

ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

ANÁLISE DE FATORES DE ENVOLTÓRIA E DO CLIMA NO DESEMPENHO
ENERGÉTICO DE EDIFICAÇÕES COMERCIAIS

Lucas Emidio Fernandes Dias

São Paulo
2014

ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

ANÁLISE DE FATORES DE ENVOLTÓRIA E DO CLIMA NO DESEMPENHO
ENERGÉTICO DE EDIFICAÇÕES COMERCIAIS

Trabalho de formatura apresentado à Escola
Politécnica da Universidade de São Paulo para
obtenção do título de Graduação em Engenharia

Lucas Emidio Fernandes Dias

Nº 7208647

Orientador: Alberto Hernandez Neto

Área de Concentração:
Engenharia Mecânica

São Paulo

2014

Dias, Lucas Emidio Fernandes

**Análise de fatores de envoltória e do clima no consumo energético de edificações comerciais / . – São Paulo, 2014.
57 p.**

Trabalho de Formatura - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia Mecânica.

1.Consumo energético 2.Edifícios comerciais I.Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia Mecânica II.t.

RESUMO

O presente trabalho descreve um estudo sobre o desempenho energético de edificações de escritório climatizadas em função de quatro parâmetros definidos. São apresentados os objetivos do estudo bem como sua contextualização. A contextualização é seguida de uma revisão bibliográfica de artigos científicos pesquisados como base para o desenvolvimento dos conteúdos e das informações pertinentes ao tema em questão. Descrevem-se os programas utilizados para realizar as simulações. Em seguida, são descritos os modelos de edificações utilizados nas simulações computacionais. São explicados os parâmetros de análise de consumo energético e a matriz de simulações que será utilizada no estudo. Em seguida, são expostas simulações e análises para cinco diferentes cidades. Verificou-se que a geometria, o fator solar dos vidros, a área de envidraçada de parede e o clima relacionados a uma edificação comercial podem provocar variações de cerca de 18%, 11%, 37% e 70%, respectivamente, no consumo específico anual do sistema de ar-condicionado. Foi obtido um modelo que foi utilizado para prever o consumo energético anual de edifícios comerciais em três outras cidades, apresentando um erro máximo da ordem de 7,52%. Por fim, são apresentadas as conclusões e descritas sugestões futuras para novos estudos que possam dar continuidade ao tema abordado neste trabalho.

ABSTRACT

This text describes a study of the energetic performance of air-conditioned office buildings while influenced by four defined parameters. Firstly, the objectives and contextualization of this study are presented. The contextualization is followed by a references section, describing the scientific papers used as a basis for the development of this study and important information related to the topic of this study. The softwares used for the development of this study are described in the subsequent section. Then, the models of buildings used in the simulations are described. The analysis parameters for the power consumption and the simulation matrix are explained. After this section, the results and analysis for the simulations in five different cities are explained. It was verified that the geometry, the solar factor, the window-to-wall ratio and the climate associated to a commercial building can cause variations of approximately 18%, 11%, 37% and 70%, respectively, in the specific annual energy consumption of the air conditioning system. A model was obtained and used to predict the energy consumption of commercial buildings in three other cities, presenting a maximum error of 7.52%. At the end section, the conclusions of this study are presented, as well as suggestions for future studies which can continue the research related to the topic presented in this report.

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Valores de GHR para as cidades estudadas.

Tabela 2 - Resumo da matriz de simulações do estudo.

Tabela 3 - Parâmetros de carga interna utilizados nas simulações computacionais.

Tabela 4 - Coeficientes globais de transferência de calor através das superfícies externas da edificação.

Tabela 5 - Resumo dos consumos energéticos obtidos para as simulações em São Paulo dos perfis REF, RET, ESB, I e U com WWR=0, 40%, 60% e 80% e FS=0,25, 0,38 e 0,82.

Tabela 6 - Comparação entre os consumos específicos do sistema de AVAC obtidos através de simulação e do modelo proposto.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1– Planta simplificada de edificações utilizados no estudo. (a) Perfil quadrado. (b) Perfil “I”. (c) Perfil “U”. (d) Perfil “H”.

Figura 2 - Consumo de energia em edificações de Hong Kong. (LAM et al., 2004)

Figura 3 - Coeficientes de forma de edificações estudadas em Hong Kong. (LAM, 2004)

Figura 4 - Regressão linear para 20 edificações analisadas em Hong Kong. (LAM et al., 2004)

Figura 5 - *RVRs* para diferentes cidades na China em edificações com envoltória tradicional. (ENSHEN, 2005)

Figura 6 - *RVRs* para diferentes cidades da China com envoltória melhorada. (ENSHEN, 2005)

Figura 7 - Exemplo de geometria criada com o auxílio do SketchUp.

Figura 8 - Vistas isométrica e de topo do andar do modelo proposto de edificação de referência. Medidas em metros.

Figura 9 - Vista tridimensional e de topo do andar do modelo proposto de edificação retangular. Medidas em metros.

Figura 10 - Vistas isométrica e de topo do andar do modelo proposto de edificação esbelta. Medidas em metros.

Figura 11 - Vistas isométrica e de topo do andar do modelo proposto de edificação "I". Medidas em metros.

Figura 12 - Vistas isométrica e de topo do andar do modelo proposto de edificação "U". Medidas em metros.

Figura 13 - Perfis de utilização e ocupação das cargas e sistemas internos das edificações simuladas (parte 1).

Figura 14 - Perfis de utilização e ocupação das cargas e sistemas internos das edificações simuladas (parte 2).

Figura 15 - Materiais definidos para a constituição das superfícies de troca.

Figura 16 - Definição dos parâmetros para o vidro de fator solar $FS=0,25$.

Figura 17 - Composições das superfícies externas e internas de troca de calor das edificações simuladas.

Figura 18 - Gráfico de consumo total e do sistema de AVAC para as edificações de perfis RET, ESB, I e U ($WWR=40\%$ e $FS=0,38$) na cidade de São Paulo.

Figura 19 - Curvas de regressão linear para os consumos energéticos de AVAC em São Paulo em função da geometria, com $WWR=0, 40\%, 60\%$ e 80% e $FS=0,38$.

Figura 20 - Curvas de regressão linear para os consumos energéticos de AVAC em São Paulo em função da geometria, com $WWR=40\%$ e $FS=0,25, 0,38$ e $0,82$.

Figura 21 - Curvas de regressão linear para os consumos energéticos de AVAC com $WWR=40\%$ e $FS=0,38$ para São Paulo, Rio de Janeiro, Porto Alegre, Brasília e Manaus.

Figura 22- Curvas de regressão linear para os consumos energéticos de AVAC em São Paulo em função do fator solar, com $WWR=40\%$ e $FS=0,25, 0,38$ e $0,82$.

Figura 23- Gráfico de consumo energético anual de AVAC por área de piso em São Paulo em função do fator solar, para $WWRs$ de $40\%, 60\%$ e 80% . Resultados apresentados para o perfil ESB.

Figura 24 -Curvas de regressão linear para os consumos energéticos de AVAC em função do fator solar, com $WWR=40\%$ e perfil ESB para São Paulo, Rio de Janeiro, Porto Alegre, Brasília e Manaus.

Figura 25- Curvas de regressão linear para os consumos energéticos de AVAC em São Paulo em função do WWR , com $FS=0,38$. Curvas apresentadas os perfis RET, ESB, I e U.

Figura 26- Curvas de regressão linear para os consumos energéticos de AVAC em São Paulo em função do WWR, com perfil ESB. Curvas apresentadas os perfis FS=0,25, 038 e 0,82.

Figura 27 - Curvas de regressão linear para os consumos energéticos de AVAC em São Paulo em função do WWR=40% e perfil ESB para São Paulo, Rio de Janeiro, Porto Alegre, Brasília e Manaus.

Figura 28- Curvas de regressão linear para os consumos energéticos de AVAC em função do clima, com WWR=40% e FS=0,38. Curvas apresentadas os perfis RET, ESB, I e U.

Figura 29- Curvas de regressão linear para os consumos energéticos de AVAC em função do clima, com perfil ESB e FS=0,38. Curvas apresentadas para WWR=0, 40%, 60% e 80%.

Figura 30 - Curvas de regressão linear para os consumos energéticos de AVAC em função do clima, com perfil ESB e WWR=40%. Curvas apresentadas para FS=0,25, 0,32 e 0,82.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	1
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	2
2.1. Forma da Edificação	2
2.2. Clima Local da Envoltória da Edificação	3
2.3. Regime de Ocupação da Edificação.....	7
2.4. Aspectos Construtivos da Edificação.....	8
3. PROGRAMAS DE SIMULAÇÃO.....	10
4. DEFINIÇÃO DOS MODELOS DE EDIFICAÇÃO UTILIZADOS NAS SIMULAÇÕES	12
4.1. Edificação de Referência (REF).....	13
4.2. Edificação de Perfil Retangular (RET)	14
4.3. Edificação de Perfil Esbelto (ESB).....	15
4.4. Edificação de Perfil “I” (I)	16
4.5. Edificação de Perfil “U” (U).....	17
5. MATRIZ DE SIMULAÇÃO	18
5.1. Forma Geométrica.....	18
5.2. Área Envidraçada	18
5.3. Fator Solar (FS).....	19
5.4. Clima.....	19
5.5. Resumo da Matriz de Simulações	20
6. SIMULAÇÕES E ANÁLISES	22
6.1. Definição dos Parâmetros de Simulação.....	22
6.2. Resultados das Simulações	26
6.2.1. Simulação e Análise do Consumo Energético Anual em Função da Geometria da Edificação	28

6.2.2. Simulação e Análise do Consumo Energético Anual em Função do Fator Solar	35
6.2.3. Simulação e Análise do Consumo Energético Anual em Função da Área Envidraçada de Parede	40
6.2.4. Simulação e Análise do Consumo Energético Anual em Função do Clima	45
6.2.5. Análise Global.....	50
6.2.6. Validação do Modelo	51
7. CONCLUSÕES	53
8. SUGESTÕES PARA ESTUDOS FUTUROS	56
9. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	57

1. INTRODUÇÃO

O ambiente urbano apresenta um consumo significativo da energia produzida globalmente, em especial com a climatização de edificações. Conjuntos empresariais e outros edifícios comerciais representam uma grande parcela do consumo energético com climatização. Segundo YU et al. (2011), os maiores gastos energéticos anuais de edificações estão relacionados à climatização e ao suprimento de água aquecida. Dessa forma, surge a necessidade de avaliar o consumo energético dessas edificações.

O objetivo deste estudo é avaliar a influência de parâmetros relacionados a características construtivas e climáticas de edificações comerciais climatizadas em seu consumo energético.

Serão definidos os parâmetros de caracterização da envoltória da edificação de acordo com as normas ASHRAE 90.1-2007 (ASHRAE, 2007) e NBR16401 (ABNT, 2008). Em seguida, parte-se para a definição de uma edificação de referência. A partir da edificação de referência são propostas e caracterizadas outras tipologias para a construção de outros modelos de simulação.

O estudo é desenvolvido a partir de uma série de simulações, utilizando a ferramenta computacional Energy Plus, onde são adotados como parâmetros a geometria do edifício, as condições climáticas, a área envidraçada de parede do edifício e o tipo de vidro utilizado nas janelas.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A revisão bibliográfica será dividida de acordo com o assunto tratado pelo artigo. As seções 2.1 a 2.4 englobam referências que analisam diferentes parâmetros que afetam o consumo energético em edificações climatizadas, sendo que a seção 2.1 se refere aos aspectos geométricos, a seção 2.2 se refere aos aspectos climáticos, a seção 2.3 se refere ao regime de ocupação e a seção 2.4 se refere aos aspectos construtivos.

2.1. Forma da Edificação

OURGHI et al. (2006) definem o parâmetro compactividade relativa (*relativecompactness* – *RC*) que é a relação entre a razão do volume com a área externa de uma edificação. Os autores mostram que o consumo de energia elétrica de um edifício climatizado aumenta com a redução da sua *RC*.

Segundo LAM et al. (2003), a orientação das edificações também pode alterar o consumo energético nas edificações. De acordo como os autores, edifícios retangulares orientados com a maior dimensão no eixo leste-oeste apresentam um consumo energético menor do que os edifícios orientados com a maior dimensão no eixo norte-sul. Isto porque estão sujeitos a menores variações do verão ao inverno quanto à insolação incidente ao longo de sua dimensão dominante. Edificações orientadas no eixo norte-sul, por sua vez, apresentam custos operacionais maiores em relação à climatização, já que a variação de ganho de calor por irradiação solar incidente sobre o prédio é maior.

Entre as possíveis formas nas quais a edificação pode ser construída, foram selecionadas quatro que são encontradas mais comumente nas edificações comerciais, sendo que a planta simplificada desses perfis é ilustrada na figura 1.

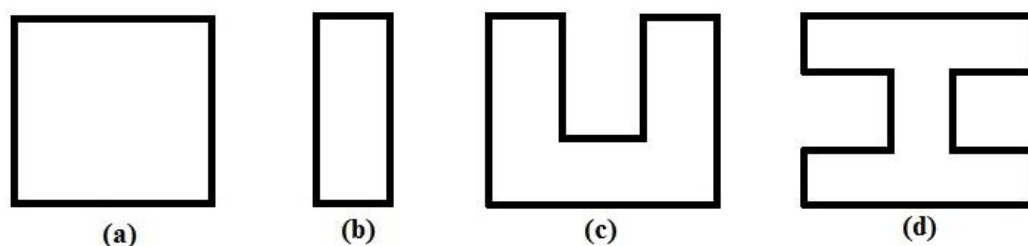


Figura 1– Planta simplificada de edificações utilizados no estudo. (a) Perfil quadrado. (b) Perfil “I”. (c) Perfil “U”. (d) Perfil “H”.

2.2. Clima Local da Envoltória da Edificação

LAM et al. (2004) analisam a influência do clima subtropical no consumo de edificações de escritório do setor público em Hong Kong. De acordo com os autores, foram levantados os consumos de energia elétrica em 20 edificações diferentes. Esses consumos, com as respectivas parcelas correspondentes aos sistemas consumidores de energia (climatização, iluminação, elevadores, entre outros) são mostrados na figura 2. É definida como coeficiente de forma a razão entre a área de fachada – incluindo o telhado – e o volume interno de uma edificação. Os respectivos coeficientes de forma de cada edificação são apresentados na figura 3.

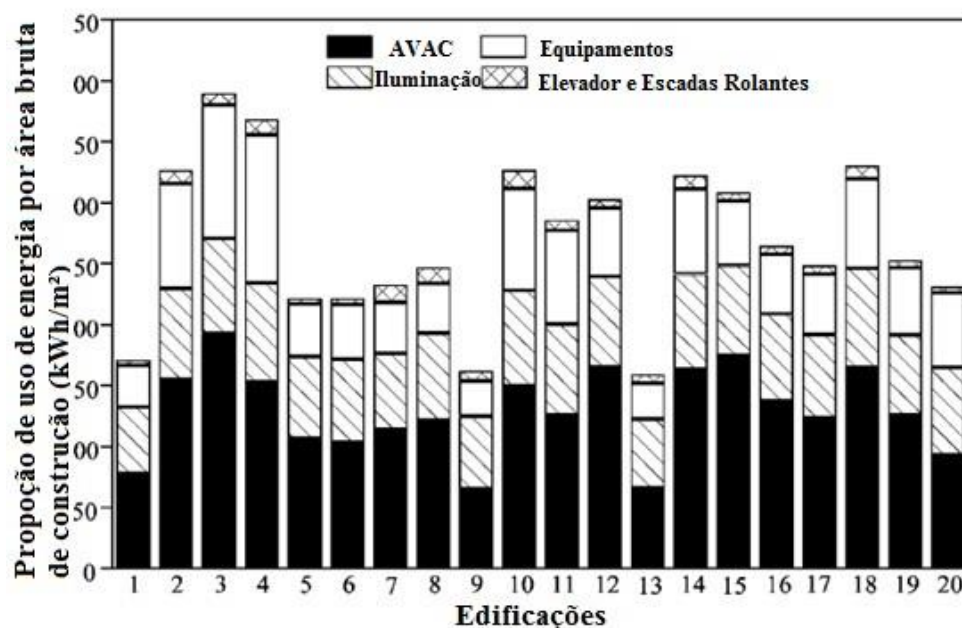


Figura 2 - Consumo de energia em edificações de Hong Kong. (LAM et al., 2004)

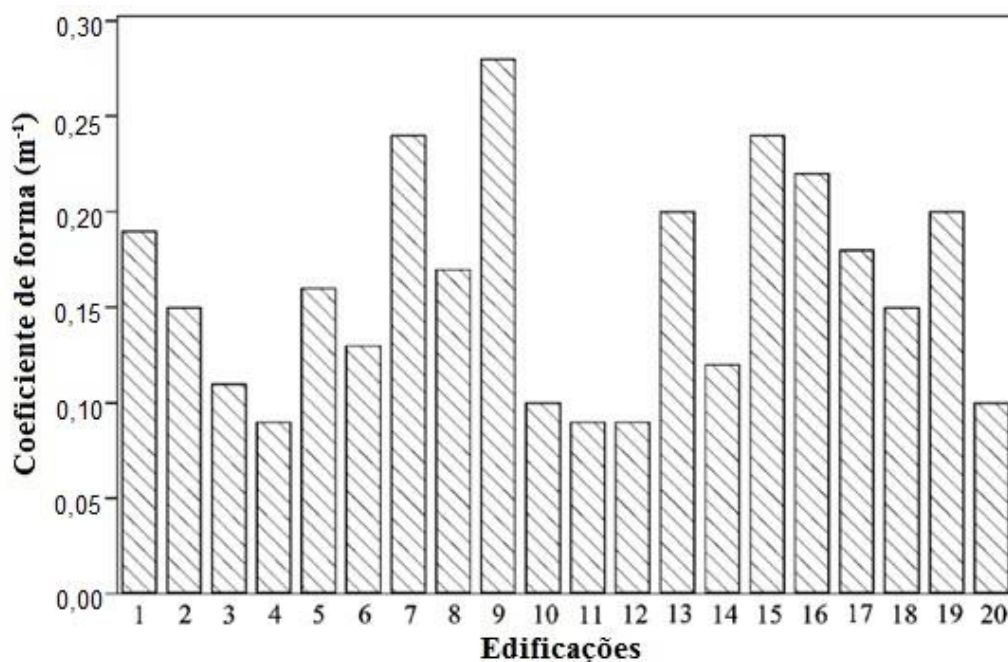


Figura 3 - Coeficientes de forma de edificações estudadas em Hong Kong. (LAM, 2004)

Os autores propõem uma regressão linear para os dados, ao analisar que o consumo elétrico varia sazonalmente. A expressão obtida para a energia E consumida na edificação é dada pela eq. (1).

$$E = a + b * CDD \quad (1)$$

Onde

E é a energia mensal consumida (kWh);

a é o termo referente aos fatores invariantes com o clima (iluminação, equipamentos e elevadores);

b é a variação de energia consumida por refrigeração conforme a temperatura da envoltória (kWh/°C);

CDD (CoolingDegree Day) é a média mensal de 5 anos(1996 a 2000) para a temperatura diária do ambiente no qual se encontra a edificação.

Na figura 4 são ilustrados os resultados para a regressão linear das edificações estudadas, incluindo o viés médio (VM), ou seja, o erro sistemático (ou

tendenciosidade) entre os valores medidos e os valores simulados mensalmente, além da raiz do erro médio quadrático (*REMQ*) para um valor de *CDD* de 19°C.

Número da Edificação	a	b	R ²	VM		REMQ	
				(MWh)	(%)	(MWh)	(%)
1	193,07	0,38	0,90	0,000	0,000	13,56	5,33
2	522,18	0,76	0,90	0,003	0,001	26,92	4,18
3	697,28	1,76	0,97	-0,002	0,000	35,60	3,63
4	2660,20	2,56	0,89	-0,003	0,000	94,61	3,08
5	114,06	0,24	0,94	0,006	0,004	6,30	4,13
6	172,80	0,37	0,87	-0,004	-0,002	15,23	6,53
7	41,15	0,19	0,97	0,004	0,005	3,49	4,85
8	171,65	0,46	0,96	0,015	0,006	10,49	4,27
9	12,86	0,03	0,96	-0,006	-0,033	0,69	3,81
10	1292,28	2,20	0,92	0,019	0,001	71,75	4,36
11	1860,06	2,26	0,90	-0,011	-0,001	81,09	3,65
12	252,21	0,43	0,91	0,001	0,000	14,30	4,44
13	93,21	0,24	0,93	0,004	0,003	6,96	5,26
14	631,84	1,19	0,92	0,000	0,000	37,19	4,52
15	196,99	0,59	0,97	0,001	0,000	10,86	3,73
16	97,31	0,22	0,97	-0,007	-0,006	4,06	3,06
17	113,61	0,24	0,96	-0,005	-0,003	5,46	3,58
18	792,27	0,79	0,85	-0,005	-0,001	34,93	3,80
19	359,40	0,75	0,96	0,012	0,003	16,40	3,41
20	673,58	1,01	0,88	-0,007	-0,001	39,71	4,75

Figura 4 - Regressão linear para 20 edificações analisadas em Hong Kong. (LAM et al., 2004)

ENSHEN (2005) realiza um estudo a respeito da variação do consumo energético em edificações em diferentes cidades em relação às variações de seus coeficientes de forma (*shapecoefficients* - *SC*). O autor admitiu uma edificação de $2304m^2$ e coeficiente $SC_{2304} = 0,29$ como referência e a edificação variante com $960m^2$ e $SC_{960} = 0,41$. Verificou-se que a variação apresentada no consumo devido ao aquecimento foi aproximadamente igual entre as cidades, assim como o consumo devido ao resfriamento. As figuras 5 e 6 apresentam, respectivamente, as taxas de variação relativa ou *Relative Variation Rates* (*RVRs*) anuais do consumo com aquecimento e resfriamento para envoltórias tradicionais e melhoradas das edificações. *RVR-H* é referente à energia de aquecimento e *RVR-C* à de resfriamento

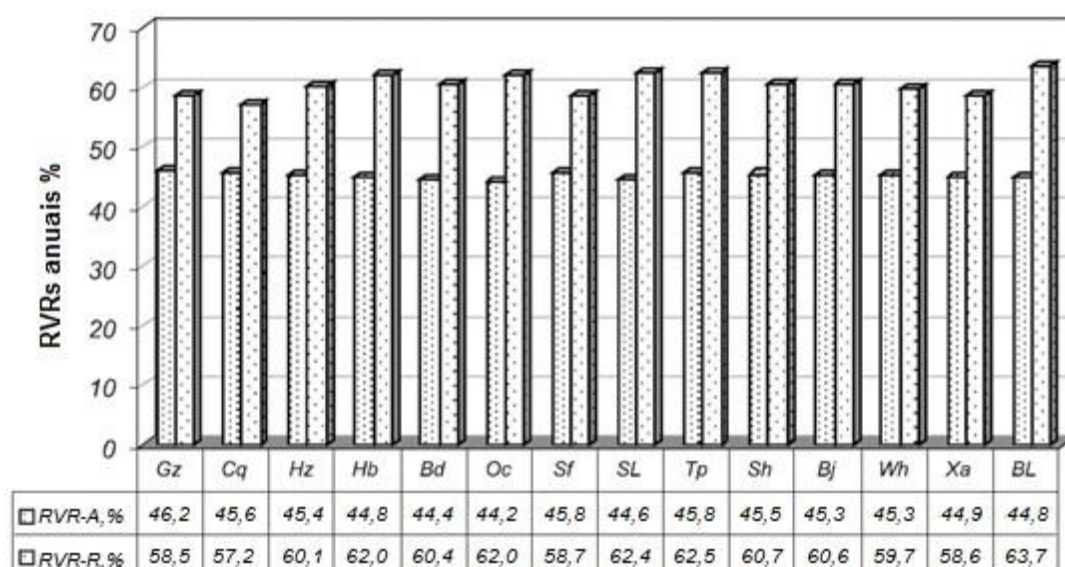


Figura 5 - RVRs para diferentes cidades na China em edificações com envoltória tradicional. (ENSHEN, 2005)

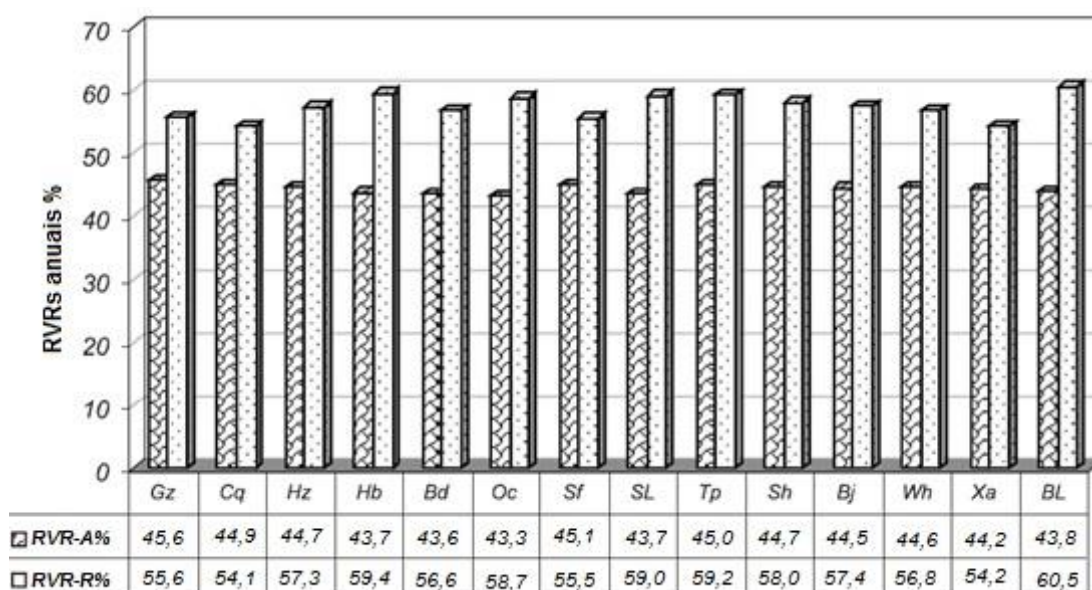


Figura 6 - RVRs para diferentes cidades da China com envoltória melhorada. (ENSHEN, 2005)

Da análise realizada pelo autor, concluiu-se que as RVRs para aquecimento e resfriamento são aproximadamente as mesmas para diferentes climas. Os valores absolutos de consumo, no entanto, são diretamente dependentes do clima local. Além disso, a ventilação externa também influi nos consumos. Quanto maior a ventilação, maior o consumo devido ao aquecimento, enquanto o consumo devido ao resfriamento reduz.

2.3. Regime de Ocupação da Edificação

Existem ainda diferentes regimes de ocupação dos edifícios. Esse fator, além de ser pouco previsível, exerce grande influência no padrão de consumo energético do edifício.

Segundo LEE et al. (2013), o modelo de simulação proposto pela maioria dos programas de análise energética quanto ao comportamento dos ocupantes de uma edificação é impreciso. Isso se deve ao fato de que os ocupantes são admitidos como simples fontes de energia emitindo calor correspondente ao metabolismo humano, com rotinas pré-fixadas baseadas em um histórico de comportamento. Neste modelo, não são consideradas as possíveis variações de comportamento devido a imprevisibilidades decorrentes das tomadas de decisão dos ocupantes.

Tendo esses fatos em vista, os autores propõem o método *ABM*, ou *Agent Based Modeling*. O método proposto se baseia em crenças comportamentais (expectativas de resultado), normativas (obstáculos estabelecidos por norma ou hierarquia) e de controle (acessibilidade e ajustabilidade). Todas essas crenças são consideradas em um modelo matemático proposto para a tomada de decisões através do método *ABM*. É definida uma função custo pelos autores, dada pela eq. (2).

$$f_{ij}(t) = a_{ij}x_{ij} + b_{ij}y_{ij} + c_{ij}z_{ij} + d_i x'_i - e_i y'_i \quad (2)$$

Onde

f_{ij} = crença em relação ao conforto para o agente i e o comportamento j ;

x = crença comportamental {0; 1};

y = crença em relação ao fator limitante de controle {0; 1};

z = crença normativa {0; 1};

x' = características de um agente (opcional, dependendo da disponibilidade de dados) {0; 1};

y' = distância do agente em relação ao sistema (opcional);

t = instante de simulação;

$a_{ij}, b_{ij}, c_{ij}, d_i, e_i$ = coeficientes de ponderação para o instante t de simulação.

Da forma como foi proposta a função f_{ij} , quanto maior for seu valor, maior será a tendência ao comportamento j que o agente i terá no instante t . Obtém-se, assim, um modelo matemático que visa prever o comportamento e o resultado das ações dos ocupantes de uma edificação.

Esse método emprega uma simulação simultânea de um programa de simulação energética de edifícios, de um programa para codificação do *ABM* e para resolução das equações diferenciais envolvendo os parâmetros ambientais atualizados ao longo da simulação. Para a simulação apresentada no artigo, os autores utilizaram o programa MATLAB® em conjunto com o *EnergyPlus* (simulação energética) através de um ambiente computacional BCVTB e de uma extensão MLE+ para *EnergyPlus*.

De acordo com os autores, o resultado das simulações feitas utilizando o *ABM* apresentou um consumo de energia cerca de 2% maior quando comparado às simulações utilizando comportamento padrão do *EnergyPlus*. Além disso, notou-se uma diferença de temperaturas de até 12°C comparando hora a hora os resultados obtidos pelo *ABM* e pelo comportamento padrão do *EnergyPlus*.

2.4. Aspectos Construtivos da Edificação

Outro aspecto importante na análise é a relação entre área de janela e área de parede no edifício (*Window-to-Wall Ratio*). Este fator exerce influência na iluminação e na radiação térmica solar admitida na edificação. No entanto, para fins deste estudo, será fixado um valor de *WWR* em 40%. De acordo com LAM et al. (2008), os valores máximo e mínimo para a *WWR* dentre uma análise de 20 edificações comerciais em Hong-Kong foram, respectivamente, 65% e 27%. Portanto pode-se utilizar o valor de 40% como adequado para este estudo.

As paredes de edifícios comerciais normalmente são compostas por múltiplas camadas. Pode-se adotar parâmetros diferentes de condutividade térmica para cada camada da parede, dependendo do material que a constitui.

LAM et al. (2004) utiliza parâmetros de condutividade térmica que variam em faixas de 1,4W/(m.°C) a 1,9W/(m.°C) para as paredes, de 3,4W/(m.°C) a

5,6W/(m.°C) para as janelas e de 0,4W/(m.°C) a 0,5W/(m.°C) para o teto. Esses valores são adotados para edificações públicas de escritório em Hong Kong para clima subtropical, semelhante ao clima de São Paulo.

Quanto maior condutividade térmica apresentada pela envoltória, maior é a variação de temperatura interna em função da temperatura da envoltória.

3. PROGRAMAS DE SIMULAÇÃO

Ao longo do desenvolvimento deste estudo será utilizado um programa de simulação para que se possa avaliar o comportamento energético das edificações denominado *EnergyPlus* (UNIVERSITY OF ILLINOIS, 2013).

O *EnergyPlus* foi desenvolvido com base nos programas BLAST e DOE-2. Tanto o BLAST (*Building Loads Analysis and System Thermodynamics*) quanto o DOE-2 foram desenvolvidos como ferramentas de simulação energética. Ambos foram concebidos a partir das preocupações advindas com a crise energética da década de 1970, na qual se verificou que o consumo energético em edificações representava uma parcela significativa na matriz energética norte-americana. Os programas eram direcionados a engenheiros e arquitetos com intuito de fornecer ferramentas de simulação para projetar e otimizar sistemas de ar condicionado e desempenho energético de edifícios.

Assim como BLAST e o DOE-2, o *EnergyPlus* é um programa de simulações e análises energéticas. De acordo com os dados de entrada das características da envoltória da edificação (clima do local de construção e características construtivas da edificação) e do regime de ocupação da edificação, o programa calcula as necessidades de aquecimento e resfriamento necessárias para manter o edifício em condições pré-estabelecidas de operação.

Além do *EnergyPlus*, é utilizado um programa auxiliar para implementar geometrias de entrada na simulação. Este programa é o *SketchUp*, que é implementado no *EnergyPlus* com o auxílio da extensão *OpenStudio*. Na figura 7 é ilustrada uma geometria de entrada de um andar de edifício comercial criada utilizando o *SketchUp* (TRIMBLE NAVIGATION, 2013).

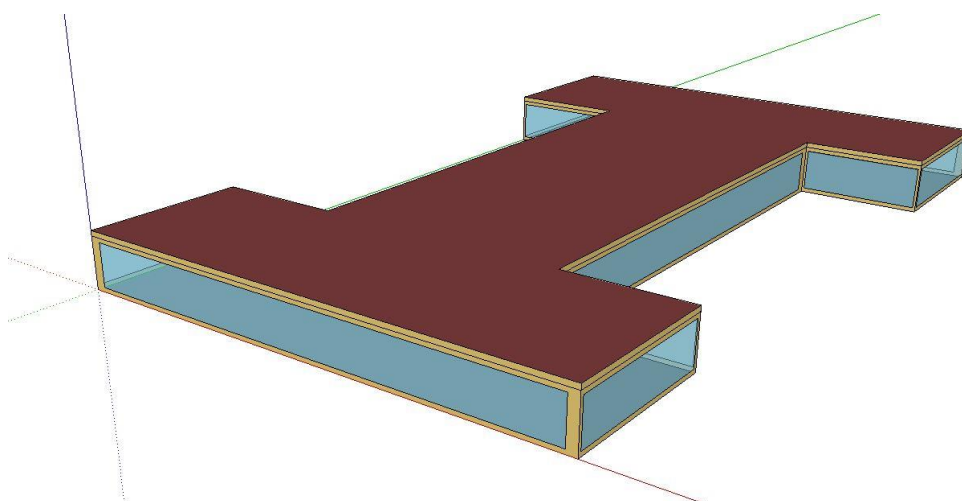


Figura 7 - Exemplo de geometria criada com o auxílio do SketchUp.

4. DEFINIÇÃO DOS MODELOS DE EDIFICAÇÃO UTILIZADOS NAS SIMULAÇÕES

A definição dos modelos de edificações a serem simulados utilizando o *EnergyPlus* foi feita com base em OURGHI(2006). Inicialmente, definiu-se uma edificação retangular. Estabeleceu-se o pé-direito (h) de um andar deste edifício igual a 3m. A área da base (A_{b-RET}) foi definida para dimensões de 30m por 35m, portanto $1050m^2$.

Com a edificação retangular definida, obteve-se um volume interno do andar (V) igual a $3150m^3$. Baseado no volume obtido, propôs-se uma edificação de referência de base quadrada, com lado a , cujo volume é igual a $3150m^3$, obtendo-se $a = 32,4m$.

A partir da edificação retangular e da edificação de referência, foram definidas outras três edificações. Para essa definição, foi feito o cálculo das áreas de parede externa de todos os modelos propostos. Essas áreas foram relacionadas através do índice *RC* (*Relative Compactness*), que se refere à compactividade relativa de uma edificação em relação a uma edificação de referência.

De acordo com a definição apresentada na seção 2.1, o índice *RC* é dado pela eq. (3).

$$RC = \frac{A_{ext,REF}}{A_{ext,EDIF}} \quad (3)$$

Onde:

$A_{ext,REF}$ é a área de parede externa da edificação de referência;

$A_{ext,EDIF}$ é a área de parede externa da edificação analisada.

Neste estudo, define-se como área de referência a área de parede externa da edificação de base quadrada e lado a .

Nas seções 4.1, 4.2, 4.3, 4.4 e 4.5 são apresentados os modelos de edificação utilizados nas simulações de consumo energético. É importante ressaltar que o vão central de elevador não foi considerado em nenhum dos modelos, já que será feita

uma análise comparativa entre os mesmos. Dessa forma, os valores absolutos de consumo energético em cada modelo não são o foco central deste estudo. Além disso, definiu-se um pé-direito de 3m para os modelos, incluindo a edificação de referência e fixou-se a área do piso para todos os perfis em 1050m².

4.1. Edificação de Referência (REF)

A edificação de referência utilizada neste estudo possui base quadrada. Em relação a ela são definidos os índices RC dos demais modelos analisados. Dessa forma, tem-se que RC_{REF} é unitário. Na figura 8, são ilustrados o modelo tridimensional de um andar da edificação de referência e a vista superior do andar.

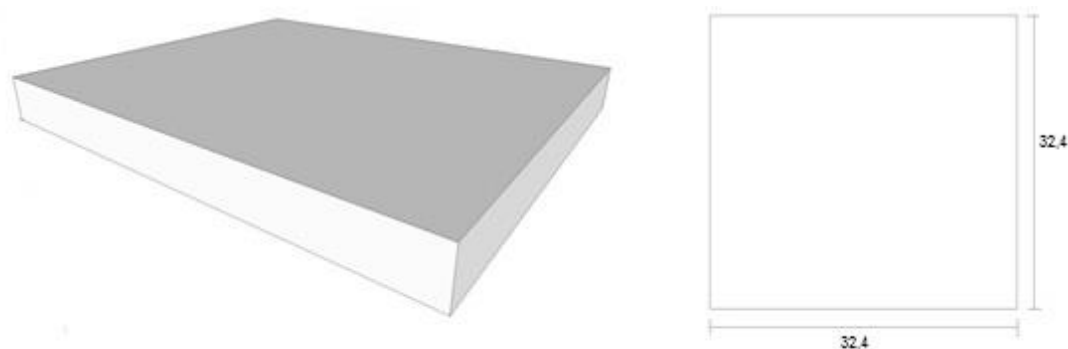


Figura 8 - Vistas isométrica e de topo do andar do modelo proposto de edificação de referência. Medidas em metros.

Os dados da edificação de referência são apresentados a seguir:

- Volume (V): $V = A_{b-REF} \cdot h = 3150m^3$;
- Aresta (a): $a = 32,4m$;
- Pé-direito (h): $h = 3m$;
- Área da base (A_{b-REF}): $A_{b-REF} = a^2 = 32,4^2 \cong 1050m^2$;
- Área de parede externa ($A_{ext,REF}$): $A_{ext,REF} = 4ah = 4 * 32,4 * 3 = 388,8m^2$;
- Índice RC (RC_{REF}): $RC_{REF} = \frac{A_{ext,REF}}{A_{ext,REF}} = 1$.

Para todos os modelos definidos nas seções 4.2, 4.3, 4.4 e 4.5 serão adotadas as mesmas características construtivas (volume, pé-direito e área de piso) e condições de carga interna e de transferência de calor devida às cargas externas.

4.2. Edificação de Perfil Retangular (RET)

A edificação retangular foi utilizada para definir o volume interno comum a todos os modelos. É um dos perfis arquitetônicos mais observados nos edifícios comerciais e, portanto, será objeto de análise neste estudo. Na figura 9, são ilustrados o modelo tridimensional de um andar da edificação retangular e a vista superior do andar.

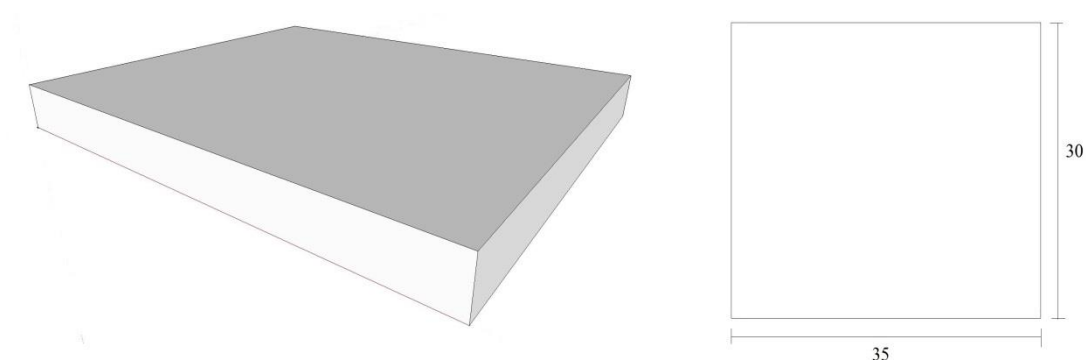


Figura 9 - Vista tridimensional e de topo do andar do modelo proposto de edificação retangular. Medidas em metros.

Os dados para um andar da edificação retangular proposta são apresentados a seguir:

- Área de parede externa ($A_{ext,RET}$):

$$A_{ext,RET} = 2h(30 + 35) = 2.3. (30 + 35) = 390m^2;$$

- Índice RC (RC_{RET}): $RC_{RET} = \frac{A_{ext,REF}}{A_{ext,RET}} = \frac{388,8}{390} = 0,997.$

4.3. Edificação de Perfil Esbelto (ESB)

Outro perfil arquitetônico comumente observado em edifícios comerciais é o perfil esbelto. Será, portanto, um objeto de análise neste estudo.

Os dados para um andar da edificação do perfil esbelto proposto são apresentados a seguir:

- Área de parede externa ($A_{ext,ESB}$):

$$A_{ext,ESB} = 2h(20,2 + 52) = 2.3. (20,2 + 52) = 433,2m^2;$$

- Índice RC (RC_{ESB}): $RC_{ESB} = \frac{A_{ext,REF}}{A_{ext,ESB}} = \frac{388,8}{433,2} = 0,898;$

- Variação percentual do índice RC em relação ao perfil retangular ($\Delta RC_{RET-ESB\%}$):

$$\Delta RC_{RET-ESB\%} = \frac{RC_{RET}-RC_{ESB}}{RC_{RET}} = \frac{0,997-0,898}{0,997} = 9,97\%.$$

Como o presente trabalho também visa à análise do efeito da variação da geometria de uma edificação no consumo energético, procura-se obter uma variação percentual de no mínimo 10% no índice RC em relação aos demais perfis. Dessa forma, o perfil esbelto proposto está adequado para o escopo das análises e é apresentado na figura 10.

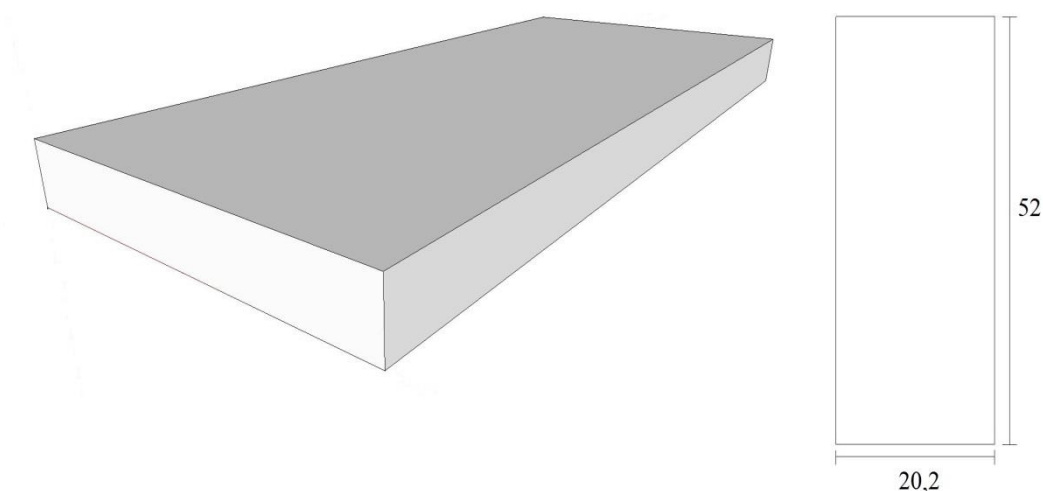


Figura 10 - Vistas isométrica e de topo do andar do modelo proposto de edificação esbelta. Medidas em metros.

4.4. Edificação de Perfil “I” (I)

Outro perfil arquitetônico estudado no presente trabalho é o perfil “I”, também observado em edificações comerciais. Na figura 11, são ilustrados o modelo tridimensional de um andar da edificação de perfil “I” e a vista superior do andar.

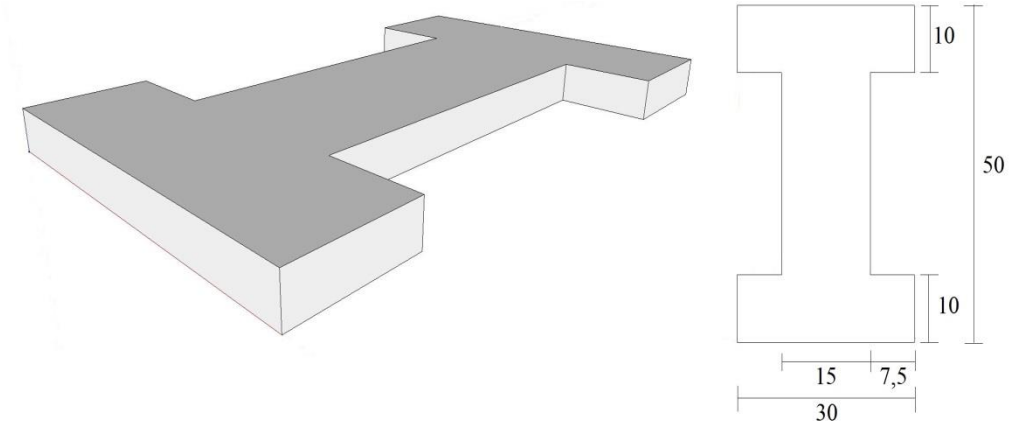


Figura 11 - Vistas isométrica e de topo do andar do modelo proposto de edificação "I". Medidas em metros.

Os dados para um andar da edificação do perfil “I” proposto são apresentados a seguir:

- Área de parede externa ($A_{ext,I}$):

$$A_{ext,I} = h[10.4 + 30.2 + 15.2 + 30.2] = 570m^2;$$

- Índice RC (RC_I): $RC_I = \frac{A_{ext,REF}}{A_{ext,I}} = \frac{388,8}{570} = 0,682;$

- Variação percentual do índice RC em relação ao perfil retangular ($\Delta RC_{RET-I\%}$):

$$\Delta RC_{RET-I\%} = \frac{RC_{RET}-RC_I}{RC_{RET}} = \frac{0,997-0,682}{0,997} = 31,58\%;$$

- Variação percentual do índice RC em relação ao perfil esbelto ($\Delta RC_{ESB-I\%}$):

$$\Delta RC_{ESB-I\%} = \frac{RC_{ESB}-RC_I}{RC_{ESB}} = \frac{0,898-0,682}{0,898} = 24\%.$$

4.5. Edificação de Perfil “U” (U)

Outro perfil arquitetônico observado em edificações comerciais é o perfil “U” e será estudado no presente trabalho. Na figura 12, são ilustrados o modelo tridimensional de um andar da edificação de perfil “U” e a vista superior do andar.

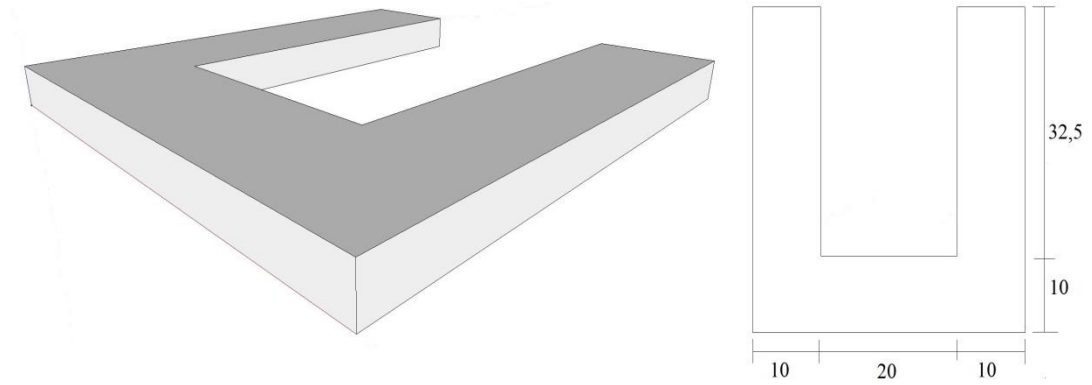


Figura 12 - Vistas isométrica e de topo do andar do modelo proposto de edificação "U". Medidas em metros.

Os dados para um andar da edificação do perfil “U” proposto são apresentados a seguir:

- Área de parede externa ($A_{ext,U}$):

$$A_{ext,U} = (10 \cdot h) \cdot 2 + (42,5 \cdot h) \cdot 2 + (42,5 - 10) \cdot h \cdot 2 + (40 \cdot h) + (20 \cdot h) = 690m^2;$$

- Índice RC (RC_U): $RC_U = \frac{A_{ext,REF}}{A_{ext,U}} = \frac{388,8}{690} = 0,563$;

- Variação percentual do índice RC em relação ao perfil retangular ($\Delta RC_{RET-U\%}$):

$$\Delta RC_{RET-U\%} = \frac{RC_{RET} - RC_U}{RC_{RET}} = \frac{0,997 - 0,563}{0,997} = 43,49\%;$$

- Variação percentual do índice RC em relação ao perfil esbelto ($\Delta RC_{ESB-U\%}$):

$$\Delta RC_{ESB-U\%} = \frac{RC_{ESB} - RC_U}{RC_{ESB}} = \frac{0,898 - 0,563}{0,898} = 37,22\%;$$

- Variação percentual do índice RC em relação ao perfil “I” ($\Delta RC_{I-U\%}$):

$$\Delta RC_{I-U\%} = \frac{RC_I - RC_U}{RC_I} = \frac{0,682 - 0,563}{0,682} = 17,39\%.$$

5. MATRIZ DE SIMULAÇÃO

No presente trabalho, busca-se fazer simulações de uma edificação e avaliar o consumo energético dos modelos propostos de edificações com o objetivo de analisar os efeitos que a variação de certos parâmetros tem sobre o consumo total anual de energia de cada modelo. Para delimitar o escopo deste trabalho, foram definidos quatro parâmetros para análises iniciais: a forma geométrica, a área envidraçada de parede, o coeficiente de ganho de calor solar ou fator solar e o clima.

Nas seções 5.1, 5.2, 5.3 e 5.4 são explicados em maior detalhe os parâmetros de análise que são variados nas simulações.

5.1. Forma Geométrica

Um dos parâmetros a ser variado para analisar a resposta de consumo dos modelos é a forma geométrica. A variação deste parâmetro será feita pela mudança do perfil arquitetônico da edificação e sua quantificação será feita por meio dos índices *RC* de cada modelo.

Com isso, busca-se estabelecer uma correlação entre a variação dos índices *RC* e o consumo energético de uma edificação.

Para o presente trabalho, serão utilizados os perfis arquitetônicos propostos na seção 4, cujos índices *RC* são 0,997 (perfil retangular), 0,898 (perfil esbelto), 0,682 (perfil “I”) e 0,563 (perfil “U”). Além disso, será utilizada a edificação de base quadrada como referência para a comparação com os demais modelos, sendo utilizadas, portanto, cinco formas geométricas nas simulações.

5.2. Área Envidraçada

O parâmetro de área envidraçada influi diretamente no consumo energético da edificação e, neste trabalho, busca-se avaliar este efeito em cada modelo. A variação deste parâmetro será feita por meio da razão de área envidraçada por área de parede,

ou *Window to Wall Ratio* (*WWR*) e será avaliada a correlação numérica entre a variação da *WWR* e o consumo energético dos modelos.

Para este estudo, serão utilizados quatro valores de *WWR*: 0% (sem área envidraçada), 40%, 60% e 80%. O valor nulo de *WWR* será utilizado para analisar o efeito da forma geométrica, já que a edificação de referência é definida sem envidraçamento (OURGHI, 2007).

5.3. Fator Solar (FS)

Outro parâmetro que influencia no consumo energético de edificações é o material utilizado para envidraçamento. Tipos diferentes de vidros empregados nas janelas acarretam em diferenças na transferência de calor pelas mesmas. A definição desse parâmetro é feita por meio do fator solar (FS).

Nas simulações do presente trabalho serão utilizados três valores para o FS: 0,25, 0,38 (vidro laminado cinza de 8 mm) e 0,82 (vidro simples incolor de 6mm). Dessa forma, serão considerados os efeitos de três tipos diferentes de material empregado na área envidraçada.

5.4. Clima

O clima que envolve a edificação influi diretamente na troca de calor desta com o meio e, assim, no consumo energético da edificação. O clima será, portanto, um parâmetro variado nas simulações. A variação deste parâmetro será feita pela utilização de dados climáticos de municípios pertencentes a diferentes zonas bioclimáticas brasileiras.

Serão utilizados dados de 5 zonas bioclimáticas brasileiras nas simulações. As cidades adotadas para a análise dos dados climáticos serão: São Paulo, Rio de Janeiro, Porto Alegre, Brasília e Manaus. Esses dados serão implementados diretamente de arquivos referentes às características climáticas de municípios brasileiros no programa *EnergyPlus*. O parâmetro de clima será quantificado por

meio dos valores de Graus Hora de Resfriamento (GHR)¹ correspondentes a cada município avaliado. A tabela 1 apresenta os valores de GHR para as cidades simuladas, segundo BORGSTEIN et al. (2014).

Tabela 1 – Valores de GHR para as cidades estudadas.

CIDADE	GHR
São Paulo	14.172
Rio de Janeiro	45.016
Porto Alegre	23.954
Brasília	16.624
Manaus	82.005

5.5. Resumo da Matriz de Simulações

Em vista dos parâmetros apresentados nas seções 5.1, 5.2, 5.3 e 5.4, pode-se montar uma matriz de simulações com todas as possíveis combinações de situações a serem simuladas.

Para a estimativa do número de simulações, é importante ressaltar que as simulações da edificação de referência para cada clima serão realizadas apenas uma vez, pois esta é definida com WWR nulo. As simulações para as demais geometrias com WWR nulo serão realizadas apenas uma vez para cada dado climático, pois nestes casos a mudança de fator solar não influi no consumo energético das edificações.

A tabela 2 apresenta um resumo da matriz de simulações, com o número de simulações efetivas para o estudo.

¹ Graus Hora de Resfriamento (GHR) é uma metodologia que quantifica o clima através das horas anuais acumuladas em que a temperatura externa se encontra acima de uma temperatura de base estabelecida. Para este estudo, os valores de GHR foram calculados com base em uma temperatura de bulbo úmido de 15°C (BORGSTEIN, 2014). É importante ressaltar que o efeito da diferença entre a temperatura média externa e a temperatura de base a cada hora é quantificado em número de horas. Dessa forma, o GHR pode exceder o número de horas anuais (8760 horas). O cálculo do GHR é dado por: $GHR = \sum (T_{med} - T_{base})$.

Tabela 2 - Resumo da matriz de simulações do estudo.

CARACTERÍSTICA	Quantidade
Geometrias (RC)	5
WWR	4
FS	3
Clima (GHR)	5
Total de Combinações	300
Simulações Repetidas	95
Simulações Efetivas	205

Serão realizadas, portanto, 205 simulações.

6. SIMULAÇÕES E ANÁLISES

6.1. Definição dos Parâmetros de Simulação

Além das características construtivas apresentadas na seção 4 é necessária a definição dos parâmetros de carga interna adotados para a simulação do modelo. Esses parâmetros incluem a carga e o perfil de uso da iluminação e dos equipamentos, além da carga e do perfil de ocupação das pessoas presentes na edificação. As potências por área de piso de iluminação e de equipamentos e a densidade de ocupantes na edificação foram adotadas com base nas normas ASHRAE 90.1-2007 e NBR16401. A tabela 3 apresenta os parâmetros de carga interna utilizados nas simulações computacionais utilizando o *EnergyPlus*.

Tabela 3 - Parâmetros de carga interna utilizados nas simulações computacionais.

PARÂMETROS DE CARGA INTERNA PARA AS SIMULAÇÕES		
Fonte	Carga Interna	Unidade
Iluminação	11,0	W/m ²
Equipamentos	10,7	W/m ²
Pessoas	7,5	m ² /pessoa

Os perfis de uso de iluminação e dos equipamentos e o perfil de ocupação das pessoas foram retirados da tabela G-I do Apêndice G da norma ASHRAE 90.1-2007. As figuras 13 e 14 apresentam os perfis definidos no *EnergyPlus* para as simulações.

Field	Units	Obj1	Obj2	Obj3	Obj4	Obj5	Obj6	Obj7	Obj8	Obj9	Obj10	Obj11
Name		Office Lights Sched	Office Equipment Sc	Office Occupancy Sc	Infiltration Schedule	Infiltration Hall On Sc	Infiltration Quarter Or	Hours of Operation	Always On	Always Off	Heating Setpoint Sc	Cooling Setpoint Sc
Schedule Type Limits Name		Fraction	Fraction	Fraction	Fraction	Fraction	Fraction	On/Off	Fraction	Fraction	Temperature	Temperature
Field 1	varies	Through: 12/31	Through: 12/31	Through: 12/31	Through: 12/31	Through: 12/31	Through: 12/31	Through: 12/31	Through: 12/31	Through: 12/31	Through: 12/31	Through: 12/31
Field 2	varies	For: AllDays	For: AllDays	For: AllDays	For: Weekdays Sun	For: Weekdays Sun	For: Weekdays Sun	For: Weekdays Sun	For: AllDays	For: AllDays	For: AllDays	For: AllDays
Field 3	varies	Until: 05:00	Until: 05:00	Until: 05:00	Until: 06:00	Until: 06:00	Until: 06:00	Until: 06:00	Until: 24:00	Until: 24:00	Until: 06:00	Until: 06:00
Field 4	varies	0.05	0.05	0	1	1	1	0	1	0	15	30
Field 5	varies	Until: 07:00	Until: 07:00	Until: 07:00	Until: 22:00	Until: 22:00	Until: 22:00	Until: 22:00			Until: 22:00	Until: 22:00
Field 6	varies	0.1	0.1	0	0.25	0.25	0.25	1			20	24
Field 7	varies	Until: 08:00	Until: 08:00	Until: 08:00	Until: 24:00	Until: 24:00	Until: 24:00	Until: 24:00			Until: 24:00	Until: 24:00
Field 8	varies	0.3	0.2	1	1	1	0				15	30
Field 9	varies	Until: 12:00	Until: 12:00	Until: 12:00	For: Saturday Winter	For: Saturday Winter	For: Saturday Winter	For: Saturday Winter				
Field 10	varies	0.9	0.95	0.95	Until: 06:00	Until: 06:00	Until: 06:00	Until: 06:00				
Field 11	varies	Until: 13:00	Until: 13:00	Until: 13:00	1	1	1	0				
Field 12	varies	8	8	0.5	Until: 18:00	Until: 18:00	Until: 18:00	Until: 18:00				
Field 13	varies	Until: 17:00	Until: 17:00	Until: 17:00	0	0.5	0.25	1				
Field 14	varies	9	9	0.95	Until: 24:00	Until: 24:00	Until: 24:00	Until: 24:00				
Field 15	varies	Until: 18:00	Until: 18:00	Until: 18:00	1	1	1	0				
Field 16	varies	5	0.3	For: Sunday Holiday	For: Sunday Holiday	For: Sunday Holiday	For: Sunday Holiday	For: Sunday Holiday				
Field 17	varies	Until: 20:00	Until: 20:00	Until: 22:00	Until: 24:00	Until: 24:00	Until: 24:00	Until: 24:00				
Field 18	varies	3	3	0.1	1	1	1	0				
Field 19	varies	Until: 22:00	Until: 22:00	Until: 24:00								
Field 20	varies	2	2	0.05								
Field 21	varies	Until: 23:00	Until: 23:00									
Field 22	varies	1	1									
Field 23	varies	Until: 24:00	Until: 24:00									
Field 24	varies	0.5	0.5									

Figura 13 - Perfis de utilização e ocupação das cargas e sistemas internos das edificações simuladas (parte 1).

Field	Units	Obj12	Obj13	Obj14	Obj15
Name		Office Activity Sched	Office Work Eff. Sch	Office Clothing Sched	FanAvailSched
Schedule Type Limits Name		Any Number	Fraction	Any Number	Fraction
Field 1	varies	Through: 12/31	Through: 12/31	Through: 04/30	Through: 12/31
Field 2	varies	For: AllDays	For: AllDays	For: AllDays	For: AllDays
Field 3	varies	Until: 24:00	Until: 24:00	Until: 24:00	Until: 6:00
Field 4	varies	120	0	1	0
Field 5	varies			Through: 09/30	Until: 22:00
Field 6	varies			For: AllDays	1
Field 7	varies			Until: 24:00	Until: 24:00
Field 8	varies			0.5	0
Field 9	varies			Through: 12/31	
Field 10	varies			For: AllDays	
Field 11	varies			Until: 24:00	
Field 12	varies			1	
Field 13	varies				
Field 14	varies				

Figura 14 - Perfis de utilização e ocupação das cargas e sistemas internos das edificações simuladas (parte 2).

Além dos fatores de carga interna, é necessário definir os fatores que influem na troca de calor com o meio externo. Essa troca de calor é dada através de quatro tipos de superfície separadora: paredes externas, teto, chão e vidros. No programa *EnergyPlus*, deve-se definir os materiais que constituem as diversas camadas dessas superfícies de troca. Para efeitos de simulação, apenas o coeficiente global de transferência de calor (U) é importante nesta definição de parâmetros. Dessa forma, foram estabelecidas séries de camadas que resultassem no coeficiente global de transferência de calor desejado para cada tipo de superfície. Para cada camada foi especificado um material (com valores específicos de condutividade térmica, densidade e calor específico) e uma espessura. Como o parâmetro importante é o coeficiente de transferência de calor, a definição das camadas não se limitou a paredes usualmente utilizadas na construção civil. Na figura 15, são apresentados os materiais para a constituição das paredes externas, do teto, do chão. É importante ressaltar que foi admitida resistência nula na troca de calor através de paredes internas, pois se supôs equilíbrio térmico entre os ambientes internos dos modelos

simulados. Dessa forma, o valor definido para a condutividade dessas paredes é elevado (da ordem de 10^3 W/(m.K)).

Explanation of Object and Current Field

Object Description: Regular materials described with full set of thermal properties

Field Description:
ID: A1
Enter a alphanumeric value
This field is required.

Field	Units	Obj1	Obj2	Obj3	Obj4
Name		CONC.TETO	CONC PAREDE	CONC CHAO	PAREDE INTERIOR
Roughness		MediumRough	MediumRough	MediumRough	MediumSmooth
Thickness	m	0.532	0.312	0.532	0.02
Conductivity	W/m-K	1.75	1.75	1.75	1000
Density	kg/m ³	2400	2400	2400	8
Specific Heat	J/kg-K	1000	1000	1000	1000
Thermal Absorptance					
Solar Absorptance					
Visible Absorptance					

Figura 15 - Materiais definidos para a constituição das superfícies de troca.

Definiu-se, também, a transferência de calor através dos vidros. Essa definição é feita no *EnergyPlus* através da entrada do coeficiente global de transferência de calor (U) e do coeficiente de ganho de calor solar (*Solar Heat Gain Coefficient – SHGC*), ou fator solar. A figura 16 apresenta a definição desses parâmetros para um dos tipos de vidro utilizados nas simulações.

Explanation of Object and Current Field

Object Description: Alternate method of describing windows
This window material object is used to define an entire glazing system using simple performance parameters.

Field Description:
ID: A1
Enter a alphanumeric value
This field is required.

Field	Units	Obj1
Name		JANELA
U-Factor	W/m ² -K	5.65
Solar Heat Gain Coefficient		0.25
Visible Transmittance		0.8

Figura 16 - Definição dos parâmetros para o vidro de fator solar FS=0,25.

Definidos os materiais, são feitas as composições das superfícies de troca para que resultem os coeficientes globais de transferência de calor desejados. As composições das paredes externas e internas, do teto, do chão e das janelas são apresentadas na figura 17.

Field	Units	Obj1	Obj2	Obj3	Obj4	Obj5	Obj6	Obj7
Name		Exterior Floor	Interior Floor	Exterior Wall	Interior Wall	Exterior Roof	Interior Ceiling	Exterior Window
Outside Layer		CONC CHAO	PAREDE INTERIOR	CONC PAREDE	PAREDE INTERIOR	CONC TETO	PAREDE INTERIOR	JANELA
Layer 2								
Layer 3								
Layer 4								
Layer 5								
Layer 6								
Layer 7								
Layer 8								
Layer 9								
Layer 10								

Figura 17 - Composições das superfícies externas e internas de troca de calor das edificações simuladas.

Os coeficientes globais de transferência de calor adotados para a troca de calor através das paredes externas, tetos e vidros foram retirados da biblioteca de materiais do VisualDOE-3.1 (ORDENES, 2003). Esses coeficientes são apresentados na tabela 4.

Tabela 4 - Coeficientes globais de transferência de calor através das superfícies externas da edificação.

TRANSFERÊNCIA DE CALOR ATRAVÉS DAS SUPERFÍCIES	
Superfície	U (W/(m ² .K))
Paredes Externas	5,61
Teto e Chão	3,29
Vidros	5,65

Definidos os parâmetros relacionados às cargas interna e externa das edificações simuladas, resta definir de um sistema de Aquecimento, Ventilação e Ar Condicionado. Esta é uma entrada necessária para que o *EnergyPlus* conclua as simulações. As características do sistema de AVAC são listadas a seguir:

- Sistema de AVAC central;
- *Chiller* de resfriamento com condensação a água e caixas VAV (Volume de Ar Variável);

- A renovação de ar foi definida como a soma das renovações de ar devido aos ocupantes (total de 1562 m³/h por andar) e por área de piso (total de 1512 m³/h por andar). Isso totaliza uma renovação de ar de 3074 m³/h para cada um dos andares dos tipos de edificação definidos;
- O COP (Capacidade de Refrigeração) do *chiller* foi definido em 5,5.

6.2. Resultados das Simulações

Após a elaboração dos modelos de cada perfil arquitetônico definido na seção 4 no *SketchUp* e dos parâmetros de simulação apresentados na seção 6.1, foram feitas simulações no *EnergyPlus*. Essas simulações foram feitas para as cidades de São Paulo, Rio de Janeiro, Porto Alegre, Brasília e Manaus, com arquivos de dados climáticos TRY, provenientes de um levantamento de dados do Laboratório de Eficiência Energética em Edificações (LabEEE). Para cada um destes climas, foram feitas as simulações para todas as combinações possíveis de fator solar (FS), percentuais de área envidraçada (*WWR*) e perfil geométrico (*RC*), de acordo com o número de simulações estimado na seção 5. Para a análise do parâmetro clima, foram utilizados os valores de GHR de BORGSTEIN et. al (2014), apresentados na tabela 1 da seção 5.4.

Foram obtidas as tabelas de consumo energético anual de todos os perfis arquitetônicos, cada um com quatro diferentes porcentagens de área envidraçada (*WWR*) e três fatores solares (FS). Na tabela 5 é apresentada uma tabela com um resumo dos resultados obtidos para as simulações energéticas dos perfis referência (REF), retangular (RET), esbelto (ESB), “I” (I) e “U” (U) com *WWR*s iguais a 0, 40%, 60% e 80% e fatores solares 0,25, 0,38 e 0,82 na cidade de São Paulo. A tabela também inclui os consumos exclusivos do sistema de aquecimento, ventilação e ar-condicionado (AVAC) e sua parcela correspondente no consumo total de cada edificação (Consumo % AVAC), além do consumo total por área de piso (Consumo por Área) e do consumo de AVAC por área de piso (Consumo AVAC por Área). É importante notar que os resultados da simulação para *WWR* nulo foram apresentados apenas uma vez, pois os modelos não apresentam janelas e, portanto, os fatores

solares não têm influência nos resultados. As tabelas com os resultados de simulação para as demais cidades estão apresentadas no ANEXO.

Tabela 5 - Resumo dos consumos energéticos obtidos para as simulações em São Paulo dos perfis REF, RET, ESB, I e U com WWR=0, 40%, 60% e 80% e FS=0,25, 0,38 e 0,82.

PARÂMETROS				CONSUMO ENERGÉTICO				
GEOMETRIA		Envidraçamento		Consumo AVAC (kWh)	Consumo Total (kWh)	Consumo % AVAC (kWh)	Consumo por Área (kWh/m ²)	Consumo AVAC por Área (kWh/m ²)
Perfil	RC	WWR	FS					
REF	1,000	0%	0,25	25.128,65	111.600,74	22,5%	106,29	23,93
RET	0,997	0%	0,25	25.020,43	111.512,28	22,4%	106,20	23,83
ESB	0,898	0%	0,25	26.029,23	112.554,04	23,1%	107,19	24,79
I	0,682	0%	0,25	26.315,65	112.807,52	23,3%	107,44	25,06
U	0,563	0%	0,25	27.715,73	114.207,59	24,3%	108,77	26,40
RET	0,997	40%	0,25	28.440,46	114.932,32	24,7%	109,46	27,09
ESB	0,898	40%	0,25	30.586,88	117.111,68	26,1%	111,53	29,13
I	0,682	40%	0,25	31.267,56	117.759,42	26,6%	112,15	29,78
U	0,563	40%	0,25	34.102,56	120.594,42	28,3%	114,85	32,48
RET	0,997	60%	0,25	30.115,24	116.607,10	25,8%	111,05	28,68
ESB	0,898	60%	0,25	32.695,52	119.220,34	27,4%	113,54	31,14
I	0,682	60%	0,25	33.668,72	120.160,58	28,0%	114,44	32,07
U	0,563	60%	0,25	37.089,71	123.581,57	30,0%	117,70	35,32
RET	0,997	80%	0,25	31.526,76	118.018,63	26,7%	112,40	30,03
ESB	0,898	80%	0,25	34.341,85	120.866,67	28,4%	115,11	32,71
I	0,682	80%	0,25	35.479,36	121.971,22	29,1%	116,16	33,79
U	0,563	80%	0,25	39.432,07	125.923,93	31,3%	119,93	37,55
RET	0,997	40%	0,38	29.639,58	116.131,44	25,5%	110,60	28,23
ESB	0,898	40%	0,38	32.122,61	118.647,42	27,1%	113,00	30,59
I	0,682	40%	0,38	32.988,78	119.480,64	27,6%	113,79	31,42
U	0,563	40%	0,38	36.293,67	122.785,53	29,6%	116,94	34,57
RET	0,997	60%	0,38	31.727,98	118.219,84	26,8%	112,59	30,22
ESB	0,898	60%	0,38	34.842,13	121.366,94	28,7%	115,59	33,18
I	0,682	60%	0,38	35.957,55	122.449,42	29,4%	116,62	34,25
U	0,563	60%	0,38	40.373,19	126.865,06	31,8%	120,82	38,45
RET	0,997	80%	0,38	33.491,59	119.983,45	27,9%	114,27	31,90
ESB	0,898	80%	0,38	37.011,34	123.536,15	30,0%	117,65	35,25
I	0,682	80%	0,38	38.427,28	124.919,14	30,8%	118,97	36,60
U	0,563	80%	0,38	44.001,97	130.493,84	33,7%	124,28	41,91
RET	0,997	40%	0,82	29.926,94	116.418,80	25,7%	110,88	28,50
ESB	0,898	40%	0,82	32.298,00	118.822,81	27,2%	113,16	30,76
I	0,682	40%	0,82	33.653,32	120.145,18	28,0%	114,42	32,05
U	0,563	40%	0,82	37.946,53	124.438,39	30,5%	118,51	36,14
RET	0,997	60%	0,82	32.415,43	118.907,28	27,3%	113,25	30,87
ESB	0,898	60%	0,82	36.112,24	122.637,05	29,4%	116,80	34,39
I	0,682	60%	0,82	38.045,34	124.537,20	30,5%	118,61	36,23
U	0,563	60%	0,82	43.953,44	130.445,30	33,7%	124,23	41,86
RET	0,997	80%	0,82	35.038,63	121.530,49	28,8%	115,74	33,37
ESB	0,898	80%	0,82	39.848,40	126.373,21	31,5%	120,36	37,95
I	0,682	80%	0,82	42.176,75	128.668,60	32,8%	122,54	40,17
U	0,563	80%	0,82	49.514,37	136.006,23	36,4%	129,53	47,16

É importante ressaltar que as cargas internas são constantes e independentes das condições externas. Isso ocorre porque essas cargas são definidas em função da área de piso das edificações simuladas, que é constante para todos os modelos. Dessa forma, o consumo energético anual da edificação não varia em função destes fatores. A variação do consumo energético anual total da edificação é dada, portanto, pelo sistema de AVAC. Assim, convém para as seções seguintes analisar com maior detalhamento o consumo exclusivamente do sistema de AVAC. De forma a se obterem análises que podem ser generalizadas facilmente, esse consumo do sistema de AVAC será dividido pela área de piso. Será analisado com mais detalhes, portanto, o comportamento do consumo específico do sistema de AVAC, isto é, do consumo do sistema de AVAC dividido pela área de piso.

Como o número de simulações é muito elevado, a análise das próximas seções será feita para algumas condições específicas. Essas condições permitem uma análise aprofundada do efeito de cada parâmetro sobre o consumo energético anual da edificação, de modo que os resultados podem ser generalizados posteriormente para as demais combinações de fatores.

6.2.1. Simulação e Análise do Consumo Energético Anual em Função da Geometria da Edificação

A partir da tabela 5 foram obtidas curvas do consumo energético anual total e do sistema AVAC em cada um dos perfis com todas as *WWRs* analisadas, assim como os fatores solares. A figura 18 ilustra o consumo total e o consumo do sistema de AVAC para cada tipo de geometria. Foram fixados $WWR=40\%$ e $FS=0,38$. A simulação foi feita para a cidade de São Paulo.

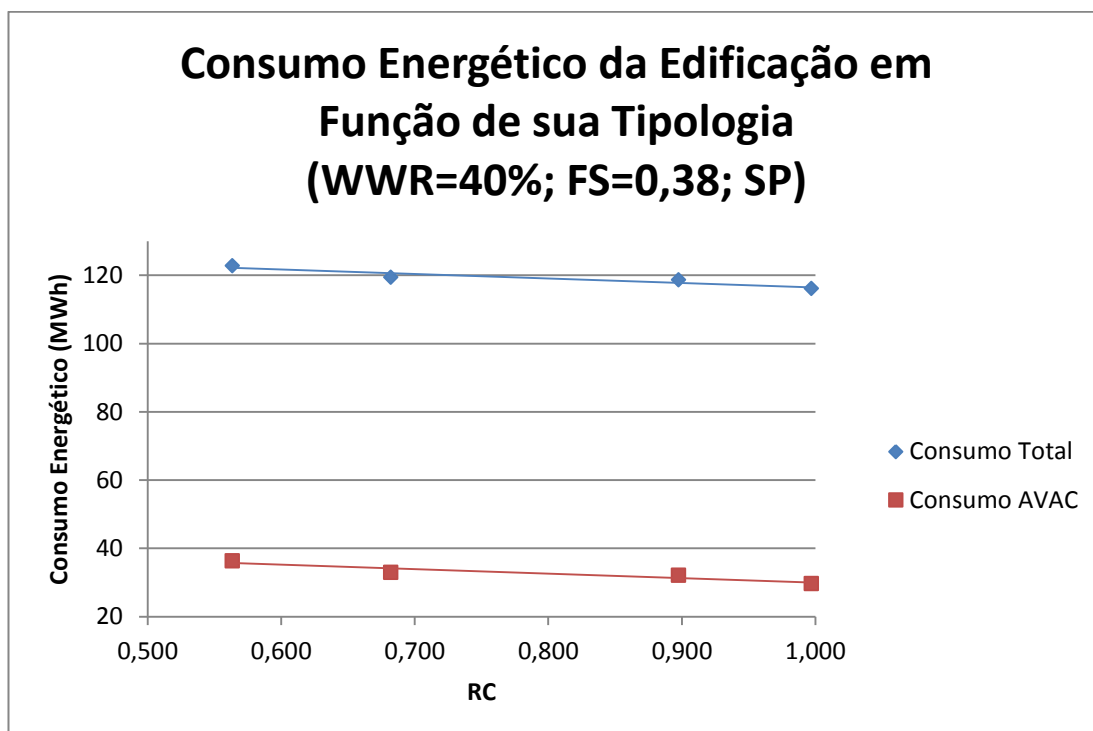


Figura 18 - Gráfico de consumo total e do sistema de AVAC para as edificações de perfis RET, ESB, I e U (WWR=40% e FS=0,38) na cidade de São Paulo.

Nota-se na figura 18 que o consumo energético diminui com o aumento do RC. Isso ocorreu conforme o esperado por OURGHI (2006), já que os consumos totais aumentam conforme o perfil é menos compacto (menores RCs). Isso pode ser explicado pela maior área lateral de troca de calor com o ambiente externo, sujeita à mesma insolação das demais edificações. O resultado é uma troca maior de calor por radiação, o que aumenta a exigência do sistema AVAC.

Nota-se, no entanto, que a variação no consumo energético anual total devido às variações de RC é muito pequena (menor do que 10%). Isso pode ser explicado devido à grande área de piso dos andares propostos. Essa grande área faz com que as cargas internas (iluminação e equipamentos) apresentem maior influência na carga térmica total, já que elas dependem diretamente de sua distribuição pelo piso (potência/área ou W/m^2). Dessa forma, a variação decorrente do aumento de potência interna se sobrepõe ao aumento de potência devido à expansão da área de parede (aumento de trocas com o ambiente externo).

Quando se avalia apenas o consumo do sistema de AVAC, nota-se que a influência da geometria é significativa. Da figura 18, obtém-se uma variação de 18,3% em relação à geometria de menor índice RC (perfil U).

Da regressão linear, percebe-se que as curvas dos consumos total e do sistema de AVAC são praticamente paralelas. As regressões do consumo total e do consumo do sistema de AVAC obtidas a partir das curvas da figura 18 são dadas, respectivamente, pelas eq. (4) e (5).

$$\text{Consumo Total} = -13.099 \cdot \text{RC} + 129.544 \text{ (kWh)} \quad (4)$$

$$\text{Consumo AVAC} = -13.131 \cdot \text{RC} + 43.069 \text{ (kWh)} \quad (5)$$

Visando à obtenção de uma análise quantitativa desta variação, foram traçadas novas curvas de consumo em função da geometria (medida pelo índice *RC*). Para fins de comparação, foram traçadas três curvas do consumo do sistema de AVAC em função da geometria, com dois parâmetros fixos e o outro com curvas explicitadas para cada um de seus valores.

Na figura 19, foram utilizados os dados dos perfis RET, ESB, I e U com WWR=40%, 60% e 80% e fator solar fixado em FS=0,38. Os valores apresentados nessas curvas são das simulações feitas utilizando o clima de São Paulo. Foram analisados os consumos específicos do sistema de AVAC, já que este é o sistema responsável pela variação do consumo se busca uma análise generalizada do mesmo.

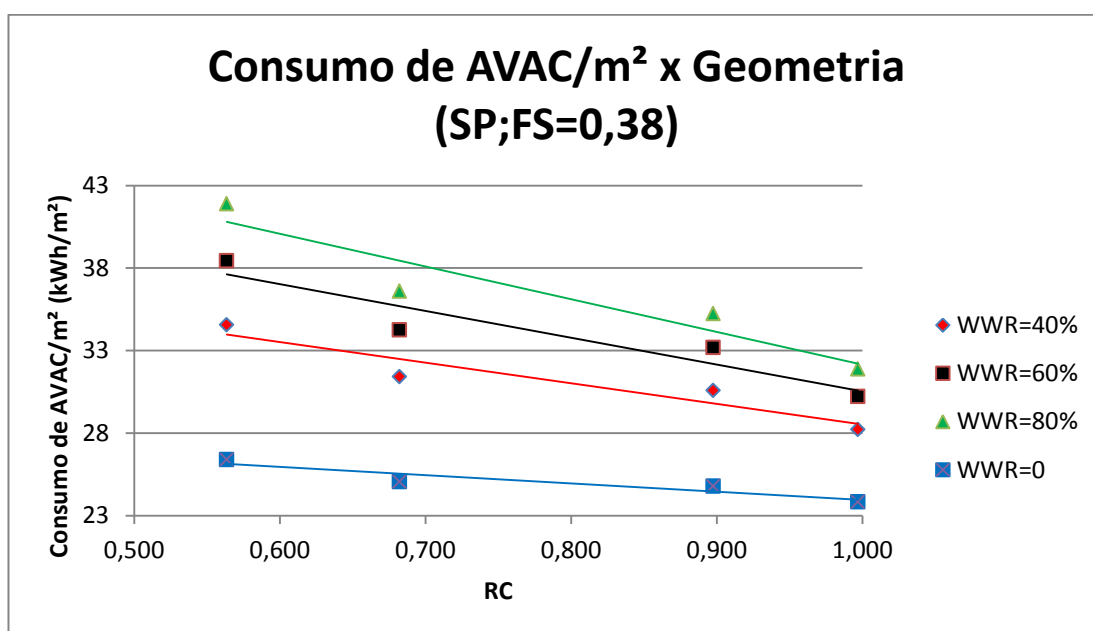


Figura 19 - Curvas de regressão linear para os consumos energéticos de AVAC em São Paulo em função da geometria, com WWR=0, 40%, 60% e 80% e FS=0,38.

Para cada uma das regressões lineares dos dados da figura 19, obtiveram-se as equações (6) a (9).

WWR=0:

$$\text{Consumo} = -5,012 \cdot \text{RC} + 28,953 \text{ (kWh/m}^2\text{)} \quad (6)$$

WWR=40%:

$$\text{Consumo} = -12,506 \cdot \text{RC} + 41,018 \text{ (kWh/m}^2\text{)} \quad (7)$$

WWR=60%:

$$\text{Consumo} = -16,248 \cdot \text{RC} + 46,779 \text{ (kWh/m}^2\text{)} \quad (8)$$

WWR=80%:

$$\text{Consumo} = -19,825 \cdot \text{RC} + 51,975 \text{ (kWh/m}^2\text{)} \quad (9)$$

Nota-se um grande salto entre os consumos com WWR nulo e WWR=40%. Isso ilustra a grande influência do aumento da área envidraçada de parede no aumento da carga térmica das edificações. Esse aumento conforme o aumento das áreas envidraçadas já era esperado.

Para fins quantitativos, foram obtidas as regressões lineares em função do RC, em São Paulo, para WWR=40% e variando o fator solar. As curvas obtidas são ilustradas na figura 20.

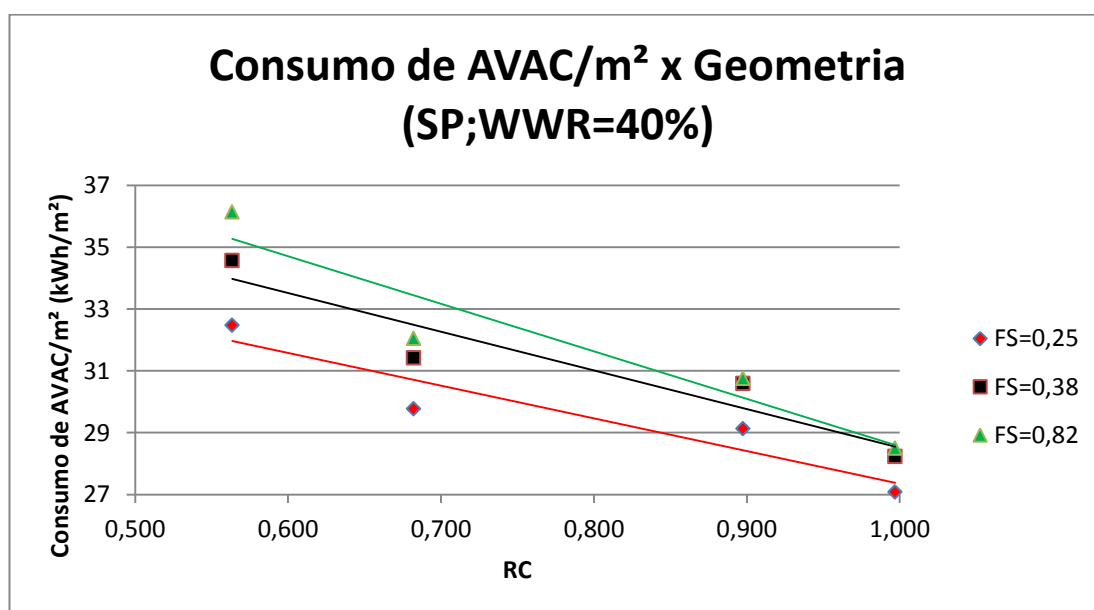


Figura 20 - Curvas de regressão linear para os consumos energéticos de AVAC em São Paulo em função da geometria, com WWR=40% e FS=0,25, 0,38 e 0,82.

As relações obtidas das curvas na figura 20 são dadas pelas equações (10) a (12).

FS=0,25:

$$\text{Consumo} = -10,592 \cdot \text{RC} + 37,933 \text{ (kWh/m}^2\text{)} \quad (10)$$

FS=0,38:

$$\text{Consumo} = -12,506 \cdot \text{RC} + 41,018 \text{ (kWh/m}^2\text{)} \quad (11)$$

FS=0,82:

$$\text{Consumo} = -15,381 \cdot \text{RC} + 43,937 \text{ (kWh/m}^2\text{)} \quad (12)$$

Conforme era esperado, o consumo energético anual do sistema de AVAC aumenta com o aumento do fator solar. Isso ocorre devido ao aumento da permeabilidade do vidro, o que resulta numa carga térmica mais elevada devida à radiação solar.

Nota-se que o salto entre os consumos energéticos conforme variam os fatores solares tende a diminuir com o aumento destes. Apesar da proximidade entre FS=0,25 e FS=0,38, o salto entre estas curvas é muito maior do que entre FS=0,38 e FS=0,82. Isso indica que o comportamento do consumo pode ser não linear com a variação do fator solar.

Para obter mais uma análise quantitativa do consumo do sistema de AVAC em função do tipo de geometria, fixou-se WWR em 40% e FS em 0,38. Foram, então, traçadas as curvas para as diferentes cidades simuladas. Estas curvas estão apresentadas na figura 21.

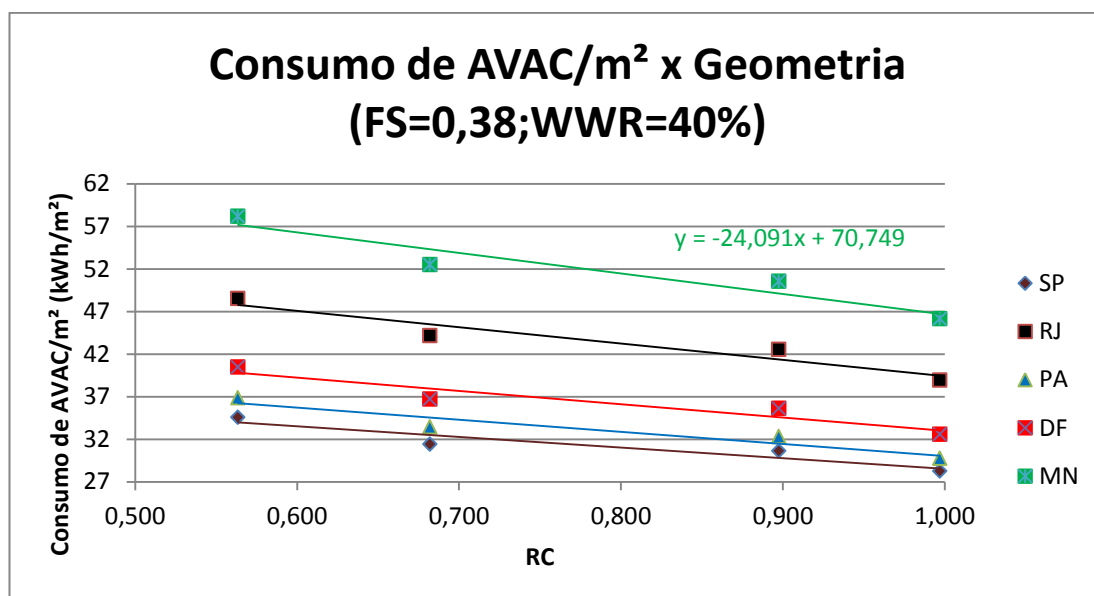


Figura 21 -Curvas de regressão linear para os consumos energéticos de AVAC com WWR=40% e FS=0,38 para São Paulo, Rio de Janeiro, Porto Alegre, Brasília e Manaus.

As relações obtidas das curvas na figura 21 são dadas pelas equações (13) a (17).

São Paulo:

$$\text{Consumo} = -12,506 \cdot \text{RC} + 41,018 \text{ (kWh/m}^2\text{)} \quad (13)$$

Porto Alegre:

$$\text{Consumo} = -14,258 \cdot \text{RC} + 44,281 \text{ (kWh/m}^2\text{)} \quad (14)$$

Brasília:

$$\text{Consumo} = -15,678 \cdot \text{RC} + 48,65 \text{ (kWh/m}^2\text{)} \quad (15)$$

Rio de Janeiro:

$$\text{Consumo} = -19,227 \cdot \text{RC} + 58,626 \text{ (kWh/m}^2\text{)} \quad (16)$$

Manaus:

$$\text{Consumo} = -24,091 \cdot \text{RC} + 70,749 \text{ (kWh/m}^2\text{)} \quad (17)$$

Nota-se que os consumos energéticos aumentam com quanto maiores as médias de temperaturas (quantificadas pelo GHR). As curvas são deslocadas quase paralelamente, de forma que o comportamento é similar. Um resultado notável aparece neste gráfico. O consumo energético anual em Brasília foi mais elevado do que o consumo em Porto Alegre, apesar de possuir um GHR menor. Este fato será analisado com maior profundidade na seção 6.2.4.

6.2.2. Simulação e Análise do Consumo Energético Anual em Função do Fator Solar

Procurou-se, também, quantificar a variação do consumo específico do sistema de AVAC referente à variação nos fatores solares para os perfis, áreas envidraçadas e climas em questão. A figura 22 apresenta as curvas de consumo específico do sistema de AVAC em função do fator solar, para cada tipo de geometria. Foi fixado WWR=40%. A simulação foi feita para a cidade de São Paulo, com os dados apontados na tabela 5.

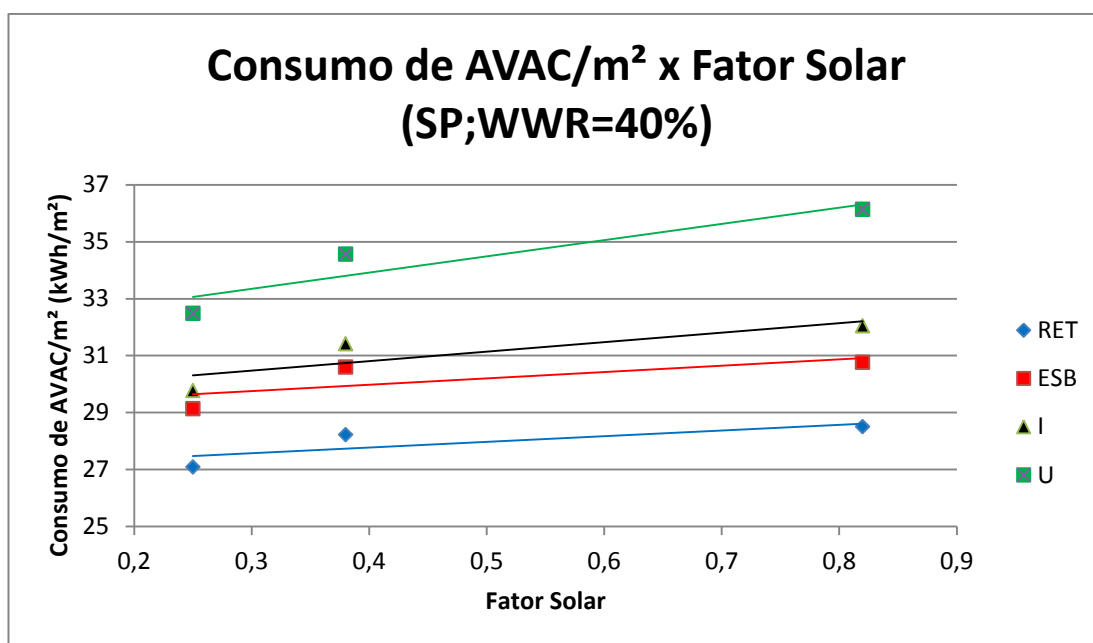


Figura 22- Curvas de regressão linear para os consumos energéticos de AVAC em São Paulo em função do fator solar, com WWR=40% e FS=0,25, 0,38 e 0,82.

Percebe-se que o consumo de energia tende a aumentar com o aumento do fator solar. Isso já era um resultado esperado e observado na seção 6.2.1, já que o fator solar mais elevado permite uma incidência maior de luz solar no ambiente interno do edifício e, portanto, aumenta seu ganho de calor solar. Este implica em um consumo maior do sistema AVAC para controlar a temperaturas dos ambientes climatizados. Visto que as demais cargas internas (pessoas, iluminação e equipamentos) são constantes para todos os modelos, resulta em um aumento no consumo geral da edificação.

Observa-se que a influência do fator solar no consumo específico do sistema de AVAC é significativa. Da figura 22, obtém-se uma variação de 11,3% do consumo específico de AVAC para o perfil U, em relação ao menor valor de fator solar (FS=0,25).

Nota-se, novamente, a tendência de crescimento do consumo de energia conforme se diminui o índice *RC* dos perfis, com deslocamento praticamente paralelo entre as curvas de cada tipologia.

Para cada uma das regressões lineares dos dados da figura 22, obtiveram-se as eqs. (18) a (21).

Perfil RET:

$$\text{Consumo} = 2,009 \cdot \text{FS} + 26,968 \text{ (kWh/m}^2\text{)} \quad (18)$$

Perfil ESB:

$$\text{Consumo} = 2,227 \cdot \text{FS} + 29,085 \text{ (kWh/m}^2\text{)} \quad (19)$$

Perfil I:

$$\text{Consumo} = 3,337 \cdot \text{FS} + 29,469 \text{ (kWh/m}^2\text{)} \quad (20)$$

Perfil U:

$$\text{Consumo} = 5,698 \cdot \text{FS} + 31,641 \text{ (kWh/m}^2\text{)} \quad (21)$$

Observa-se que o afastamento entre os consumos de FS=0,25 e de FS=0,38 é maior do que entre este último e o consumo de FS=0,82, como já havia sido notado na seção 6.2.1. Dessa forma, há um indício de que o comportamento do consumo em função do FS pode ser não-linear (possivelmente logarítmico). Para o escopo deste trabalho, o comportamento será admitido linear, já que aproxima a variação de uma forma satisfatória.

A fim de se obterem novas regressões e observar o efeito da variação da área envidraçada, fixou-se o perfil esbelto e foram traçadas novas curvas para WWR=40%, 60% e 80%. Não foram simulados os resultados para WWR nulo, pois o fator solar não influi no consumo destes. As curvas são mostradas na figura 23.

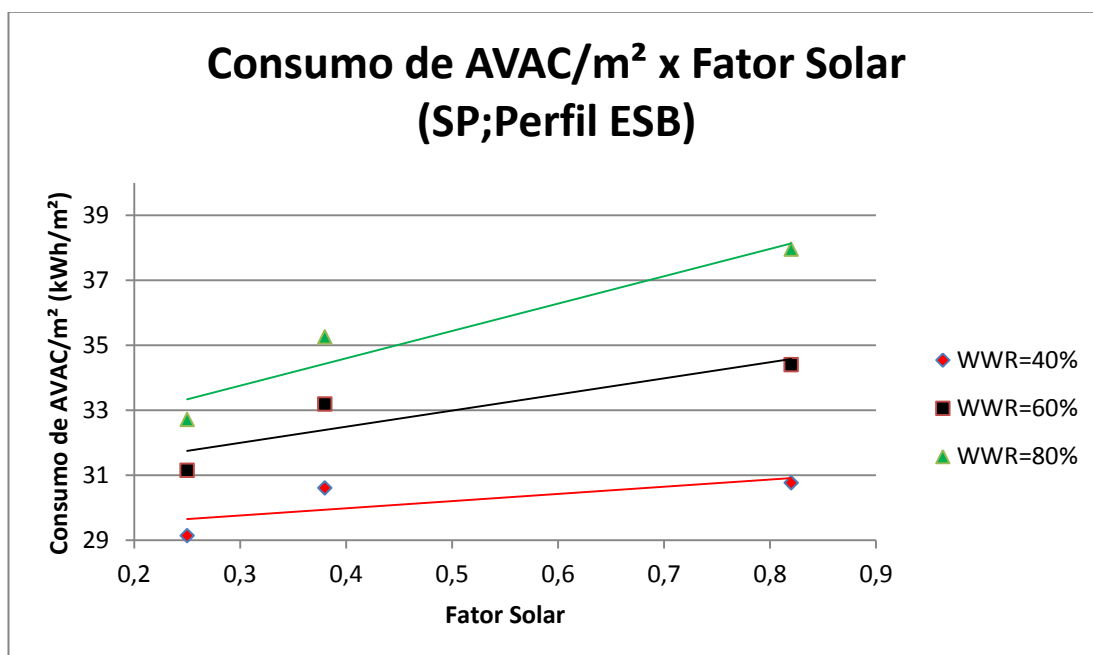


Figura 23- Gráfico de consumo energético anual de AVAC por área de piso em São Paulo em função do fator solar, para WWRs de 40%, 60% e 80%. Resultados apresentados para o perfil ESB.

Conforme o esperado, o consumo aumenta com o acréscimo de área envidraçada na parede da edificação.

As relações numéricas obtidas para as curvas na figura 23 são dadas pelas equações (22) a (24).

WWR=40%:

$$\text{Consumo} = 2,227 \cdot \text{FS} + 29,085 \text{ (kWh/m}^2\text{)} \quad (22)$$

WWR=60%:

$$\text{Consumo} = 4,955 \cdot \text{FS} + 30,51 \text{ (kWh/m}^2\text{)} \quad (23)$$

WWR=80%:

$$\text{Consumo} = 8,421 \cdot \text{FS} + 31,232 \text{ (kWh/m}^2\text{)} \quad (24)$$

Para obter mais uma análise quantitativa do consumo do sistema de AVAC em função do fator solar, fixou-se WWR em 40% e adotou-se o perfil esbelto. Foram, então, traçadas as curvas para as diferentes cidades simuladas. Estas curvas estão apresentadas na figura 24.

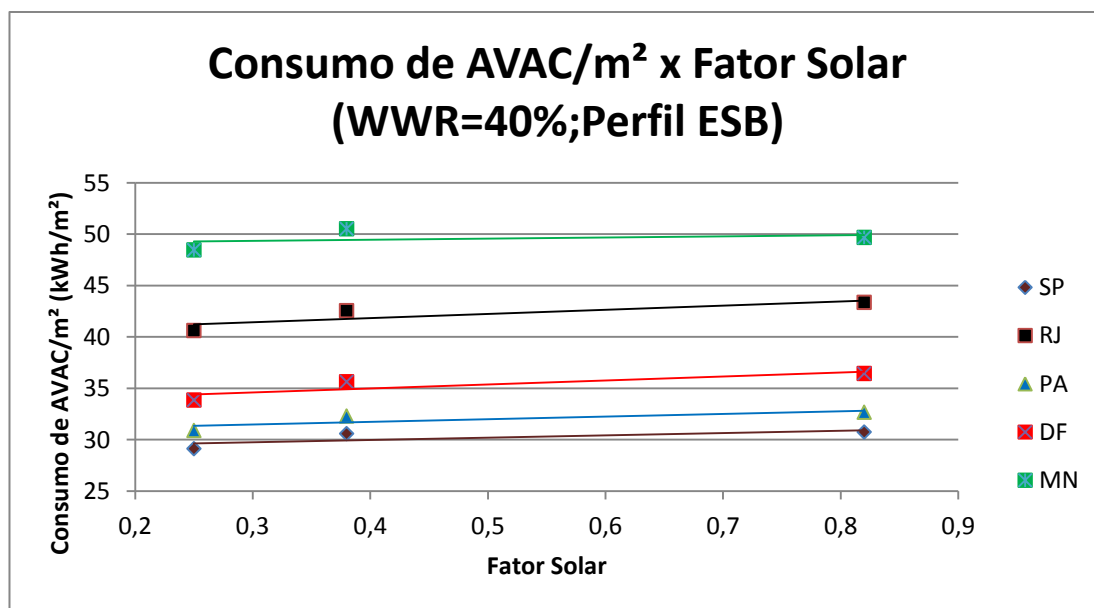


Figura 24 -Curvas de regressão linear para os consumos energéticos de AVAC em função do fator solar, com WWR=40% e perfil ESB para São Paulo, Rio de Janeiro, Porto Alegre, Brasília e Manaus.

As relações obtidas das curvas na figura 24 são dadas pelas equações (25) a (29).

São Paulo:

$$\text{Consumo} = 2,227 \cdot \text{FS} + 29,085 \text{ (kWh/m}^2\text{)} \quad (25)$$

Porto Alegre:

$$\text{Consumo} = 2,550 \cdot \text{FS} + 30,723 \text{ (kWh/m}^2\text{)} \quad (26)$$

Brasília:

$$\text{Consumo} = 3,851 \cdot \text{FS} + 33,446 \text{ (kWh/m}^2\text{)} \quad (27)$$

Rio de Janeiro:

$$\text{Consumo} = 4,046 \cdot \text{FS} + 40,218 \text{ (kWh/m}^2\text{)} \quad (28)$$

Manaus:

$$\text{Consumo} = 1,086 \cdot \text{FS} + 49,028 \text{ (kWh/m}^2\text{)} \quad (29)$$

Nota-se um comportamento análogo dos consumos energéticos em função do fator solar com relação aos consumos energéticos da seção 6.2.1.

Pelas regressões, possível perceber que a geometria apresenta uma influência mais acentuada no consumo específico de AVAC (e, conseqüentemente, do consumo total da edificação) do que o fator solar. Enquanto os coeficientes angulares obtidos para as regressões da seção 6.2.1 apresentam valores na faixa de 10 a 20, os valores dos coeficientes angulares das regressões em função do fator solar pertencem a uma ordem de grandeza menor (valores entre 1,00 e 6,00). Percebe-se que, apesar de menos influente que a geometria, o fator solar é um parâmetro influente no consumo energético anual da edificação, já que apresenta variações percentuais da ordem de 10% no consumo específico de AVAC.

6.2.3. Simulação e Análise do Consumo Energético Anual em Função da Área Envidraçada de Parede

Nesta seção, são quantificadas as variações do consumo específico do sistema de AVAC em função das áreas envidraçadas de parede. A figura 25 apresenta as curvas de consumo específico do sistema de AVAC em função do WWR, para cada tipo de geometria. Foi fixado $FS=0,38$. A simulação foi feita para a cidade de São Paulo, com os dados apontados na tabela 5.

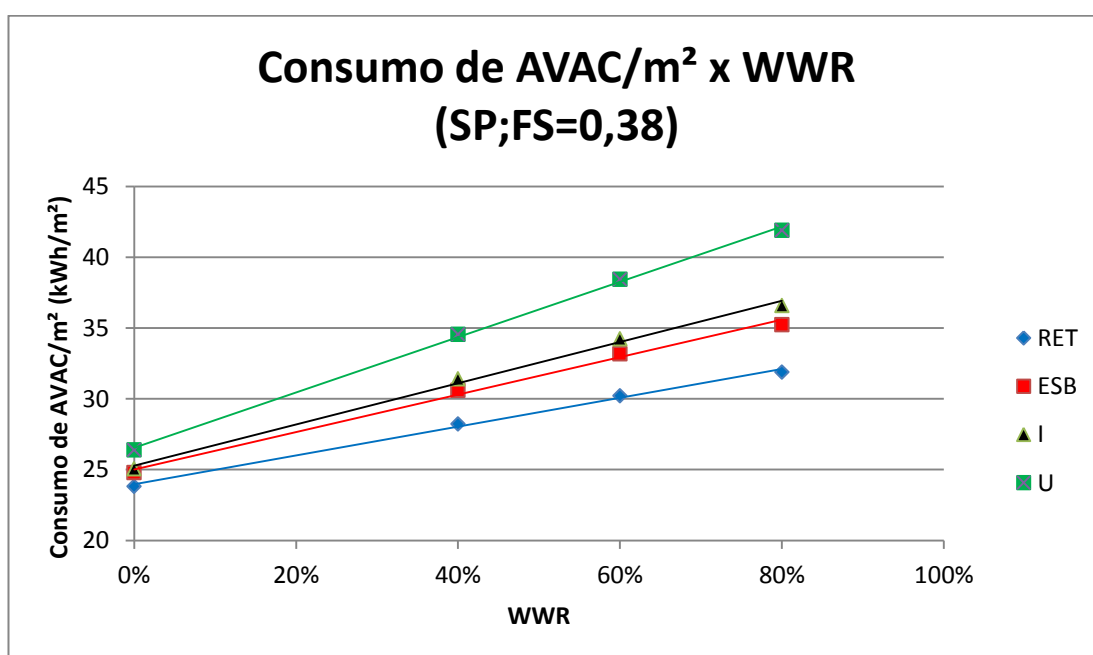


Figura 25- Curvas de regressão linear para os consumos energéticos de AVAC em São Paulo em função do WWR, com $FS=0,38$. Curvas apresentadas os perfis RET, ESB, I e U.

Percebe-se que o consumo de energia tende a aumentar com o aumento do WWR. Isso já era um resultado esperado e observado na seção 6.2.1, já que o aumento da área envidraçada de parede permite uma incidência maior de luz solar no ambiente interno do edifício e, portanto, aumenta seu ganho de calor solar. Isso resulta em um aumento no consumo energético anual do sistema AVAC. Como as demais cargas internas (pessoas, iluminação e equipamentos) são constantes para todos os modelos, tem-se como resultado global em um aumento no consumo geral da edificação.

Observa-se que a influência da área envidraçada de parede no consumo específico do sistema de AVAC é significativa. Da figura 25, para o perfil U, tem-se uma variação de aproximadamente 37% do menor (0%) para o maior (80%) valor de WWR.

Nota-se novamente a tendência de crescimento do consumo de energia conforme se diminui o índice *RC* dos perfis. As curvas para as diferentes tipologias apresentam uma pequena variação angular, mas mantêm-se muito próximas entre si, com um maior salto ocorrendo entre as curvas dos perfis I e U.

Para cada uma das regressões lineares dos dados da figura 25, obtiveram-se as equações (30) a (33).

Perfil RET:

$$\text{Consumo} = 10,177 \cdot \text{WWR} + 23,963 \text{ (kWh/m}^2\text{)} \quad (30)$$

Perfil ESB:

$$\text{Consumo} = 13,227 \cdot \text{WWR} + 25,001 \text{ (kWh/m}^2\text{)} \quad (31)$$

Perfil I:

$$\text{Consumo} = 14,562 \cdot \text{WWR} + 25,278 \text{ (kWh/m}^2\text{)} \quad (32)$$

Perfil U:

$$\text{Consumo} = 19,510 \cdot \text{WWR} + 26,550 \text{ (kWh/m}^2\text{)} \quad (33)$$

Com o objetivo de obter novas regressões lineares, fixou-se o perfil esbelto e foram traçadas novas curvas para FS=0,25, 0,38 e 0,82. As curvas são mostradas na figura 26.

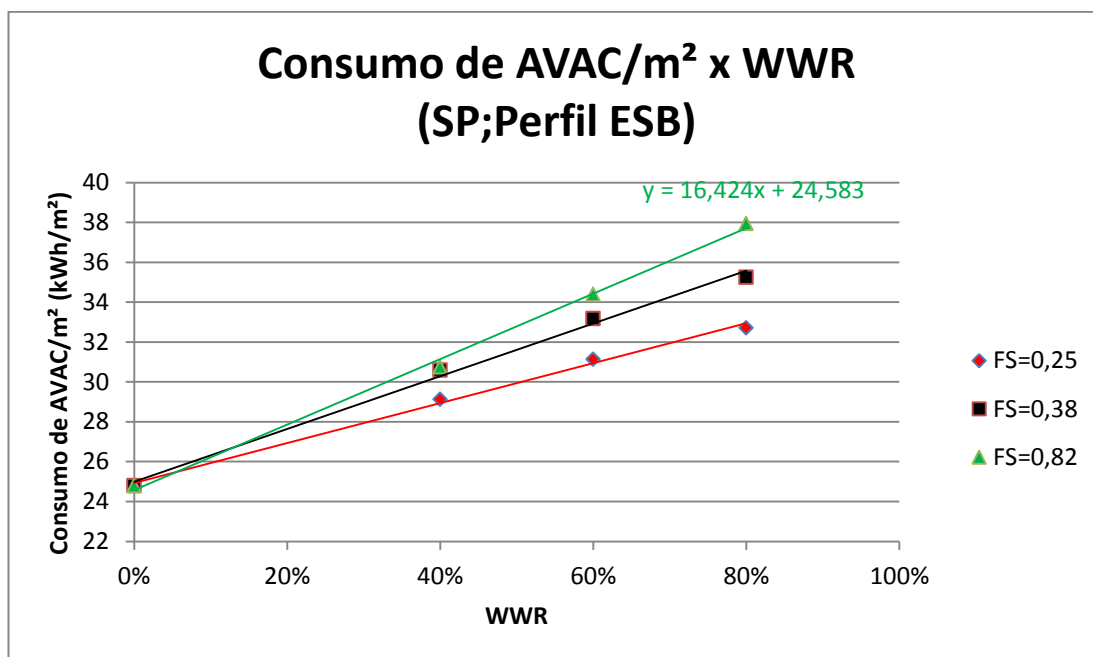


Figura 26- Curvas de regressão linear para os consumos energéticos de AVAC em São Paulo em função do WWR, com perfil ESB. Curvas apresentadas os perfis FS=0,25, 038 e 0,82.

Nota-se um comportamento similar às curvas para cada perfil geométrico. Conforme o esperado, o consumo aumenta com o acréscimo de área envidraçada na parede da edificação e os fatores solares apresentam deslocamentos de suas curvas para cima quanto maior o seu valor. Há, também, uma variação no coeficiente angular das regressões.

As relações obtidas das curvas na figura 26 são dadas pelas equações (34) a (36).

FS=0,25:

$$\text{Consumo} = 10,018 \cdot \text{WWR} + 24,933 \text{ (kWh/m}^2\text{)} \quad (34)$$

FS=0,38:

$$\text{Consumo} = 13,227 \cdot \text{WWR} + 25,001 \text{ (kWh/m}^2\text{)} \quad (35)$$

FS=0,82:

$$\text{Consumo} = 16,424 * \text{WWR} + 24,583 \text{ (kWh/m}^2\text{)} \quad (36)$$

Para obter mais uma análise quantitativa do consumo do sistema de AVAC em função da área envidraçada, fixou-se FS=0,38 e adotou-se o perfil esbelto. Foram, então, traçadas as curvas para as diferentes cidades simuladas. Estas curvas estão apresentadas na figura 27.

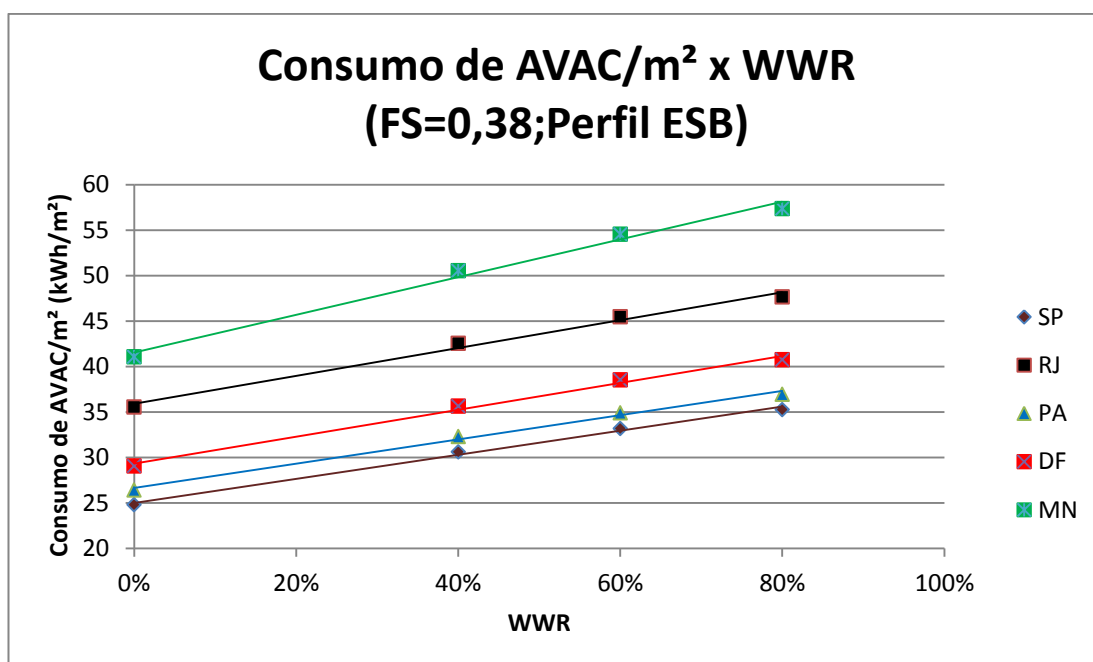


Figura 27 - Curvas de regressão linear para os consumos energéticos de AVAC em São Paulo em função do WWR=40% e perfil ESB para São Paulo, Rio de Janeiro, Porto Alegre, Brasília e Manaus.

As relações obtidas das curvas na figura 27 são dadas pelas equações (37) a (41).

São Paulo:

$$\text{Consumo} = 13,227 * \text{WWR} + 25,001 \text{ (kWh/m}^2\text{)} \quad (37)$$

Porto Alegre:

$$\text{Consumo} = 13,333 \cdot \text{WWR} + 26,639 \text{ (kWh/m}^2\text{)} \quad (38)$$

Brasília:

$$\text{Consumo} = 14,816 \cdot \text{WWR} + 29,31 \text{ (kWh/m}^2\text{)} \quad (39)$$

Rio de Janeiro:

$$\text{Consumo} = 15,347 \cdot \text{WWR} + 35,894 \text{ (kWh/m}^2\text{)} \quad (40)$$

Manaus:

$$\text{Consumo} = 20,751 \cdot \text{WWR} + 41,534 \text{ (kWh/m}^2\text{)} \quad (41)$$

Nota-se que as regressões de (37) a (41) repetem o comportamento das seções 6.2.1 e 6.2.2 e apresentam aspecto quase paralelo entre si em todas as cidades, exceto em Manaus, que apresenta uma inclinação maior. No entanto, essa diferença não é muito alta ou aparente nas curvas traçadas.

Pelas regressões, nota-se que o efeito da área envidraçada de parede é da mesma ordem de grandeza do efeito da geometria. Percebe-se que a área envidraçada de parede é um fator muito influente no consumo energético anual da edificação, já que apresenta variações percentuais da ordem de 40% no consumo específico de AVAC.

6.2.4. Simulação e Análise do Consumo Energético Anual em Função do Clima

Nesta seção, serão quantificados os efeitos da variação do clima de envoltória no consumo específico do sistema de AVAC. A figura 28 apresenta as curvas de consumo específico do sistema de AVAC em função do GHR, para cada tipo de geometria. Foram fixados WWR=40% e FS=0,38. Para os resultados desta seção, foram utilizados os dados da tabela 5 e das tabelas A1 a A4 presentes no ANEXO A.

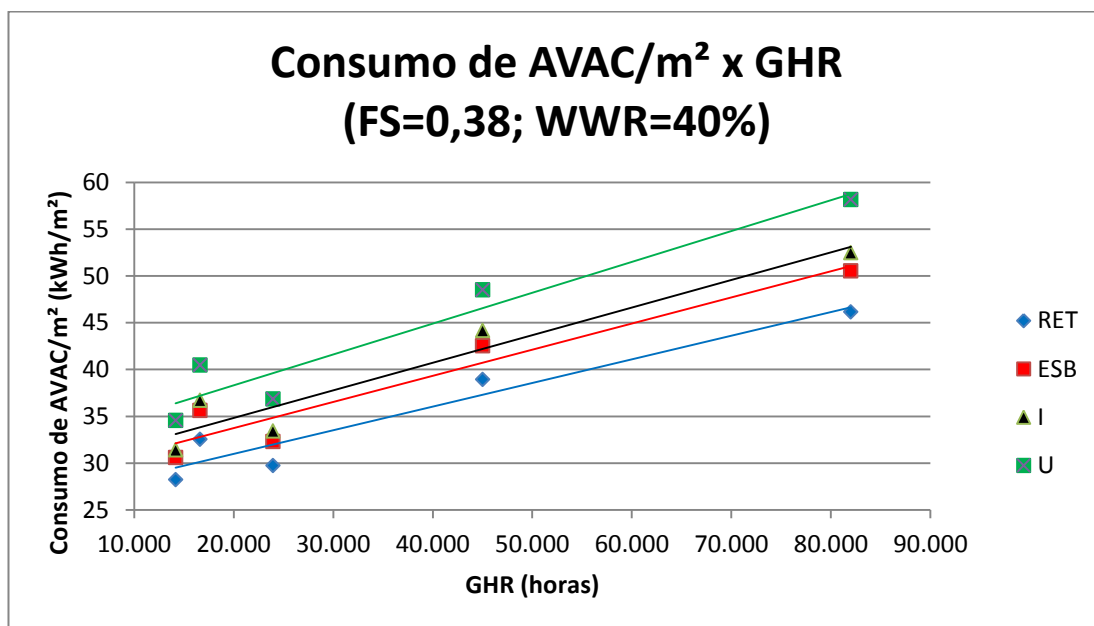


Figura 28- Curvas de regressão linear para os consumos energéticos de AVAC em função do clima, com WWR=40% e FS=0,38. Curvas apresentadas os perfis RET, ESB, I e U.

Percebe-se que o consumo de energia tende a aumentar com o aumento do GHR. Esse já era um resultado esperado e observado na seção 6.2.1, já que o GHR indica o número de horas anuais em que a temperatura média externa está acima do *setpoint* de resfriamento do sistema de ar condicionado (neste estudo, os GHRs adotados foram calculados para temperatura de bulbo úmido igual a 15°C).

No entanto, percebem-se resultados notáveis para as cidades de Brasília e de Porto Alegre. Apesar de apresentar um GHR menor (16.624) do que a cidade de Porto Alegre (23.954), Brasília obteve consumos específicos do sistema de AVAC mais elevados. Este é um fato curioso, já que as demais cidades apresentaram o resultado esperado em função do clima. É importante ressaltar que todos os arquivos de simulação apresentaram as mesmas condições de cargas internas e de

características construtivas. Como a única variante entre as cidades foi o arquivo de dados climáticos empregado para cada município, há grandes indícios de que estes resultados estejam relacionados ao conjunto de dados presentes nos arquivos climáticos. Ressalta-se que foram utilizados os arquivos de dados climáticos TRY do LabEEE para todas as simulações (LABEEE, 2005).

Uma possível explicação para o resultado inesperado seria a ocorrência de invernos muito rigorosos na cidade de Porto Alegre. Segundo dados do Instituto Nacional de Meteorologia, para o período de 1961 a 1990, as médias mensais de temperaturas de bulbo seco para os meses de maio a setembro apresentaram valores abaixo de 17°C, com temperatura média mínima para o mês de junho, igual a 14,3°C (INMET, 1990). Para o município de Brasília, as médias de temperaturas para o mesmo período apresentaram valores mais elevados, com mínimo de 18,3°C, para o mês de julho. Essas diferenças sazonais, com um grande período de temperaturas de inverno muito abaixo do *setpoint* de resfriamento (24°C), poderiam explicar a redução do consumo energético anual do sistema de ar-condicionado nessas edificações simuladas em Porto Alegre. Para estudos futuros, seria adequado realizar um levantamento de banco de dados com valores de simulações para todos os municípios brasileiros. Dessa forma, o erro estatístico seria reduzido, possibilitando uma análise que levasse em consideração as diferenças climáticas locais de cada município. Esta sugestão será comentada na seção 8.

Para cada uma das regressões lineares dos dados da figura 28, obtiveram-se as equações (42) a (45).

Perfil RET:

$$\text{Consumo} = 0,0003 \cdot \text{GHR} + 25,937 \text{ (kWh/m}^2\text{)} \quad (42)$$

Perfil ESB:

$$\text{Consumo} = 0,0003 \cdot \text{GHR} + 28,155 \text{ (kWh/m}^2\text{)} \quad (43)$$

Perfil I:

$$\text{Consumo} = 0,0003 \cdot \text{GHR} + 28,912 \text{ (kWh/m}^2\text{)} \quad (44)$$

Perfil U:

$$\text{Consumo} = 0,0003 \cdot \text{GHR} + 31,73 \text{ (kWh/m}^2\text{)} \quad (45)$$

Com o objetivo de obter novas regressões lineares, fixou-se o perfil esbelto e $\text{FS}=0,38$ e foram traçadas novas curvas para $\text{WWR}=0, 40\%, 60\%$ e 80% . As curvas são mostradas na figura 29.

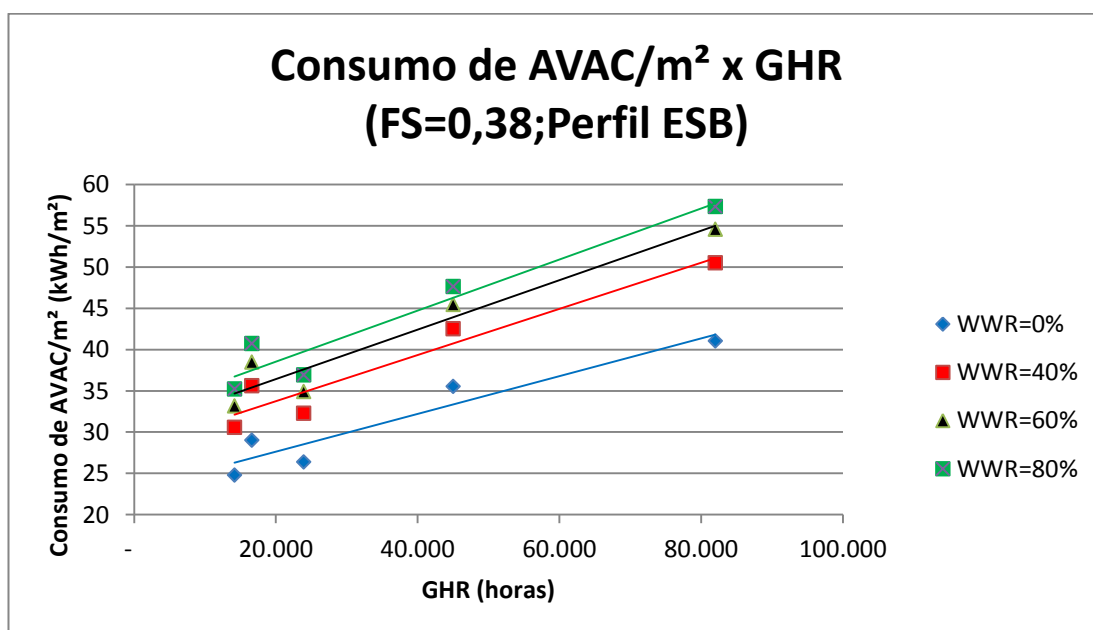


Figura 29- Curvas de regressão linear para os consumos energéticos de AVAC em função do clima, com perfil ESB e $\text{FS}=0,38$. Curvas apresentadas para $\text{WWR}=0, 40\%, 60\%$ e 80% .

Nota-se que as curvas são praticamente paralelas entre si e apresentam uma tendência de aumento similar ao que foi observado nas outras seções.

As relações obtidas das curvas na figura 29 são dadas pelas equações (46) a (49).

WWR=0:

$$\text{Consumo} = 0,0002 * \text{GHR} + 23,042 (\text{kWh/m}^2) \quad (46)$$

WWR=40%:

$$\text{Consumo} = 0,0003 * \text{GHR} + 28,155 (\text{kWh/m}^2) \quad (47)$$

WWR=60%:

$$\text{Consumo} = 0,0003 * \text{GHR} + 30,446 (\text{kWh/m}^2) \quad (48)$$

WWR=80%:

$$\text{Consumo} = 0,0003 * \text{GHR} + 32,347 (\text{kWh/m}^2) \quad (49)$$

Observa-se das regressões que o comportamento de crescimento conforme o WWR é análogo ao que foi verificado nas seções 6.2.1 a 6.2.3.

Para obter mais uma análise quantitativa do consumo do sistema de AVAC em função do clima, fixou-se WWR em 40% e adotou-se o perfil esbelto. Foram, então, traçadas as curvas para diversos fatores solares. Estas curvas estão apresentadas na figura 30.

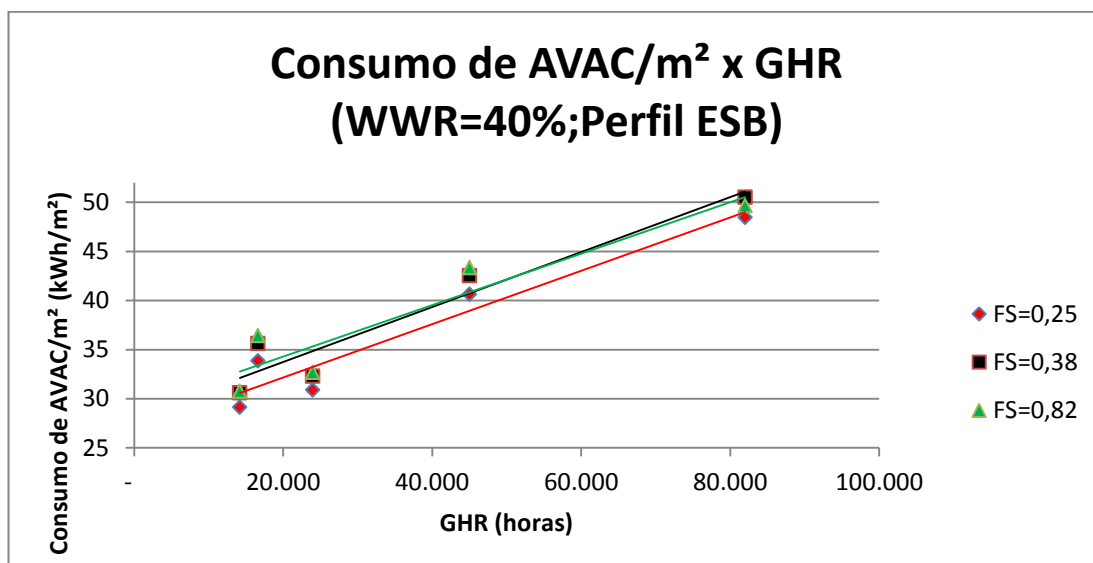


Figura 30 - Curvas de regressão linear para os consumos energéticos de AVAC em função do clima, com perfil ESB e WWR=40%. Curvas apresentadas para FS=0,25, 0,32 e 0,82.

As relações obtidas das curvas na figura 27 são dadas pelas equações (50) a (52).

FS=0,25:

$$\text{Consumo} = 0,0003 \cdot \text{GHR} + 26,724 \text{ (kWh/m}^2\text{)} \quad (50)$$

FS=0,38:

$$\text{Consumo} = 0,0003 \cdot \text{GHR} + 28,155 \text{ (kWh/m}^2\text{)} \quad (51)$$

FS=0,82:

$$\text{Consumo} = 0,0003 \cdot \text{GHR} + 29,059 \text{ (kWh/m}^2\text{)} \quad (52)$$

Nota-se que as regressões de (50) a (52) repetem o comportamento das seções 6.2.1 e 6.2.2 e apresentam aspecto quase paralelo entre si. No entanto, percebe-se um ponto atípico para a cidade de Manaus. O consumo energético anual para o FS=0,82 foi menor do que para FS=0,32. Este resultado contraria o que foi observado nas seções anteriores. Dada a proximidade dos valores obtidos (49,67 W/m² para

FS=0,82 e 50,52W/m² para FS=0,32), conclui-se que é decorrência de anomalias estatísticas.

Pelas regressões, nota-se que o efeito clima no consumo energético anual da edificação é maior do que dos demais fatores, já que apresenta variações percentuais da ordem de 70% no consumo específico de AVAC. Este é, portanto, um fator decisivo na avaliação das estratégias de consumo e de climatização de uma edificação. Os valores pequenos dos coeficientes angulares obtidos para as regressões são uma decorrência dos valores elevados de entrada para GHR (da ordem de 10⁴).

6.2.5. Análise Global

Verificadas as influências individuais de cada fator no consumo energético das edificações climatizadas, foi feita uma análise global do efeito combinado desses fatores no consumo específico de AVAC das edificações climatizadas. Foi feita uma regressão linear múltipla com base nos dados da tabela 5 e nas tabelas A1 a A4 do ANEXO, que apresentam todos os dados de consumo e fatores de entrada para cada simulação. Utilizou-se a regressão linear múltipla do Excel, o qual faz a regressão através da metodologia ANOVA (nível de confiança de 95%).

Da regressão linear múltipla, obteve-se a equação (53). Esta equação pode ser utilizada como modelo de previsão do consumo do sistema de AVAC de uma edificação qualquer, dadas as suas entradas de geometria (RC), área envidraçada de parede (WWR), fator solar (FS) e clima (GHR).

$$\text{Consumo} = 35,80 - 21,44 \cdot \text{RC} + 14,38 \cdot \text{WWR} + 7,74 \cdot \text{FS} + 2,95 \cdot 10^{-4} \cdot \text{GHR} \text{ (kWh/m}^2\text{)} \quad (53)$$

Para esta regressão, foram obtidos R²=0,8674 e desvio padrão σ igual a 3,775. Dessa forma, 86,74% do consumo específico de AVAC podem ser explicados com certa precisão pelos fatores independentes (RC, WWR, FS e GHR) na equação aproximada.

As médias dos resultados de consumo diferem de 3,775 W/m² para cima ou para baixo. A média dos consumos específicos do sistema de AVAC obtidos por simulação, considerando todas as simulações realizadas, foi de 40,82 W/m². Portanto, o desvio padrão corresponde a 9,25% desta média.

Considera-se que, dada a base de dados limitada utilizada para as simulações e análises, o modelo propõe um método estimativo aceitável, já que o erro padrão está abaixo de 10%. Sugere-se, para estudos subsequentes, que sejam feitas regressões com uma base de dados mais ampla, para reduzir os erros estatísticos.

6.2.6. Validação do Modelo

Com o objetivo de se obter uma comparação entre o modelo obtido e as simulações, foram feitas simulações para determinadas condições em três outras cidades brasileiras. Procurou-se obter climas variados para que a comparação pudesse abranger diversas faixas de condições externas. As cidades escolhidas foram Cuiabá (MT), São Luis (MA) e Florianópolis (SC).

Na tabela 6 são apresentados os valores de consumo energético anual do sistema de AVAC obtidos para os três municípios através da simulação e os valores previstos pelo modelo, através da eq. (53). A tabela 6 também apresenta a variação percentual do valor previsto modelo em relação ao valor obtido com a simulação. É importante ressaltar que as mesmas condições de carga interna, de características construtivas e de sistema de AVAC das simulações realizadas nas seções anteriores foram utilizadas para realizar essas novas simulações.

Tabela 6 – Comparação preliminar entre os consumos específicos do sistema de AVAC obtidos através de simulação e do modelo proposto.

CIDADE	PERFIL	WWR	FS	GHR (horas)	CONSUMO AVAC SIMULAÇÃO (kWh/m ²)	CONSUMO AVAC MODELO (kWh/m ²)	DIFERENÇA ABSOLUTA (kWh/m ²)	DIFERENÇA PERCENTUAL
Cuiabá (MT)	RET	40%	0,38	59.551	43,99 ± 3,52	40,69 ± 7,40	3,31	7,52%
Florianópolis (SC)	ESB	80%	0,82	28.602	41,12 ± 3,29	42,84 ± 7,40	-1,71	-4,17%
São Luis (MA)	U	60%	0,25	80.130	60,33 ± 4,83	57,93 ± 7,40	2,40	3,98%

Como é possível perceber pelos valores apresentados na tabela 6, as variações percentuais (em relação aos valores da simulação) entre os valores obtidos através de simulação e os valores calculados através da eq. (53) apresentaram valor máximo de 7,52% e valor mínimo (absoluto) de 3,98%.

Como as diferenças percentuais entre os valores simulado e previsto pelo modelo foram menores do que 10% em relação ao valor da simulação, nota-se que o modelo obtido nas seções anteriores foi satisfatório e pode ser usado para prever o consumo em edificações de escritório de características variadas (envolvendo os fatores estudados) com certa precisão. É importante ressaltar que o *EnergyPlus* apresenta uma incerteza de 8% nos valores obtidos através de simulação (UNIVERSITY OF ILLINOIS, 2013).

7. CONCLUSÕES

Através da observação e análise dos resultados apresentados na seção 6, conclui-se que este estudo apresenta uma nova perspectiva de análise para o consumo energético em edificações climatizadas. Foi possível, através das simulações, criar uma base de dados para estimativa de consumo energético em edificações climatizadas de escritório.

É importante ressaltar que foi utilizada uma base de dados limitada para a realização das simulações, apenas com valores mais representativos de cada característica. Convém, para estudos futuros, aumentar o conjunto de valores utilizados como base para as simulações em cada uma das categorias.

Da seção 6, pode-se observar comportamentos esperados do consumo energético conforme a variação dos parâmetros de estudo. A geometria influi de forma a aumentar o consumo energético anual do edifício conforme diminui a sua compactividade, representada pelo índice RC. Notou-se, também, que a influência da geometria depende da área de piso do andar da edificação, pois determina a prevalência ou não dos efeitos das cargas internas sobre o aumento da transferência de calor pelas paredes. Se a área de piso for muito elevada (da ordem de 1000 m² para cima) os efeitos das cargas internas (cuja entrada é dada por área de piso) se sobrepõem ao aumento proporcionado pela variação da forma geométrica, de forma que a variação do índice RC contribui pouco para a variação do consumo total. Nos resultados apresentados, esta variação foi de 5,42% no consumo total (figura 18). No entanto, quando se avalia o efeito da variação do RC no consumo específico do sistema de AVAC, nota-se que sua contribuição é significativa. A variação da geometria do edifício pode variar em aproximadamente 18% o consumo específico do sistema de AVAC.

O fator solar influi de forma a aumentar o consumo energético anual do edifício conforme aumenta seu valor. Isso é esperado, pois se aumenta a permeabilidade do vidro e, portanto, a transmissão de calor solar para o interior do edifício. Quantitativamente, sua influência é menor do que a dos demais fatores. Nos resultados apresentados, esta variação foi da ordem de 11,3% no consumo específico do sistema de AVAC (figura 22).

A área envidraçada de parede influi de forma a aumentar o consumo energético anual do edifício conforme aumenta seu valor. Esse comportamento é esperado, pois se aumenta a área de vidro nas paredes, o que aumenta a transmissão de calor solar para o interior do edifício. Quantitativamente, a área envidraçada de parede é o segundo fator mais influente. Nos resultados apresentados, a variação de WWR provocou variações de aproximadamente 37% no consumo específico do sistema de AVAC (figura 25).

As condições climáticas do local onde está a edificação influenciam fortemente o consumo do sistema de ar-condicionado. Em geral, segue-se a tendência de aumento do consumo energético em função do aumento do GHR. No entanto, durante as simulações ocorreu um resultado inesperado em relação aos municípios de Brasília e de Porto Alegre. O município de Brasília, apesar de apresentar um GHR menor (16.624) do que o de Porto Alegre (23.954), teve um consumo energético anual mais elevado do que o município de Porto Alegre. Como as condições de carga interna dos arquivos de simulação são as mesmas, conclui-se que a variação inesperada decorreu dos arquivos de dados climáticos utilizados. Pelo fato de o município de Porto Alegre apresentar temperaturas historicamente mais baixas (média mínima de 14,3°C) do que Brasília (média mínima de 18,3°C) durante os meses de maio a setembro (INMET, 1990), conclui-se que a demanda do sistema de AVAC é muito baixa durante esses meses. Isso resulta em consumos energéticos maiores do sistema de ar-condicionado em Brasília. Quantitativamente, o fator clima é o mais influente de todos os fatores estudados neste trabalho. Nos resultados apresentados, a variação de clima proporcionou variações de até 70% no consumo específico do sistema de AVAC.

Foi feita uma regressão linear múltipla com o objetivo de se obter uma análise global do efeito dos parâmetros estudados no consumo do sistema de ar-condicionado. Obteve-se uma expressão matemática que pode ser utilizada para prever consumos energéticos de AVAC em edificações comerciais, dadas as suas condições de geometria (RC), de área de janelas (WWR), de fator solar (FS) e de clima (GHR).

Foram simulados edifícios nas cidades de Cuiabá (MT), Florianópolis (SC) e São Luis (MA), cada uma com uma combinação dos fatores estudados. O resultado de

previsão do modelo foi satisfatório, já que o erro máximo em relação ao valor simulado foi de 7,52%.

Dessa forma, conclui-se que este trabalho foi bem sucedido em propor um modelo de análise e previsão de consumo energético anual em edificações comerciais. Para um maior refinamento dos resultados, sugere-se aumentar a base de dados para reduzir os desvios estatísticos.

8. SUGESTÕES PARA ESTUDOS FUTUROS

Os resultados da seção 6 e as conclusões da seção 7 indicam que este estudo pode ter sido bem sucedido ao propor um modelo de previsão do consumo energético de edificações comerciais através da entrada de certas características da edificação analisada.

Sugere-se, para próximos estudos, um aprofundamento de aspectos deste trabalho e, também, a investigação de outras características que podem influenciar o consumo energético de edificações.

Primeiro, sugere-se estender as simulações para todos os municípios brasileiros, de forma a criar uma base de dados confiável. Isso possibilitaria uma maior precisão nas análises e previsões, já que o erro estatístico seria reduzido.

Em seguida, sugere-se investigar o efeito da área de piso no consumo energético da edificação. Como apontado nas seções 6.2.1 e 7, a influência da geometria no consumo energético total de uma edificação pode não ser muito significativa se a área de piso desta edificação for muito elevada, já que os efeitos das cargas internas podem se sobrepor ao efeito da radiação solar na área de parede. Pode-se tentar fazer simulações com diferentes áreas de piso do andar do edifício para investigar os resultados.

Propõe-se, também, a avaliação do efeito da manutenção do sistema de AVAC na sua capacidade de refrigeração (COP). Este aspecto investigaria a influência dos equipamentos de ar-condicionado no consumo energético geral da edificação.

Por fim, sugere-se aumentar o número de tipos de vidro (fatores solares) utilizados nas simulações, para investigar mais detalhadamente o comportamento do consumo energético do edifício em função desta característica (na seção 6.2.2 foi apontado um possível comportamento não-linear).

9. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16401: Instalações de ar-condicionado – Sistemas Centrais e Unitários**. Apêndices A e C. Rio de Janeiro, 2008. 60 p.

ASHRAE - AMERICAN SOCIETY OF HEATING, REFRIGERATION AND AIR-CONDITIONING ENGINEERS, INC. **ASHRAE STANDARD 90.1 : Energy Standard for Buildings Except Low-Rise Residential Buildings**. Edição I-P. Atlanta, GA, EUA, 2007. Cap 05, 06, 09 e 10.

BORGSTEIN, Edward; LAMBERTS, Roberto; VERSAGE, Rogerio. **Grau-horas de resfriamento – GHR**. 2014. Conselho Brasileiro de Construção Sustentável.

ESHEN, Long. **Are the relative variation rates (RVRs) approximate in different cities with the same increase of shape coefficient?** Building and Environment. Ed 40. p 473-480. 2005.

INMET- INSTITUTO NACIONALDEMETEOROLOGIA. **Banco de Dados Meteorológicos para Ensino e Pesquisa**. Disponível em: <<http://www.inmet.gov.br/portal/>>. 1990. Acessado em 13 de novembro de 2014.

LABEEE – LABORATÓRIO DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA EM EDIFICAÇÕES. **Arquivos climáticos em formato TRY, SWERA, CSV e BIN**. Disponível em: <<http://www.labee.ufsc.br/downloads/arquivos-climaticos/formato-try-swera-csv-bin>>. 2005. Acessado em 5 de novembro de 2014.

LAM, Joseph C.; CHAN, Ricky Y.C.; TSANG C.L.; LI, Danny H.W. **Electricity use characteristics of purpose-built office buildings in subtropical climates**. Energy Conversion and Management. Ed 45.p 829-844.2004.

LAM, J. C.; WAN, Kevin K.W.; CHEUNG, K.L.; YANG, Liu. **Principal component analysis of electricity use in office buildings**. Energy and Buildings. Ed 40, p 828-836. 2008.

LEE, Y. S.; MALKAWI, A.M. **Simulating multiple occupant behaviors in buildings: an agent-based modeling approach**. Energy and Buildings. Ed 69. p 407-416.2013.

ORDENES, M.; PEDRINI, A.; GHISI, E.; LAMBERTS, R..**Metodologia utilizada na elaboração da biblioteca de materiais e components construtivos brasileiros para a simulações no VisualDOE-3.1**.Anexo A. Florianópolis, 2003. 19 p.

OURGHI,R.; AL-ANZI, A.; KRARTI, M..**A simplified analysis method to predict the impact of shape on annual energy use for office buildings**.Energy Conversion and Management. Ed 48. p 300-305. 2006.

TRIMBLE NAVIGATION. Endereçoeletrônico do SketchUp. Disponível em: <<http://www.sketchup.com>>. 2013. Acessadoem 14 de outubro de 2014.

UNIVERSITY OF ILLINOIS; ERNEST ORLANDO LAWRENCE BERKELEY NATIONAL LABORATORY. **Basic Concepts Manual – Essential Information You Need about Running EnergyPlus**. US Department of Energy.p1-8. 2013.

YU, Z.; FUNG, B. C.M.;HAGHIGHAT, F.;YOSHINO, H.; MOROFSKY, E..**A systematic procedure to study the influence of occupant behavior on buildingenergy consumption**. Energy and Buildings. Ed 43. p 1409-1417. 2011.

ANEXO – TABELAS DE RESULTADOS DAS SIMULAÇÕES

Tabela A1 – Tabela de resultados das simulações para o município do Rio de Janeiro.

PARÂMETROS				CONSUMO ENERGÉTICO				
GEOMETRIA		Envidraçamento		Consumo AVAC (kWh)	Consumo Total (kWh)	Consumo % AVAC (kWh)	Consumo por Área (kWh/m²)	Consumo AVAC por Área (kWh/m²)
Perfil	RC	WWR	FS					
REF	1,000	0%	0,25	35.502,13	121.974,22	29,1%	116,17	33,81
RET	0,997	0%	0,25	35.317,33	121.809,19	29,0%	116,01	33,64
ESB	0,898	0%	0,25	37.325,35	123.850,15	30,1%	117,95	35,55
I	0,682	0%	0,25	38.612,60	125.104,46	30,9%	119,15	36,77
U	0,563	0%	0,25	41.535,93	128.027,79	32,4%	121,93	39,56
RET	0,997	40%	0,25	39.328,50	125.820,36	31,3%	119,83	37,46
ESB	0,898	40%	0,25	42.654,95	129.179,76	33,0%	123,03	40,62
I	0,682	40%	0,25	44.136,58	130.628,44	33,8%	124,41	42,03
U	0,563	40%	0,25	48.084,69	134.576,54	35,7%	128,17	45,79
RET	0,997	60%	0,25	41.209,22	127.701,08	32,3%	121,62	39,25
ESB	0,898	60%	0,25	44.919,96	131.444,77	34,2%	125,19	42,78
I	0,682	60%	0,25	46.398,15	132.890,02	34,9%	126,56	44,19
U	0,563	60%	0,25	50.876,75	137.368,61	37,0%	130,83	48,45
RET	0,997	80%	0,25	42.524,94	129.016,80	33,0%	122,87	40,50
ESB	0,898	80%	0,25	46.498,76	133.023,58	35,0%	126,69	44,28
I	0,682	80%	0,25	48.200,42	134.692,29	35,8%	128,28	45,91
U	0,563	80%	0,25	52.999,08	139.490,94	38,0%	132,85	50,48
RET	0,997	40%	0,38	40.873,58	127.365,43	32,1%	121,30	38,93
ESB	0,898	40%	0,38	44.666,50	131.191,32	34,0%	124,94	42,54
I	0,682	40%	0,38	46.366,93	132.858,79	34,9%	126,53	44,16
U	0,563	40%	0,38	50.931,50	137.423,35	37,1%	130,88	48,51
RET	0,997	60%	0,38	43.275,30	129.767,16	33,3%	123,59	41,21
ESB	0,898	60%	0,38	47.743,59	134.268,41	35,6%	127,87	45,47
I	0,682	60%	0,38	49.508,89	136.000,74	36,4%	129,52	47,15
U	0,563	60%	0,38	55.124,11	141.615,96	38,9%	134,87	52,50
RET	0,997	80%	0,38	45.230,19	131.722,05	34,3%	125,45	43,08
ESB	0,898	80%	0,38	50.023,25	136.548,05	36,6%	130,05	47,64
I	0,682	80%	0,38	52.049,32	138.541,18	37,6%	131,94	49,57
U	0,563	80%	0,38	58.795,78	145.287,65	40,5%	138,37	56,00
RET	0,997	40%	0,82	41.665,01	128.156,87	32,5%	122,05	39,68
ESB	0,898	40%	0,82	45.524,53	132.049,34	34,5%	125,76	43,36
I	0,682	40%	0,82	47.913,41	134.405,27	35,6%	128,01	45,63
U	0,563	40%	0,82	54.310,25	140.802,11	38,6%	134,10	51,72
RET	0,997	60%	0,82	44.521,21	131.013,08	34,0%	124,77	42,40
ESB	0,898	60%	0,82	50.216,31	136.741,12	36,7%	130,23	47,83
I	0,682	60%	0,82	53.123,56	139.615,41	38,0%	132,97	50,59
U	0,563	60%	0,82	61.049,08	147.540,95	41,4%	140,52	58,14
RET	0,997	80%	0,82	47.624,97	134.116,82	35,5%	127,73	45,36
ESB	0,898	80%	0,82	54.625,58	141.150,38	38,7%	134,43	52,02
I	0,682	80%	0,82	57.722,28	144.214,14	40,0%	137,35	54,97
U	0,563	80%	0,82	66.898,70	153.390,56	43,6%	146,09	63,71

Tabela A2 – Tabela de resultados das simulações para o município de Porto Alegre.

PARÂMETROS				CONSUMO ENERGÉTICO				
GEOMETRIA		Envidraçamento		Consumo AVAC (kWh)	Consumo Total (kWh)	Consumo % AVAC (kWh)	Consumo por Área (kWh/m²)	Consumo AVAC por Área (kWh/m²)
Perfil	RC	WWR	FS					
REF	1,000	0%	0,25	26.389,16	112.861,25	23,4%	107,49	25,13
RET	0,997	0%	0,25	26.239,98	112.731,85	23,3%	107,36	24,99
ESB	0,898	0%	0,25	27.725,15	114.249,96	24,3%	108,81	26,40
I	0,682	0%	0,25	28.458,58	114.950,44	24,8%	109,48	27,10
U	0,563	0%	0,25	30.380,05	116.871,91	26,0%	111,31	28,93
RET	0,997	40%	0,25	30.102,35	116.594,21	25,8%	111,04	28,67
ESB	0,898	40%	0,25	32.432,63	118.957,43	27,3%	113,29	30,89
I	0,682	40%	0,25	33.385,30	119.877,17	27,8%	114,17	31,80
U	0,563	40%	0,25	36.534,80	123.026,64	29,7%	117,17	34,80
RET	0,997	60%	0,25	31.820,88	118.312,73	26,9%	112,68	30,31
ESB	0,898	60%	0,25	34.466,49	120.991,31	28,5%	115,23	32,83
I	0,682	60%	0,25	35.690,46	122.182,33	29,2%	116,36	33,99
U	0,563	60%	0,25	39.343,97	125.835,82	31,3%	119,84	37,47
RET	0,997	80%	0,25	33.171,82	119.663,68	27,7%	113,97	31,59
ESB	0,898	80%	0,25	36.029,68	122.554,50	29,4%	116,72	34,31
I	0,682	80%	0,25	37.512,06	124.003,92	30,3%	118,10	35,73
U	0,563	80%	0,25	41.663,07	128.154,93	32,5%	122,05	39,68
RET	0,997	40%	0,38	31.225,55	117.717,40	26,5%	112,11	29,74
ESB	0,898	40%	0,38	33.920,08	120.444,88	28,2%	114,71	32,30
I	0,682	40%	0,38	35.117,67	121.609,54	28,9%	115,82	33,45
U	0,563	40%	0,38	38.708,56	125.200,42	30,9%	119,24	36,87
RET	0,997	60%	0,38	33.496,70	119.988,56	27,9%	114,27	31,90
ESB	0,898	60%	0,38	36.655,29	123.180,10	29,8%	117,31	34,91
I	0,682	60%	0,38	38.056,45	124.548,32	30,6%	118,62	36,24
U	0,563	60%	0,38	42.764,41	129.256,27	33,1%	123,10	40,73
RET	0,997	80%	0,38	35.149,67	121.641,54	28,9%	115,85	33,48
ESB	0,898	80%	0,38	38.782,87	125.307,68	31,0%	119,34	36,94
I	0,682	80%	0,38	40.517,66	127.009,52	31,9%	120,96	38,59
U	0,563	80%	0,38	46.317,76	132.809,62	34,9%	126,49	44,11
RET	0,997	40%	0,82	31.650,38	118.142,23	26,8%	112,52	30,14
ESB	0,898	40%	0,82	34.308,67	120.833,48	28,4%	115,08	32,67
I	0,682	40%	0,82	36.356,23	122.848,10	29,6%	117,00	34,62
U	0,563	40%	0,82	40.980,08	127.471,94	32,1%	121,40	39,03
RET	0,997	60%	0,82	34.467,44	120.959,30	28,5%	115,20	32,83
ESB	0,898	60%	0,82	38.181,07	124.705,88	30,6%	118,77	36,36
I	0,682	60%	0,82	40.786,97	127.278,83	32,0%	121,22	38,84
U	0,563	60%	0,82	46.983,93	133.475,79	35,2%	127,12	44,75
RET	0,997	80%	0,82	37.234,45	123.726,31	30,1%	117,83	35,46
ESB	0,898	80%	0,82	41.880,63	128.405,44	32,6%	122,29	39,89
I	0,682	80%	0,82	45.140,81	131.632,67	34,3%	125,36	42,99
U	0,563	80%	0,82	52.445,66	138.937,53	37,7%	132,32	49,95

Tabela A3 – Tabela de resultados das simulações para o município de Brasília.

PARÂMETROS				CONSUMO ENERGÉTICO				
GEOMETRIA		Envidraçamento		Consumo AVAC (kWh)	Consumo Total (kWh)	Consumo % AVAC (kWh)	Consumo por Área (kWh/m²)	Consumo AVAC por Área (kWh/m²)
Perfil	RC	WWR	FS					
REF	1,000	0%	0,25	28.919,84	115.391,94	25,1%	109,90	27,54
RET	0,997	0%	0,25	28.712,60	115.204,46	24,9%	109,72	27,35
ESB	0,898	0%	0,25	30.492,20	117.017,02	26,1%	111,44	29,04
I	0,682	0%	0,25	31.040,58	117.532,44	26,4%	111,94	29,56
U	0,563	0%	0,25	33.239,35	119.731,21	27,8%	114,03	31,66
RET	0,997	40%	0,25	32.756,20	119.248,06	27,5%	113,57	31,20
ESB	0,898	40%	0,25	35.550,75	122.075,56	29,1%	116,26	33,86
I	0,682	40%	0,25	36.484,76	122.976,61	29,7%	117,12	34,75
U	0,563	40%	0,25	39.774,93	126.266,79	31,5%	120,25	37,88
RET	0,997	60%	0,25	34.542,82	121.034,68	28,5%	115,27	32,90
ESB	0,898	60%	0,25	37.806,16	124.330,97	30,4%	118,41	36,01
I	0,682	60%	0,25	38.896,72	125.388,58	31,0%	119,42	37,04
U	0,563	60%	0,25	42.715,41	129.207,27	33,1%	123,05	40,68
RET	0,997	80%	0,25	36.169,93	122.661,80	29,5%	116,82	34,45
ESB	0,898	80%	0,25	39.489,89	126.014,69	31,3%	120,01	37,61
I	0,682	80%	0,25	40.731,41	127.223,27	32,0%	121,17	38,79
U	0,563	80%	0,25	44.990,10	131.481,96	34,2%	125,22	42,85
RET	0,997	40%	0,38	34.184,11	120.675,96	28,3%	114,93	32,56
ESB	0,898	40%	0,38	37.403,74	123.928,55	30,2%	118,03	35,62
I	0,682	40%	0,38	38.545,81	125.037,66	30,8%	119,08	36,71
U	0,563	40%	0,38	42.504,76	128.996,62	33,0%	122,85	40,48
RET	0,997	60%	0,38	36.568,06	123.059,92	29,7%	117,20	34,83
ESB	0,898	60%	0,38	40.435,06	126.959,87	31,8%	120,91	38,51
I	0,682	60%	0,38	41.818,52	128.310,37	32,6%	122,20	39,83
U	0,563	60%	0,38	46.729,09	133.220,94	35,1%	126,88	44,50
RET	0,997	80%	0,38	38.453,97	124.945,82	30,8%	119,00	36,62
ESB	0,898	80%	0,38	42.775,39	129.300,20	33,1%	123,14	40,74
I	0,682	80%	0,38	44.465,71	130.957,57	34,0%	124,72	42,35
U	0,563	80%	0,38	50.445,17	136.937,03	36,8%	130,42	48,04
RET	0,997	40%	0,82	34.320,00	120.811,87	28,4%	115,06	32,69
ESB	0,898	40%	0,82	38.263,12	124.787,93	30,7%	118,85	36,44
I	0,682	40%	0,82	39.788,72	126.280,58	31,5%	120,27	37,89
U	0,563	40%	0,82	45.507,27	131.999,13	34,5%	125,71	43,34
RET	0,997	60%	0,82	36.946,75	123.438,61	29,9%	117,56	35,19
ESB	0,898	60%	0,82	42.613,86	129.138,67	33,0%	122,99	40,58
I	0,682	60%	0,82	44.647,56	131.139,42	34,0%	124,89	42,52
U	0,563	60%	0,82	52.119,49	138.611,35	37,6%	132,01	49,64
RET	0,997	80%	0,82	39.971,93	126.463,79	31,6%	120,44	38,07
ESB	0,898	80%	0,82	46.838,99	133.363,79	35,1%	127,01	44,61
I	0,682	80%	0,82	49.154,40	135.646,25	36,2%	129,19	46,81
U	0,563	80%	0,82	58.155,14	144.647,01	40,2%	137,76	55,39

Tabela A4 – Tabela de resultados das simulações para o município de Manaus.

PARÂMETROS				CONSUMO ENERGÉTICO				
GEOMETRIA		Envidraçamento		Consumo AVAC (kWh)	Consumo Total (kWh)	Consumo % AVAC (kWh)	Consumo por Área (kWh/m²)	Consumo AVAC por Área (kWh/m²)
Perfil	RC	WWR	FS					
REF	1,000	0%	0,25	41.125,97	127.598,05	32,2%	121,52	39,17
RET	0,997	0%	0,25	40.939,86	127.431,72	32,1%	121,36	38,99
ESB	0,898	0%	0,25	43.096,57	129.621,39	33,2%	123,45	41,04
I	0,682	0%	0,25	44.448,92	130.940,78	33,9%	124,71	42,33
U	0,563	0%	0,25	47.703,86	134.195,72	35,5%	127,81	45,43
RET	0,997	40%	0,25	46.918,85	133.410,71	35,2%	127,06	44,68
ESB	0,898	40%	0,25	50.886,92	137.411,72	37,0%	130,87	48,46
I	0,682	40%	0,25	52.874,75	139.366,62	37,9%	132,73	50,36
U	0,563	40%	0,25	58.161,64	144.653,49	40,2%	137,77	55,39
RET	0,997	60%	0,25	49.429,88	135.921,74	36,4%	129,45	47,08
ESB	0,898	60%	0,25	54.340,34	140.865,15	38,6%	134,16	51,75
I	0,682	60%	0,25	56.358,95	142.850,81	39,5%	136,05	53,68
U	0,563	60%	0,25	62.681,05	149.172,91	42,0%	142,07	59,70
RET	0,997	80%	0,25	51.569,02	138.060,89	37,4%	131,49	49,11
ESB	0,898	80%	0,25	56.686,72	143.211,53	39,6%	136,39	53,99
I	0,682	80%	0,25	58.803,58	145.295,45	40,5%	138,38	56,00
U	0,563	80%	0,25	65.583,76	152.075,63	43,1%	144,83	62,46
RET	0,997	40%	0,38	48.461,50	134.953,35	35,9%	128,53	46,15
ESB	0,898	40%	0,38	53.049,57	139.574,39	38,0%	132,93	50,52
I	0,682	40%	0,38	55.121,97	141.613,82	38,9%	134,87	52,50
U	0,563	40%	0,38	61.084,12	147.575,99	41,4%	140,55	58,18
RET	0,997	60%	0,38	51.601,92	138.093,78	37,4%	131,52	49,14
ESB	0,898	60%	0,38	57.294,68	143.819,48	39,8%	136,97	54,57
I	0,682	60%	0,38	59.434,78	145.926,64	40,7%	138,98	56,60
U	0,563	60%	0,38	67.019,50	153.511,36	43,7%	146,20	63,83
RET	0,997	80%	0,38	53.926,03	140.417,88	38,4%	133,73	51,36
ESB	0,898	80%	0,38	60.222,01	146.746,82	41,0%	139,76	57,35
I	0,682	80%	0,38	62.658,46	149.150,31	42,0%	142,05	59,67
U	0,563	80%	0,38	71.741,15	158.233,01	45,3%	150,70	68,32
RET	0,997	40%	0,82	47.874,28	134.366,13	35,6%	127,97	45,59
ESB	0,898	40%	0,82	52.154,88	138.679,69	37,6%	132,08	49,67
I	0,682	40%	0,82	55.073,63	141.565,49	38,9%	134,82	52,45
U	0,563	40%	0,82	62.704,07	149.195,93	42,0%	142,09	59,72
RET	0,997	60%	0,82	51.081,65	137.573,52	37,1%	131,02	48,65
ESB	0,898	60%	0,82	57.641,81	144.166,62	40,0%	137,30	54,90
I	0,682	60%	0,82	61.222,60	147.714,45	41,4%	140,68	58,31
U	0,563	60%	0,82	71.276,19	157.768,05	45,2%	150,26	67,88
RET	0,997	80%	0,82	54.653,15	141.145,02	38,7%	134,42	52,05
ESB	0,898	80%	0,82	62.794,70	149.319,50	42,1%	142,21	59,80
I	0,682	80%	0,82	67.042,83	153.534,68	43,7%	146,22	63,85
U	0,563	80%	0,82	78.915,41	165.407,27	47,7%	157,53	75,16