DESENVOLVIMENTO DO METAMODELO PARA A ETIQUETAGEM DE EDIFICAÇÕES RESIDENCIAIS[1]

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

ABSTRACT

The aim of this study is to describe the metamodel development used in the Brazilian Regulation for residential buildings. The metamodel output predicts the annual cooling and heating thermal loads, as well as the annual comfort hours percentage, for living rooms and bedrooms. The method consists on creating a robust database to train and validate the neural network-based metamodel. The database was created from simulations with different building characteristics and Brazilian climates. Simulation modeling assumptions were made and the Latin Hypercube sampling method was used to best suit the study's goal and resources. Sensitivity analysis and other statistical methods were used on the prediction results to validate the metamodel performance.

***Keywords**: Building energy efficiency. Neural network-based metamodel. Brazilian regulation.*

1 INTRODUÇÃO

O consumo crescente de energia elétrica no mundo, do qual as edificações representam uma parcela consistente, levanta preocupações relacionadas aos impactos ambientais e aos recursos energéticos. No Brasil, o desenvolvimento de regulamentações relacionadas à implementação da eficiência energética em edificações ganhou relevância após a crise energética de 2001 (BRASIL, 2001).

A implementação dos Regulamentos Técnicos da Qualidade para o Nível de Eficiência Energética de Edificações Comerciais (RTQ-C) e Residenciais (RTQ-R) (INMETRO, 2009; INMETRO, 2010) contribuiu para a melhoria da eficiência energética das edificações brasileiras. A aplicação destes regulamentos possibilita a etiquetagem de edificações, classificando-as pela classe de eficiência energética.

O atual RTQ-R apresenta dois métodos para a avaliação da classe de eficiência da edificação: método prescritivo e método de simulação. O método prescritivo atual é baseado em equações oriundas de regressões lineares múltiplas, porém, possui limitações.

[1] MAZZAFERRO, L., OLINGER, M. S., MACHADO , R. M. S., ELI, L. G., MELO, A. P., FOSSATI, M., LAMBERTS, R. Desenvolvimento do metamodelo para a etiquetagem de edificações residenciais. In: ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 17., 2018, Foz do Iguaçu. **Anais**... Porto Alegre: ANTAC, 2018.

O método simplificado subestima os efeitos positivos da ventilação natural ao superestimar o consumo de aquecimento. Além disso, o método simplificado apresenta uma sensibilidade excessiva a capacidade térmica da envoltória das edificações residenciais (VAN DER KNAAP, 2011). A impossibilidade do uso da ventilação natural em conjunto com o condicionamento artificial é outra limitação do atual método prescritivo.

O indicador de desempenho (graus-hora) do método atual pode não ser compreendido por grande parte dos consumidores, pois o indicador não é facilmente convertido para a provável economia de energia da edificação.

Desde sua implementação, o RTQ-R passou por avaliações e proposições de melhorias (INMETRO, 2012). Dentre as propostas mais recentes, está o desenvolvimento de um novo metamodelo para a avaliação da eficiência energética da envoltória de edificações residenciais, considerando simultaneamente o uso de ventilação natural e do sistema de condicionamento de ar em edificações (CB3E, 2018).

Em regulamentos energéticos, os metamodelos podem ser utilizados para obter predições relacionadas à eficiência energética de edificações. As vantagens da utilização de metamodelos consistem na velocidade e facilidade de obtenção dos resultados (VERSAGE, 2015).

O presente trabalho tem como objetivo descrever o desenvolvimento do metamodelo utilizado pelo método simplificado de classificação de eficiência energética da envoltória de edificações residenciais no Brasil. Este metamodelo abrange grande parte das soluções arquitetônicas encontradas em edificações residenciais. O metamodelo prediz as cargas térmicas anuais de resfriamento e de aquecimento, e o percentual de horas de conforto, para salas e dormitórios.

2 MÉTODO

Para desenvolver o metamodelo, priorizou-se a elaboração de um banco de dados robusto, organizada em três etapas: a modelagem, a amostragem e a simulação dos casos. Após a elaboração do banco de dados, foi realizado o treinamento e a validação do metamodelo.

2.1 Modelagem

Na etapa de modelagem foram definidas as rotinas e condições de contorno do modelo base, descritas no Quadro 1, que são mantidas constantes e servem de referência para todas as outras modificações. A principal premissa do modelo base é possuir três zonas térmicas com características de dormitórios e uma zona térmica com características de sala.

Quadro 1 - Rotinas e condições adotadas no modelo base

Parâmetro descrito	**Ambiente**	
	Sala	**Dormitório**

Horário de ocupação	14h-22h	22h-8h
Horários com possibilidade de ventilação	14h-22h	14h-8h
Horários com possibilidade de AC	14h-22h	22h-8h
Temperatura de acionamento do AC para resfriamento	26°C	26°C
Temperatura de acionamento do AC para aquecimento	16°C	16°C
Temperatura de *setpoint* de resfriamento do AC	23°C	23°C
Temperatura de *setpoint* de aquecimento do AC	18°C	18°C

Fonte: o autor (2018)

Os dormitórios apresentam janelas em uma ou duas fachadas, de acordo com o número de fachadas expostas. As portas dos ambientes dos modelos de simulação estão sempre fechadas, ou seja, a ventilação ocorre por frestas e pelo efeito da ventilação unilateral.

O controle da integração das estratégias de condicionamento natural com o condicionamento artificial foi definido por meio do *Energy Management System* (EMS) do programa EnergyPlus. O EMS permite elaborar controles e rotinas de alto nível para modelos computacionais de edificações. Desta forma, é possível considerar tanto o uso da ventilação natural, quanto o uso do sistema de condicionamento de ar para o modelo.

No modelo de simulação, a ventilação natural pode ser acionada após respeitar três condições: a temperatura interna deve ser maior que temperatura externa, a temperatura interna deve ser maior que 19°C, e a rotina de ventilação deve permitir.

Sempre que o sistema de condicionamento de ar for acionado na sala e nos dormitórios, este permanece ligado até o último horário de ocupação do ambiente. As venezianas estão acopladas às janelas dos ambientes somente quando estas estiverem fechadas.

2.2 Amostragem

Na etapa de amostragem foram definidos os parâmetros da edificação a serem variados para criação da amostra, respeitando a premissa do modelo base e as rotinas. Foram selecionados 28 parâmetros de entrada relacionados a edificação (Quadro 2).

Quadro 2 – Parâmetros da edificação e seus valores limites

Variável	**Valores limites**
Tipo de ambiente	Sala ou dormitório
Percentual de vidro na fachada norte	0.1-0.9
Percentual de vidro na fachada leste	0.1-0.9
Percentual de vidro na fachada sul	0.1-0.9
Percentual de vidro na fachada oeste	0.1-0.9
Área de fachada norte [m²]	0-150
Área de fachada leste [m²]	0-150
Área de fachada sul [m²]	0-150
Área de fachada oeste [m²]	0-150
Área do ambiente [m²]	8-300
Capacidade térmica das paredes externas	20-300

[kJ/(m²K)]	
Transmitância térmica das paredes externas [W/m²K]	0.5-3.5
Capacidade térmica da cobertura [kJ/(m²K)]	30-300
Transmitância térmica da cobertura [W/m²K]	0.5-3.5
Transmitância do vidro [W/m²K]	2.8-5.7
Fator solar do vidro	0.22-0.87
Tipo de piso do pavimento	Madeira ou cerâmico
Pé direito [m]	2.5-5
Absortância solar das paredes externas	0.1-0.9
Absortância solar da cobertura	0.1-0.9
Tamanho da projeção [m]	0-2
Altura do pavimento [m]	0-50
Veneziana	Sem ou com
Altura da janela em relação ao pé direito [%]	0-100
Fator de abertura para ventilação (%)	50-100
Pilotis	Sem ou com
Exposição do piso	Laje entre pavimentos ou em contato com o solo
Exposição da cobertura	Laje entre pavimentos ou exposta ao exterior

Fonte: o autor (2018)

Para cada parâmetro da edificação, considerou-se a inclusão de valores dentro de intervalos possíveis de serem encontrados em edificações residenciais. A análise combinatória dos parâmetros resultou em um universo de aproximadamente 261 bilhões de possibilidades. Por meio da aplicação do método de amostragem por Hipercubo Latino, este número foi reduzido para 60.000 casos, utilizando códigos de programação em linguagens Python e R.

2.3 Simulação

O programa de simulação termo energética utilizado foi o EnergyPlus, versão 8.7. Após as simulações, foi elaborado um banco de dados organizado em dados de entrada e seus respectivos dados de saída.

Os dados de saída dos ambientes de permanência prolongada (dormitórios e salas) consistiram no percentual de horas de conforto (%), da carga térmica anual de aquecimento (kWh/m².ano) e da carga térmica anual de resfriamento (kWh/m².ano).O percentual de horas de conforto é calculado através do somatório de horas entre 18ºC e 26ºC (temperatura operativa do ambiente) sem uso do sistema de condicionamento de ar, dividido pelo total de horas ocupadas do ambiente.

As simulações foram realizadas para os seguintes climas: Belém, Belo Horizonte, Cuiabá, Curitiba, Florianópolis, Foz do Iguaçu, Goiânia, Manaus, Niterói, Porto Alegre, Rio de Janeiro, São Paulo, Salvador, Santa Maria, Teresina. Para todas as cidades, foram utilizados os arquivos climáticos INMET 2016 (LabEEE, 2018). Quatro variáveis climáticas foram incluídas para representar a influência do clima no metamodelo (Quadro 3), baseadas no estudo de RORIZ (2014).

Quadro 3 – Parâmetros climáticos e sua respectiva sigla

Variável	**Sigla**
Temperatura Média Anual	TMA
Desvio Padrão da Média mensal das Temperaturas Médias diárias	dpT
Amplitude Média Anual	AMA
Desvio Padrão da Amplitude Média mensal	dpA

Fonte: o autor (2018)

Foram realizadas análises estatísticas, de caráter descritivo, nos dados de entrada e de saída das simulações. Os valores no banco de dados foram centralizados e escalonados, para melhorar a estabilidade numérica no processo de treinamento. Desta forma, gerou-se o banco de dados definitivo, que inclui as variáveis da edificação e a variáveis climáticas.

3 RESULTADOS

Os resultados do trabalho foram obtidos por meio da utilização do banco de dados, gerado através do método descrito, para o processo de treinamento e de validação do metamodelo.

3.1 Treinamento do metamodelo

Devido ao grande número de dados e a presença de relações não-lineares complexas, o modelo preditivo escolhido foi a rede neural artificial. O treinamento da rede neural artificial consiste no processo iterativo de ajuste dos pesos das conexões (neurônios) entre os dados de entrada e os dados de saída, de acordo com os valores esperados.

Cada uma das três variáveis de saída é predita por uma rede neural específica, a partir de 32 variáveis de entrada. O número de neurônios na camada intermediária das redes neurais foi otimizado para minimizar o erro da predição, para cada variável de saída analisada.

Efetuou-se a inclusão das variáveis climáticas na matriz de parâmetros utilizada para o treinamento do metamodelo, possibilitando a consideração de resultados obtidos em diferentes climas de forma unificada.

Como critérios para comparação entre as centenas de redes neurais geradas, foram adotados: o coeficiente de determinação (R^2), a raiz do erro médio quadrático (RMSE) e a raiz do erro médio quadrático normalizada (NRMSE).

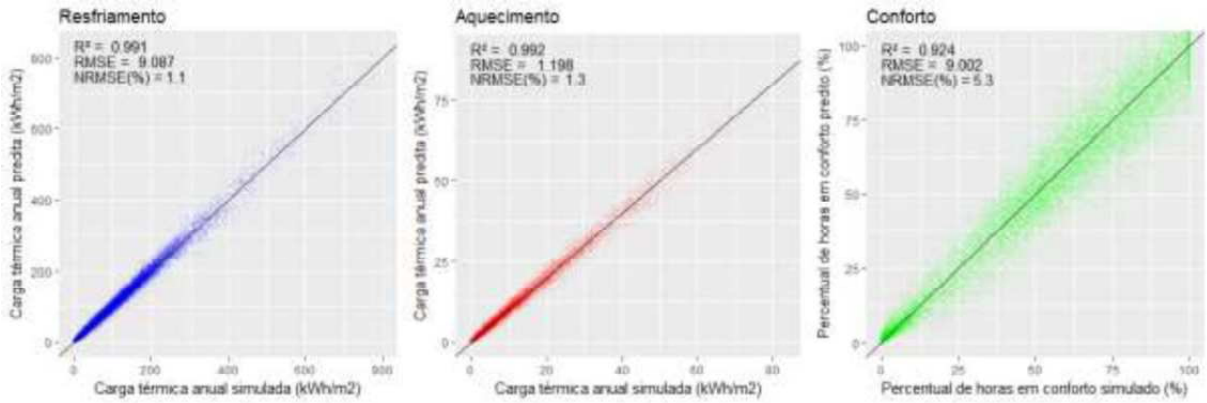
3.2 Validação do metamodelo

Os testes de sensibilidade foram realizados variando parâmetros associados ao metamodelo, em valores que vão do menor valor até o maior valor. Foram utilizados valores vistos e nunca vistos (intermediários entre os vistos) pela rede neural para garantir que os resultados sejam confiáveis em diversas situações.

Entre as variáveis mais impactantes nos resultados das três redes neurais estão: a temperatura média anual do clima, a absortância da cobertura, a transmitância térmica da cobertura, a transmitância térmica das paredes externas, a área da zona térmica e a presença ou não de pilotis.

Os gráficos de dispersão presentes na Figura 1, contém a plotagem de cerca de 60.000 casos de valores preditos pelo metamodelo *versus* valores simulados através do EnergyPlus, para todos os climas citados.

Figura 1 – Predições relativas ao resfriamento, aquecimento e conforto



Fonte: o autor (2018)

Também foram realizados testes para casos não vistos pelo metamodelo e avaliados os comportamentos das variáveis de saída em função das combinações de variáveis de entrada. Novamente, o metamodelo alcançou boas predições de carga térmica de resfriamento e de aquecimento.

4 CONCLUSÕES

A execução do método, sob as condições descritas, possibilitou elaborar uma base de dados robusta para o treinamento e validação do metamodelo a ser utilizado na nova proposta de etiquetagem de edificações residenciais.

O desenvolvimento do novo metamodelo procurou eliminar limitações observadas no método atual. O resultado da avaliação da edificação, por meio de valores de carga térmica, que posteriormente serão transformados em valores de consumo, auxiliará o consumidor no entendimento dos benefícios de habitar uma edificação eficiente.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à CAPES e ao CNPq pela bolsa de estudos e à ELETROBRAS/PROCEL pelos recursos financeiros aplicados no financiamento do projeto.

REFERÊNCIAS

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: Março de 2018.

CENTRO BRASILEIRO DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA EM EDIFICAÇÕES – CB3E. **Novo método de avaliação energética de edificações com base em energia primária**. 2017. Disponível em: http://cb3e.ufsc.br/etiquetagem/desenvolvimento/atividades-2012-2016/trabalho-1/pesquisas . Acesso em: Março de 2018.

INSTITUTO NACIONAL DE METROLOGIA, NORMALIZAÇÃO E QUALIDADE INDUSTRIAL - INMETRO. Portaria 163, de 08 de junho de 2009. **Regulamento Técnico da Qualidade do Nível de Eficiência Energética de Edifícios Comerciais, de Serviços e Públicos**. Rio de Janeiro, 2009.

INSTITUTO NACIONAL DE METROLOGIA, NORMALIZAÇÃO E QUALIDADE INDUSTRIAL - INMETRO. Portaria 163, de 08 de junho de 2009. **Regulamento Técnico da Qualidade do Nível de Eficiência Energética de Edificações Residenciais**. Rio de Janeiro, 2010.

INSTITUTO NACIONAL DE METROLOGIA, NORMALIZAÇÃO E QUALIDADE INDUSTRIAL - INMETRO. Portaria n.º 18, de 16 de janeiro de 2012. **Regulamento Técnico da Qualidade do Nível de Eficiência Energética de Edificações Residenciais**. Rio de Janeiro, 2012.

LABORATÓRIO DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA EM EDIFICAÇÕES. Arquivos Climáticos INMET. Disponível em http://www.labeee.ufsc.br/downloads/arquivos-climaticos/inmet2016. Acesso em: Março de 2018.

RORIZ, M. Proposta de revisão do zoneamento bioclimático brasileiro – Versão 3.0. ANTAC – Associação Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído. Grupo de Trabalho sobre Conforto e Eficiência Energética de Edificações. Data: Março de 2014. Disponível em: http://www.labeee.ufsc.br/sites/default/files/Climas_v3.pdf. Acesso em: Março de 2018.

VAN DER KNAAP, A. N. **Building Performance Simulation to Support Building Energy Regulation:** a case study for residential buildings in Brazil. Eindhoven, 2011. Tese. Master Building Services, Department of the Built Environment, Technische Universiteit Eindhoven, Eindhoven, 2011.

VERSAGE, R. **Metamodelo para estimar a carga térmica de edificações condicionadas artificialmente.** Tese. Doutorado em Engenharia Civil - Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil. Florianópolis: Universidade Federal de Santa Catarina, 2015.