

## **ANÁLISE DA PRECISÃO DE UM METAMODELO PARA A AVALIAÇÃO DA ENVOLTÓRIA DE ACORDO COM O REGULAMENTO BRASILEIRO DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA EM EDIFICAÇÕES**

**Mateus Vinícius Bavaresco (1); Leonardo Mazzaferro (2); Ana Paula Melo (3); Roberto Lamberts (4)**

- (1) Mestre em Engenharia Civil, Doutorando do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, mateus.bavaresco@posgrad.ufsc.br, Universidade Federal de Santa Catarina, Laboratório de Eficiência Energética em Edificações, Florianópolis
- (2) Mestre em Engenharia Civil, Doutorando do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, leonardo.mazzaferro@posgrad.ufsc.br, Universidade Federal de Santa Catarina, Laboratório de Eficiência Energética em Edificações, Florianópolis
- (3) 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
- (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 verifica a precisão de uma proposta de metamodelo desenvolvido para a avaliação da envoltória do Método Prescritivo do Regulamento Técnico da Qualidade do Nível de Eficiência Energética de Edifícios Comerciais, de Serviços e Públicos do Brasil (RTQ-C), através da utilização da análise de sensibilidade. O estudo adotou cinco tipologias comerciais, localizadas nas cidades de São Paulo, Belém e Curitiba. Foram analisados diferentes casos, variando os dados de entrada de acordo com os pré-requisitos dos níveis de eficiência A e D de acordo com o RTQ-C e da ASHRAE Standard 90.1. Os casos foram analisados por meio de simulação computacional e com a aplicação do metamodelo, a fim de realizar comparações dos resultados. Com base nos resultados, conclui-se que o método proposto apresenta boa predição na determinação da carga térmica de edificações, podendo ser aplicado futuramente no RTQ-C.

Palavras-chave: Simulação computacional; Metamodelo; Análise de sensibilidade, RTQ-C

### **ABSTRACT**

The main objective of this study is to verify the accuracy of a metamodel developed to assess the thermal load of commercial buildings, based on sensitivity analysis. The study is based on the simplified model to evaluate the building envelope presented in the Regulation for Energy Efficiency Labelling of Commercial Buildings in Brazil (RTQ-C). The study adopted five commercial typologies, located in the cities of São Paulo, Belém and Curitiba. Different cases were analyzed by varying the input data according to the prerequisites of efficiency levels A and D according to the RTQ-C and the ASHRAE Standard 90.1. The cases were analyzed through computational simulation and the application of the metamodel, in order to compare the results. Therefore, results of this work may have a profound impact in the thermal load of buildings and may be applied in the future in the RTQ-C.

Keywords: Computational simulation; Surrogate model; Sensitivity analysis; RTQ-C

## 1. INTRODUÇÃO

As edificações podem ser descritas através de um conjunto de dados, os quais podem ser encontrados em projetos de engenharia e arquitetura. A simulação computacional consegue abranger este conjunto de dados em um modelo que represente a edificação. Os materiais, as dimensões e outras informações da edificação são utilizados para estimar o seu desempenho energético. Uma série de condições de contorno são aplicadas para a resolução de equações físicas e cálculo das transferências de calor entre as zonas térmicas do modelo de simulação (HENSEN; LAMBERTS, 2011). Para representar uma edificação, também podem ser utilizados modelos estatísticos, baseados apenas em dados de entradas e saídas. Os dados de entrada de uma edificação referem-se aos elementos construtivos e seus respectivos sistemas e características; e o dado de saída analisado vai depender do objetivo final da simulação (consumo de energia, carga térmica, entre outros). Apesar de consideravelmente mais rápidos, os modelos estatísticos encontram dificuldade em reproduzir o comportamento real das edificações, pois carecem dos princípios de conservação de energia. O desenvolvimento de um metamodelo possibilita combinar as vantagens dos modelos computacionais e estatísticos. A elaboração de um modelo implica na diminuição do grau de complexidade do sistema original para permitir sua aplicação, sem perder informações relevantes ao longo do processo (AGUIRRE, 2007).

Com o objetivo de reduzir o consumo de energia das edificações, normas e regulamentos de desempenho termoenergético vêm sendo desenvolvidos nas últimas décadas em diversos países, inclusive no Brasil. Muitas destas normas e regulamentos adotam os metamodelos para a predição da eficiência energética da operação de edificações. Regulamentos, certificações e códigos de energia visam sensibilizar os consumidores sobre o uso racional de energia e incentivar melhorias no mercado imobiliário (VERSAGE, 2015).

Em 2009 foi publicado o Regulamento Técnico da Qualidade para o Nível de Eficiência Energética em Edifícios Comerciais, de Serviço e Públicos (RTQ-C) (BRASIL, 2012). A implementação deste regulamento marcou o processo de melhoria da eficiência energética das edificações brasileiras. O regulamento classifica as edificações de acordo com cinco níveis. A classificação pode ser obtida através do Método Prescritivo, baseado em uma equação que atribui pesos a cada requisito, ou através do Método de Simulação, o qual prevê a utilização de um programa de simulação computacional. O regulamento vigente oferece um metamodelo baseado em uma regressão linear múltipla para avaliação da envoltória de edificações, mas possui diversas limitações e críticas: a representação da volumetria da edificação (MELO *et al.*, 2011), a diferenciação de área envidraçada e proteções solares por orientação solar da fachada (CASTRO; WESTPHAL, 2011), a aplicação de vidros de controle solar (FOSSATI; LAMBERTS, 2010), o uso de apenas um padrão de carga térmica interna e padrão de uso e ocupação, entre outros. Estas limitações ocorrem especialmente quando o desenvolvimento do modelo engloba poucas tipologias ou tipologias semelhantes, o que prejudica a aplicação do modelo em condições diferentes das encontradas nas tipologias consideradas (AL GHARABLY; DECAROLIS; RANJITHAN, 2015). O sucesso dos programas de certificação energética de edificações depende da credibilidade da economia de energia alcançada e na relação de custo-benefício em obter classificações superiores (PÉREZ-LOMBARD *et al.*, 2009).

Para superar as limitações encontradas no modelo vigente do regulamento brasileiro, a nova proposta consiste no desenvolvimento de um metamodelo para predição da carga térmica de cada zona térmica da edificação. Por recomendação do Apêndice G da ASHRAE Standard 90.1, a edificação é dividida de acordo com as áreas que apresentam mesma densidade de cargas térmicas internas (pessoas, equipamentos e iluminação), além de ser dividida em zonas térmicas interiores e perimetrais. O metamodelo proposto por Melo *et al.* (2016) realiza a predição da carga térmica baseado em uma rede neural artificial, treinada a partir de casos simulados. Os casos simulados foram escolhidos a partir de amostragem por Hipercubo Latino em um universo de possíveis combinações. Entre as variáveis consideradas na elaboração do modelo preditivo estão parâmetros físicos e geométricos da edificação, além de condições de contorno e variáveis climáticas, dentre as quais destacam-se: transmitância, capacidade e absortância térmica das paredes e coberturas; transmitância térmica dos vidros; percentual de abertura de janelas na fachada; ângulos de sombreamento; carga interna instalada; e padrões de uso. O modelo preditivo em questão permite estimar os resultados de carga térmica interna de edificações em algumas das maiores cidades brasileiras, em sua maioria, capitais estaduais. Após o desenvolvimento de um metamodelo, é importante verificar a magnitude dos erros encontrados nas predições e em que condições estes ocorrem. Através de análises de sensibilidade, é possível determinar a influência da variação dos parâmetros no resultado obtido, e conseqüentemente verificar a precisão do metamodelo na predição. Aplicadas em simulações de desempenho de edificações, as análises de sensibilidade servem como critérios de apoio para decisões de projeto (HOPFE; AUGENBROE; HENSEN, 2013).

## 2. OBJETIVO

O objetivo deste artigo é verificar a precisão do metamodelo desenvolvido por Melo *et al.* (2016) para avaliação da envoltória do Método Prescritivo do Regulamento Técnico da Qualidade do Nível de Eficiência Energética de Edifícios Comerciais, de Serviços e Públicos do Brasil através da utilização da análise de sensibilidade.

## 3. MÉTODO

Na Figura 1 é apresentado o fluxograma do método adotado para o desenvolvimento deste artigo. Destaca-se que as “tipologias” se referem às dimensões das edificações avaliadas; enquanto os “casos” estão relacionados aos níveis de eficiência energética testados. As simulações serão realizadas através do programa EnergyPlus, considerando cinco casos com diferentes pré-requisitos dos dados da envoltória e do sistema de iluminação.

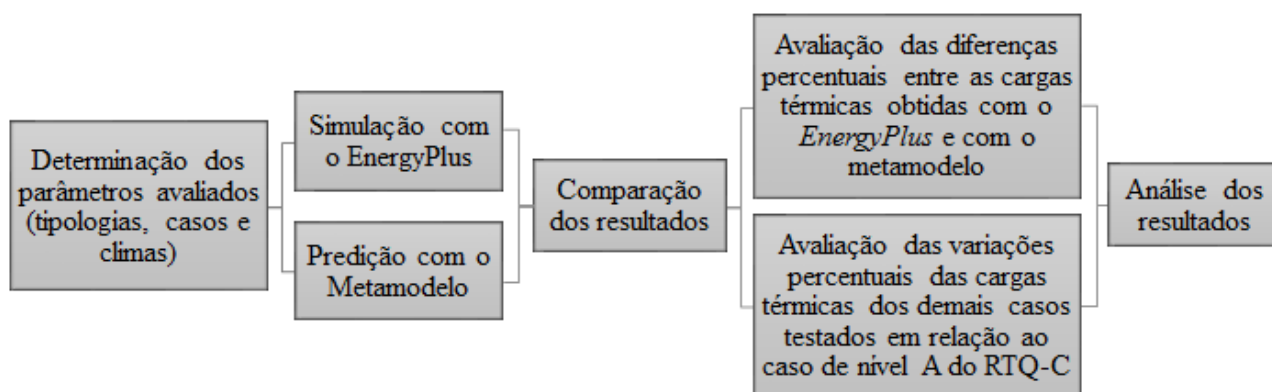


Figura 1 – Fluxograma do método utilizado nesta pesquisa.

### 3.1 Obtenção das cargas térmicas com o *EnergyPlus* e com o metamodelo

Inicialmente foram obtidas as cargas térmicas das edificações avaliadas com a aplicação do *EnergyPlus* versão 8.0 e com a aplicação do metamodelo, a fim de realizar as comparações propostas. Neste tópico são detalhadas as características das simulações e predições realizadas.

#### 3.1.1. Tipologias avaliadas

Foram avaliadas cinco tipologias de edificação de escritório, determinadas por meio de levantamento de dados em campo a fim de obter modelos representativos do cenário nacional. Os levantamentos foram realizados pelo Centro Brasileiro de Eficiência Energética em Edificações (CB3E, 2016). Na Tabela 1 são apresentados os detalhes das tipologias avaliadas.

Tabela 1 – Detalhes das tipologias avaliadas.

Tipologia	Dimensões (m)	Número de pavimentos	Área total (m <sup>2</sup> )
1	9,00 x 9,00	10	810,00
2	12,00 x 15,00	10	1.800,00
3	20,00 x 25,00	10	5.000,00
4	34,64 x 43,30	25	37.497,80
5	50,00 x 50,00	10	25.000,00

#### 3.1.2. Casos analisados

Foram analisados cinco casos para cada tipologia avaliada:

- CASO 1: Modelo de acordo com os pré-requisitos de envoltória e iluminação do nível A do RTQ-C;
- CASO 2: Modelo de acordo com os pré-requisitos de envoltória e iluminação da ASHRAE Standard 90.1 (2013);

- CASO 3: Modelo de acordo com os pré-requisitos de envoltória e iluminação do nível A do RTQ-C, mas com WWR (*window to wall ratio*) e SHGC (*solar heat gain coefficient*) de acordo com os pré-requisitos da ASHRAE Standard 90.1 (2013);
- CASO 4: Modelo de acordo com os pré-requisitos de envoltória e iluminação do nível D do RTQ-C;
- CASO 5: Modelo de referência obtido pelos levantamentos realizados em campo.

Os parâmetros referentes aos casos avaliados são apresentados na Tabela 2.

Tabela 2 – Parâmetros considerados nas simulações.

Casos avaliados	Densidade de potência de iluminação (W/m <sup>2</sup> )	Transmitância térmica das paredes (W/m <sup>2</sup> .K)			Transmitância térmica da cobertura (W/m <sup>2</sup> .K)			WWR (%)		SHGC
		Curitiba	São Paulo	Belém	Curitiba	São Paulo	Belém	Tipologias 1 e 2	Tipologias 3, 4 e 5	
CASO 1	9,7	1	3,7	3,7	0,5	1	1	18	18	0,87
CASO 2	12	0,435	0,479	0,705	0,233	0,233	0,233	31	40	0,25
CASO 3	9,7	1	3,7	3,7	0,5	1	1	31	40	0,25
CASO 4	14,1	3,7	3,7	3,7	2	2	2	60	60	0,87
CASO 5	14,1	2,46	2,46	2,46	2,06	2,06	2,06	50	50	0,82

As demais informações necessárias para a determinação da carga térmica foram fixadas em todos os casos e são apresentadas na Tabela 3. Essas informações foram obtidas com o levantamento realizado em campo e, por serem condizentes com o cenário nacional, foram consideradas em todas as avaliações realizadas.

Tabela 3 – Parâmetros comuns para todos os casos avaliados.

Variável		Valor
Densidade de equipamentos (W/m <sup>2</sup> )		9,7
Densidade de pessoas (m <sup>2</sup> /pessoa)		10,0
Ocupação (horas/dia)		8,0
Absortância das paredes		0,5
Absortância da cobertura	Caso 5	0,8
	Demais casos	0,5
Trocias de ar por hora		0,5

### 3.1.3. Climas analisados

As simulações foram realizadas para três cidades de zonas bioclimáticas distintas de acordo com o zoneamento bioclimático brasileiro: Curitiba (ZB1); São Paulo (ZB3); e Belém (ZB8). Foram utilizados os arquivos climáticos INMET (2016) (LABEEE, 2016).

### 3.1.4. Caracterização das simulações com o EnergyPlus e predições com o metamodelo

As características descritas nos tópicos 3.1.1, 3.1.2 e 3.1.3 foram utilizadas nas simulações com o EnergyPlus e nas predições com o metamodelo. Todos os parâmetros apresentados foram combinados entre si para obtenção das cargas térmicas das edificações. Na Figura 2 é apresentada a ilustração de um dos caminhos da árvore de possibilidade de combinações das variáveis avaliadas. As combinações totais geraram 75 simulações com o EnergyPlus e 75 predições com o metamodelo. Neste tópico, são apresentadas as diferenças entre a aplicação das ferramentas avaliadas.

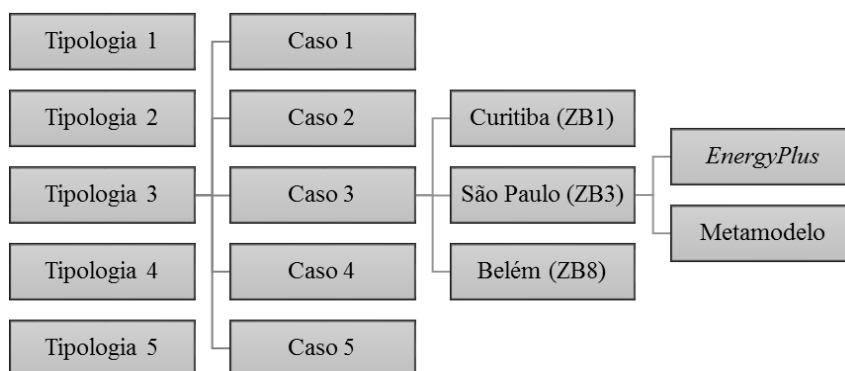


Figura 2 – Representação de um dos caminhos da árvore de possibilidades das variáveis avaliadas na pesquisa.

As cinco tipologias descritas foram testadas com ambas as ferramentas (*EnergyPlus* e metamodelo), que apresentam algumas variações na aplicação. No programa *EnergyPlus* é necessário modelar as edificações e dividi-las em zonas térmicas para cálculo da carga térmica de resfriamento. Já o metamodelo prediz a carga térmica das zonas térmicas a partir das características termofísicas e densidades de cargas internas presentes nas zonas. As zonas térmicas avaliadas são ilustradas na Figura 3. As divisões das edificações seguiram os critérios da ASHRAE Standard 90.1 (ASHRAE, 2013), resultando em quatro zonas de *shell* (com 4,5 m de profundidade; orientadas a norte, sul, leste e oeste) e uma zona de *core*, sem contato com o exterior. Com exceção para a tipologia 1, onde não foi elaborada uma zona de *core*, uma vez que a divisão em 4,5 m das zonas de *shell* é suficiente para o pavimento. Para dividir as zonas térmicas da edificação, foram inseridas paredes de baixa inércia térmica, com 10 cm de espessura, condutividade de 1 W/m.K, densidade de 1200 kg/m<sup>3</sup> e calor específico de 0,5 kJ/kg.K.

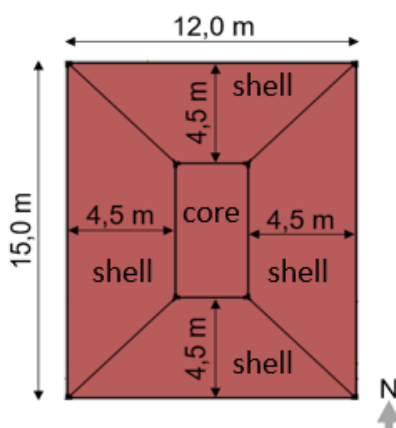


Figura 3 – Ilustração das zonas térmicas consideradas nas simulações.

No programa *EnergyPlus* foram modelados três pavimentos que seguem a divisão das zonas térmicas indicadas e representam a edificação completa: térreo, pavimento-tipo e cobertura. O que varia entre os pavimentos são as condições de contorno. Isto é, o pavimento térreo foi configurado com piso em contato com o solo e cobertura adiabática (sem troca de calor); o pavimento-tipo possui tanto o piso quanto a cobertura adiabáticos e é multiplicado pelo número de pavimentos-tipo existentes na edificação real; e o pavimento cobertura possui piso adiabático e cobertura em contato com o exterior, possibilitando as trocas térmicas. Nenhuma das paredes foi considerada adiabática. O número de zonas térmicas necessárias na predição com o metamodelo é o mesmo. Entretanto, neste caso, o procedimento é simplificado e não necessita modelagem, pois as cargas térmicas de cada zona são calculadas a partir das características termofísicas e das densidades de cargas internas. Desta forma, foram lançados os parâmetros referentes às quinze zonas térmicas (cinco por pavimento avaliado, considerando as condições de contorno) e calculada a carga térmica total da edificação de acordo com a área de cada zona térmica.

As simulações no programa *EnergyPlus* foram realizadas com o sistema *Ideal Loads* para prever a carga térmica das edificações avaliadas, tendo em vista sua capacidade de refrigeração infinita, como foi apresentado por Versage (2015). Com a inserção do sistema *Ideal Loads*, foi possível obter a carga térmica anual de resfriamento de cada zona térmica avaliada, permitindo a realização das comparações entre os resultados obtidos com o Programa *EnergyPlus* e o metamodelo. A temperatura de *setpoint* estabelecida para resfriamento foi 24°C. Além das trocas de ar por hora lançadas nas simulações, os modelos tiveram uma taxa

de renovação de ar de 0,0075 m<sup>3</sup>/s/pessoa, seguindo recomendações da Resolução nº. 9 de 2003 da Agência Nacional de Vigilância Sanitária (BRASIL, 2003).

A escolha do sistema *Ideal Loads* e da taxa de renovação de ar foram dados de entrada baseada nos critérios utilizados durante o desenvolvimento do metamodelo. Ou seja, foram inseridas características idênticas às do metamodelo para que os resultados obtidos com as simulações no *EnergyPlus* fossem comparáveis aos do metamodelo.

### 3.2. Análise de sensibilidade

Cada um dos cinco casos testados é constituído por um grupo de características que classificam a edificação correspondente em um determinado nível de eficiência energética. De um caso para outro, há variação na densidade de potência de iluminação, nas transmitâncias térmicas das paredes e coberturas, no percentual de abertura das fachadas e no fator solar dos vidros empregados. Desta forma, verificou-se a sensibilidade do metamodelo em relação à variação desse grupo de parâmetros, uma vez que as simulações também foram realizadas no *EnergyPlus*, o que permitiu a realização de comparações entre as cargas térmicas obtidas com as duas ferramentas.

Nas comparações, o caso 1 (modelo de acordo com os pré-requisitos da envoltória e iluminação do nível A do RTQ-C) foi determinado como caso base. Assim, foi possível avaliar a influência da variação dos parâmetros referentes aos demais casos com relação ao resultado de carga térmica do caso base.

Tendo em vista que o metamodelo foi desenvolvido com dados de simulações computacionais realizadas no programa *EnergyPlus*, é esperado que suas predições apresentem resultados convergentes com os obtidos no programa *EnergyPlus*. Desta forma, verificar a sensibilidade da ferramenta desenvolvida para predição de carga térmica é essencial para garantir que os resultados obtidos com esta ferramenta sejam coerentes e replicáveis para diferentes tipologias de edificações inseridas em climas distintos.

### 3.3. Comparação entre os resultados do metamodelo versus *EnergyPlus*

A partir dos resultados simulados versus preditos foram avaliados os valores de carga térmica obtidos para cada tipologia analisada, e realizadas as seguintes análises gráficas:

- Elaboração de diagramas de caixa para avaliar as cargas térmicas agrupadas por tipologia e por ferramenta empregada na predição. Com essa análise, foi possível avaliar a dispersão dos dados e verificar se há influência da tipologia na variação das predições obtidas com o metamodelo em relação às obtidas com o *EnergyPlus*;
- Avaliação da variação percentual do resultado de carga térmica obtida com o resultado do metamodelo em relação à obtida com o *EnergyPlus*. Nesse caso, os dados foram agrupados de acordo com o clima e para todos os casos analisados;
- Análise da variação entre os resultados de cargas térmicas preditas dos demais casos em relação ao Caso 1, para verificar as variações percentuais das cargas térmicas dos modelos analisados. Essa análise foi realizada combinando-se todas as variáveis estudadas: tipologia, clima, modelo e ferramentas avaliadas.

## 4. ANÁLISE DE RESULTADOS

Todas as análises foram geradas por meio de comparações entre os valores de carga térmica obtidos para as edificações analisadas quando avaliadas com o programa *EnergyPlus* e com o metamodelo.

### 4.1. Comparação entre os resultados obtidos com o *EnergyPlus* e o metamodelo

Inicialmente, os resultados das cargas térmicas obtidas com a aplicação das duas ferramentas utilizadas foram avaliadas em relação às tipologias adotadas. Na Figura 4 são apresentados os diagramas de caixa gerados com o tratamento dos dados. A linha que divide o diagrama de caixa nos dois tons de cinza indica a mediana da distribuição, isto é, abaixo dela estão 50% dos casos avaliados.

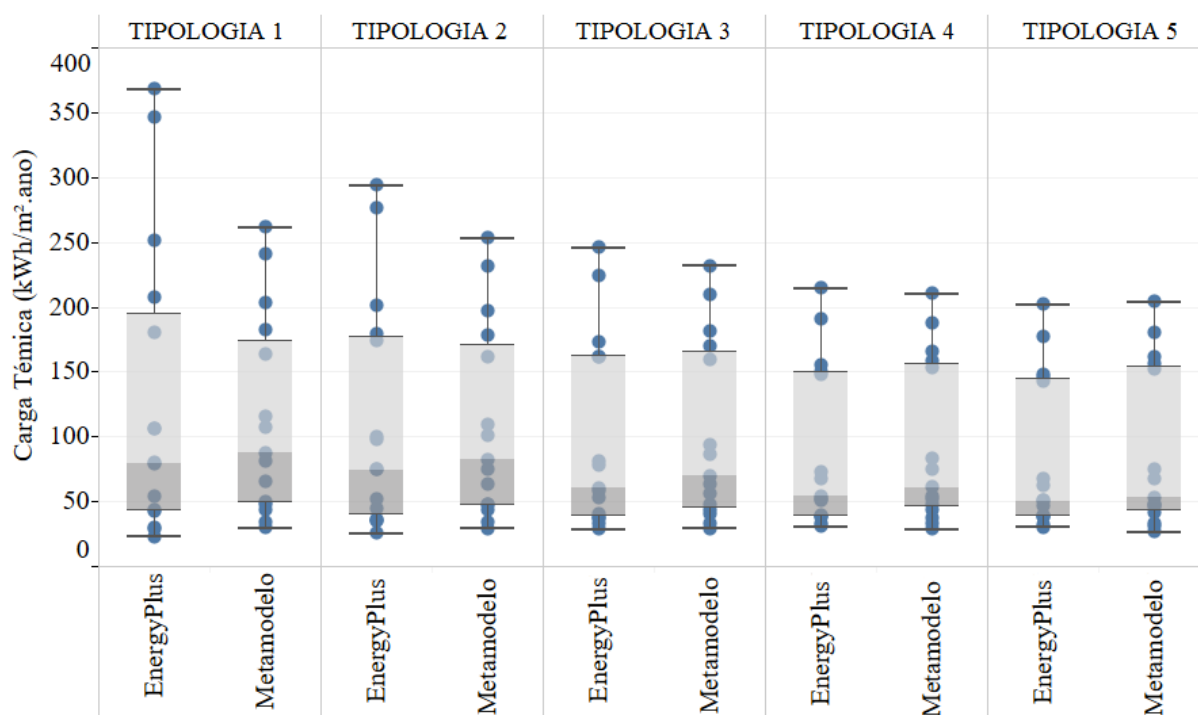


Figura 4 – Relação entre as tipologias avaliadas e a predição da carga térmica das edificações com as duas ferramentas testadas.

Avaliando-se visualmente a dispersão dos dados pela Figura 4, percebe-se que quanto maior a edificação, menor a variação obtida entre a predição do programa *EnergyPlus* e a do metamodelo. Observou-se que as medianas dos casos simulados com o *EnergyPlus* são menores em relação às obtidas com o metamodelo. Ou seja, em todos os casos, 50% dos valores obtidos com o metamodelo são maiores em relação aos mesmos 50% simulados com o *EnergyPlus*. Entretanto, essa característica é minimizada conforme o aumento das dimensões das edificações avaliadas.

Para complementar a avaliação, foi calculada a média dos resultados das cargas térmicas obtidas para cada tipologia (Tabela 4). Observa-se que as médias calculadas apresentam pouca variação quando as duas ferramentas são comparadas. Apesar de as medianas dos resultados das cargas térmicas obtidas com o metamodelo serem superiores, as médias das cargas térmicas das edificações menores obtidas com o *EnergyPlus* são superiores às do metamodelo. Este fato é devido aos valores extremos (acima do quartil superior) obtidos nesses casos. Os valores elevados distorcem a média, tornando-a maior.

Tabela 4 – Médias de carga térmica por tipologia e variação do Metamodelo em relação ao *EnergyPlus*.

Modelo	Metamodelo	<i>EnergyPlus</i>	Metamodelo versus <i>EnergyPlus</i> (kWh/m <sup>2</sup> )	Metamodelo versus <i>EnergyPlus</i> (%)
9,00 x 9,00	114,10	129,72	-15,62	-12,04
12,00 x 15,00	110,08	113,10	-3,02	-2,67
20,00 x 25,00	100,74	98,14	2,60	2,65
43,30 x 34,64	92,56	88,90	3,66	4,12
50,00 x 50,00	87,96	84,49	3,47	4,10

Na Figura 5 são apresentadas as variações obtidas entre os resultados das cargas térmicas preditas pelo metamodelo e as obtidas com o *EnergyPlus*. As avaliações foram realizadas agrupando-se os resultados de acordo com os climas analisados. A maior parte dos resultados apresenta variação de  $\pm 20\%$  quando se compara a carga térmica predita pelo metamodelo à calculada pelo programa *EnergyPlus*. Dos 75 casos comparados, doze apresentam resultados que excedem essa margem. Ou seja, apenas 16% dos casos analisados apresentam variações que extrapolam o intervalo observado. Os casos que excedem ou ficam próximos aos limites do intervalo de variação seguem dois padrões:

1. Para os climas mais frios (Curitiba e São Paulo), observa-se uma maior variação nos modelos mais eficientes, que correspondem aos Casos 1, 2 e 3. Neste padrão, os valores são extrapolados em grandezas positivas, isto é, mais de 20%;
2. No clima mais quente (Belém), observou-se a maior variação nos modelos menos eficientes, Casos 4 e 5. Neste padrão, as extrapolações ocorrem em grandezas negativas, isto é, menores que -20%.

Uma característica comum aos dois padrões observados para as maiores variações das cargas térmicas é a influência da tipologia estudada. Em todos os casos, percebeu-se que as menores edificações apresentam maiores variações de carga térmica. Os piores resultados foram observados nas combinações dos fatores atenuantes das variações. Ou seja, um modelo referente ao Caso 1, com dimensão de 9 m x 9 m, em Curitiba, por exemplo, apresenta as maiores variações em relação aos demais. Assim como o modelo correspondente ao Caso 5, também com dimensão de 9 m x 9 m, inserido no clima de Belém. O que permite concluir que a associação de extremos (de eficiência ou ineficiência energética, de clima e de influência do meio externo nas edificações) torna as predições do metamodelo mais suscetíveis a incertezas.

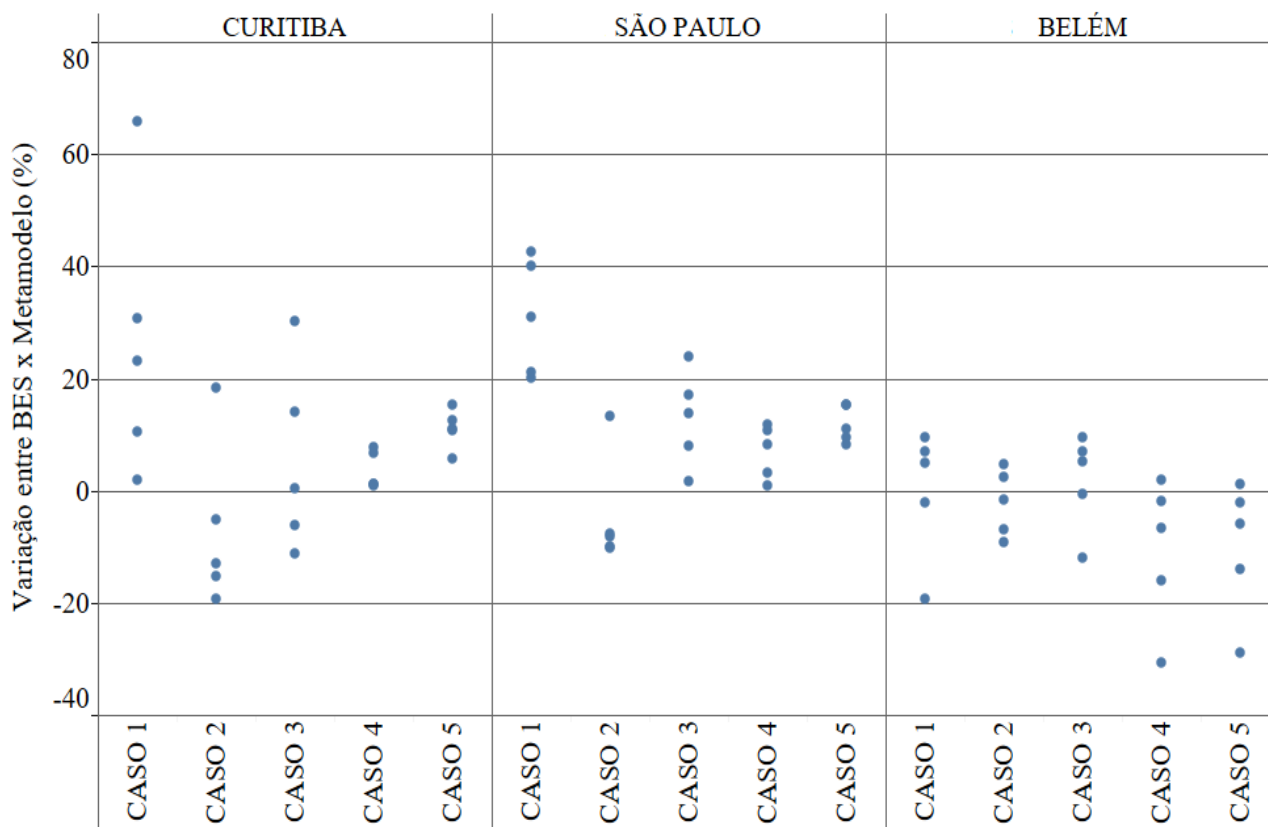


Figura 5 – Variação percentual entre as cargas térmicas obtidas com o *EnergyPlus* e com o Metamodelo de acordo com os casos testados.

#### 4.2. Variação entre o Caso base e os demais casos analisados

As variações entre os demais casos analisados e o Caso 1 (modelo de acordo com os pré-requisitos nível A do RTQ-C) foram observadas com o objetivo de avaliar os possíveis níveis de eficiência energética de edificações de escritório frente as variações como tipologia e clima. Na Figura 6 é apresentada essa análise, e mostram-se as variações de todos os casos para ambas as ferramentas empregadas neste artigo. Para interpretação do gráfico, destacam-se cinco informações:

1. Formato do símbolo: cada cidade avaliada possui um marcador distinto para possibilitar a diferenciação;
2. Tamanho do símbolo: está relacionado às tipologias estudadas. Quanto maior o símbolo, maior é a tipologia correspondente;
3. Cor: cada caso avaliado foi destacado com uma cor;
4. Eixos: no eixo vertical é apresentada a variação entre os demais casos e o Caso 1, de acordo com a carga térmica predita pelo metamodelo. No eixo horizontal, são apresentadas as mesmas informações obtidas com as simulações no programa *EnergyPlus*. Ressalta-se que as escalas adotadas, bem como os intervalos entre cada valor, foram fixados em ambos os eixos, facilitando a percepção de eventuais variações obtidas na determinação das escalas com as ferramentas;
5. A linha diagonal inserida no gráfico indicaria uma linha de tendência caso os valores obtidos com o metamodelo e com o *EnergyPlus* fossem iguais.



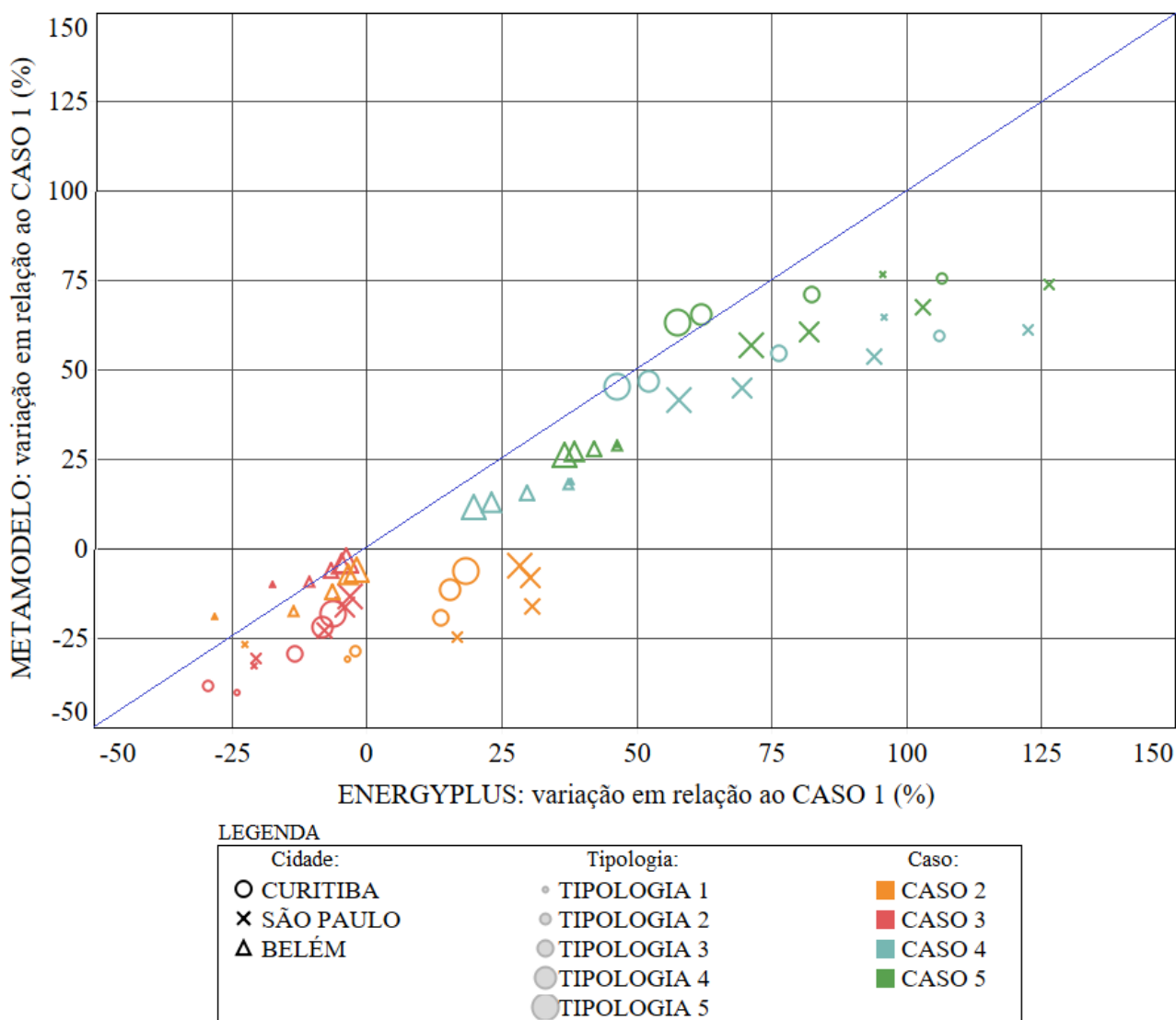


Figura 6 – Variações das cargas térmicas dos modelos testados em relação ao Modelo A do RTQ-C.

Avaliando-se a Figura 6, é possível perceber os agrupamentos dos casos testados. Quanto mais eficiente o modelo, menor é a variação em relação ao Caso 1. O modelo de acordo com os pré-requisitos de envoltória e iluminação da ASHRAE Standard 90.1 2013 (Caso 2), e o modelo que combina as características do Nível A do RTQ-C ao WWR e SHGC da ASHRAE (Caso 3) apresentaram as menores variações em relação ao Caso 1. O Caso 3, inclusive, apresentou variações negativas em todas as combinações testadas, tanto com o programa *EnergyPlus* quanto com o metamodelo. Este fato é devido à utilização de vidros com menor fator solar, implicando em menores acréscimos de carga térmica ocasionados pela radiação solar, mas mantendo as superfícies opacas da envoltória em níveis de transmitância térmica condizentes à realidade climática brasileira.

As maiores variações em relação ao Caso 1 foram observadas para o Caso 5 (modelo de referência). Para os climas de Curitiba e São Paulo, as variações obtidas entre o Caso 5 e o Caso 1 foram de 57,6% a 126,5% no *EnergyPlus*, e de 56,8% a 76,4% no metamodelo. Com essa informação, é possível concluir que o estoque nacional de edificações de escritório apresenta níveis de eficiência energética passíveis de melhora, evidenciando a necessidade da aplicação da eficiência energética em edificações. Confrontando-se os casos isoladamente, percebeu-se que em todos os testes os modelos referentes ao Caso 5 apresentaram variações em relação ao Caso 1 maiores que as observadas para o Caso 4, referente ao nível D do RTQ-C. Ou seja, se a etiquetagem atual fosse baseada na variação da carga térmica em relação ao modelo mais eficiente, os modelos de referência de edificações criados com dados obtidos em campo seriam inseridos no nível E de eficiência energética.

Porém, ressalta-se que as conclusões aqui apresentadas dependem do clima; do tamanho e da forma da edificação; das propriedades dos materiais utilizados na construção, além do número de simulações realizadas e do método estatístico empregado.

## 5. CONCLUSÕES

As conclusões obtidas com a realização deste artigo são apresentadas a seguir:

- Observou-se que as médias das cargas térmicas obtidas com o programa *EnergyPlus* e com o metamodelo são semelhantes. As maiores variações encontradas foram as da tipologia 9 m x 9 m, onde a média das cargas térmicas preditas com o metamodelo é 12% menor em relação à obtida com os resultados do *EnergyPlus*. Dentre as demais tipologias avaliadas, as variações percentuais obtidas entre as médias dos casos preditos com o metamodelo e dos simulados com o *EnergyPlus* não foram maiores que 4%, indicando boa predição do metamodelo. Comparando-se os casos isoladamente, percebeu-se que em 84% dos testes realizados as cargas preditas com o metamodelo apresentaram variações inseridas em um intervalo de -20% a 20% em relação às obtidas com o *EnergyPlus*. Isto é, das 75 comparações realizadas, apenas doze (16% do total) apresentaram variações que extrapolaram os limites percebidos.

- Nos casos em que as variações obtidas foram maiores que 20% ou menores que -20%, foram observadas as seguintes características: extremos de eficiência associados à clima frio, e extremos de ineficiência associados à clima quente, respectivamente; sendo que em ambas as situações as maiores variações foram percebidas para as menores edificações testadas, que são as que mais sofrem influência do meio externo. Desta forma, concluiu-se que a associação desses fatores extremos (de eficiência ou ineficiência, de clima e de influência do meio externo) torna as predições do metamodelo mais suscetíveis a incertezas. Estudo com relação à influência do fator de forma (área da envoltória/volume total) das edificações frente a associação dos fatores externos operados estão sendo analisados.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AGUIRRE, Luis Antonio. **Introdução à identificação de sistemas**. Terceira ed. Belo Horizonte: Editora UFMG, 2007. p. 236
- AL GHARABLY, Maged; DECAROLIS, Joseph F.; RANJITHAN, S. Ranji. An enhanced linear regression-based building energy model (LRBEM+) for early design. **Journal of Building Performance Simulation**, v.8. Fev. 2015.
- ASHRAE. AMERICAN SOCIETY OF HEATING, REFRIGERATING AND AIR-CONDITIONING ENGINEERS. **ASHRAE Standard 90.1–2013: Energy Standard for Buildings Except Low -Rise Residential Buildings**. ASHRAE: Atlanta, 2013.
- BRASIL. AGÊNCIA NACIONAL DE VIGILÂNCIA SANITÁRIA (ANVISA). **Resolução – RE Nº 9, de 16 de janeiro de 2003**. Determina a publicação de Orientação Técnica elaborada por Grupo Técnico Assessor, sobre Padrões Referenciais de Qualidade do Ar Interior, em ambientes climatizados artificialmente de uso público e coletivo. 2003.
- BRASIL. MINISTÉRIO DO DESENVOLVIMENTO, INDÚSTRIA E COMÉRCIO EXTERIOR – MDIC. INSTITUTO NACIONAL DE METROLOGIA, QUALIDADE E TECNOLOGIA – INMETRO. **Regulamento Técnico da Qualidade para o Nível de Eficiência Energética de Edificações Comerciais, de Serviços e Públicas (RTQ-C)**. Rio de Janeiro, 2012.
- CASTRO, Luíza Tavares de; WESTPHAL, Fernando Simon. Comparativo entre o método prescritivo e simulação para análise de desempenho de envoltória. In: Encontro Nacional de Conforto no Ambiente Construído. 2011. **Anais...Búzios: ENCAC**. 2011
- CB3E – Centro Brasileiro de Eficiência Energética em Edificações. 2016. Relatório parcial de índices mínimos de eficiência – edificações comerciais. **Relatório interno**.
- FOSSATI, Michele; LAMBERTS, Roberto. Eficiência energética da envoltória de edifícios de escritórios de Florianópolis: discussões sobre a aplicação do método prescritivo do RTQ-C. **Ambiente Construído**, v. 10, n. 2, p. 59–69, 2010.
- HENSEN, Jan L.M.; LAMBERTS, Roberto. Introduction to building performance simulation. In: **Building performance simulation for design and operation**. New York: Spon Press, 2011. p. 1–14.
- HOPFE, Christina Johanna; AUGENBROE, Godfried; HENSEN, Jan L.M. Multi-criteria decision making under uncertainty in building performance assessment. **Building and Environment**, v. 69, p. 81–90, nov. 2013.
- 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.
- MELO, Ana Paula; LAMBERTS, Roberto; CÓSTOLA, Daniel; HENSEN, Jan L.M. Capability and deficiency of the simplified model for energy calculation of commercial buildings in the Brazilian regulation. In: International IBPSA Building Simulation Conference. 2011. **Proceedings...Sydney, Australia: BS2011**. 2011
- 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, Luis; ORTIZ, José; GONZÁLEZ, Rocío; MAESTRE, Ismael R. A review of benchmarking, rating and labelling concepts within the framework of building energy certification schemes. **Energy and Buildings**, v. 41, n. 3, p. 272–278, mar. 2009.
- VERSAGE, R. S. **Metamodelo para estimar a carga térmica de edificações condicionadas artificialmente**. 2015. 191 f. Tese 137 (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.

## AGRADECIMENTOS

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