



DESENVOLVIMENTO DE UM MÉTODO PARA APRIMORAR A PRECISÃO DO MÉTODO PRESCRITIVO DA ETIQUETAGEM PROCEL/INMETRO PARA EDIFÍCIOS COMERCIAIS

Ana Paula Melo (1); Daniel Cóstola (2); Roberto Lamberts (3); Jan L. M. Hensen (4)

- (1) Doutora em Engenharia Civil, Pós-Doutoranda do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, apaula_melo@labeee.ufsc.br, Universidade Federal de Santa Catarina, Laboratório de Eficiência Energética em Edificações, Florianópolis
- (2) PhD, Pós-Doutor do Departamento de Arquitetura, Construção e Planejamento, D.Costola@tue.nl, Eindhoven University of Technology, Building Physics & Systems Group, Eindhoven
- (3) PhD, Professor do Departamento de Engenharia Civil, lamberts@labeee.ufsc.br, Universidade Federal de Santa Catarina, Departamento de Engenharia Civil, Laboratório de Eficiência Energética em Edificações, Florianópolis
- (4) PhD, Professor do Departamento de Arquitetura, Construção e Planejamento, J.Hensen@tue.nl, Eindhoven University of Technology, Building Physics & Systems Group, Eindhoven

RESUMO

Este artigo apresenta o desenvolvimento de um método mais preciso para avaliar o consumo de energia de edificações comerciais. O estudo baseou-se no modelo simplificado para a avaliação da eficiência da envoltória do Regulamento Técnico da Qualidade do Nível de Eficiência Energética de Edifícios Comerciais, de Serviços e Públicos (RTQ-C). A metodologia consiste, primeiramente, em avaliar a utilização de um estudo estatístico confiável e complexo, como o método estatístico de redes neurais artificiais. A segunda etapa consiste em aplicar a técnica de modelagem através do método Hipercubo Latino para combinar a interação entre diferentes parâmetros de entrada. A terceira etapa e a última etapa consistem na aplicação e validação do estudo proposto, respectivamente. Com base nos resultados, conclui-se que o método proposto apresenta um grande impacto no consumo de energia das edificações, podendo ser aplicado futuramente no RTQ-C.

Palavras-chave: modelo simplificado, redes neurais artificiais, RTQ-C.

ABSTRACT

The main objective of this study is to develop a more accurate method to assess the energy consumption of commercial buildings. 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 first step was to evaluate the feasibility and relevance of more complex statistical modelling techniques, such as the neural network. The second step of the assessment consisted of applying the Latin Hypercube sampling technique to combine the effects of several input parameters. The third and the fourth steps are the application and validation of the proposed method, respectively. Therefore, results of this work may have a profound impact in the energy consumption of buildings and may be applied in the future in the RTQ-C.

Keywords: simplified model, artificial neural network, RTQ-C.

1. INTRODUÇÃO

A sustentabilidade vem se intensificando com a demanda crescente de certificações e selos sustentáveis, como por exemplo, LEED, BREEAM, e AQUA. Muitos países vêm percebendo a importância de construir de forma sustentável, buscando elaborar certificações que aumentem a eficiência das suas edificações (ASHRAE, 2010; CALIFORNIA ENERGY COMMISSION, 2001; AUSTRALIAN BUILDING CODES BOARD, 2008.).

Desde a década de setenta, os países vem buscando soluções para melhoria da eficiência energética em edificações e nos sistemas que as compõem. Em 1984, no Brasil, o Inmetro deu início a programas de avaliação da conformidade com foco no desempenho, visando esclarecer aos consumidores sobre as informações da eficiência energética dos equipamentos. Depois de muitos anos de discussão e de trabalhos envolvendo diversas instituições foi publicado o Regulamento Técnico da Qualidade do Nível de Eficiência Energética de Edifícios Comerciais, de Serviços e Públicos (RTQ-C) no dia 27 de Fevereiro de 2009 pelo Instituto Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial – Inmetro (BRASIL, 2009). A implementação deste regulamento reflete na busca por construções eficientes, apresentando uma grande melhoria na eficiência energética dos edifícios brasileiros. Este regulamento visa a etiquetagem de edificações no Brasil, classificando pelo nível de eficiência energética e baseando-se em três requisitos principais: Eficiência e potência instalada do sistema de iluminação; Eficiência do sistema do condicionamento de ar e Desempenho térmico da envoltória da edificação, quando a mesma for condicionada artificialmente. Inicialmente, o regulamento é de caráter voluntário, mas depois de alguns anos da sua implantação esta proposta passará a ter caráter obrigatório, sendo a edificação avaliada de acordo com requisitos que variam de eficiência A (mais eficiente) a E (menos eficiente). O RTQ-C apresenta dois métodos para a avaliação do nível final de eficiência da edificação: método prescritivo, que se refere a um modelo simplificado onde são atribuídos pesos a cada requisito; ou através do método de simulação, que adota a utilização de um programa de simulação computacional.

Durante o desenvolvimento do modelo simplificado para a avaliação da envoltória presente no RTQ-C, foram encontradas algumas limitações com relação à volumetria do edifício e da transmitância térmica das paredes (CARLO, 2008). A solução encontrada foi determinar dois modelos simplificados para a avaliação da envoltória das edificações baseando-se na área da projeção e área da fachada da edificação; e excluir do modelo simplificado o parâmetro transmitância térmica das paredes para encontrar uma correlação de alta qualidade entre os dados de entrada e o dado de saída através da utilização do método estatístico de regressão linear múltipla. Estas limitações foram avaliadas por Carlo e Lamberts, (2010), observando que o modelo simplificado apresenta limites quanto ao uso de diferentes volumetrias de edificações e limitações quanto a utilização de vidros de alto desempenho juntamente com grande área de janela.

Yamakawa e Westphal (2011) analisam a influência do dado de entrada fator solar do vidro e área de abertura das fachadas nos métodos propostos para avaliação do RTQ-C. Os resultados mostraram que o dado de entrada fator solar dos vidros não é avaliado adequadamente no Método Prescritivo, observando que há discrepância entre os resultados de nível de eficiência final encontrados pelo método prescritivo e o método de simulação.

O estudo realizado por Melo et al. (2012) analisou a precisão do modelo simplificado presente no RTQ-C, concluindo que o modelo simplificado apresenta resultados fora do limite estabelecido quando comparado com casos do BESTEST (Building Energy Simulation Test) (ASHRAE Standard 140, 2004). A maioria dos casos excedeu em até 60% o limite estabelecido. Outra limitação encontrada neste estudo foi com relação ao nível de eficiência estabelecido pelos métodos presentes no RTQ-C. O modelo simplificado presente no RTQ-C resulta em nível de eficiência de envoltória inferior quando comparado com o método de simulação. Observou-se também que o modelo simplificado presente no RTQ-C apresenta o resultado final estabelecido como um indicador de consumo, e não como um resultado de consumo de energia da edificação.

Frente a estas limitações e com base nos resultados apresentados nos estudos citados acima, verifica-se a necessidade de desenvolver um método mais preciso para calcular o consumo de energia de edificações comerciais.

2. OBJETIVO

O objetivo deste artigo é desenvolver um método para aprimorar a precisão do modelo simplificado 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.

3. MÉTODO

O método deste trabalho está dividido em cinco etapas principais:

1. Aplicação de técnicas de modelagem estatísticas, realizando a comparação entre duas técnicas: regressão linear múltipla e redes neurais artificiais.
2. Aplicação de técnicas de modelagem, realizando a comparação entre duas técnicas: análise paramétrica e método Hipercubo Latino.
3. Base de dados ampliada, estabelecendo tipologias e parâmetros para o desenvolvimento de um modelo simplificado mais preciso.
4. Desenvolvimento de um novo modelo simplificado, baseando-se na nova base de dados.
5. Validação do modelo simplificado desenvolvido, verificando a precisão deste com relação aos resultados obtidos através de simulação computacional.

3.1. Técnicas de modelagem estatística

Esta parte do método apresenta uma comparação entre duas técnicas de modelagem estatística aplicadas nos casos utilizados para o desenvolvimento do modelo simplificado presente no Regulamento Técnico da Qualidade do Nível de Eficiência Energética de Edifícios Comerciais, de Serviços e Públicos: regressão linear múltipla e redes neurais artificiais. O método de regressão linear múltipla foi utilizado para o desenvolvimento do modelo simplificado presente no RTQ-C.

O método de regressão linear é um método simples de desenvolver e fácil de utilizar quando comparado ao uso de programas de simulação computacional. Como consequência, nota-se a crescente utilização desta ferramenta para determinar o consumo de energia de edificações. Entretanto, atualmente existem outros métodos estatísticos que permitem avaliar a resposta do desenvolvimento de modelos simplificados. Entre os métodos que vem se destacando e criando interesse pelo estudo e desenvolvimento é o método estatístico de redes neurais artificiais. As redes neurais artificiais são baseadas no funcionamento do cérebro humano, mais precisamente no comportamento dos neurônios. Segundo Bezdek e Pal (1992) entre as vantagens da utilização do método estatístico de redes neurais destacam-se a qualidade superior frente a outros métodos estatísticos; imunidade a falhas e ruídos; modelos compactos com respostas rápidas.

Para o desenvolvimento desta etapa, a mesma base de dados adotada para o desenvolvimento do modelo simplificado presente no RTQ-C (CARLO, 2008) foi utilizada para a aplicação do método estatístico de redes neurais, permitindo comparar entre os dois métodos os valores encontrados de erro médio, desvio padrão e coeficiente de determinação. Estes valores foram obtidos comparando os resultados encontrados através de simulação computacional com os valores equacionados. Para a utilização do método de redes neurais adotou-se o programa EasyNN-Plus (EasyNN Plus, 2011).

A arquitetura da rede neural foi classificada como feed-forward, na qual a camada de saída conecta-se somente com a camada anterior. Adotou-se a metodologia onde 50% dos casos são selecionados para o treinamento da rede neural e 25% dos casos são selecionados para a validação da rede. Os outros 25% são selecionados para verificar o desempenho da rede, sendo que estes casos não fazem parte do treinamento e da validação. Todos os casos foram aleatoriamente selecionados pelo programa EasyNN-Plus.

Os parâmetros considerados para o desenvolvimento do modelo simplificado foram considerados como dados da camada de entrada. O consumo de energia da edificação (kWh/m² de área condicionada) foi considerado como dado de saída. Os parâmetros de entrada e seus devidos valores foram considerados como variáveis independentes e o consumo de energia como variável dependente.

3.2. Técnicas de amostragem

Este método apresenta uma comparação entre duas técnicas de amostragem aplicadas nos casos utilizados para o desenvolvimento do modelo simplificado presente no Regulamento Técnico da Qualidade do Nível de Eficiência Energética de Edifícios Comerciais, de Serviços e Públicos: a mudança de somente um parâmetro para cada novo caso e o método Hipercubo Latino.

Dentre as etapas de uma análise estatística, destaca-se o aspecto importante das formas de amostragem. É necessário garantir que a amostra utilizada para o estudo consiga representar e executar o método estatístico utilizado (RISSO et al., 2010; OLSSON et al., 2003; XU et al. 2005). A determinação de uma amostra com baixa qualidade poderá refletir em erros, comprometendo os resultados finais (DE WITT e AUGENBROE, 2002). Deve-se ter um cuidado especial e criterioso com relação à amostra escolhida.

Para o desenvolvimento dos casos do RTQ-C foi adotada a técnica de amostragem onde há a mudança de somente um parâmetro para cada novo caso. Esta técnica permite observar a influência de cada parâmetro no resultado do dado de saída da simulação, porém exige que sejam elaborados diversos casos de acordo

com o número de parâmetros a serem analisados mesmo que estes não influenciem significativamente no resultado final. Além disso, esta técnica oculta a influência da interação de dois ou mais parâmetros em cada simulação.

Com a utilização do método Hipercubo Latino (MHL), é possível analisar a influência da combinação de diferentes fatores. Através desta técnica é possível reduzir o número de casos a ser simulado, sem que seja reduzida a qualidade dos resultados McKay et al. (1979). A comparação entre ambas as técnicas de modelagem permite entender o comportamento e a influência destas no desenvolvimento de um modelo simplificado.

Assim sendo, depois de analisar as duas técnicas de amostragem (mudança de um parâmetro por vez e MHL), aplicou-se a técnica de modelagem estatística de redes neurais artificiais nos casos gerados com a aplicação destas duas técnicas de amostragem. Ou seja, foi aplicado o método estatístico de redes neurais tanto nos casos gerados para o desenvolvimento do modelo simplificado presente no RTQ-C quanto nos casos gerados através do método Hipercubo Latino.

3.3. Base de dados

Para alcançar o objetivo do estudo, foram consideradas diferentes tipos, com diferentes números de pavimento tipo, área construída, área condicionada, área de cobertura, entre outros, para abranger as características de grande parte das edificações brasileiras. Além disso, foram considerados diferentes dados de entrada, variando estes valores de mínimos a máximos.

Foi considerado um total de dezesseis tipologias, considerando pequenas e grandes lojas, pequenos e grandes escritórios, hotéis e escritórios verticais. Quanto aos dados de entrada, preocupou-se em abranger valores mínimos e máximos respectivos aos dados de entrada, conforme apresentado na Tabela 1. Ressalta-se que a análise foi realizada levando em consideração o clima da cidade de Florianópolis, Brasil.

Tabela 1. Parâmetros adotados.

| Parâmetros | Valores considerados |
|--|--|
| Percentual de janela na fachada | 5; 15; 30; 45; 65; 90 |
| Densidade de carga interna (W/m ²) | 20; 35; 40; 65 |
| Transmitância térmica das paredes (W/(m ² .K)) | 0,66; 1,61; 2,02; 2,28; 2,49; 3,7; 4,4 |
| Transmitância térmica da cobertura (W/(m ² .K)) | 0,62; 1,03; 1,18; 1,75; 1,92; 2,25; 4,56 |
| Ângulo de projeção do <i>brise</i> vertical (°) | 0 (sem <i>brise</i>); 35; 45 |
| Ângulo de projeção do <i>brise</i> horizontal (°) | 0 (sem <i>brise</i>); 45 |
| <i>Solar Heat Gain Coefficient</i> dos vidros | 0,87; 0,81; 0,76; 0,59; 0,49; 0,25 |
| Infiltração de ar (ACH) | 0,5; 1; 3 |
| Absortância das paredes à radiação solar | 0,2; 0,5; 0,8 |
| Absortância da cobertura à radiação solar | 0,2; 0,5; 0,8 |
| Padrão de uso (horas/dia) | 11; 14; 24 (hotel) |
| Orientação (° Norte verdadeiro) | Norte-Sul; Leste-Oeste |
| Sistema de condicionamento de ar | Split com COP de 3,20 ($w_{\text{térmico}}/w_{\text{elétrico}}$) |

Para a elaboração dos casos considerou-se a utilização do método Hipercubo Latino, com a influência de dois ou mais parâmetros em cada novo caso. A interação entre os diferentes parâmetros foi realizada através do uso de uma macro desenvolvida por Hoes (2007) a qual utiliza o programa SimLab (SimLab, 2011) no programa MatLab (MatLab, 2011). Como consequência, estabeleceu-se através da macro o número de 200 novos casos para cada uma das dezesseis tipologias adotadas, onde a interação entre todos os parâmetros e seus respectivos valores para cada uma das dezesseis tipologias resultou em um total de 3200 casos.

Após a geração de todos os casos, adotou-se o programa de simulação computacional EnergyPlus, versão 6.0 (DOE, 2010) para obter o consumo de energia para cada caso. Com base nestes resultados foi possível observar a influência dos dados de entrada no consumo de energia das edificações e a variação encontrada nos resultados de consumo para cada tipologia.

3.4. Modelo simplificado

Para o desenvolvimento do novo modelo simplificado, adotou-se o método estatístico de redes neurais com a utilização do programa EasyNN-Plus. Foram considerados os 3200 casos elaborados através do método Hipercubo Latino, analisando os parâmetros como dados da camada de entrada (variáveis independentes), e o consumo da edificação em kWh/m² como dado de saída (variável dependente) para o treinamento da rede neural. Além dos parâmetros de entrada, também foram analisados parâmetros relacionados com a área construtiva de cada uma das dezesseis tipologias adotadas. Todos os parâmetros considerados para a camada de entrada para o treinamento da rede neural podem ser observados através da Tabela 2.

Tabela 2. Dados de entrada.

| Parâmetros construtivos | Parâmetros relacionados com a área das tipologias |
|--|---|
| Percentual de área de janela na fachada (%) | Pé-direito (m) |
| Fator solar dos vidros | Comprimento (m) |
| Ângulo vertical de sombreamento (°) | Número de andares |
| Ângulo horizontal de sombreamento (°) | Área de fachada (m ²) |
| Transmitância térmica da parede (W/(m ² .K)) | Área de projeção da cobertura (m ²) |
| Transmitância térmica da cobertura (W/(m ² .K)) | Área de piso condicionada (m ²) |
| Infiltração (ACH) | Área de piso não condicionada (m ²) |
| Carga interna instalada (W/m ²) | |
| Absortância da parede | |
| Absortância da cobertura | |
| Padrão de uso (horas) | |

Através dos resultados obtidos com a aplicação da rede neural, foi calculado o coeficiente de determinação (R^2), a média dos erros (\bar{e}) e desvio padrão dos erros (σ_e). Estes resultados foram obtidos com a comparação entre os resultados do programa EnergyPlus e do método estatístico de redes neurais uma vez que ambos possuem os resultados na mesma unidade, kWh/m². A frequência dos erros entre o resultado simulado e equacionado foi observada através de um histograma.

3.5. Validação

A validação consiste na aplicação do modelo simplificado desenvolvido, para avaliação da precisão dos seus respectivos resultados.

Para a avaliação dos novos modelos foram adotadas três tipos: uma considerada como Pequena Edificação, uma como Grande Edificação e uma como Edificação Vertical. As três tipologias em questão não foram consideradas para o desenvolvimento do modelo simplificado. Avaliou-se também a precisão do modelo através de uma tipologia com dimensões não convencionais para verificar o erro encontrado entre o resultado simulado e equacionado. Além das diferentes tipologias adotadas, determinou-se valores de dados de entradas que também não foram levados em consideração no desenvolvimento do modelo simplificado. Como por exemplo, valor de percentual de janela na fachada de 50%, transmitância térmica de cobertura de 0,95 W/(m².K) e número de pavimentos. Com base nestes resultados, foi possível verificar o erro final do modelo simplificado em responder a tipologias que não foram adotadas na nova base de dados.

4. ANÁLISE DE RESULTADOS

4.1. Técnicas de modelagem estatística

Segundo Carlo (2008) a aplicação do método estatístico de regressão linear múltipla alcançou um R^2 de 0,99 para as tipologias com área de projeção inferior ou igual a 500 m² e R^2 de 0,99 para as tipologias com área de projeção superior a 500 m². Aplicando o método estatístico de rede neural, o R^2 encontrado foi de 0,98 para as tipologias com área de projeção inferior ou igual a 500 m², e 0,99 para as tipologias com área de projeção superior a 500 m².

Nota-se que os resultados de consumo de energia com a utilização do programa EnergyPlus são praticamente os mesmos encontrados com a utilização do método estatístico de redes neurais (Figura 1). Porém, avaliando os resultados de indicador de consumo (IC) encontrados para o modelo simplificado para as tipologias com área de projeção inferior ou igual a 500 m², nota-se uma grande diferença entre os resultados calculados pelo modelo simplificado e pelo método estatístico de redes neurais (Figura 2).

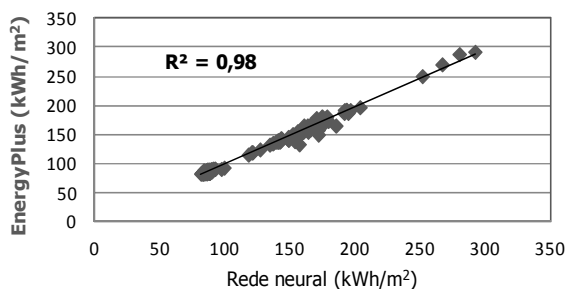


Figura 1. Coeficiente de determinação entre os resultados do programa EnergyPlus e rede neural - tipologias com área de projeção inferior ou igual a 500 m²

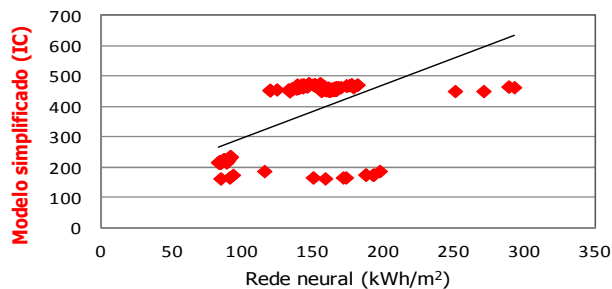


Figura 2. Comparação entre resultados do modelo simplificado versus rede neural - tipologias com área de projeção inferior ou igual a 500 m².

Para as tipologias com área de projeção superior a 500 m² nota-se o mesmo comportamento observado anteriormente. Comparando os resultados do programa EnergyPlus com o método de redes neurais, nota-se através da Figura 3 que os valores encontrados são semelhantes. Entretanto, comparando com o modelo simplificado, nota-se uma grande diferença entre os resultados (Figura 4).

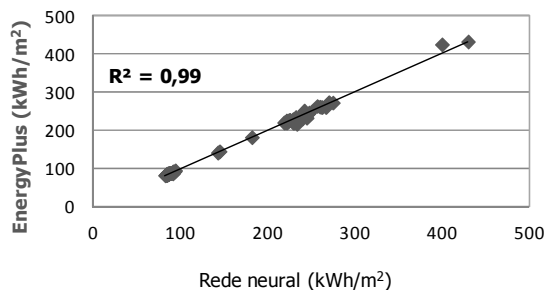


Figura 3. Coeficiente de determinação entre os resultados do programa EnergyPlus e rede neural - tipologias com área de projeção superior a 500 m²

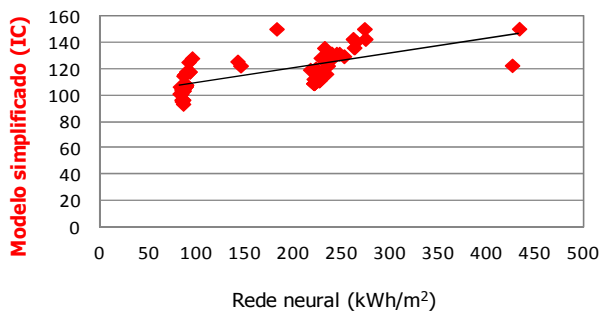


Figura 4. Comparação entre resultados do modelo simplificado versus rede neural - tipologias com área de projeção superior a 500 m²

Analisando o resultado do cálculo da média e do desvio padrão dos erros para o método estatístico de redes neurais, observa-se que para as tipologias com área de projeção inferior ou igual a 500 m² os valores encontrados foram de 2,3 kWh/m² e 4,7 kWh/m², respectivamente. Para as tipologias com área de projeção superior a 500 m² os valores encontrados foram de 0,7 kWh/m² e 5,1 kWh/m², respectivamente. Estes valores podem ser observados na Tabela 3.

Os valores de média dos erros calculados informam que a média pode ser próxima ou distante em 4,7 kWh/m² para as tipologias com área de projeção inferior ou igual a 500 m²; e 5,1 kWh/m² para as tipologias com área de projeção superior a 500 m². Observando estes valores, nota-se que o método estatístico de redes neurais conseguiu representar com precisão os resultados de consumo de energia obtidos através do programa EnergyPlus.

Tabela 3. Comparação entre os resultados com a aplicação de rede neural (RN) e regressão linear múltipla (RLM).

| Características | TIPOLOGIAS | | | |
|---|---------------------------------------|------|---------------------------------------|------|
| | Área de projeção ≤ 500 m ² | | Área de projeção > 500 m ² | |
| | RN | RLM | RN | RLM |
| R ² | 0,98 | 0,99 | 0,99 | 0,99 |
| Média dos erros (kWh/m ² .ano) | 2,3 | - | 0,7 | - |
| Desvio padrão (kWh/m ² .ano) | 4,7 | - | 5,1 | - |

Mesmo observando que as unidades dos resultados do método de simulação (kWh/m²) e do modelo simplificado (IC) são diferentes, pode-se concluir nesta etapa que o método estatístico de redes neurais foi mais eficiente para a representação da interação entre os dados de entrada e saída quando comparados com o método de regressão linear múltipla adotado para o desenvolvimento do modelo simplificado presente no RTQ-C. O comportamento do modelo simplificado frente às simulações computacionais é explicado com base nas mesmas conclusões observadas anteriormente: o modelo simplificado apresenta resultado impreciso; e o método estatístico de regressão linear múltipla adotado para o desenvolvimento do modelo

simplificado foi incapaz de capturar adequadamente a relação entre os dados de entrada e o consumo de energia.

Avaliando o R^2 encontrado para o método de redes neurais e o modelo simplificado, nota-se que o valor encontrado é praticamente o mesmo, apresentando uma correlação satisfatória entre os casos reais e os resultados equacionados. Porém, avaliando a média e desvio padrão dos erros para o método estatístico de redes neurais nota-se que este apresenta um desvio padrão máximo de 5,1 kWh/m² para as tipologias com área de projeção superior a 500 m² e de 4,7 para as tipologias com área de projeção inferior ou igual a 500 m². Já para o modelo simplificado, é possível observar a existência de uma grande diferença entre os resultados de IC e kWh/m². Observa-se que ambos os métodos possuem o mesmo valor de R^2 , mas avaliando a ordem dos resíduos nota-se que os resultados do método estatísticos de redes neurais apresentam resultados inferiores de média dos erros e desvio padrão. Ressalta-se a importância em avaliar a média e o desvio padrão dos erros entre o valor calculado e o observado antes de implicar que o modelo encontrado apresenta comportamento satisfatório.

4.2. Técnicas de amostragem

Através da aplicação e dos resultados obtidos com a utilização do método estatístico de redes neurais, observou-se que este método foi capaz de representar os valores de consumo de energia calculados por simulação computacional para cada modelo simplificado (baseando-se na área de projeção das tipologias). Com base nestes resultados, optou-se em observar o comportamento deste método estatístico para o treinamento de todos os casos em uma única equação.

Como resultado, observou-se que com a utilização do método estatístico da rede neural foi possível integrar todos os casos na mesma equação, encontrando um valor de R^2 , média dos erros e desvio padrão que conseguem representar o comportamento dos casos gerados por ambas as técnicas de amostragem: mudança de um parâmetro para cada novo caso e método Hipercubo Latino.

Para os casos gerados através da técnica de amostragem onde somente um parâmetro é modificado para cada novo caso observou-se que o R^2 encontrado foi de 0,98. Avaliando a média dos erros e o desvio padrão, nota-se novamente uma diferença mínima entre resultados calculados com o programa de simulação computacional com os resultados encontrados pela aplicação do método estatístico de redes neurais. Para os casos gerados através do método Hipercubo Latino, o valor de R^2 encontrado foi de 0,96. Os resultados encontrados para a média dos erros e desvio padrão do erro para este método foram de -0,2 kWh/m² e 5,3 kWh/m², respectivamente. Estes valores podem ser observados na Tabela 4.

Avaliando os resultados encontrados para ambas as técnicas de amostragem, nota-se que tanto a técnica onde ocorre somente a mudança de um parâmetro a cada novo caso como o MHL conseguiu representar o consumo de energia obtido através de simulação computacional. Entretanto, comparando os resultados, percebe-se que a técnica de amostragem do método Hipercubo Latino conseguiu melhor representar o comportamento das tipologias analisadas. Este método apresentou uma média de -0,2 kWh/m², com um desvio de 5,3 kWh/m² próximo ou distante da média encontrada.

Tabela 4. Aplicação das técnicas de amostragem

| Características | TIPOLOGIAS | |
|--|---|---------------------|
| | Área de projeção ≤ 500 m ² + > 500 m ² | |
| | Um parâmetro por caso | Hipercubo Latino |
| R^2 | 0,98 | 0,96 |
| Média dos erros (kWh/m ²) | -1,9 | -0,2 |
| Desvio padrão (kWh/m ²) | 6,6 | 5,3 |

Além de o MHL permitir que seja avaliada a influência da interação de dois ou mais parâmetros no dado de saída da edificação, este método também permite que seja reduzido o número de simulações necessárias sem interferir na qualidade dos resultados. Observou-se que mesmo adotando um número reduzido de casos para o desenvolvimento do modelo simplificado, este apresentou os melhores resultados de média dos erros e desvio padrão.

O desenvolvimento de dois modelos simplificados para a avaliação da eficiência energética da envoltória das edificações no RTQ-C foi necessário, pois o método estatístico de regressão linear não conseguiu ter um comportamento favorável para abranger todas as tipologias em uma mesma equação. A aplicação do método estatístico de redes neurais de acordo com a área de projeção de cada tipologia conseguiu melhor representar os resultados obtidos com simulação computacional.

4.3. Modelo simplificado

Para o desenvolvimento do novo modelo foram consideradas todas as tipologias (3200 casos) adotando o método estatístico de rede neural. Foi selecionado um total de 25% (800 casos) dos casos para validação da rede, 25% (800 casos) para verificar o desempenho da rede e o restante (1600 casos) para o treinamento da rede. Os resultados do treinamento e validação dos casos podem ser observados através da Figura 5.

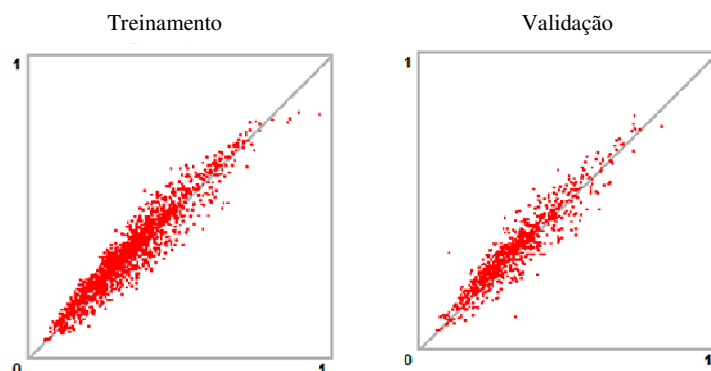


Figura 5. Treinamento e validação dos casos.
Fonte: Programa EasyNN-Plus

O treinamento dos casos selecionados apresentou um bom desempenho, assim como os casos selecionados para validação uma vez que os valores concentraram-se próximo a reta. Nota-se que dentre os casos selecionados para validação, somente dois casos apresentaram como resultado uma grande diferença entre os resultados dos valores simulados e equacionados (-28 kWh/m^2 e 20 kWh/m^2).

Após o treinamento e validação da rede neural, o programa fornece um arquivo de saída em .csv o qual permite que sejam analisados os casos que foram selecionados para a avaliação do desempenho da rede. Este arquivo permite que sejam comparados os valores de consumo equacionado (kWh/m^2) pela rede neural e o consumo simulado (kWh/m^2) pelo programa EnergyPlus. Com base nestes resultados foi possível avaliar a média dos erros dos resultados, o desvio padrão, coeficiente de determinação e analisar através de um histograma a frequência de ocorrência dos erros (simulado x equacionado).

Os resultados de média e desvio padrão dos erros para estes casos foram de $-3,7 \text{ kWh/m}^2$ e $8,7 \text{ kWh/m}^2$, respectivamente. O valor da média dos erros encontrado é relativamente baixo, e o valor do desvio padrão informa que os valores dos quais foram extraídos a média são $8,7 \text{ kWh/m}^2$ próximos ou distantes do resultado da média de $-3,7 \text{ kWh/m}^2$. O valor do coeficiente de determinação encontrado foi de 0,89, apresentado na Figura 6.

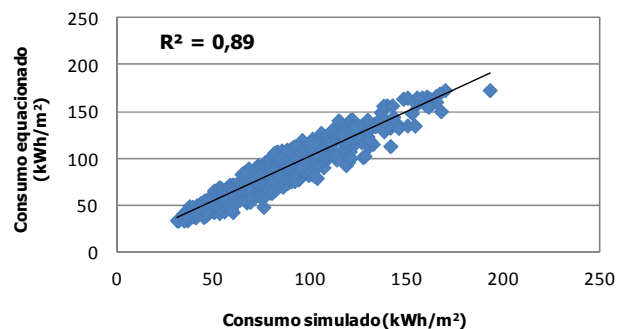


Figura 6. Coeficiente de determinação do novo modelo simplificado.

Avaliando os resultados encontrados através de um histograma com a diferença de consumo (Figura 7) e do erro percentual (Figura 8) entre os casos simulados e equacionados nota-se que 241 do total de 800 casos adotados para a avaliação do desempenho da rede apresentaram diferença entre o consumo simulado e o equacionado entre -5 kWh/m^2 e 0 kWh/m^2 (54% dos casos). Entre os resultados para uma diferença de -10 kWh/m^2 e -5 kWh/m^2 foram encontrados um total de 195 casos (75%). Para a diferença entre 0 e 10 concentram-se um total de 140 casos (48%). A maior diferença entre os casos simulados e equacionados considerando todas as tipologias encontra-se entre os limites de -10 kWh/m^2 a 10 kWh/m^2 (84% dos casos). Entre os limites -5 kWh/m^2 e 5 kWh/m^2 encontram-se um total de 64% dos casos.

Os resultados do valor obtido para o coeficiente de determinação e do histograma com a diferença entre o consumo simulado e equacionado mostram que o método estatístico de redes neurais conseguiu representar a interação entre os dados de entrada e o dado de saída para o modelo considerando todas as tipologias estudadas.

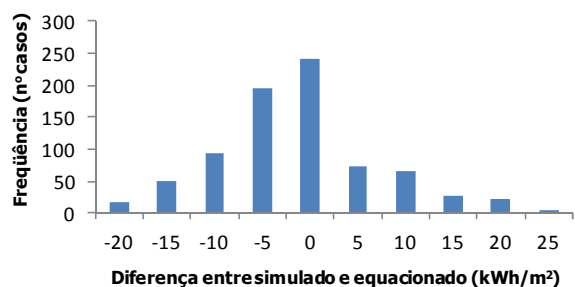


Figura 7. Histograma da diferença de consumo entre simulado e equacionado.

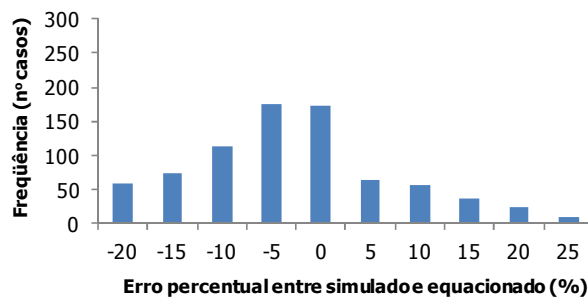


Figura 8. Histograma do erro percentual entre simulado e equacionado.

4.5. Validação

Os resultados de consumo de energia por m² das tipologias consideradas para a avaliação da precisão do novo modelo simplificado foram obtidos através do programa EasyNN-Plus. Os modelos desenvolvidos ficam armazenados no próprio programa e, com base nas características da edificação em análise o mesmo fornece os resultados de consumo de energia por m². Os resultados podem ser observados na Tabela 5.

Calculando o consumo através do programa computacional EnergyPlus para o modelo representando as Pequenas Edificações, o resultado encontrado foi de 182 kWh/m². Entretanto, avaliando o consumo através do modelo simplificado desenvolvidos através da utilização de redes neurais foi encontrado o valor de 168 kWh/m². A diferença encontrada entre o resultado do simulado e equacionado é de 14 kWh/m² (7%).

Tabela 5. Validação do modelo simplificado.

| | Consumo (kWh/m ²) | | Diferença (kWh/m ²) | Diferença (%) |
|---------------------|-------------------------------|-------------|---------------------------------|---------------|
| | EnergyPlus | Rede neural | | |
| Pequena Edificação | 182 | 168 | 14 | 7 |
| Grande Edificação | 95 | 102 | -7 | 7 |
| Edificação Vertical | 46 | 55 | -9 | 16 |
| Não convencional | 58 | 49 | 9 | 16 |

O modelo representando as Grandes Edificações resultou em um consumo de 102 kWh/m². Avaliando esta mesma tipologia através do programa EnergyPlus, o valor encontrado foi de 95 kWh/m². Comparando o valor simulado com o equacionado, encontrou-se um valor de -7 kWh/m² (7%).

Comparando os resultados simulado e equacionado para a tipologia representando as Edificações Verticais, nota-se que o resultado encontrado por simulação computacional foi de 46 kWh/m² e para o modelo foi de 55 kWh/m², com uma diferença de -9 kWh/m² (16%).

Para a tipologia com dimensões não convencionais, o resultado encontrado através do programa EnergyPlus foi de 58 kWh/m². Avaliando o consumo obtido através da aplicação do modelo simplificado o valor encontrado foi de 49 kWh/m². A diferença encontrada entre o resultado simulado e equacionado foi de 9 kWh/m² (16%).

Com base nos resultados encontrados, pode-se concluir que quanto mais detalhados os dados de entrada e quanto maior o número de informações melhor será o aprendizado de uma rede neural. Entretanto, ressalta-se a importância da correlação entre consumo de energia e o nível de eficiência alcançado. O estudo e análise do potencial de economia de energia com relação à geometria da edificação podem auxiliar para uma configuração mais eficiente energeticamente do espaço urbano, o qual é especialmente relevante em países com grande taxa de crescimento nas áreas urbanas, como é o caso do Brasil.

5. CONCLUSÕES

O objetivo principal deste trabalho foi desenvolver um método para estimar o consumo de energia em edificações comerciais. O estudo deu ênfase ao modelo simplificado presente no Regulamento Técnico da Qualidade do Nível de Eficiência Energética de Edifícios Comerciais, de Serviços e Públicos. Com base nos resultados é possível ressaltar as seguintes conclusões:

- O método estatístico adotado para o desenvolvimento do modelo simplificado do RTQ-C não foi capaz de entender a influência dos dados de entrada no dado de saída. Porém, a aplicação do método

estatístico de redes neurais apresentou resultados com pouca diferença quando comparados com os resultados do programa EnergyPlus;

- A aplicação do método Hipercubo Latino reduz o número de casos a ser gerado para determinada análise quando comparado com a técnica de alterar somente um parâmetro por caso, sem influenciar na qualidade dos resultados;
- A aplicação do método estatístico de redes neurais permitiu abranger todas as tipologias com diferentes áreas de projeção de cobertura em uma única equação;
- O desenvolvimento do novo modelo simplificado conseguiu representar a interação entre os dados de entrada e dado de saída, apresentando como resultado uma média de erros de $-3,7 \text{ kWh/m}^2$ e um desvio padrão de $8,7 \text{ kWh/m}^2$;
- O novo modelo simplificado apresentou uma diferença máxima de 14 kWh/m^2 entre o consumo simulado e equacionado para as tipologias que não foram consideradas no seu desenvolvimento.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ASHRAE – AMERICAN SOCIETY OF HEATING, REFRIGERATING AND AIR-CONDITIONING ENGINEERS. 2004. ANSI/ASHRAE Standard 140-2004: **Standard Method of Test for the Evaluation of Building Energy Analysis Computer Programs**. Atlanta, 2004.
- ASHRAE, – AMERICAN SOCIETY OF HEATING, REFRIGERATING AND AIR-CONDITIONING ENGINEERS. 2010. ANSI/ASHRAE Standard 90.1-2010: **Energy standard for building except low-rise residential buildings**. Atlanta, 2010.
- AUSTRALIAN BUILDING CODES BOARD. **About the Australian Building Codes Board**. 2008. Available from: <http://www.abcb.gov.au/about-the-australian-building-codes-board> Accessed: 05 dezembro 2010.
- BEZDEK, J. C.; PAL, S. K. **Fuzzy models for pattern recognition: methods that search for structures in data**. New York: IEEE Press, 544p. 1992.
- BRASIL, 2009. Instituto Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial (INMETRO). Portaria 185, de 22 de junho de 2009. **Regulamento de Avaliação da Conformidade do Nível de Eficiência Energética de Edifícios Comerciais, de Serviços e Públicos**. Rio de Janeiro, 04 Fevereiro.
- CALIFORNIA ENERGY COMMISSION. **Energy efficiency standards for residential and nonresidential buildings**. Sacramento: California Energy Commission, 2001. 166 p.
- CARLO, J. **Desenvolvimento de Metodologia de Avaliação da Eficiência Energética do Envolvimento de Edificações Não-residenciais**. Tese de doutorado. Departamento de Engenharia Civil, UFSC, Florianópolis, 2008.
- CARLO, J., LAMBERTS, R. 2010. Parameters and methods applied in the energy efficiency labelling regulation for buildings – part 1: prescriptive method (in Portuguese). **Revista Ambiente Construído**, v.10, n. 2, 7-26.
- DE WIT, S.; AUGENBROE, G. Analysis of uncertainty in building design evaluations and its implications. **Energy and Buildings**, v.34, n.9, p.951-958. 2002.
- DOE – DEPARTMENT OF ENERGY. **Programa EnergyPlus - version 6.0**. Available from: <http://apps1.eere.energy.gov/buildings/energyplus/> Accessed: 19 de outubro 2010.
- EASYN PluS. **EasyNN-plus neural networks**. Neural Planner Software, 2011.
- HOES, P-J. **Gebruikersgedrag in gebouwsimulaties van eenvoudig tot geavanceerd gebruikersgedragmodel** (in Dutch). Dissertação de mestrado. Technische Universiteit Eindhoven, Eindhoven, 2007.
- MATLAB – The language of technical computing. Available from: <http://www.mathworks.com/products/matlab/index.html> Accessed 11 de fevereiro 2011.
- MCKAY, M.D.; CONOVER, W. J.; BECKMAN, R. J. A Comparison of Three Methods for Selecting Values of Input Variables in the Analysis of Output from a Computer Code. **Technometrics**, v.21, n.2, p.239-245. 1979.
- MELO, A.P., CÓSTOLA, D.; LAMBERTS, R.; HENSEN, J. L. M. Assessing the accuracy of a simplified building energy simulation model using BESTEST: The case study of Brazilian regulation. **Energy and Buildings**, v.45, n.0, p.219-228. 2012.
- OLSSON, A.; SANDBERG, G.; DAHLBLOM O. On Latin hypercube sampling for structural reliability analysis, **Structural Safety**, v. 25, n.1, p.47–68. 2003.
- RISSO, V. F., RISSO, F. V. A., SCHIOZER, D. J. Aplicação da Técnica do Hipercubo Latino na Análise de Risco de Campos de Petróleo. In: Rio Oil & Gas Expo and Conference, 2010, Rio de Janeiro. **Anais...**Rio de Janeiro: 2010. p.1-3
- SIMLAB – SENSITIVITY ANALYSIS. **Free development framework for Sensitivity and Uncertainty Analysis**. Available from: <http://simlab.jrc.ec.europa.eu/> Accessed: 11 de fevereiro 2011.
- XU, C.; HE, H. S.; HU, Y.; CHANG, Y.; LI, X.; BU, R. Latin hypercube sampling and geostatistical modeling of spatial uncertainty in a spatially explicit forest landscape model simulation. **Ecological Modelling**, v.185, n.2-4, p.255-269. 2005.
- YAMAKAWA, M.A.; WESTPHAL, F.S. Influência do percentual de abertura nas fachadas e do fator solar dos vidros na etiquetagem do Procel/Inmetro: Método Prescritivo x Simulação. In: XI Encontro Nacional sobre Conforto no Ambiente Construído. **Anais...**Búzios: ANTAC, 2011.

AGRADECIMENTOS

O primeiro autor agradece à CAPES (Fundação e Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior) - Proc. no 2335/10-7 e à ELETROBRAS. pelos recursos financeiros fornecidos aplicados no financiamento do projeto.