



XIENCAC
ENCONTRO NACIONAL DE CONFORTO
NO AMBIENTE CONSTRUÍDO

VIIELACAC
ENCONTRO LATINO AMERICANO DE CONFORTO
NO AMBIENTE CONSTRUÍDO

Búzios - RJ - 2011

ANÁLISE DE SENSIBILIDADE DO INDICADOR DE CONSUMO FRENTE ÀS VARIÁVEIS DAS EQUAÇÕES DO RTQ-C

Liliane F. Maciel (1); Joyce C. Carlo (2)

(1) Bolsista PROBIC/FAPEMIG, Graduada em Arquitetura e Urbanismo, liliane.maciel@ufv.br

(2) Doutora, Professora do Departamento de Arquitetura e Urbanismo, joycecarlo@ufv.br

Universidade Federal de Viçosa, Departamento de Arquitetura e Urbanismo, Avenida Peter Henry Rolfs, s/n, Campus Universitário, Viçosa-MG, 36570-000, Tel.: (31) 3899-2200

RESUMO

Os critérios de eficiência energética exigidos pelo Regulamento Técnico da Qualidade do Nível de Eficiência Energética de Edifícios Comerciais, de Serviços e Públicos (RTQ-C), desde a sua publicação em 2009, são baseados nos métodos prescritivo e de simulação. A envoltória consiste em um dos sistemas avaliados pelo método prescritivo, esse procedimento classifica a eficiência energética em níveis que variam de “A” a “E”, isto é, do mais alto para o mais baixo. Este trabalho visa atender aos questionamentos referentes aos impactos dos parâmetros da envoltória no seu nível de eficiência. A metodologia adotada constou de pesquisa bibliográfica; seleção da amostra de edifícios segundo sua volumetria; aplicação do método prescritivo para a envoltória; determinação de intervalos de variáveis presentes na equação; identificação de um método estatístico para análise de sensibilidade e comparação da influência das variáveis entre equações de zonas bioclimáticas distintas visando verificar a coerência dos resultados de Indicador de Consumo com as peculiaridades de cada zona. Como resultado obteve-se os pesos de cada parâmetro no Indicador de Consumo da envoltória. Na média das volumetrias analisadas, o parâmetro que apresentou maior peso em todas as zonas bioclimáticas (ZB) foi o Percentual de Área de Abertura na Fachada total (PAF_T), com exceção de edifícios com área de projeção inferior a 500 m² localizados nas ZB 4 e ZB 5 e na ZB 7. A partir destes dados, os profissionais poderão atuar pontualmente em seus projetos, alterando diretamente aquele parâmetro que apresenta maior influência de modo a reduzir o consumo energético da envoltória e elevar o nível de eficiência segundo os parâmetros do RTQ-C.

Palavras-chave: análise de sensibilidade, envoltória, etiqueta de eficiência energética, edificações.

ABSTRACT

The energy efficiency criteria required by the Technical Regulations for Energy Efficiency Labeling of Commercial Buildings (RTQ-C), since 2009, are based on the prescriptive and simulation methods. The envelope is one of the systems evaluated by the prescriptive method. It is rated as energy efficiency levels from "A" to "E", which are the highest and the lowest levels. This study aims to analyze issues related to the impacts of the envelope parameters on the efficiency level. The methodology consisted on a literature research, a selection of buildings samples according to their shape and dimensions; an application of prescriptive method for the envelope; an establishment of variables ranges; an identification of a statistical method to analyze the variables sensitivity and to compare their influence on the equations according to different bioclimatic zones and to verify the consistency of the results with the peculiarities of each area. As a result, it was obtained the parameters weights on the envelope Consumption Indicator. Considering the building volumes indicators, the average indicated that the parameter which presented the greatest weight in all bioclimatic zones (ZB) was Window to Wall Ratio, except for buildings with less than 500 m² of projection area located on ZB 4, 5 or 7. With these data, professionals may act promptly on their projects, directly changing the parameter which present more influence on the reduction of energy consumption indicator for the envelope and raise the level of efficiency according to the RTQ-C parameters.

Keywords: sensitivity analysis, envelope, energy efficiency label, buildings.

1. INTRODUÇÃO

Estudos sobre eficiência energética vêm ganhando importância no Brasil desde o ano de 2001, quando uma crise no setor energético levou ao surgimento de uma Política Nacional de Conservação e Uso Racional de Energia, que visa à alocação eficiente de recursos energéticos e a preservação do meio ambiente. (BRASIL, 2001). Diante da sanção de uma primeira lei federal que trata do consumo de energia, tornou-se necessário o desenvolvimento de mecanismos que promovam a eficiência energética nas edificações construídas no país. Nesse sentido, foi publicado o Regulamento Técnico da Qualidade do Nível de Eficiência Energética de Edifícios Comerciais, de Serviços e Públicos (RTQ-C) pelo Inmetro (Instituto Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial) em 2009, atualmente Requisitos Técnicos (INMETRO, 2010), como parte do Programa Brasileiro de Etiquetagem.

O RTQ-C apresenta dois métodos de avaliação de eficiência energética de edificações: o método prescritivo e o método de simulação. A classificação do nível de eficiência é baseada em três sistemas individuais: envoltória, sistema de iluminação e sistema de condicionamento de ar. Todos os sistemas têm níveis de eficiência que variam de A (mais eficiente) a E (menos eficiente) (INMETRO, 2010).

As edificações podem receber dois tipos de Etiqueta Nacional de Conservação de Energia (ENCE): a ENCE Geral quando passa pela avaliação dos três sistemas individuais ou a ENCE Parcial, que permite que apenas um ou dois dos sistemas sejam avaliados. Segundo o método prescritivo do RTQ-C, a envoltória apresenta um peso de 30% na classificação geral do edifício. O tema deste trabalho consiste em uma investigação da influência das características da envoltória no nível de eficiência energética usando o método prescritivo. Portanto, as características investigadas podem apresentar até 30% de participação no nível de eficiência, quando excluídas as bonificações. As prescrições da envoltória baseiam-se em equações de consumo energético desenvolvidas a partir de 5000 simulações que forneceram um método de avaliação do nível de eficiência da envoltória (CARLO e LAMBERTS, 2008).

Durante a realização dos primeiros cursos de etiquetagem de edifícios comerciais, de serviços e públicos, a comunidade acadêmica levantou questionamentos sobre os impactos dos parâmetros da envoltória no seu nível de eficiência. A simples apresentação dos coeficientes de determinação das equações, obtida por Carlo e Lamberts (2008) não foi suficiente para indicar as influências em separado. De fato, conhecer o potencial de variação do Indicador de Consumo (IC) é necessário para um pleno domínio dos parâmetros dos edifícios pelos projetistas. Um regulamento recentemente publicado carece de domínio pelos projetistas e, até que seja criada uma cultura de projetos de edifícios eficientes dentre os profissionais da construção civil, é necessário que estudos forneçam as bases para viabilizar projetos de qualidade.

Westphal e Lamberts (2007) afirmam que equações de regressão podem ser usadas para guiar engenheiros e arquitetos durante a fase inicial de projeto. Características gerais como a área de abertura nas fachadas e a forma do edifício podem ser alteradas para avaliar o impacto do consumo de energia. Nesse sentido, torna-se importante a análise de sensibilidade dos parâmetros da envoltória, em outras palavras, é necessário avaliar o peso que cada variável possui nas equações do IC. Assim, os projetistas poderão identificar, de forma rápida e direta, quais parâmetros da envoltória têm maior influência no Indicador de Consumo e quais parâmetros são menos relevantes.

A análise de sensibilidade segundo Macdonald *et al.* (1999) consiste em uma técnica utilizada para avaliar a relação entre as variações nos parâmetros de entrada e as variações previstas para os de saída, sendo que, os que têm maior influência são chamados parâmetros sensíveis do modelo. Westphal e Lamberts (2007) mostram que a própria equação de regressão é resultado de uma análise de sensibilidade efetuada ao longo de um intervalo de valores para alguns parâmetros construtivos e os coeficientes obtidos para cada parâmetro representam seu impacto nos dados de saída. Entretanto esse impacto não pode ser obtido diretamente pelos coeficientes nas equações do Indicador de Consumo da envoltória do RTQ-C, pois em alguns termos das equações existem mais de uma variável para um mesmo coeficiente, isto é, existem razões e produtos de parâmetros, e ainda algumas variáveis se repetem ao longo da equação associadas a outros parâmetros e diferentes coeficientes.

2. OBJETIVO

O objetivo deste artigo é apresentar a análise da sensibilidade do Indicador de Consumo da envoltória do RTQ-C em função das variáveis presentes nas equações para a sua determinação.

3. MÉTODO

A análise da sensibilidade do Indicador de Consumo da envoltória do RTQ-C foi realizada para as duas equações de cada agrupamento de zonas bioclimáticas, totalizando na análise de dez equações.

3.1. Definição de edifícios

A amostra de edifícios foi selecionada em publicações periódicas nacionais, onde se procurou obter projetos típicos de edifícios existentes na paisagem urbana de cidades brasileiras e que possuíssem formas e alturas diversificadas. Projetos do Departamento de Obras da Universidade Federal de Viçosa foram adicionados à amostra por apresentarem dimensões dificilmente encontradas nas revistas, embora sejam tipologias recorrentes na produção de edifícios educacionais.

Baseado na metodologia utilizada por Carlo (2008) existe ainda a possibilidade de se criar volumetrias teóricas para suprir possíveis deficiências na amostra. Ou seja, a amostra poderá ser complementada com outras volumetrias caso não sejam encontrados edifícios com tais características volumétricas.

A figura 1 teve como base o gráfico mostrado por Carlo e Lamberts (2010), nesta os eixos representam indicadores de volumetria: o eixo das abscissas representa o Fator Altura (razão entre a área de projeção da cobertura e a área total construída) e o eixo das ordenadas representa o Fator de Forma (razão entre a área da envoltória e o volume total do edifício). Esta relação indica todas as volumetrias de edificações possíveis de existir. Ela apresenta duas áreas com hachuras, sendo a azul a que demarca as edificações cuja área total é menor que 500 m² e a amarela a que demarca combinações de Fator de Forma e Fator Altura em que se desconsiderou, teoricamente, existir edificações. Apresenta ainda a área selecionada para se obter as amostras, representada em verde, referente às volumetrias mais comuns de se existir na paisagem urbana (CARLO, 2008).

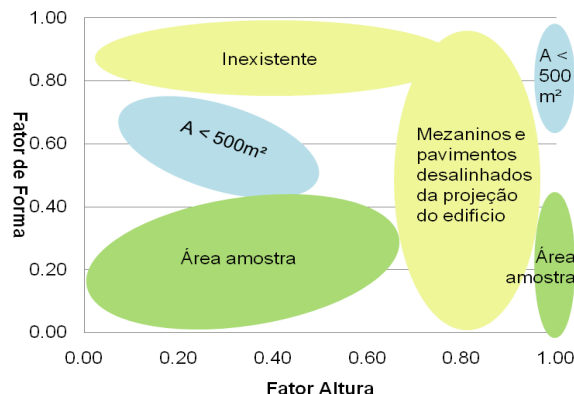


Figura 1 – Volumetrias a serem investigadas na análise de sensibilidade.

3.2. Determinação do intervalo das variáveis presentes nas equações

Dos parâmetros presentes nas equações, o Fator de Forma e o Fator Altura são definidos pela volumetria e pela geometria do edifício, portanto, as alterações nesses parâmetros são limitadas. Dessa forma, optou-se por analisar a influência da variação dos demais parâmetros mantendo o Fator de Forma e o Fator Altura constantes para cada caso amostrado.

Tabela 1 – Limites dos parâmetros da envoltória.

Parâmetro	Limite Inferior	Limite Superior
PAFT	0,05	0,95
FS	0,15	0,90
AVS	0	45
AHS	0	45

Para cada um dos demais parâmetros foram definidos os intervalos de variação de acordo com os seguintes fatores: para os limites do PAF_T (Percentual de Área de Abertura na Fachada total) consideraram-se as condições construtivas, onde um mínimo e um máximo possível de existir foram determinados. Para o FS (Fator Solar) foram observados os tipos de vidro disponíveis no mercado. Os valores dos ângulos de sombreamento (AVS e AHS) a serem usados nas equações tiveram seus limites definidos pelo próprio RTQ-C. A tabela 1 apresenta os limites superiores e inferiores definidos para cada um dos parâmetros analisados.

3.3. Análise de Sensibilidade pelo Método Estatístico Monte Carlo

A análise de sensibilidade do Indicador de Consumo em relação às variáveis independentes foi realizada de acordo com os seis passos do Método Monte Carlo, descritos por Trebien *et al* (2007). Segundo eles, denomina-se, genericamente, método Monte Carlo qualquer procedimento que envolva processos de amostragem por meio de números aleatórios para se chegar a soluções aproximadas de um problema físico ou matemático.

Primeiro passo: o primeiro passo da análise foi a obtenção dos limites de cada parâmetro p_j , para os quais o modelo é válido (TREBIEN *et al.*, 2007). Esses limites foram apresentados na tabela 1.

Segundo passo: o segundo passo consistiu na obtenção de uma matriz de valores aleatórios (v_{ij}) dentro dos limites definidos na tabela 1, onde cada coluna representa um dos 4 parâmetros analisados, ou

seja, o índice j varia de 1 a 4 e cada linha corresponde a uma iteração em que todos os valores são alterados gerando novas combinações dos parâmetros do modelo, isto é, o índice i varia de 1 a 1500. Este intervalo de variação é descrito no item 3.4.

Fernandes (2005) afirma que uma forma coerente de se obter números aleatórios seria a adivinhação, mas salienta que não é prático fazer adivinhações de centenas ou milhares de iterações para múltiplas variáveis, além do inconveniente de que o resultado dificilmente satisfaria o modelo de distribuição de probabilidades escolhido. O que se faz, segundo ele, é usar um gerador de números aleatórios, que na verdade não existe, uma vez que esses geradores seguem algoritmos que, por definição, nada têm de aleatórios. Ainda segundo Fernandes (2005), a quantidade mínima de linhas da matriz v_{ij} é estimada pela equação 1, em que o número de iterações é inversamente proporcional ao erro total, ou seja, quanto maior o número de linhas da matriz, menor será o erro.

$$N = \left(\frac{3\cdot\sigma}{\varepsilon}\right)^2 \quad \text{Equação 1}$$

Onde:

N: número de iterações;

σ : desvio padrão da variável aleatória;

ε : erro total, (média da variável aleatória x $\varepsilon\%$);

$\varepsilon\%$: erro relativo estipulado arbitrariamente.

Terceiro passo: o terceiro passo apresentado foi a obtenção dos incrementos que cada valor aleatório irá possuir, para que as derivadas parciais pudessem ser determinadas (TREBIEN *et al.*, 2007). Foi desenvolvida então uma segunda matriz com o mesmo número de linhas e colunas que a matriz de números aleatórios. Essa matriz contém os incrementos que foram determinados segundo a regra de Brown e Dennis (DUARTE, 1994), onde $IC(i)$ é o valor do IC para os parâmetros da linha i (Equação 2).

$$\Delta v_{ij} = \min\{|IC(i)|; \delta_{ij}\} \quad \text{Equação 2}$$

Onde:

$$\delta_{ij} = \begin{cases} 10^{-9} & se |v_{ij}| \leq 10^{-6} \\ |v_{ij}| \times 10^{-3} & se |v_{ij}| > 10^{-6} \end{cases}$$

Quarto passo: o quarto passo consistiu na obtenção de uma matriz de derivadas parciais do IC. Essa matriz apresenta o mesmo número de linhas e colunas das matrizes anteriores, pois indica para cada linha as derivadas parciais do IC com relação a cada parâmetro (cada coluna). A equação 3 determina o cálculo da derivada parcial. O $IC(i + \Delta v_{ij})$ é o IC calculado com os valores da linha i , com exceção do parâmetro j , que é incrementado com o valor Δv_{ij} .

$$S_{ij} = \frac{IC(i + \Delta v_{ij}) - IC(i)}{\Delta v_{ij}} \quad \text{Equação 3}$$

Quinto passo: o quinto passo, de acordo com Trebien *et al.* (2007), foi a adimensionalização da matriz de derivadas parciais (S_{ij}), mediante a equação 4, obtendo-se a matriz SA_{ij} . Esse passo tem como objetivo a obtenção de uma análise de sensibilidade independente de unidades ou grandezas.

$$SA_{ij} = S_{ij} \times \frac{v_{ij}}{IC(i)} \quad \text{Equação 4}$$

Sexto passo: o último objetivo dessa análise foi que os valores de sensibilidade, apesar de considerar as diferentes combinações dos quatro parâmetros do IC, fossem apresentados de forma independente dessas combinações ou intervalos de valores específicos. Ou seja, que se obtivesse um único “peso” para cada um dos parâmetros. Esse requisito foi obtido no sexto e último passo: somou-se as i linhas de cada um dos j parâmetros da matriz SA_{ij} e obteve-se o vetor de sensibilidade, conforme equação 5 (TREBIEN *et al.*, 2007).

$$Sensibilidade_i = \sum_i SA_{ij} \quad \text{Equação 5}$$

Trebien *et al.* (2007) ressaltam que como SA_{ij} representa derivadas, ao se somarem duas linhas, obtém-se a influência da derivada dessas duas linhas e não a soma das derivadas. Portanto, a correta análise do vetor de sensibilidade não deve ser feita pelo valor individual de cada uma de suas colunas, mas sim pela comparação dos valores de suas colunas.

Trebien *et al.* (2007) obtiveram, como resultado, vetores de sensibilidade adimensionais, cuja interpretação se baseava em uma comparação entre os valores encontrados para a influência de cada parâmetro. Por simplificação, neste trabalho, optou-se por chamar a soma dos vetores adimensionais, isto é, a

influência total dos parâmetros analisados, de 100%. Ou seja, se um edifício X, numa ZB (zona bioclimática) Y apresentou vetores de sensibilidade adimensionais conforme mostrado na tabela 2, significa que o PAF_T tem uma influência 21,25 vezes maior que o FS. Nesta pesquisa, os resultados foram apresentados conforme a tabela 3 em que a influência do PAF_T representa 68,33% da influência total, enquanto a influência do FS representa 3,22% da influência total dos quatro parâmetros. Para transformar os vetores de sensibilidade adimensionais em pesos percentuais com relação ao peso total dos quatro parâmetros foi utilizada a equação 6. Essa transformação se mostrou necessária para permitir que fossem realizadas comparações entre diferentes edifícios e zonas bioclimáticas.

Tabela 2 – Exemplo Vetor de Sensibilidade Adimensional.

Zona Bioclimática Y					
Edifício	Parâmetros				Soma da influência dos parâmetros
	PAF _T	FS	AVS	AHS	
X	21,25	1,00	4,20	4,65	31,10

$$P(\%)_j = \frac{VSA_j \times 100}{\sum VSA_i}$$

Equação 6

Onde:

P(%): peso percentual do parâmetro *j* em relação à influência total dos parâmetros analisados;

VSA_{*j*}: vetor de sensibilidade adimensional do parâmetro *j*;

∑VSA_{*i*}: soma dos vetores de sensibilidade adimensionais para o edifício *i*.

Tabela 3 – Exemplo Sensibilidade em Percentual.

Zona Bioclimática Y					
Edifício	Parâmetros				Influência dos quatro parâmetros
	PAF _T	FS	AVS	AHS	
X	68,33	3,22	13,50	14,95	100%

3.4. Geração de números randômicos e obtenção do número de iterações

Foi utilizado o software Minitab 16 para geração dos números randômicos. Considerando que os resultados obtidos por Trebien *et al* (2007) quando usaram a distribuição uniforme e a quando usaram a distribuição normal foram semelhantes, optou-se por utilizar somente a distribuição uniforme neste trabalho.

Trebien *et al* (2007) escolheram um número elevado de iterações (1500 linhas) para sua matriz de números aleatórios, sendo que eles analisaram 6 parâmetros em uma equação. Nesta pesquisa foi analisada a sensibilidade de 4 parâmetros para 10 equações, 2 por zona bioclimática. A equação 1 descrita por Fernandes (2005) determina o número de iterações necessárias nas equações do IC, o que determina o número de linhas da matriz. Foi arbitrado um erro relativo de 10% para ser usado na equação 1 e o maior número de iterações obtido para as equações do IC foi 1500, número de linhas definido para todas as matrizes.

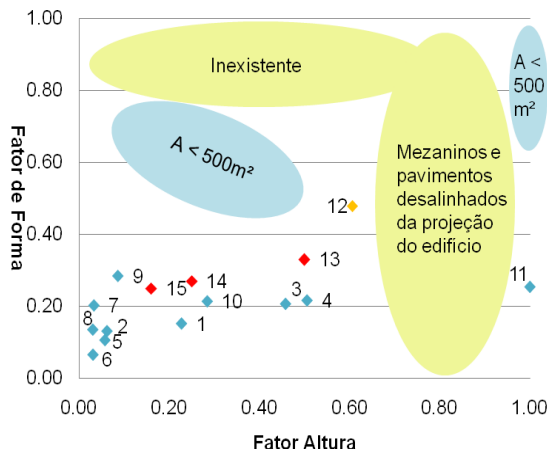


Figura 2– Volumetrias investigadas na análise de sensibilidade.

4. ANÁLISE DE RESULTADOS

A figura 2 apresenta a distribuição da amostra de edifícios segundo suas características volumétricas, representadas pelos indicadores de volumetria Fator de Forma (A_{env}/V_{tot}), no eixo das ordenadas, e pelo Fator Altura (A_{cob}/A_{tot}), no eixo das abscissas.

Os edifícios selecionados foram identificados por um número (ID) e suas principais características são apresentadas na tabela 4: área total da edificação, percentual de área de aberturas na fachada total (PAF_T), fator solar dos vidros (FS), ângulo vertical de sombreamento (AVS), ângulo horizontal de sombreamento (AHS) e indicadores de volumetria usados para representar as proporções de uma edificação (Fator de Forma, FF) e o número de pavimentos (Fator Altura, FA).

Os marcadores azuis da figura 2 (ID 1 a 11) representam edifícios existentes que apresentam área de

projeção superior a 500 m², Já o marcador alaranjado (ID 12) corresponde a um edifício também existente com área de projeção menor que 500 m². Os marcadores vermelhos da figura 4 (ID 13 a 15) representam as volumetrias definidas hipoteticamente e correspondem a edifícios com área de projeção inferior a 500 m².

4.1. Limitações da amostra

- Apenas um dos edifícios selecionados na amostra (ID 12) apresenta área de projeção do edifício (A_{pe}) inferior a 500 m².
- Para a classificação do nível de eficiência dos edifícios em que o Fator Solar dos vidros não foi informado considerou-se que foi utilizado vidro comum com fator solar de 0,87.
- Os projetos publicados em periódicos são constituídos por um número reduzido de peças gráficas e, em geral, não são cotados. Portanto, as suas dimensões foram definidas através da escala gráfica, e na ausência desta, através de proporcionalidade com algum elemento de dimensões conhecidas, como portas, por exemplo.
- É comum que os grandes edifícios, quase sempre retangulares, tenham apenas duas de suas fachadas publicadas nas revistas. Portanto, na ausência do desenho de alguma fachada, considerou-se que as fachadas opostas apresentam as mesmas características, quando era possível verificar através de fotografias.

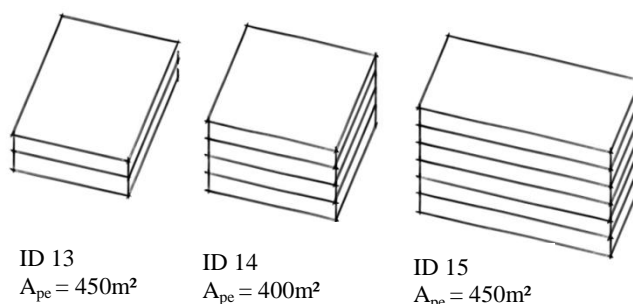


Figura 3 – Volumetrias hipotéticas com $A_{pe} < 500m^2$.

Tabela 4 – Características dos edifícios amostrados.

ID	Atot (m ²)	PAFT (%)	FS	AVS (graus)	AHS (graus)	FF (Aenv/Vtot)	FA (Acob/Atot)
1	9910	58	0,87	0	0	0,15	0,23
2	26384	41	0,87	0	0	0,13	0,06
3	3200	05	0,87	0	12,94	0,21	0,46
4	4895	15	0,87	0	0	0,22	0,51
5	30648	79	0,87	0	8,34	0,11	0,06
6	171200	58	0,32	0	0	0,06	0,03
7	22000	88	0,87	0	0	0,20	0,03
8	73250	40	0,87	0	2,21	0,13	0,03
9	7311	38	0,87	0	0	0,28	0,09
10	1796	15	0,87	0	0	0,21	0,28
11	3980	16	0,87	31,16	26,52	0,25	1,00
12	815	14	0,87	27,96	5,76	0,48	0,61

4.2. Definição de outras volumetrias com $A_{pe} \leq 500 m^2$

Considerando a dificuldade de se encontrar projetos de edifícios de pequeno porte que contenham as informações necessárias para análise volumétrica em publicações periódicas e que apenas um edifício é insuficiente para analisar as equações para edifícios com área de projeção menor que 500m², foram definidas mais três volumetrias para compor a amostra. A figura 3 apresenta esses modelos e indica suas respectivas áreas de projeção. As novas volumetrias foram identificadas pelos números (ID) de 13 a 15.

Na tabela 5 são informados número de pavimentos, dimensões, pé direito, área total, e indicadores de volumetria de cada uma das hipóteses criadas.

Definida a amostra de edifícios, as especificações do RTQ-C para determinação do nível de eficiência da envoltória foram aplicadas e o nível de eficiência energética de todos os edifícios foi obtido segundo as equações de cada um dos agrupamentos de zonas bioclimáticas. A Tabela 6 apresenta os resultados obtidos, sendo que o nível de eficiência real de cada edifício está indicado em negrito.

Tabela 5 – Características das volumetrias definidas.

ID	Num Pav	Dimensões (m)	Pé direito (m)	Atot (m ²)	FF (Aenv/Vtot)	FA (Acob/Atot)
13	2	18,0 x 25,0	3,5	900,0	0,33	0,50
14	4	20,0 x 20,0	3,5	1600,0	0,27	0,25
15	6	15,0 x 30,0	3,5	2700,0	0,25	0,16

4.4. Análise de sensibilidade do Indicador de Consumo através do método Monte Carlo

O método estatístico Monte Carlo foi aplicado para a análise de sensibilidade do Indicador de Consumo da envoltória de acordo com os passos já mencionados.

Assim, os resultados apresentados nas tabelas 7 e 8, representam a influência percentual de cada parâmetro frente à influência total dos quatro parâmetros analisados, para as ZB 2 e 3 e ZB 4 e 5. Estão destacados em negrito os pesos máximo e mínimo de cada parâmetro.

Em todas as análises com $A_{pe} > 500 \text{ m}^2$ o parâmetro que apresentou maior peso foi o PAF_T . Isso significa que pequenas variações no percentual de aberturas da fachada de uma edificação geram grandes alterações no Indicador de Consumo. O Fator Solar dos vidros apresentou a menor influência no Indicador de Consumo, com exceção das zonas bioclimáticas 4 e 5 em que o fator solar apresentou grande influência e os ângulos de sombreamento foram pouco sensíveis.

Tabela 6 – Nível de eficiência energética da envoltória.

ID	ZB 1	ZB 2 e 3	ZB 4 e 5	ZB 7	ZB 6 e 8
1	D	E	E	D	E
2	C	C	D	C	C
3	A	A	A	C	A
4	A	A	B	A	A
5	E	A	E	E	A
6	D	D	C	D	D
7	E	E	E	E	E
8	C	C	D	C	C
9	C	C	D	C	C
10	A	A	A	A	A
11	A	A	A	A	A
12	A	A	A	A	B

Na ZB1, para os edifícios com área de projeção maior que 500 m^2 , o parâmetro que apresentou maior peso no Indicador de Consumo foi o PAF_T , com uma influência média de 68,72%, enquanto a soma dos demais parâmetros apresenta uma influência de 31,28%. Já para as edificações com A_{pe} menor que 500 m^2 , há uma melhor distribuição dos pesos, mas ainda assim o parâmetro de maior sensibilidade é o PAF_T , com uma média de 32,58% de influência, seguido do AVS com influência média de 29,63% e do FS com influência média de 25,18%. Em média, a menor influência ficou para o AHS, com um peso de 12,60%.

Na ZB 2 e 3, os edifícios com área de projeção maior que 500 m^2 apresentaram o PAF_T como parâmetro mais sensível, sua influência média foi de 58,06%, enquanto o AVS apresentou uma influência média de 24,72% e FS e AHS somaram uma influência média de 17,23% (tabela 7). Nas edificações com A_{pe} menor que 500 m^2 , os pesos são melhor distribuídos e o parâmetro de maior sensibilidade é o PAF_T , com uma média de 36,23% de influência, seguido do AVS com influência média de 29,47%, do FS com influência média de 17,64% e do AHS, com um peso de 16,66% (tabela 7).

Para a ZB 4 e 5, os edifícios com área de projeção maior que 500 m^2 apresentaram o PAF_T e o FS como parâmetros mais sensíveis, sua influência média do PAF_T foi de 46,36%, enquanto o FS apresentou uma influência média de 45,31% e em média os ângulos de sombreamento somaram uma influência de 8,3% (tabela 8). Nas edificações com A_{pe} menor que 500 m^2 , o parâmetro de maior sensibilidade é o AVS, com uma média de 45,58% de influência, seguido do FS com influência média de 26,18%, do PAF_T com influência média de 14,84% e do AHS, com um peso de 13,39% (tabela 8).

Tabela 7 – Sensibilidade dos parâmetros – ZB 2 e 3.

Zona Bioclimática 2 e 3							
ID edifícios	A_{pe}	FF (A_{env}/V_{tot})	FA (A_{cob}/A_{tot})	Parâmetros			
				PAF _T	FS	AVS	AHS
1	$A_{pe} > 500 \text{ m}^2$	0,15	0,23	56,26	8,45	26,15	9,15
2		0,13	0,06	56,56	8,31	25,91	9,22
3		0,21	0,46	59,15	8,07	24,17	8,62
4		0,22	0,51	59,69	8,09	23,44	8,78
5		0,11	0,06	56,09	8,65	25,88	9,38
6		0,06	0,03	56,98	8,32	25,75	8,95
7		0,20	0,03	58,72	8,27	24,23	8,78
8		0,13	0,03	56,48	8,57	25,59	9,36
9		0,28	0,09	59,60	8,15	23,65	8,61
10		0,21	0,28	59,86	8,19	23,23	8,72
11		0,25	1,00	59,23	8,13	23,90	8,75
12	$A_{pe} \leq 500 \text{ m}^2$	0,48	0,61	36,55	17,47	29,40	16,58
13		0,33	0,50	35,93	17,87	29,58	16,63
14		0,27	0,25	36,25	17,45	29,46	16,83
15		0,25	0,16	36,19	17,79	29,43	16,59

Tabela 8 – Sensibilidade dos parâmetros – ZB 4 e 5.

Zona Bioclimática 4 e 5							
ID edifícios	A_{pe}	FF (A_{env}/V_{tot})	FA (A_{cob}/A_{tot})	Parâmetros			
				PAF _T	FS	AVS	AHS
1	$A_{pe} > 500 \text{ m}^2$	0,15	0,23	46,63	45,61	4,94	2,81
2		0,13	0,06	46,16	45,17	5,58	3,10
3		0,21	0,46	46,80	45,76	4,79	2,65
4		0,22	0,51	46,91	45,48	4,93	2,69
5		0,11	0,06	46,34	45,19	5,46	3,01
6		0,06	0,03	46,29	45,04	5,53	3,13
7		0,20	0,03	45,88	44,56	6,17	3,39
8		0,13	0,03	46,44	44,39	5,85	3,32
9		0,28	0,09	45,76	44,98	6,06	3,20
10		0,21	0,28	46,26	45,88	5,07	2,79
11		0,25	1,00	46,79	46,40	4,37	2,43
12	$A_{pe} \leq 500 \text{ m}^2$	0,48	0,61	14,78	25,98	45,66	13,59
13		0,33	0,50	14,83	26,06	45,64	13,46
14		0,27	0,25	15,02	26,53	45,02	13,40
15		0,25	0,16	14,71	26,16	46,00	13,12

Já na ZB7, para os edifícios com área de projeção maior que 500 m², o parâmetro que apresentou maior peso no Indicador de Consumo foi o PAF_T, com influência média de 56,42%, seguido do FS com influência média de 19,17%, enquanto os ângulos de sombreamento somam uma influência de 24,4%. Para as edificações com A_{pe} menor que 500 m², o parâmetro de maior sensibilidade é o AHS, com uma média de 38,12% de influência, seguido do AVS com influência média de 31,44% e do FS com influência média de 21,60%. Em média, a menor influência ficou para o PAF_T, com um peso de 8,84%.

Na ZB 6 e 8, para os edifícios com área de projeção maior que 500 m², o parâmetro que apresentou maior peso no Indicador de Consumo foi o PAF_T, com uma influência média de 68,56%, enquanto os demais parâmetros juntos apresentam uma influência de 31,43%. Já para as edificações com A_{pe} menor que 500 m², há uma melhor distribuição dos pesos, sendo que o parâmetro de maior sensibilidade é o PAF_T, com uma

média de 36,37% de influência, seguido do AVS com influência média de 35,67% e do FS com influência média de 15,65%. A menor influência média ficou para o AHS, com um peso de 12,32%.

4.5. Médias dos pesos dos parâmetros da envoltória

A tabela 9 apresenta as médias das influências dos parâmetros da envoltória para as equações definidas para $A_{pe} > 500 \text{ m}^2$ e para as equações referentes a edifícios com $A_{pe} \leq 500 \text{ m}^2$. Esta tabela consiste em uma síntese dos resultados obtidos nesta pesquisa. As influências máximas estão destacadas em negrito.

Tabela 9 – Influência média dos parâmetros da envoltória.

Zonas Bioclimáticas	Área de projeção	Parâmetros			
		PAF _T	FS	AVS	AHS
ZB1	$A_{pe} > 500 \text{ m}^2$	68,72	3,14	13,37	14,77
	$A_{pe} \leq 500 \text{ m}^2$	32,58	25,18	29,63	12,60
ZB 2 e 3	$A_{pe} > 500 \text{ m}^2$	58,06	8,29	24,72	8,94
	$A_{pe} \leq 500 \text{ m}^2$	36,23	17,64	29,47	16,66
ZB 4 e 5	$A_{pe} > 500 \text{ m}^2$	46,39	45,31	5,34	2,96
	$A_{pe} \leq 500 \text{ m}^2$	14,84	26,18	45,58	13,39
ZB 7	$A_{pe} > 500 \text{ m}^2$	56,42	19,17	10,20	14,20
	$A_{pe} \leq 500 \text{ m}^2$	8,84	21,60	31,44	38,12
ZB 6 e 8	$A_{pe} > 500 \text{ m}^2$	68,56	5,13	19,30	7,00
	$A_{pe} \leq 500 \text{ m}^2$	36,37	15,65	35,67	12,32

Na média das influências dos parâmetros, o PAF_T se mostra mais sensível na maioria dos casos. Como exceção, nas edificações com A_{pe} menor que 500 m^2 nas ZB 4 e 5 e ZB 7 os ângulos de sombreamento e fator solar apresentam pesos maiores que o PAF_T. É importante notar ainda que embora o PAF_T apresente uma sensibilidade consideravelmente maior que os demais parâmetros para a maioria das situações, na ZB 4 e 5 para edifícios com $A_{pe} > 500 \text{ m}^2$, o FS apresenta peso próximo ao peso do PAF_T. Igualmente, para a ZB 6 e 8, em edifícios com $A_{pe} \leq 500 \text{ m}^2$ o AVS apresenta peso semelhante ao peso do PAF_T.

4.6. Análise dos resultados de acordo com as especificidades das zonas bioclimáticas para edifícios com $A_{pe} > 500 \text{ m}^2$

O PAF_T é o parâmetro que apresentou maior sensibilidade devido à influência que a quantidade de aberturas exerce nas necessidades de: aquecimento na ZB 1, de aquecimento e resfriamento na ZB 2 e 3 e na ZB 4 e 5, e de resfriamento na ZB 7 e na ZB 6 e 8.

O Fator Solar dos vidros foi o parâmetro menos sensível nas ZB 1, ZB 2 e 3 e ZB 6 e 8. Já na ZB 7, o FS apresentou uma influência notável e na ZB 4 e 5 o FS apresentou um comportamento atípico. Nesse caso, ele apresentou uma grande sensibilidade, se aproximando da influência do PAF_T. Essa alta sensibilidade do FS na ZB 4 e 5 reduziu o peso dos dispositivos de proteção solar. Os ângulos de sombreamento apresentaram pouca influência, a menor sensibilidade entre todas as zonas bioclimáticas. Nas demais zonas os ângulos de sombreamento apresentaram influência mediana: na ZB 1 é importante o controle da entrada de calor pelas aberturas, que devem permitir a incidência de raios solares durante o inverno; na ZB 2 e 3 e ZB 6 e 8, o AVS tem maior influência que o AHS, por proteger a edificação da radiação solar direta nos horários em que o sol está mais alto e na ZB 7, o AHS possui maior influência que AVS, por serem cidades localizadas a norte do país. Além disso, as equações não diferenciam as orientações para aplicação das proteções solares.

4.7. Análise dos resultados de acordo com as especificidades das zonas bioclimáticas para edifícios com $A_{pe} \leq 500 \text{ m}^2$

Nas equações da envoltória para os edifícios com área de projeção inferior a 500 m^2 todos os parâmetros se mostraram representativos. Isto é, nos edifícios de menor porte, alterações em quaisquer dos parâmetros geram variações semelhantes no IC.

O parâmetro mais sensível na ZB 1, na ZB 2 e 3 e ZB 6 e 8 foi o PAF_T, devido às trocas térmicas que ocorrem através do vidro. Nessas zonas, o segundo maior peso é do AVS, seguido do FS e o menor peso ficou para o AHS, já que a orientação das proteções solares não é diferenciada nas equações.

Mais uma vez a ZB 4 e 5 apresentou um comportamento distinto. O AVS foi o parâmetro mais

sensível. O FS apresentou o segundo maior peso e as menores influências foram do PAF_T e do AHS.

Na ZB 7, composta por cidades de temperatura elevada, os parâmetros de maior influência foram os ângulos de sombreamento, o que fez com que o FS apresentasse um peso menor e o PAF_T representasse a menor influência.

5. CONCLUSÕES

5.1. Conclusões gerais

Os conceitos de eficiência energética devem ser cada vez mais aplicados nos projetos e obras desenvolvidos pelos profissionais ligados à construção civil. Pode-se afirmar que a envoltória é um elemento muito importante na elaboração de um edifício energeticamente eficiente, uma vez que, ao contrário dos sistemas de iluminação e condicionamento de ar, a envoltória não consome energia, e quando projetada com qualidade, reduz o consumo energético dos demais sistemas que garantem o conforto do usuário.

Foram determinados os pesos dos parâmetros da envoltória presentes nas equações do RTQ-C. A partir destes dados, que foram apresentados no item 5 que trata dos resultados alcançados, os profissionais poderão atuar pontualmente em seus projetos, alterando diretamente aquele parâmetro que apresenta maior influência de modo a reduzir o consumo energético da envoltória e elevar o nível de eficiência segundo os parâmetros do RTQ-C.

Além das limitações da amostra citadas no item 4.1, este trabalho apresentou limitações no que se refere à interpretação dos resultados obtidos. As análises não foram suficientes para explicar o comportamento atípico da ZB 4 e 5, em que o FS foi um parâmetro de grande peso, enquanto nas demais zonas bioclimáticas o FS apresentou baixa representatividade. Vale lembrar que as diferenças entre os coeficientes de determinação das equações do IC não foram significativas entre si (CARLO e LAMBERTS, 2008), o que não indica desvios na correlação. A característica que mais diferencia a ZB 4 é o clima seco, sendo que não houve simulação da ZB 5. Mas este fator não explica o impacto do Fator Solar.

É recomendável que a análise de sensibilidade seja realizada durante a elaboração das equações para as próximas versões do RTQ-C.

Para suprir as limitações dessa pesquisa, sugere-se o uso de simulação computacional, em um trabalho futuro, para que se possa interpretar o comportamento diferenciado da ZB 4 e 5, a partir do arquivo climático de cidades localizadas nestas zonas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BRASIL. Lei n. 10295, de 17 de outubro de 2001. Dispõe sobre a Política Nacional de Conservação e Uso Racional de Energia. **Lex:** Diário Oficial da União, Brasília, 2001. Disponível em: <www.inmetro.gov.br/qualidade/lei10295.pdf>. Acesso em: 17 jan. 2011.
- CARLO, J. C. **Desenvolvimento de metodologia de avaliação da eficiência energética do envoltório de edificações não-residenciais**. 2008. 196 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina, 2008.
- CARLO, J. C.; LAMBERTS, R. Development of envelope efficiency labels for commercial buildings: Effect of different variables on electricity consumption. In: **Energy and Buildings**. , v.40, p. 2002 - 2008, 2008.
- CARLO, J. C.; LAMBERTS, R. Parâmetros e métodos adotados no regulamento de etiquetagem da eficiência energética de edifícios – parte 1: método prescritivo. **Revista Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 10, n. 2, p. 7-26, abr./jun. 2010.
- DUARTE, M. V. **Ajuste de modelos dinâmicos de estruturas com não linearidades concentradas**. 1994, 190 f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) - Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 1994.
- FERNANDES, C. A. **Gerenciamento de riscos em projetos:** como usar o Microsoft Excel para realizar a simulação Monte Carlo. 2005. Disponível em: <<http://www.bbbrothers.com.br/scripts/Artigos/MonteCarloExcel.pdf>>. Acesso em: 20 ago. 2010.
- INMETRO. Instituto Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial. **Portaria 372, de 17 de setembro de 2010**. Requisitos Técnicos da Qualidade para o Nível de Eficiência Energética de Edifícios Comerciais, de Serviços e Públicos. Rio de Janeiro, 2010. Disponível em: <<http://www.inmetro.gov.br/legislacao/rtac/pdf/RTAC001462.pdf>>. Acesso em: 01 out. 2010.
- MACDONALD, I.A.; CLARKE, J.A. e STRACHAN. Assessing Uncertainty in Building Simulation. In: **Building Simulation 1999, Proceedings...** Kyoto, Japan: IBPSA, 1999.
- MME. Ministério de Minas e Energia. **Plano Nacional de Eficiência Energética:** Premissas e Diretrizes Básicas na Elaboração do Plano, 2010. Versão Consulta Pública. Disponível em: http://www.mme.gov.br/mme/galerias/arquivos/noticias/2010/PNEf_-_Premissas_e_Dir_Basicas.pdf. Acesso em: 03 jan. 2011.
- TREBIEN, R.; MENDES, N.; OLIVEIRA, G. H. C. Sensibilidade do índice PMV e regiões de conforto visando ao aperfeiçoamento de climatizadores. **Revista Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 7, n. 3, p. 71-87, jul./set. 2007.
- WESTPHAL, F. S.; LAMBERTS, R. Regression analysis of electric energy consumption of commercial buildings in Brazil. In: **Building Simulation 2007, Proceedings...** Beijing, China: IBPSA, 2007. p. 1543-1550.

AGRADECIMENTOS

As autoras agradecem à FAPEMIG pelo apoio financeiro.