

ANÁLISE DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA: DESVIOS ENTRE DADOS CONSTRUTIVOS ESTIMADOS E MEDIDOS PARA CONSTRUÇÃO DE MODELOS

Camille L. Lanzer (1); Ana Carolina O. Veloso (2); Ricardo N. N. Koury (3); Roberta V. G. Souza (4)

(1) Estudante, Graduação em Arquitetura e Urbanismo, camillelanzer@gmail.com

(2) Dra, Arquiteta, acoveloso@gmail.com, Laboratório de Conforto Ambiental e Eficiência Energética no Ambiente Construído, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte – MG

(3) Dr, Professor do Departamento de Engenharia Mecânica, koury@ufmg.br, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte - MG, Tel.: (31) 3409 5145

(4) Dra, Professora do Depto de Tecnologia da Arquitetura e Urbanismo, roberta@arq.ufmg.com Universidade Federal de Minas Gerais, Laboratório de Conforto Ambiental e Eficiência Energética no Ambiente Construído, Belo Horizonte - MG, Tel.: (31) 3409 8825

RESUMO

A análise de *benchmarking* classifica as edificações por seu consumo de energia permitindo identificar em quais edifícios há oportunidades para redução do consumo energético. Porém, o desenvolvimento de modelos nacionais se vê comprometido pela escassez de dados disponíveis para análise. Assim, este artigo se propõe a verificar os erros devidos à simplificação na estimativa de variáveis de projeto usadas na análise de *benchmarkings* com foco nas edificações comerciais. Para o presente estudo foi feita uma comparação entre os dados medidos a partir de ferramentas acessíveis e a partir de dados de projeto fornecidos pela prefeitura local, considerados mais precisos. Os dados avaliados referem-se à área total de piso, volume, área de fachada e percentual de abertura na fachada, de edifícios reais em Belo Horizonte, MG. A partir da análise de gráficos de dispersão, indicando o R^2 , e de cálculos do desvio de erro médio (MBE) e desvio de erro quadrático médio (RMSE), foi possível concluir que o levantamento simplificado pode ser uma estratégia para obtenção de dados edifícios com baixos índices de erro para análises de *benchmarking* de consumo de edificações comerciais.

Palavras-chave: *benchmarking*, eficiência energética, levantamento de dados.

ABSTRACT

The benchmarking analysis classifies buildings according to their energy consumption, contributing to identify buildings in which there may be opportunities for energy savings. Nevertheless, the implementation of national benchmarking models is compromised by the lack of available data for analysis. Therefore, this paper proposes to verify the accuracy of the simplified estimation of constructive variables necessary to create a benchmarking of commercial towers. The present study presents a comparison between measured constructive data obtained from simplified assessment methods and data from architectural plans obtained with the local city hall, considered more precise. The evaluated data refer to total floor area, volume, façade area and window-to-wall-ratio of buildings in Belo Horizonte, MG. From dispersion graphics analysis, indicating the correlation coefficient R^2 , calculations of the mean error deviation (MBE) and mean square error deviation (RMSE), it was possible to conclude that this simplified assessment can be a satisfactory strategy for obtaining data from buildings, showing low error rates for the analysis of the consumption benchmarking of commercial buildings.

Keywords: *benchmarking*, energy efficiency, data mining.

1. INTRODUÇÃO

O crescimento da demanda energética representa uma tendência mundial e também um desafio na manutenção de seu fornecimento. Em países em desenvolvimento isto se torna ainda mais acentuado devido à necessidade de grandes investimentos em redes nacionais e na capacidade de geração (BORGSTEIN; LAMBERTS, 2014). Dessa forma, governos estão estabelecendo metas para redução da geração de carbono e do consumo de energia. No Brasil é provável que o controle do consumo de energia em edifícios se torne um elemento fundamental para o controle de emissões (BORGSTEIN; LAMBERTS, 2014). Isso acontece, pois, a eficiência de edificações é uma área com grande potencial para melhoria e para redução de consumo energético. Hoje 50% do consumo total de energia elétrica no país está ligado ao parque edificado principalmente nos setores comerciais, residenciais e públicos (BEN, 2016). Assim, novas certificações ligadas ao projeto e à construção de edificações mais eficientes como o Programa de Etiquetagem em Edificações, PBE-Edifica, vêm ganhando espaço no cenário nacional. Este define classificação de desempenho energético para edificações comerciais, de serviço e públicas e são analisadas em relação ao projeto e especificação do sistema de ar condicionado, de iluminação e da envoltória.

Já o *Benchmarking* é um modelo de avaliação comparativa do consumo de energia. Para Chung (CHUNG et al., 2006), o *benchmarking* é um processo que compara o uso da energia em um edifício ou grupo de edifícios com características semelhantes ou analisa a forma como o uso de energia varia de acordo com um nível estabelecido. Desta forma, permite identificar a rentabilidade de medidas para redução dos custos com o consumo de energia e facilita a melhoria contínua, fornecendo medidas para se estabelecer metas de conservação de energia em edifícios. Diversos modelos de *benchmarking* vêm sendo desenvolvidos desde a década de 1990, sendo que o levantamento de dados é a primeira etapa deste processo (LOMBARD et al., 2009). A partir de dados de consumo de energia, construtivos e de operação das edificações pode-se avaliar o peso de variáveis no consumo de energia, construir modelos de referência e classificar as edificações a partir de seu consumo de energia como fizeram diversos autores (VELOSO et al., 2017; TIAN, 2017; SCHAEFER; GHISI, 2015; CARVALHO et al.; 2010; VERA; LANGLOIS, 2007).

A disponibilidade de informações é uma questão central no desenvolvimento de novos modelos. Nos EUA o programa Energy Star fornece classificações em eficiência no setor de construção comercial a partir de dados divulgados pelo *Commercial Buildings Energy Consumption Survey* (EIA, 2017). A divulgação pública desses dados é obrigatória em Nova Iorque desde o *Greener Greater Buildings Plan* (PLANAYC, 2012). No Reino Unido, desde 2015, todos os prédios públicos com mais de 250m² devem possuir um *Display Energy Certificate* (DEC) que é de acesso público (ARMITAGE, 2012). Porém, o Brasil não possui políticas para a divulgação dos dados necessários à elaboração de *benchmarks*, havendo por diversas vezes questões ligadas à confidencialidade da informação, especialmente aquela relativa ao consumo de energia elétrica das edificações e aos dados de projeto das mesmas, e isso prejudica o desenvolvimento de modelos necessários para compreensão do consumo energético em edificações em um cenário nacional. Dessa forma, a complexidade na obtenção de informações pode acarretar em uma simplificação dos modelos e imprecisão dos resultados.

O presente estudo complementa as análises desenvolvidas para a construção de um processo de *benchmarking* de edificações de escritório para a cidade de Belo Horizonte (VELOSO, 2017). A essência do processo de *benchmarking* é a análise comparativa. Para o estudo foram selecionadas edificações de escritório com no mínimo três pavimentos e área bruta superior a 1.000 m² em Belo Horizonte (20° 48' 57" Sul, 43° 57' 15" Oeste). A estimativa da quantidade dessas edificações em Belo Horizonte - MG foi produzida a partir de um banco de dados de IPTU (Imposto Predial e Territorial Urbano) de todas as edificações aprovadas até 2011, fornecidos pela Prefeitura Municipal. Foi verificado que em Belo Horizonte existem 568 edificações de edificações de escritório com no mínimo três pavimentos e área bruta superior a 1.000 m² e dessas, foram utilizadas para este estudo, apenas 49 edificações. Dentre as informações contidas nesse banco de dados, destacam-se as seguintes:

- Ano de construção – identifica qual é o tempo de uso da edificação e com isso, é possível determinar características arquitetônicas e construtivas relativas à época de construção;
- Tipo de ocupação – identifica a atividade predominante da edificação;
- Localização – permite localizar a edificação dentro da malha urbana de Belo Horizonte;
- Área construída – identifica a área total construída aprovada da edificação;
- Número de andares – incluindo o número de subsolos.

No entanto, para o desenvolvimento do *benchmarking* foi necessário obter-se dados não disponibilizados neste banco de dados como área de piso total, volume, área de fachada, percentual de

abertura na fachada, etc.

A decisão pela investigação destas variáveis foi feita a partir de levantamento de 96 fontes bibliográficas que apresentaram estudos relativos ao desenvolvimento de *benchmarkings* de edificações entre 1989 e 2016 realizado por Veloso (2017) nos quais identificou-se que em 59 destas tratava-se de variáveis edilícias. Destas, as variáveis edilícias mais presentes nestes estudos eram relativas às áreas da edificação (61% dos estudos), ao tipo de vidro (47%), ao percentual de aberturas nas fachadas (44% dos estudos), à forma (24% dos estudos) e à presença de proteção solar (24% dos estudos). Como na amostra de edificações há pequena presença de dispositivos de proteção solar, esta variável não será estudada no presente trabalho. Outra característica que não será estudada será o tipo de vidro, pois não se tinha o conhecimento do tipo de vidro existentes nas edificações para se fazer as comparações.

A obtenção destes dados ocorreu da seguinte maneira: a primeira, considerada estimada de forma simplificada e a segunda, a partir de dados medidos originários de projetos arquitetônicos. Como não se pôde obter dados de todas as edificações selecionadas por meio de dados medidos o presente artigo visa discutir os desvios ocorridos nas simplificações adotadas para o levantamento das variáveis necessárias ao processo.

2. OBJETIVO

O objetivo desta pesquisa é a verificação do impacto causado pela simplificação na estimativa de variáveis de projeto na análise de *benchmarking* para os edifícios de escritório tomando como caso base a cidade de Belo Horizonte.

3. MÉTODO

O método apresenta os procedimentos de levantamento simplificado para obtenção de dados estimados e os procedimentos de levantamento de dados medidos em planta de variáveis como áreas de piso, volume, áreas de fachada e porcentagem envidraçada das fachadas.

Após esta descrição, são indicados os indicadores utilizados para comparação dos dados obtidos pelos dois procedimentos utilizados.

3.1. Levantamento de dados estimados

Após a identificação dos edifícios a serem estudados, fez-se um levantamento pela ferramenta *Google Maps/Street View* em conjunto às plantas urbanas disponibilizadas pela Empresa de Informática e Informação do Município de Belo Horizonte (PRODABEL). Essas plantas consistem na projeção das edificações e dos terrenos em Belo Horizonte. Por meio deste levantamento inicial foi possível estimar as áreas de piso, volume, áreas de fachada e porcentagem envidraçada das fachadas, das edificações levantadas conforme descrito a seguir.

3.1.1. Área de piso total – método simplificado

O número de andares foi levantado pela base de dados do IPTU e conferido via *Google Maps/Street View*. A área de projeção da edificação foi retirada da imagem produzida pela ferramenta *Google Maps/Street View* associada ao levantamento da PRODABEL, como demonstrado na Figura 1.

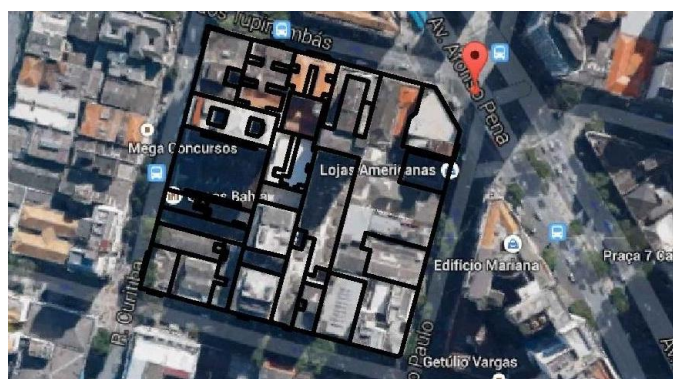


Figura 1 - Exemplo de levantamento pelas ferramentas *Google Maps/Street View* e PRODABEL (linhas pretas).

Assim, a área de piso total foi determinada de acordo com a Equação 1.

$$A_p = \text{AND} \times A_{PE} \quad \text{Equação 1}$$

Onde:

A_p é a área de piso total da edificação [m²];

AND é o número de andares da edificação;

A_{PE} é a área de projeção da edificação [m²].

3.1.2. Volume – método simplificado

O volume das edificações foi calculado a partir do número de andares, da área de projeção da edificação e do pé-direito. O número de andares e a área de projeção da edificação foram determinados conforme explicitado anteriormente. A altura do pavimento de piso a piso foi determinada da seguinte forma: para prédios totalmente condicionados (condicionados por sistema central) – a altura considerada foi de 3,15m e para prédios com modo misto de condicionamento de ar (condicionado por aparelhos split/janela) – a altura considerada foi de 2,90m. Assim, o volume foi determinado de acordo com a Equação 2.

$$V = \text{AND} \times A_{PE} \times \text{PD} \quad \text{Equação 2}$$

Onde:

V é o volume total da edificação [m³];

AND é o número de andares da edificação;

A_{PE} é a área de projeção da edificação [m²];

PD é a altura piso a piso da edificação [m].

3.1.3. Área de fachadas externas – método simplificado

A área de fachada das edificações foi aferida multiplicando o número de andares, a altura do pavimento de piso a piso e o perímetro da projeção da edificação. O número de andares e a altura do pavimento foram determinados conforme explicitado anteriormente. O perímetro da projeção da edificação foi calculado usando-se as ferramentas *Google Maps/ Street View* e os mapas da PRODABEL. Vale ressaltar que em alguns prédios as fachadas faziam divisa com outros prédios e assim, foi necessária a retirada dessas áreas de fachada do cômputo final da área de fachada total uma vez que a análise realizada no *benchmarking* foi relativa apenas às superfícies que permitem troca de calor diretamente com o ambiente externo. Assim, a área das fachadas externas foi determinada de acordo com a Equação 3.

$$A_{FCH} = (\text{AND} \times P_{PE} \times \text{PD}) - A_{FCHE} \quad \text{Equação 3}$$

Onde:

A_{FCH} é a área de fachada da edificação [m²];

AND é o número de andares da edificação;

P_{PE} é o perímetro da projeção da edificação [m];

PD é a altura piso a piso da edificação [m];

A_{FCHE} é a área de fachada dividida com edificação vizinha [m²].

3.1.4. Percentual de abertura nas fachadas – método simplificado

O percentual de abertura nas fachadas (PAF) foi determinado a partir de levantamento visual, via *Google Maps/ Street View*. Alguns estudos fizeram estudos usando valores de PAF para análise de eficiência energética em edificações ou em processos de *benchmarking*. Maciel e Carlo (2011), utilizaram valores de

PAF de 5 a 95%, Carlo e Lamberts (2010) de 16 a 72%, Santana e Ghisi (2007) de 1 a 100%, Ribeiro (2016) de 14 a 47% e Veloso et al. (2017) de 1 a 50%.

Foram utilizadas das mesmas faixas do estudo de Veloso et al. (2017), alterando somente as duas últimas faixas. Assim, as faixas de PAF utilizadas neste trabalho foram: até 10%, de 11 a 25%, de 26 a 40% e de 40 a 50%. Porém, para fins de análise no presente artigo, utilizou-se o valor médio destas faixas, sendo adotados os seguintes valores para o PAF: 10%, 18%, 33% e 45%.

3.2. Levantamento de dados medidos de projeto

A segunda parte do levantamento de dados foi feita a partir de desenhos técnicos das edificações concedidos pela Prefeitura Municipal de Belo Horizonte (PBH). Foram utilizadas neste estudo, informações detalhadas de 49 edificações.

3.2.1. Área de piso total – dados medidos

Neste levantamento, considerado mais preciso que o anterior, a área de piso total foi calculada a partir das plantas concedidas pela PBH. Estas foram recebidas em formato *pdf* e por isso, foram redesenhadas no programa AutoCad®. A partir do desenho das edificações no programa, fez-se a somatória da área de todos os pavimentos. Assim, a área de piso total foi determinada de acordo com a Equação 4.

$$A_p = \sum_{i=1}^n A_{PA} \quad \text{Equação 4}$$

Onde:

A_p é a área de piso total da edificação [m²];

A_{PA} é a área do andar da edificação [m²].

3.2.2. Volume – dados medidos

O volume das edificações foi calculado pela multiplicação da área de piso total pela altura do pavimento. A área de piso total foi calculada conforme explicitado anteriormente. Porém, para o cálculo da altura de piso a piso do pavimento foram necessárias algumas adaptações. Os desenhos técnicos recebidos não continham, em sua grande maioria, cortes das edificações dificultando o estabelecimento desta variável. Dessa forma, determinou-se que ele seria calculado pela diferença de nível quando este estivesse indicado nas plantas ou, na ausência deste, pelo número de degraus da escada multiplicado por 0,18m de espelho. Assim, o volume foi determinado de acordo com a Equação 5.

$$V = A_p \times PD \quad \text{Equação 5}$$

Onde:

V é o volume total da edificação [m³];

A_p é a área de piso total da edificação [m²];

PD é a altura piso a piso da edificação [m].

3.2.3. Área de fachadas externas – dados medidos

A área de fachada foi determinada a partir do perímetro de cada andar, multiplicado pela altura de cada andar. O perímetro do andar foi calculado com auxílio do programa AutoCad® e a altura do andar conforme explicitado anteriormente. Quando a edificação fazia divisa com outra edificação, ou seja, estava encostada em outra edificação vizinha, essa área não foi contabilizada como área de fachada. Assim, a área das fachadas foi determinada de acordo com a Equação 6.

$$A_{FCH} = \sum_{i=1}^n [(P_{PE} \times PD) - A_{FCHE}] \quad \text{Equação 6}$$

Onde:

A_{FCH} é a área de fachada da edificação [m²];

P_{PE} é o perímetro da projeção da edificação [m];

PD é a altura piso a piso da edificação [m];

A_{FCHE} é a área de fachada encostada em edificação vizinha [m²].

3.1.4. Percentual de abertura nas fachadas – dados medidos

O percentual de abertura na fachada foi calculado dividindo-se a área total das aberturas pela área total de fachada da edificação. A área total de fachada foi calculada conforme explicitado anteriormente. O levantamento das aberturas das edificações foi feito a partir dos quadros de esquadrias presentes nas plantas. Para os projetos que não possuíam quadro de esquadrias, as aberturas foram levantadas pelos cortes e pelas fachadas. Os projetos que não apresentavam tabela de esquadrias, cortes ou fachadas, tiveram a altura das aberturas deduzidas do *Google Street View/ Google 3D* através de proporções. Assim, o percentual de abertura na fachada foi determinado de acordo com a Equação 7.

$$PAFt = (A_{EN}) \div (A_{FCH}) \times 100 \quad \text{Equação 7}$$

Onde:

$PAFt$ é a porcentagem da área de fachada envidraçada [%];

A_{EN} é a área total de fachada envidraçada [m²];

A_{FCH} é a área de fachada da edificação [m²].

3.3. Análise dos dados

Para se avaliar a relação entre os dados estimados e os dados medidos, foi utilizado o coeficiente de correlação. A relação entre as variáveis é do tipo experimental, ou seja, os valores de uma das variáveis são controlados pela atribuição ao acaso do objeto sendo estudado e observando o que acontece com os valores da outra variável. O coeficiente de correlação pode variar de -1 a $+1$. O coeficiente $+1$, indica uma correlação linear positiva perfeita e o coeficiente de correlação “0”, significa que não existe um relacionamento linear entre as duas variáveis. Para ilustrar essa correlação, utilizou-se o diagrama de dispersão.

Também foram utilizados indicadores estatísticos de desempenho: desvio do erro médio (MBE) e desvio do erro quadrático médio (RMSE). O MBE é um bom indicador da tendência global no modelo. Ele captura a diferença média entre pontos de dados estimados e medidos. O MBE positivo indica que os dados estimados são mais elevados que os medidos. Já o RMSE é uma medida de quão perto o perfil de dados estimados estão dos dados medidos. O NMBE e CV(RMSE) serão calculados pela divisão do MBE e RMSE pela respectiva média dos dados estimados da amostra. Para o cálculo destes valores foram utilizadas as Equações 8 e 9.

$$NMBE = \frac{100}{y} \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - y_i)}{n} \quad \text{Equação 8}$$

Onde:

NMBE é o desvio de erro médio;

x_i são os dados estimados;

y_i são os dados medidos;

n é o número de edifícios da amostra;

y é a média dos dados estimados.

$$CV(RMSE) = \frac{100}{y} \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - y_i)^2}{n}}$$

Equação 9

Onde:

RMSE é o desvio de erro quadrático médio;

x_i são os dados estimados;

y_i são os dados medidos;

n é o número de edifícios da amostra;

y é a média dos dados estimados.

4. RESULTADOS

Nesta seção são apresentados quatro gráficos de dispersão que ilustram a relação entre os valores dos levantamentos de dados estimados (eixo X) e de dados medidos em projeto (eixo Y) da área de piso total, do volume, da área de fachada e do percentual de abertura na fachada. Além disso, são apresentados os erros médios (NMBE e RMSE) calculados para as características construtivas acima citadas.

Em relação à área total de piso da edificação, a Figura 2 mostra a relação entre os dados estimados e os dados medidos. É possível perceber que há uma boa correlação entre os valores, com $R^2=0,93$. Esta é a característica das edificações que apresentou a melhor correlação entre os dados estimados e medidos, com $NMBE = -2,59\%$ e $RMSE = 14,47\%$. Acredita-se que o pequeno desvio encontrado se deva ao fato de que os dados estimados vieram de um levantamento de dados da PRODABEL, que é de um setor da PBH e que, portanto, os dados de projeção da edificação são obtidos diretamente dos projetos arquitetônicos. Pressupõe-se que a pequena diferença entre os dados medidos e estimados, tenha sido causada por alterações nas construções pós-ocupação. Assim, estima-se que seja possível a utilização de levantamentos simplificados referentes a esta característica para análises de *benchmarking*.

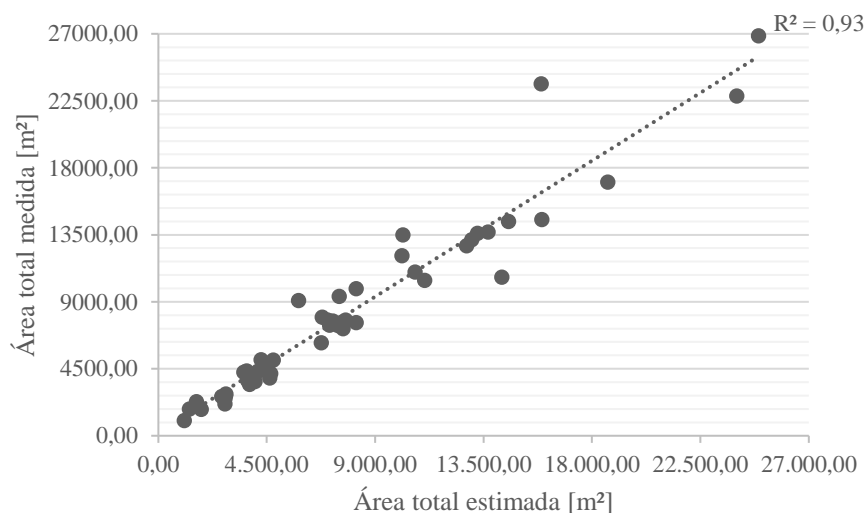


Figura 2 - Relação entre dados estimados e medidos da Área de Piso Total das edificações analisadas.

A análise da área da edificação em uma avaliação de eficiência energética é de extrema importância, uma vez que os índices primários de comparação são estabelecidos como relações de consumo por área (kWh/m^2). A indicação de boa precisão deste valor dá confiabilidade aos índices gerados.

Com relação ao Volume da edificação, a Figura 3 mostra a relação entre os dados estimados e medidos em projeto. Neste caso houve uma correlação um pouco menor do que em relação à área de piso da edificação. Tendo em vista as equações 02 e 05, a estimação desta variável foi mais passível de erro, pois a altura de piso a piso de cada pavimento foi fixada com valores de 3,15m e 2,90m, na análise de dados estimados. Dessa forma, o Volume apresenta $NMBE = - 9,99\%$ e $RMSE = 21,29\%$. Apesar disso, a

correlação ainda é alta, com $R^2=0,94$. Assim, estima-se que seja possível a utilização de levantamentos simplificados referentes a esta característica para análises de *benchmarking*.

Como a estimativa do volume da edificação está diretamente ligada à sua área era esperado que a partir de uma boa estimativa da área a estimativa do Volume da edificação também apresentasse resultados considerados adequados. O volume da edificação é um indicativo da relação de trocas de calor com o interior da edificação a ser levado em consideração conjuntamente com a área de fachada e tem sido usado nas equações de regressão do RTQ-C (BRASIL, 2010), por exemplo.

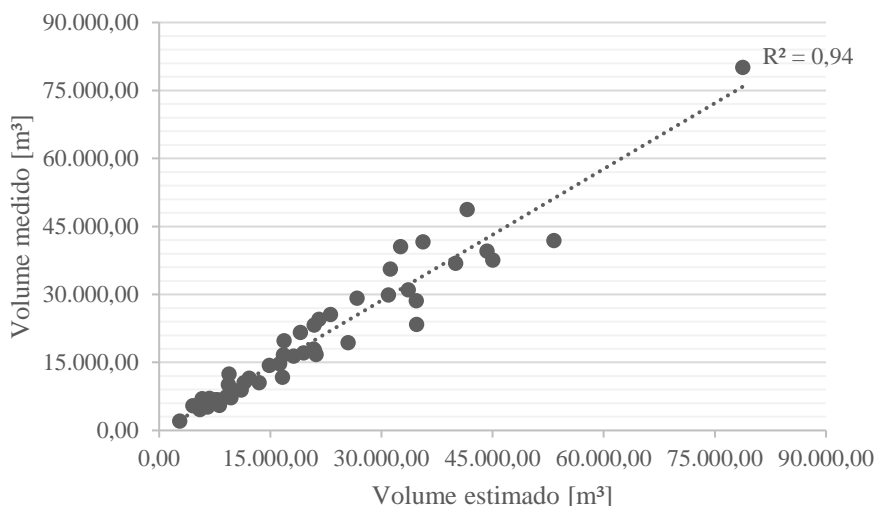


Figura 3 - Relação entre dados estimados e medidos do Volume das edificações analisadas.

Em relação à Área de Fachada, houve ainda uma correlação considerada alta entre os dados estimados e medidos, conforme pode ser visto na Figura 4. Neste caso, o valor de R^2 é menor que nos casos anteriores, apresentando $R^2=0,88$. Considera-se também aqui que a diferença na estimativa das áreas esteja relacionada com a determinação da altura do pavimento e também a possíveis diferenças relativas ao cálculo das áreas de fachada encostada em edificação vizinha. Os valores de NMBE e RMSE são, $-0,38\%$ e $16,69\%$ respectivamente. Assim, estima-se que seja possível a utilização de levantamentos simplificados referentes a esta característica para análises de *benchmarking*.

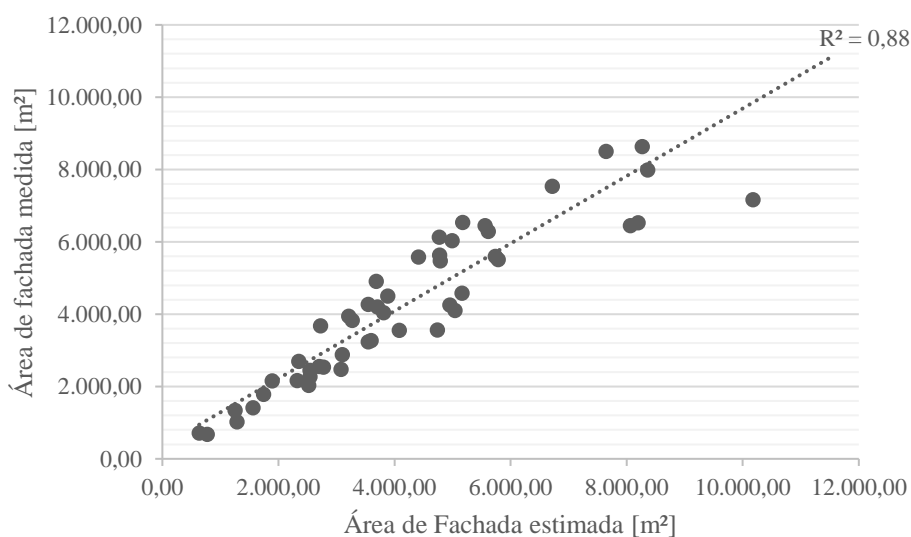


Figura 4 - Relação entre dados estimados e medidos da Área da Fachada.

A área de fachada em conjunto com o percentual de abertura nas fachadas auxilia na determinação da sensibilidade da envoltória às trocas de calor. Em relação à porcentagem da área de fachada envidraçada

(PAF), esta apresentou uma menor correlação entre os valores estimados e medidos, com $R^2=0,81$, conforme pode ser visto na Figura 5. Para os valores pré-estabelecidos, 10%, 18%, 33% e 45%, o MBE e o RMSE calculados são 3,74% e 24,83% respectivamente.

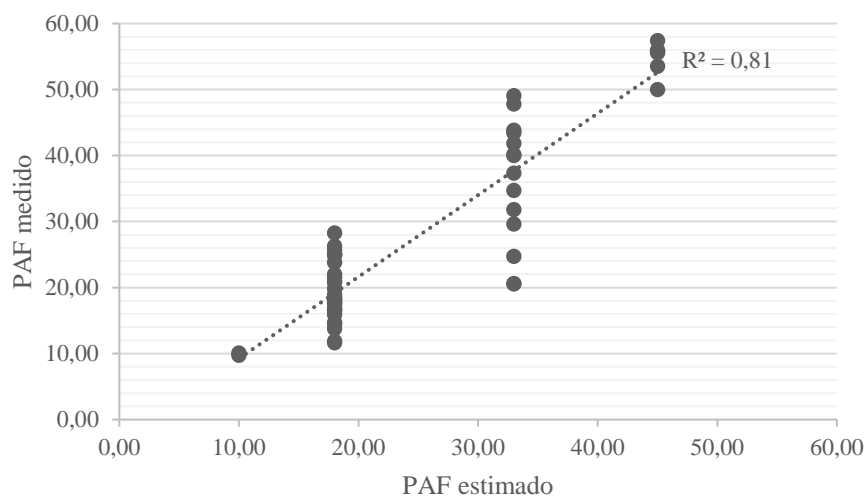


Figura 5 - Relação entre dados estimados e medidos da Porcentagem da Área de Fachada Envidraçada.

Apesar dos dados estimados terem sido pré-estabelecidos em valores fixos, os erros encontrados e a correlação entre os dados estimados e medidos parecem mostrar que essa estimativa dos dados pode ser utilizada para análise de *benchmarking*. Ao analisar-se o gráfico da Figura 5, no entanto, verifica-se que para cada faixa de PAF estimado houve uma significativa variação de valores de PAF medidos inclusive com valores medidos nas faixas entre 10 e 25% e de 26 a 40% tendo sido considerados em faixas diferentes daquelas estabelecidas. Ressalta-se que esta variável costuma ter influência significativa em análises de eficiência energética de edificações e em processos de *benchmarking* e que sua devida consideração levará a estimativas mais precisas dos níveis de eficiência energética. No entanto, considerando a imprecisão visual do levantamento realizado, e os resultados em sua maioria indicaram adequadamente a faixa de PAF à qual pertenciam as edificações considerou-se como adequado o procedimento expedito para estabelecimento do PAF.

5. CONCLUSÕES

A partir dos resultados obtidos pela análise de correlação e dos indicadores estatísticos de erro entre levantamentos de dados reais estimados e medidos em projeto é possível concluir que em casos específicos de *benchmarking* podem-se utilizar variáveis simplificadas com um baixo índice de erro nos resultados. Neste caso, considera-se levantamento simplificado aquele obtido de ferramentas como *Google Maps/ Street View*, plantas da PRODABEL e dados do IPTU. Estas ferramentas são de acesso facilitado e aceleram o processo de levantamento de dados de edifícios reais e podem ser usados em cidades que possuam bases de dados semelhantes no Brasil. Esta análise é de grande importância para o contexto brasileiro, que sofre com dificuldades referentes a obtenção de dados para edifícios reais.

Considera-se que os resultados para área de piso total, volume, área de fachada e porcentagem de fachada envidraçada apresentaram uma correlação alta entre os dados estimados e os dados medidos e também erros considerados aceitáveis. A correlação entre as variáveis, demonstrada a partir do cálculo do R^2 , variou de 0,81 a 0,93, valores que refletem a alta correspondência entre os dados reais estimados e medidos. Além disso, o MBE variou de -0,38% a -9,99% indicando que os levantamentos simplificados tendem a subdimensionar ligeiramente os valores medidos de forma mais precisa e o RMSE variou de 14,47% a 24,83% indicando que apesar das boas correlações encontradas é sempre mais aconselhável a utilização de dados mais precisos.

Ressalta-se nas análises feitas a partir de dados medidos que o máximo valor de percentual de abertura na fachada foi de 58%, o que chama a atenção para os altos valores de percentual de abertura nas fachadas utilizados por pesquisadores brasileiros como Carlo e Lamberts (2010), Santana e Ghisi (2007) e

Maciel e Carlo (2011) que chegam a usar valores de 95% em análises relativas ao desempenho em eficiência energética em edificações. Ribeiro (2016) apresenta estudo realizado pelo LABCON-UFMG dados e apresenta valores de até 47% de PAF. Considera-se que utilização de valores elevados em estudos pode levar a um superdimensionamento do peso desta variável em regressões em processos de benchmarking ou do estabelecimento do nível de eficiência energética em edificações.

Por fim, acredita-se que as características tipológicas testadas no presente trabalho são passíveis de serem levantadas de forma simplificada para futuras análises de *benchmarking* nas quais os erros aqui apresentados sejam considerados aceitáveis. Esta simplificação pode aumentar significativamente o número de dados disponíveis para análises comparativas em realidades como a brasileira na qual dados de consumo e dados edifícios não são públicos e, portanto, de difícil obtenção.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ARMITAGE, P. et al. Using Display Energy Certificates to quantify public sector office energy consumption. *Building Research & Information*, v. 43, n. 6, p. 691–709, 2015.
- BORGSTEIN, E.H; LAMBERTS, R.; Developing energy consumption benchmarks for buildings: Bank branches in Brazil. *Energy and Buildings*, n. 82, p. 82-91, 2014.
- BRASIL, Ministério das Minas e Energia. BEN - Balanço Energético Nacional. Brasília, disponível em: <http://www.epe.gov.br>, acessado em: novembro, 2016.
- BRASIL. Regulamento Técnico da Qualidade para Eficiência Energética de Edifícios Comerciais, de Serviços e Públicos – RTQ-C. Ministério do Desenvolvimento, Indústria e Comércio Exterior. Instituto Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial (INMETRO). Portaria no 372, de 17 de setembro de 2010.
- CARLO, J. C.; LAMBERTS, R. Parâmetros e métodos adotados no regulamento de etiquetagem da eficiência energética de edifícios – parte 1: método prescritivo. *Ambiente Construído*, v. 10, n.2, p. 7-26, 2010.
- CARVALHO, M. M. Q.; ROVERE, E. L. LA; GONC, A. C. M. Analysis of variables that influence electric energy consumption in commercial buildings in Brazil. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 14, p. 3199–3205, 2010.
- CHUNG, W.; HUI, Y. V.; LAM, Y. M. Benchmarking the energy efficiency of commercial buildings. *Applied Energy*, v. 83, n. 1, p. 1–14, 2006.
- EIA – U.S. Energy Information Administration. Commercial Buildings Energy Consumption Survey (CBECS). Disponível em: <https://www.eia.gov/consumption/commercial/>>. Acesso em: 23 de maio de 2017.
- LOMBARD, L. P.; ORTIZ, J.; GONZÁLEZ, R.; MAESTRE, I.R; A review of benchmarking, rating and labelling concepts within the framework of building energy certification schemes. *Energy and Buildings*, n.41, p. 272-278, 2009.
- MACIEL, L. F.; CARLO, J.C. Análise de sensibilidade do Indicador de Consumo Frente às Variáveis das Equações do RTQ-C. In: XI Encontro Nacional de Conforto no Ambiente Construído – ENCAC – VII Encontro Latino Americano de Conforto no Ambiente Construído – ELACAC 2011. Búzios – RJ. Anais... Búzios, Rio de Janeiro, 2011.
- PLANYC. Inventory of New York City Greenhouse Gas Emissions. A Greener, Greater New York. The City of New York, 2012.
- RIBEIRO, N. F. Procedimentos Simplificados para a Avaliação da Envoltória pelo Método Prescritivo do RTQ-C, com o Foco em Edificações Existentes, dissertação. Programa de Pós-Graduação em Ambiente Construído e Patrimônio Sustentável, UFMG, Belo Horizonte, 2016.
- SANTANA, M. V.; GHISI, E. Influência do percentual de área de janela na fachada e da absorvância de paredes externas no consumo de energia em edifícios de escritório da cidade de Florianópolis-SC. Ouro Preto: Encontro Nacional de Conforto no Ambiente Construído, 9, Encontro Latino-Americano sobre Conforto no Ambiente Construído, 2007
- SCHAEFER, A.; GHISI, E. Method for obtaining reference buildings, *Energy and Buildings*, volume 128, p. 660 – 672, 2015.
- TIAN, W. et al. Relationship between built form and energy performance of office buildings in a severe cold Chinese region. *Building Simulation*, v. 10, n. 1, p. 11–24, 2017. ZHENGWEI, L.; YANMIN, H.; PENG, X.; Methods for benchmarking building energy consumption against its past or intended performance: an overview. *Applied Energy*, n. 124, p. 325-334, 2014.
- VELOSO, A. C. O., Avaliação do consumo de energia elétrica de edificações de escritório e sua correlação com as decisões de projeto, tese de doutorado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da UFMG, Belo Horizonte, 2017.
- VELOSO, A. C. O.; SOUZA, R. V. G.; KOURY, R. N. N. Research of design features that influence energy consumption in office buildings in Belo Horizonte, Brazil. *Energy Procedia*, v. 111, p. 101-110, 2017.
- VERA, I.; LANGLOIS, L. Energy indicators for sustainable development. *Energy*, v. 32, n. 6, p. 875–882, 2007.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o fomento à pesquisa por parte da FAPEMIG através de bolsa de Iniciação Científica, auxílio à participação em evento e à CAPES por bolsa de produtividade e por bolsa de doutorado.