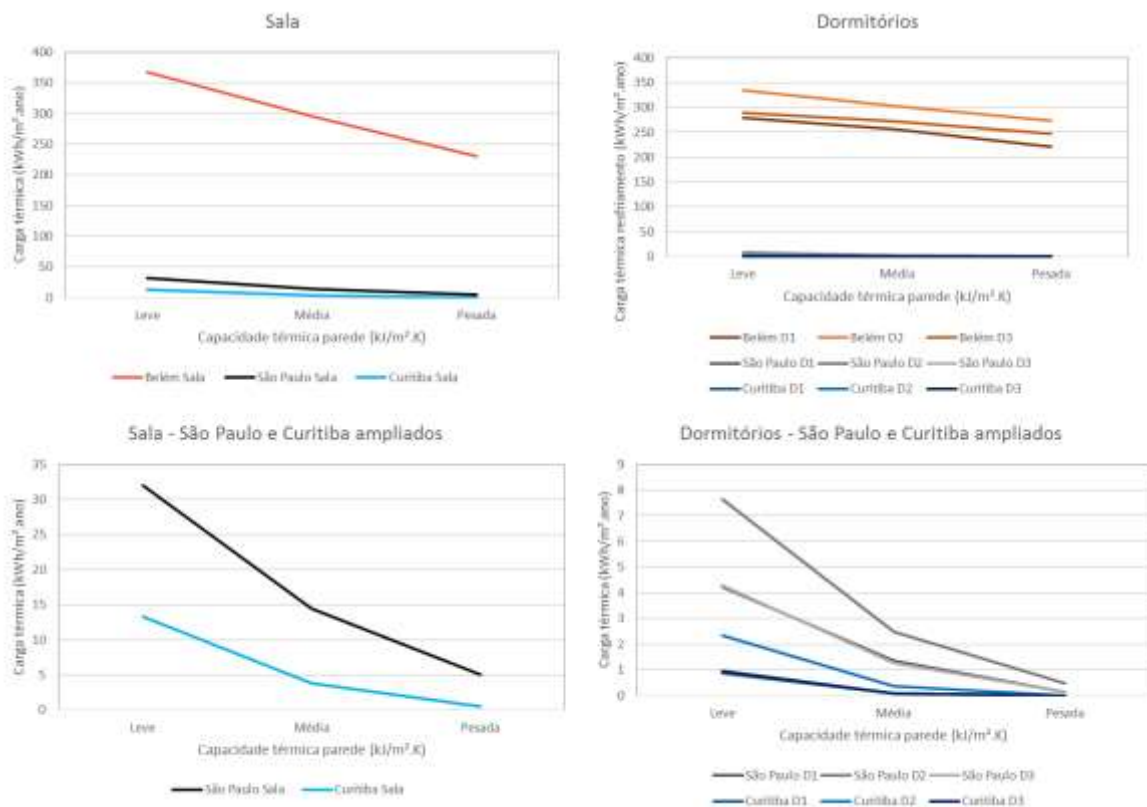
Em todos os gráficos é utilizada a abreviação D1, D2 e D3, para os dormitórios 1, 2 e 3, respectivamente. Destaca-se também que as figuras possuem escalas diferentes para melhorar a visualização do comportamento do resultado de carga térmica. O clima de Curitiba e São Paulo, por apresentarem valores inferiores a Belém, foram analisados separadamente.

Analisando os resultados, observa-se que o metamodelo respondeu de forma satisfatória para os dados de entrada que estão dentro do limite máximo e mínimo. Mesmo com os limites extrapolados, a inclinação do gráfico de carga térmica de aquecimento/resfriamento apresentou comportamento semelhante aos valores dentro dos limites para a maioria dos casos.

O APP D2, com uma fachada exposta (leste), foi o que obteve os maiores valores de carga térmica para refrigeração, por ter pouca área de troca com o ambiente externo e sendo composta por 42% em vidro. Já o D1 obteve os menores valores de carga térmica para refrigeração, possuindo duas fachadas externas (leste e sul).

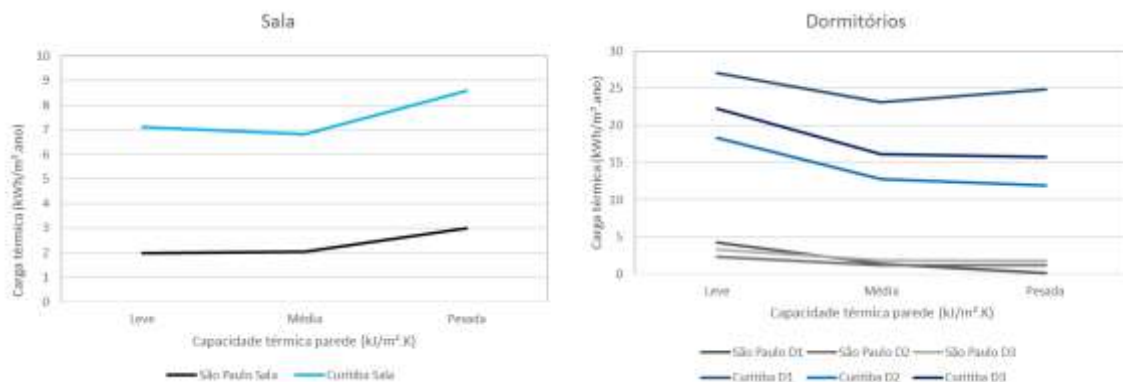
Para o dado de entrada capacidade térmica da parede, o metamodelo considera somente a informação: leve, média ou pesada. Este parâmetro apresentou o comportamento esperado de carga térmica, resfriamento (Figura 2) e aquecimento (Figura 3). Para a cidade de Belém, o aumento da capacidade térmica reduziu a carga térmica. São Paulo e Curitiba, tiveram o mesmo comportamento, porém a redução com a troca de leve para média foi maior do que de média para pesada.

Figura 2 – Capacidade térmica – resfriamento.



Fonte: Autor (2018)

Figura 3 – Capacidade térmica – aquecimento.



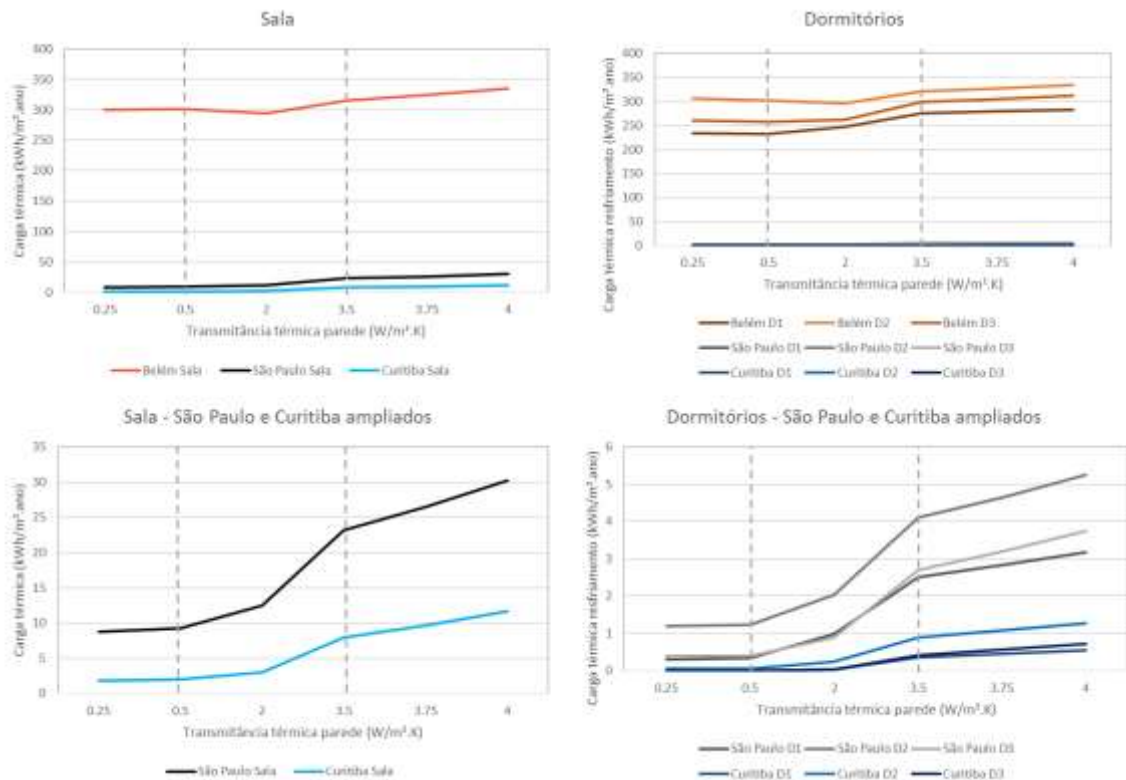
Fonte: Autor (2018)

Para a transmitância térmica das paredes externas, o metamodelo apresentou um aumento da carga térmica com o aumento deste parâmetro, porém não teve variação tão significativa. Com os limites extrapolados, o metamodelo teve comportamento semelhante aos valores dentro do limite de aplicação. Na Figura 4 é possível observar a variação para o resfriamento e na Figura 5 para o aquecimento. Em Belém, para a sala, quando utilizado o valor extrapolado de 0,25 W/m².K, a carga térmica encontrada foi de 300 kWh/m².ano. Para 2,00 W/m².K, o valor foi 6 kWh/m².ano menor. Em São Paulo e Curitiba os valores seguem o mesmo padrão, porém com grandezas

inferiores, na casa de 0 kWh/m².ano até 30 kWh/m².ano.

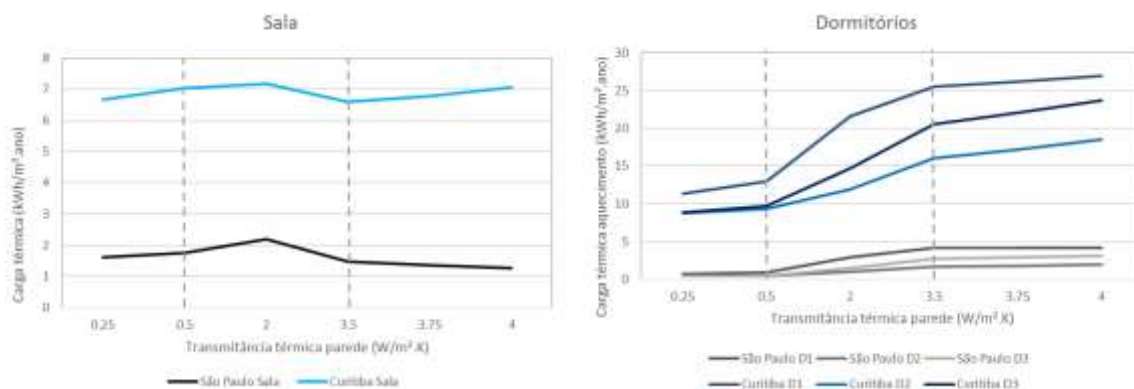
As linhas tracejadas verticais nos indicam os limites do metamodelo.

Figura 4 – Transmitância térmica – resfriamento.



Fonte: Autor (2018)

Figura 5 – Transmitância térmica – aquecimento.

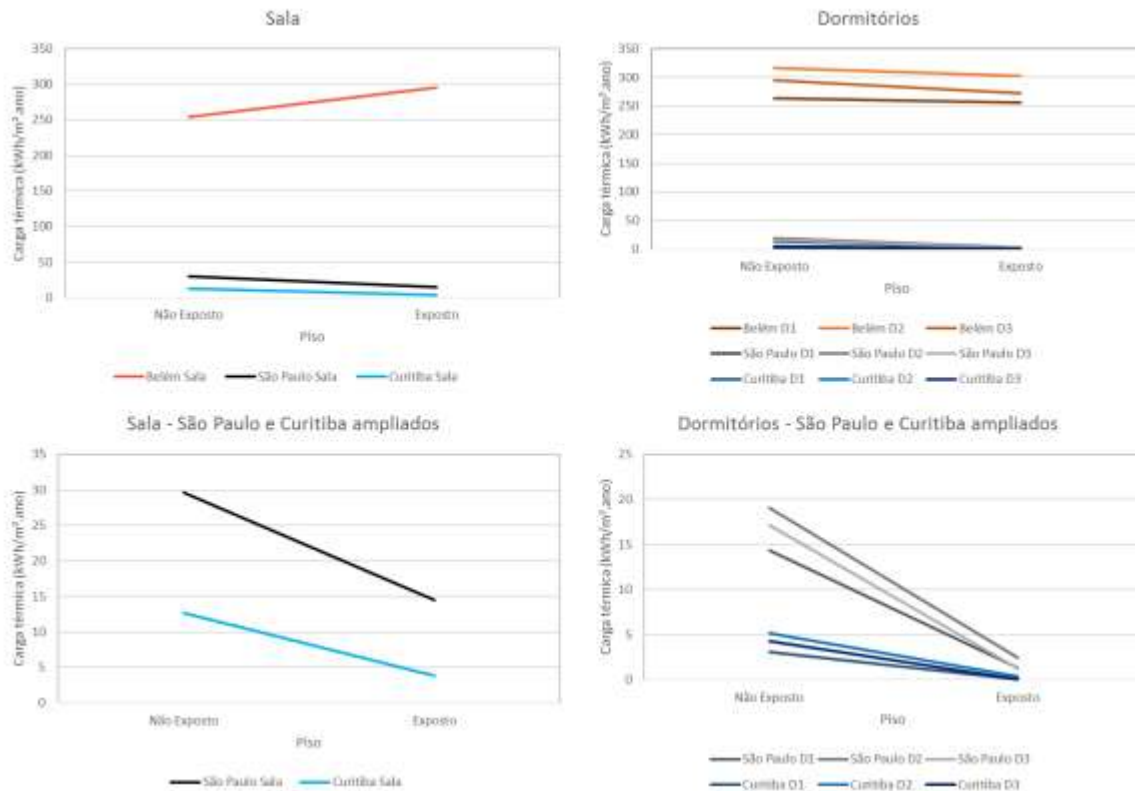


Fonte: Autor (2018)

Para a exposição do piso ao solo, somente a sala em Belém aumentou a sua carga térmica com a exposição. Nos demais ambientes houve redução. Em Belém, nos dormitórios, a carga térmica reduziu entre 3% e 9%. Em Curitiba, para o resfriamento, a carga térmica reduziu 70% na sala, e nos dormitórios 93% a 98%, chegando a valores de 0,09 kWh/m².ano. Para o aquecimento, houve aumento de aproximadamente 15% nos dormitórios. Na sala houve

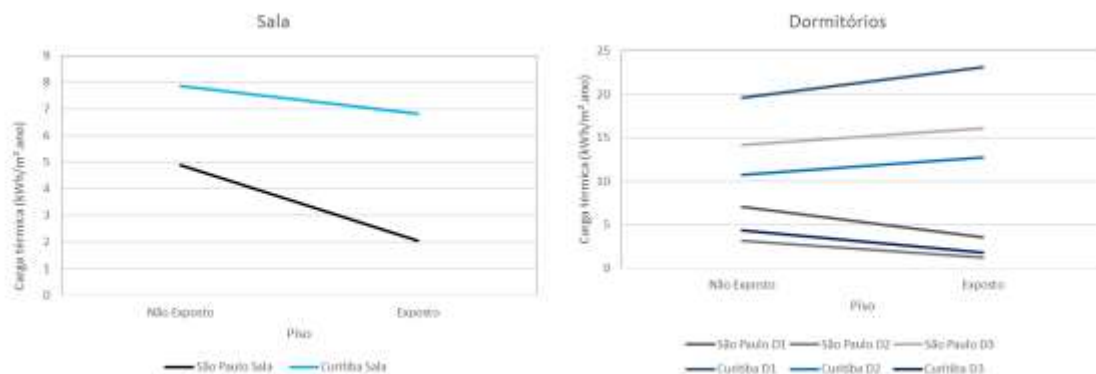
redução. Em São Paulo o comportamento foi semelhante a Curitiba para o resfriamento. A necessidade de aquecimento reduziu em todos os ambientes. Os resultados estão nas Figura 8 e Figura 9.

Figura 8 – Exposição do piso – resfriamento.



Fonte: Autor (2018)

Figura 9 – Exposição do piso – aquecimento.

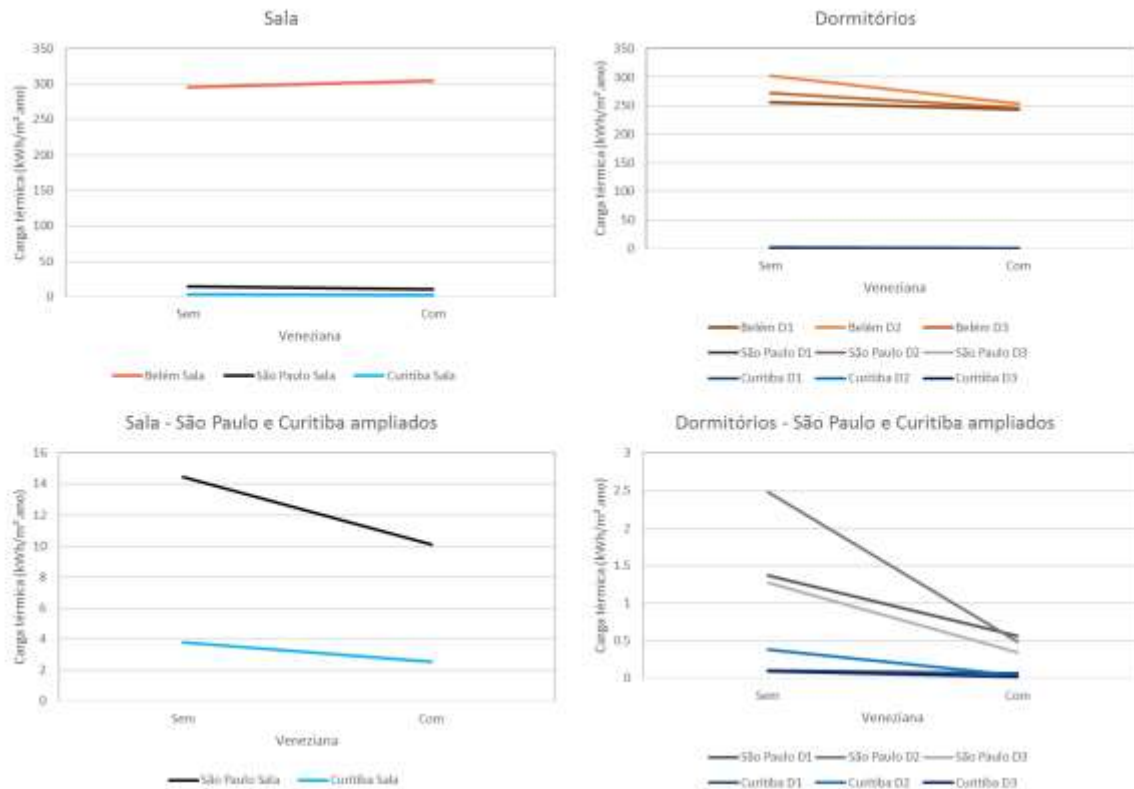


Fonte: Autor (2018)

Para a veneziana, o impacto nos climas mais amenos foi maior do que em Belém. Em valores absolutos para resfriamento, Belém teve redução de 13 kWh/m².ano, 48 kWh/m².ano, 26 kWh/m².ano, nos dormitórios 1, 2 e 3, respectivamente; e aumento de 10 kWh/m².ano na sala. Os climas de São Paulo e Curitiba tiveram reduções entre 0,03 kWh/m².ano e 2 kWh/m².ano de carga térmica para resfriamento nos dormitórios; e de 4 kWh/m².ano e 1

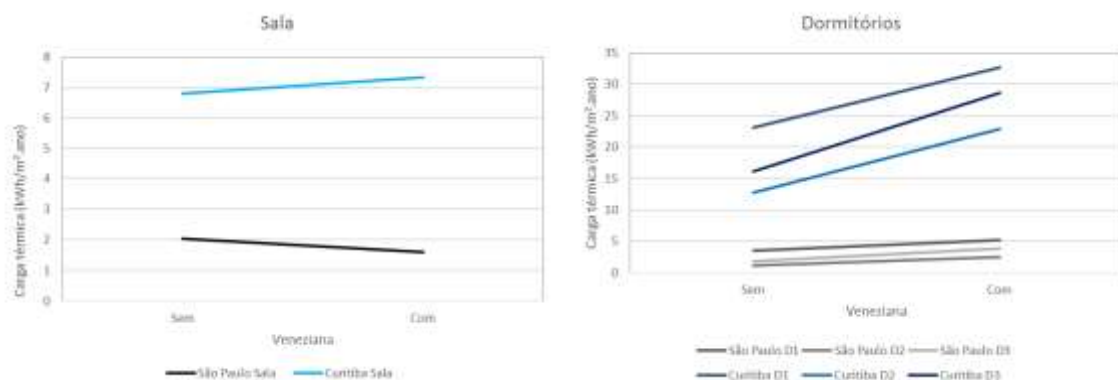
kWh/m².ano para a sala. Esses resultados podem ser visualizados na Figura 10. A necessidade de aquecimento, como apresentada na Figura 11, aumentou com a utilização de veneziana.

Figura 10 – Uso da veneziana – resfriamento.



Fonte: Autor (2018)

Figura 11 – Uso da veneziana – aquecimento.



Fonte: Autor (2018)

Pela análise de sensibilidade, foi possível perceber que o novo metamodelo, da etiquetagem de edificações residenciais brasileiras, responde satisfatoriamente, apresentando algumas inconsistências para valores fora dos limites abordados pela rede neural. Como o usuário poderá utilizar o método simplificado somente para determinados limites, essas inconsistências não afetarão a classificação do nível de eficiência energética da envoltória

da edificação.

O comportamento da veneziana mostra que a influência do dispositivo e sua modelagem necessitam de maior estudo, para verificar se essa pequena influência é próxima ao real ou se o modelo está subestimando a sua interação com a edificação.

4 CONCLUSÕES

Metamodelos são ferramentas de predição aproximada e devido a interação dos diversos parâmetros podem apresentar resultados não satisfatórios para alguns casos. Com base nos resultados é possível traçar as seguintes conclusões:

- O metamodelo responde satisfatoriamente à influência dos dados de entrada no dado de saída;
- A combinação dos dados de entrada de uma edificação pode representar em aumento ou redução na carga térmica da edificação;
- A economia de energia depende do clima e das combinações entre os parâmetros da edificação analisada.

REFERÊNCIAS

AHMAD, A. S.; HASSAN, M. Y.; ABDULLAH, M. P.; RAHMAN, H. A.; HUSSIN, F.; ABDULLAH, H.; SAIDUR, R. A review on applications of ANN and SVM for building electrical energy consumption forecasting. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v.33, p 102-109, 2014.

CENTRO BRASILEIRO DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA EM EDIFICAÇÕES – CB3E.

Desenvolvimento do metamodelo para avaliação do nível de eficiência da envoltória de edificações residenciais. Disponível em:

<<http://cb3e.ufsc.br/etiquetagem/desenvolvimento/atividades-2012-2016/trabalho-1/pesquisas>> Acesso em: 30 janeiro de 2018.

INSTITUTO NACIONAL DE METROLOGIA, NORMALIZAÇÃO E QUALIDADE INDUSTRIAL -

INMETRO. Portaria 372, de 17 de setembro de 2010. **Regulamento Técnico da Qualidade do Nível de Eficiência Energética de Edificações Comerciais, de Serviços e Públicas.** Rio de Janeiro, 2010. Disponível em:

<http://www.pbeedifica.com.br/sites/default/files/projetos/etiquetagem/comercial/downloads/Port372-2010_RTQ_Def_Edificacoes-C_rev01.pdf> Acesso em: março de 2018.

INSTITUTO NACIONAL DE METROLOGIA, NORMALIZAÇÃO E QUALIDADE INDUSTRIAL -

INMETRO. Portaria 18, de 16 de janeiro de 2012. **Regulamento Técnico da Qualidade do Nível de Eficiência Energética de Edificações Residenciais.** Rio de Janeiro, 2012.

Disponível em: <

<http://www.pbeedifica.com.br/sites/default/files/projetos/etiquetagem/residencial/downloads/RTQR.pdf>> Acesso em: março de 2018.

SILVA, A. S.; ALMEIRA, L. S. S.; GHISI, ENEDIR. Análise de incertezas físicas em simulação computacional de edificações residenciais. **Revista Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 17, n. 1, p.289-303, 2016.

SORGATO, M. J.; MELO, A. P.; LAMBERTS, R. The effect of window opening ventilation control on residential building energy consumption. **Energy and Buildings**, v. 133, p. 1-13, 2016.