



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS**

**PROGRAMA DE PÓS GRADUAÇÃO EM  
ENGENHARIA MECÂNICA**

**AVALIAÇÃO DO CONSUMO DE ENERGIA ELÉTRICA  
DE EDIFICAÇÕES DE ESCRITÓRIO E SUA CORRELAÇÃO  
COM AS DECISÕES DE PROJETO**

**Ana Carolina de Oliveira Veloso**

20 de fevereiro de 2017

**Ana Carolina de Oliveira Veloso**

**AVALIAÇÃO DO CONSUMO DE ENERGIA ELÉTRICA  
DE EDIFICAÇÕES DE ESCRITÓRIO E SUA CORRELAÇÃO  
COM AS DECISÕES DE PROJETO**

Projeto de Tese apresentada ao Programa de Pós Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito parcial à obtenção do título de Doutor em Engenharia Mecânica.

Área de concentração: Energia e Sustentabilidade

Orientador: Prof. Dr. Ricardo Nicolau Nassar Koury

Co-Orientadora: Profa. Dra. Roberta Vieira Gonçalves de Souza

Belo Horizonte  
Escola de Engenharia da UFMG  
2017



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM**  
**ENGENHARIA MECÂNICA**

Av. Antônio Carlos, 6627 - Campus Universitário  
31270-901 - Belo Horizonte - MG

Tel.: +55 31 3409.5145

E-mail: [cpgmec@demec.ufmg.br](mailto:cpgmec@demec.ufmg.br)

**"AVALIAÇÃO DO CONSUMO DE ENERGIA ELÉTRICA DE  
EDIFICAÇÕES DE ESCRITÓRIO E SUA CORRELAÇÃO COM AS  
DECISÕES DE PROJETO"**

**ANA CAROLINA DE OLIVEIRA VELOSO**

Tese submetida à Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Minas Gerais, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de "**Doutora em Engenharia Mecânica**", na área de concentração de "**Energia e Sustentabilidade**".

Tese aprovada no dia 20 de fevereiro de 2017.

Por:

**Prof. Ricardo Nicolau Nassar Koury**  
Orientador - Departamento de Engenharia Mecânica/UFMG

**Prof.ª Roberta Vieira Gonçalves de Souza**  
Coorientadora - Dpto. de Tecnologia da Arquitetura e do Urbanismo/UFMG

**Prof.ª Joyce Correna Carlo**  
Universidade Federal de Viçosa

**Prof. Luiz Machado**  
Departamento de Engenharia Mecânica/UFMG

**Prof. Felipe Nunes dos Santos**  
Departamento de Ciência Política/UFMG

**Prof. Ralney Nogueira de Faria**

Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais

À minha família

## **Agradecimentos**

Ao professor e orientador Ricardo Koury, por ter me recebido e aceitado me orientar na Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Minas Gerais. O desafio foi grande e você soube me apoiar e deixar o caminho mais leve durante estes quatro anos.

À professora e orientadora Roberta Vieira pela orientação, amizade, confiança e conhecimento compartilhado durante estes nove anos de pesquisa no LABCON-UFMG. Você fez de mim uma profissional mais qualificada e feliz por ter escolhido trabalhar com Eficiência Energética.

Ao professor Carlos Coimbra que me recebeu no Coimbra Energy Group da University of Califórnia, San Diego e me proporcionou toda infraestrutura necessária para a realização do doutorado sanduíche.

À CAPES pela bolsa de estudo concedida para realização do doutorado e também do período sanduíche nos Estados Unidos.

Também agradeço aos professores e aos funcionários do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da UFMG, em especial à Marina Costa pelo suporte técnico e apoio ao longo do curso.

Ao professor Felipe Nunes, por sua valiosa orientação na avaliação estatística.

Aos professores Luiz Machado, Matheus Porto, Ralney Nogueira pelas contribuições durante a qualificação.

Ao Arq. Wilton Lage Duarte da Secretaria Municipal Adjunta de Regulação Urbana (SMARU) por ter disponibilizado os projetos arquitetônicos.

Ao Rômulo Pereira Álvares da Companhia Energética de Minas Gerais por ter disponibilizado os dados de consumo de energia das edificações.

A todos os amigos do LABCON pelas conversas, convívio, discussões científicas e muita amizade. Em especial à Raquel Diniz, Camila Ferreira, Daniel Amaral, Marina Garcia e Carolina Vilela. Aos bolsistas de Iniciação Científica: Lucas Moreira, Ana Clara Caixeta e Camille Lanzer – a ajuda de vocês foi fundamental para o desenvolvimento do meu trabalho.

Aos amigos da Ares – Patrícia, Paula, Guilherme e Caio, pelo companheirismo, profissionalismo, incentivo e aceitação nas minhas decisões.

Aos amigos *San Diegans*: Bruna, Aline, Priscila, Hamanda, Lorene, Ítalo, João, André, Raphael e Thiago. Vocês fizeram os meus dias nos Estados Unidos muito mais felizes.

E aos meus pais que são meus exemplos de dedicação e amor pelo que fazem, que sempre acreditaram nos meus sonhos e não mediram esforços para me ajudar a concretizá-los. Ao Matheus, Mariana, Jaile, Thiago e Luiza!

Por fim, a todos os amigos que torceram e contribuíram direta ou indiretamente para a realização deste trabalho. Minha eterna gratidão a todos!

## RESUMO

Em países cujas regulamentações de eficiência energética já se mostram consolidadas ou em fase de consolidação, um importante parâmetro a ser verificado é o padrão de consumo relativo de energia elétrica dos edifícios existentes de acordo com faixas estabelecidas para diferentes tipologias. Este tipo de verificação é chamado de marco de consumo ou “*benchmarking*”. No Brasil, após a implementação, em 2010, do Regulamento Técnico da Qualidade para Eficiência Energética de Edifícios Comerciais, de Serviços e Públicos – RTQ-C, considera-se que o próximo passo a ser dado em termos regulatórios seja analisar o padrão de consumo de energia dos edifícios. Infere-se que parte deste consumo esteja relacionado a decisões tomadas ainda na fase de projeto da edificação. Com isso, o objetivo principal dessa pesquisa foi estabelecer, através de dados reais de consumo de 101 edificações, a influência das decisões de projeto no consumo de energia das torres de edifícios de escritórios na cidade de Belo Horizonte – MG. Para alcançar esse objetivo, foi necessário o levantamento do consumo de energia elétrica desta tipologia de edificações bem como de suas características construtivas e do tipo de sistemas de condicionamento nela instalados. Para a classificação das edificações de acordo com seu consumo foi desenvolvida metodologia para isolar o consumo anual por área das torres a partir de dados de consumo anual por área das edificações como um todo e foram levantados dados construtivos através de levantamento feito pela internet e por levantamentos feitos *in loco*. Obtido o consumo anual por área das torres foi feita uma classificação deste consumo por faixas de acordo com metodologia proposta pela EN 15217 e posteriormente foi feita uma análise de sensibilidade das variáveis de projeto (modo de condicionamento de ar, absorvância solar das paredes, presença de proteção solar, fator solar dos vidros, proporção entre paredes e vidros - WWR (*Window-to-wall ratio*), volume, área de projeção da cobertura, área da envoltória, fator de forma e fator de altura) em relação à classificação proposta. Verificou-se que as seguintes variáveis: modo de condicionamento de ar, absorvância solar das paredes, fator solar dos vidros e WWR - tiveram correlação com o consumo anual de energia elétrica por área das torres. A última etapa do trabalho foi então o desenvolvimento de uma equação de regressão linear multivariada para a previsão da intensidade de uso de energia (EUI, *energy use intensity*) - feita em função das variáveis anteriormente citadas.

Palavras-chave: consumo de energia, benchmarking, edifícios de escritórios, análise de sensibilidade

## ABSTRACT

In countries whose energy efficiency regulations have already been consolidated or are under consolidation, an important parameter to be verified is the pattern of relative consumption of electric energy of existing buildings according to ranges established for different typologies. This kind of verification is called the consumption or “*benchmarking*”. In Brazil, following the implementation in 2010 of the Technical Regulation of Quality for Energy Efficiency of Commercial, Services and Public Buildings - RTQ-C, it is considered that the next step to be taken in regulatory terms is to analyze the energy consumption pattern of buildings. This implies that part of this consumption is related to decisions taken during the design phase of the building. Thus, the main objective of this research was to establish, through actual data of consumption of 101 buildings, the influence of the design decisions on the energy consumption of the office towers in the city of Belo Horizonte – MG. To achieve this aim, it was necessary to survey the electric energy consumption of this typology of buildings, as well as their constructive characteristics and the type of conditioning systems installed in them. For the classification of the buildings according to their consumption, a methodology was developed to isolate the annual consumption per square meter of the towers based on annual consumption data per square meter of the buildings as a whole and constructive data was collected through an Internet survey and on-site. With the annual consumption per square meter of the towers in hands, it was made a classification of this consumption by bands according to methodology proposed by EN 15217 - Energy Performance of Buildings — Methods for expressing energy performance and for energy certification of buildings and afterwards a sensitivity analysis of the design variables (type of air conditioning, wall absorption, presence of shading, Solar heat gain coefficient, proportion between walls and windows – WWR (Window-to-wall ratio), volume, coverage area, envelope area, shape and height factor) in relation to the proposed classification. It was verified that the type variables of air conditioning, wall absorption, Solar heat gain coefficient and WWR were correlated with the annual consumption of electric energy per square meter of the towers. The last step of the work was the development of a multivariate linear regression equation for the EUI forecast based on the variables previously mentioned.

**Keywords:** energy consumption, benchmarking, office buildings, sensitivity analysis.



## LISTAS DE FIGURA

Figura 1: Mapa mundial da classificação climática de Köppen .....	24
Figura 2: Diferença entre as melhores práticas de benchmarking .....	36
Figura 3: Processo de benchmarking de energia dos edifícios .....	37
Figura 4: Plataforma de cálculo do benchmarking para as agências bancárias no Brasil.....	42
Figura 5: Plataforma de cálculo do benchmarking para os edifícios corporativos no Brasil. .	43
Fonte: <a href="http://benchmarkingenergia.cbcs.org.br/plataforma_calculo.html">http://benchmarkingenergia.cbcs.org.br/plataforma_calculo.html</a> .....	43
Figura 6: Fluxograma da metodologia proposta. ....	47
Figura 7: Frequência de Ocorrência das Absortâncias solar das Paredes presente na amostra de edificações.....	53
Figura 8: Frequência de ocorrência das cores e reflexões dos vidros presente na amostra de edificações.....	54
Figura 9: Edificações exemplo de cada tipologia edificação.....	55
Figura 10: Frequência de ocorrência do modo de condicionamento de Ar presente na amostra de edificações.....	56
Figura 11: Frequência de ocorrência da presença ou não de proteção solar nas fachadas da amostra de edificações. ....	57
Figura 12. Área total, da torre e das garagens das edificações. ....	69
Figura 13: Consumo de energia elétrica total, da torre e das garagens das edificações. ....	70
Figura 14: Consumo de energia elétrica por área total, da torre e das garagens das edificações.....	71
Figura 15: Porcentagem de edificações por classificação.....	72
Figura 16: Porcentagem de edificações por classificação.....	73
Figura 17: Porcentagem de torres totalmente condicionadas (TC) por classificação.....	74
Figura 18: Porcentagem de torres com modo misto de condicionamento de ar (MM) por classificação. ....	75
Figura 19: Porcentagem de torres sem condicionamento de ar (NC) por classificação. ....	76

Figura 20: Limite dos consumos de energia eléctrica por área de todas as tipologias de torres. ....	77
Figura 21: Consumo médio anual de energia eléctrica por área das edificações como um todo [kWh/m <sup>2</sup> /ano] por modo de condicionamento de ar. ....	78
Figura 22: Consumo médio anual de energia eléctrica por área das torres das edificações [kWh/m <sup>2</sup> /ano] por modo de condicionamento de ar. ....	78
Figura 23: Consumo médio anual de energia eléctrica por área das torres [kWh/m <sup>2</sup> /ano] por absorptância solar média das paredes externas. ....	80
Figura 24: Consumo médio anual de energia eléctrica por área das torres [kWh/m <sup>2</sup> /ano] em comparação com a existência ou não de protecção solar nas fachadas. ....	81
Figura 25: Consumo médio anual de energia eléctrica por área das torres [kWh/m <sup>2</sup> /ano] por Fator Solar. ....	83
Figura 26: Consumo médio anual de energia eléctrica por área das torres [kWh/m <sup>2</sup> /ano] por faixa de WWR. ....	84
Figura 27: Variação dos valores de WWR dentro de cada classificação e entre as classificações. ....	86
Figura 28: Consumo médio anual de energia eléctrica por área das torres [kWh/m <sup>2</sup> /ano] por volume total. ....	86
Figura 29: Variação dos valores de volume dentro de cada classificação e entre as classificações. ....	88
Figura 30: Consumo médio anual de energia eléctrica por área das torres [kWh/m <sup>2</sup> /ano] por área de projecção da cobertura da torre. ....	88
Figura 31: Variação dos valores de Área de projecção da cobertura dentro de cada classificação e entre as classificações. ....	90
Figura 32: Consumo médio anual de energia eléctrica das torres das edificações por área [kWh/m <sup>2</sup> /ano] por Área da envoltória. ....	90
Figura 33: Variação dos valores de área da envoltória dentro de cada classificação e entre as classificações. ....	92

Figura 34: Variação dos valores do Fator de Forma dentro de cada classificação e entre as classificações.....	93
Figura 35: Variação dos valores do Fator de Altura dentro de cada classificação e entre as classificações.....	93
Figura 36: Dispersão entre os EUI real e previsto com o universo de 75 torres gerado a partir dos dados de Modo de condicionamento de ar, WWR, absorptância das paredes, fator solar dos vidros, proteção solar, volume, área de projeção da cobertura e área da envoltória. ....	95
Figura 37: Dispersão entre os EUI real e previsto com o universo de 75 torres gerado a partir dos dados de Modo de condicionamento de Ar, WWR, Absortância solar das paredes e fator solar dos vidros. ....	97

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Resumo da classificação climática de Köppen .....	24
Tabela 2: Tabela dos limites do consumo de energia elétrica.....	30
Tabela 3: Classificação do edifício segundo NABERS. ....	33
Tabela 4: Consumo de energia das edificações de escritório no Reino Unido. ....	39
Tabela 5: Tabela de benchmarking energético para os edifícios com condicionamento de ar central. ....	41
Tabela 6: Tabela de benchmarking energético para os edifícios com condicionamento unitário.....	41
Tabela 7: Absortância das cores.....	52
Tabela 8: Tabela de Fatores Solares dos vidros. ....	54
Tabela 9: Tabela dos limites do consumo de energia elétrica estabelecido pela EN 15217. ....	62
Tabela 10: Tabela dos limites do consumo de energia elétrica.....	62
Tabela 11: Tabela dos limites do consumo de energia elétrica por área de todas as edificações da amostra [kWh/m <sup>2</sup> /ano].....	71
Tabela 12: Tabela dos limites do consumo de energia elétrica por área de todas as edificações da amostra [kWh/m <sup>2</sup> /ano].....	72
Tabela 13: Tabela dos limites do consumo de energia elétrica por área das edificações totalmente condicionadas [kWh/m <sup>2</sup> /ano].....	74
Tabela 13: Tabela dos limites do consumo de energia elétrica por área das edificações com modo misto de condicionamento de ar [kWh/m <sup>2</sup> /ano].....	75
Tabela 15: Tabela dos limites do consumo de energia elétrica por área das edificações sem condicionamento de ar [kWh/m <sup>2</sup> /ano]. ....	75
Tabela 16: Variáveis explicativas do modelo de regressão. ....	94
Tabela 16: Coeficientes de regressão.....	95
Tabela 18: Variáveis explicativas do modelo de regressão. ....	96
Tabela 19: Coeficientes de regressão.....	96

## **LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS**

ABCB - Australian Building Codes Board

ASHRAE – American Society of Heating, Refrigerating and Air Conditioning Engineers

BCA - Building Code of Australia

BEC - Building Energy Codes

BEN – Balanço Energético Nacional

CEMIG Companhia Energética de Minas Gerais S.A.

CGIEE - Comitê Gestor de Indicadores e Níveis de Eficiência Energética

ELETROBRÁS - Centrais Elétricas Brasileiras S.A.

EPE – Empresa de Planejamento Energético

EUI - Energy Use Intensity

ILD – Internal Load Density

INMETRO - Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia

IPTU - Imposto Predial e Territorial Urbano

LEED - Leadership in Energy and Environmental Design

NABERS - National Australian Built Environment Rating System

PBE Edifica - Programa Brasileiro de Etiquetagem para Edificações

PNE – Plano Nacional de Energia

PNEf - Plano Nacional de Eficiência Energética

PROCEL – Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica

RTQ-C – Regulamento Técnico da Qualidade de Eficiência Energética de Edifícios Comerciais, de Serviços e Públicos

RTQ-R - Regulamento Técnico da Qualidade de Eficiência Energética de Edifícios Residenciais

SRC - Standardized Regression Coefficient

WWR - Window to Wall Ratio

# SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO .....</b>	<b>15</b>
1.1 Contextualização do Problema.....	15
1.2 Objetivo geral e Objetivos Específicos .....	19
1.3 Estrutura do trabalho .....	19
<b>2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>21</b>
2.1 Consumo de energia nos edifícios comerciais .....	21
2.2 Etiquetagem energética .....	29
2.2.1 União Europeia .....	30
2.2.2 Nova York.....	30
2.2.3 Hong Kong.....	31
2.2.4 Austrália.....	32
2.2.5 Brasil.....	33
2.3 Benchmarking .....	35
2.4 Análise de Sensibilidade .....	44
<b>3. MATERIAIS E MÉTODOS.....</b>	<b>47</b>
3.1 Levantamento das edificações de escritório de Belo Horizonte .....	48
3.2 Dados de consumo .....	48
3.2.1 Taxa de Vacância.....	50
3.3 Levantamento das características das edificações.....	50
3.4 Projeto arquitetônico .....	59
3.5 Indicador de desempenho.....	60
3.6 Classificação das edificações .....	60
3.7 Variáveis analisadas .....	62
3.8 Análise de sensibilidade dos dados .....	63
3.8.1 Teste de Qui-quadrado de Pearson .....	63

3.8.2	Análise de variância .....	64
3.8.3	Regressão Linear Multivariada .....	66
<b>4.</b>	<b>RESULTADOS .....</b>	<b>68</b>
4.1	Classificação das edificações .....	68
4.2	Análise de sensibilidade .....	77
4.2.1	Modo de condicionamento de ar .....	77
4.2.2	Absortância solar das paredes .....	80
4.2.3	Proteção Solar .....	81
4.2.4	Fator solar dos vidros .....	82
4.2.5	Relação entre área de abertura e área de fachada opaca, WWR.....	84
4.2.6	Volume.....	86
4.2.7	Área de projeção da cobertura (Apcob) .....	88
4.2.8	Área da envoltória.....	90
4.2.9	Fator de Forma, FF e Fator de Altura, FA .....	92
4.3	Regressão Linear Multivariada .....	93
<b>5.</b>	<b>CONCLUSÃO.....</b>	<b>98</b>
5.1	Limitações do trabalho .....	101
5.2	Recomendação para trabalhos futuros.....	102
<b>6.</b>	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>103</b>
<b>ANEXO 1</b>	<b>.....</b>	<b>113</b>
<b>ANEXO 2</b>	<b>.....</b>	<b>114</b>
<b>ANEXO 3</b>	<b>.....</b>	<b>117</b>
<b>ANEXO 4</b>	<b>.....</b>	<b>118</b>
<b>ANEXO 5</b>	<b>.....</b>	<b>121</b>

# 1.

## INTRODUÇÃO

### 1.1 Contextualização do Problema

A energia tem um papel fundamental no desenvolvimento e no progresso da humanidade e, portanto, há que se buscar forma de assegurar segurança em seu abastecimento. As edificações podem dar uma importante contribuição em relação ao uso racional de energia pois elas são responsáveis por uma parcela significativa do consumo de energia elétrica no Brasil e no mundo e, assim, estima-se que haja grande potencial de mitigação do consumo neste setor. No Brasil, a matriz das edificações está bastante ligada ao uso de energia elétrica. De acordo com informações recentes, o consumo de energia elétrica no Brasil atingiu 522,8 TWh em 2015 e a demanda de energia elétrica no país indica uma significativa concentração no consumo ligado ao parque edificado, principalmente nos setores comerciais, residenciais e públicos, com uma parcela de 50% do consumo total de energia elétrica (BEN , 2016).

Projetando um cenário futuro, o Plano Nacional de Energia – 2030 (BRASIL, 2007) prevê que com ações de eficiência energética, a tendência de aumento na demanda do consumo de energia no Brasil pode diminuir caso continue havendo políticas governamentais nesse setor. Regulamentações, estudos e procedimentos com a finalidade de minimizar este consumo têm sido elaborados, estabelecendo parâmetros que descrevem a eficiência mínima das edificações.

Apesar das edificações, de um modo geral, terem colaborado com o aumento no consumo de energia nas últimas décadas, elas também devem ser vistas como um forte potencial para minimizar este consumo. Para que este potencial seja alcançado, concepções mais eficientes desde a etapa inicial do projeto devem ser feitas. Signor (1999), em seu trabalho, já apontava que, para a maioria dos administradores e projetistas, a eficiência energética nos edifícios passou a emergir como um fator de desempenho a ser considerado nas equações ambientais e financeiras. No Brasil, até janeiro de 2016, as edificações comerciais certificadas foram de 393 edificações com certificação LEED (*Leadership in Energy and Environmental*



*Design*), 168 com o Processo Aqua e 135 com o PBE Edifica para Edifícios Comerciais, de Serviços e Públicos.

Um dos motivos para a preocupação com a racionalização da energia nos edifícios no Brasil iniciou-se com a crise no setor elétrico ocorrido em 2001, que levou o governo a se preocupar também com questões relacionadas ao uso final racional da energia elétrica e seu uso eficiente. Por meio da lei nº 10.295 de 19 de dezembro de 2001, foi instituído e regulamentado o Comitê Gestor de Indicadores e Níveis de Eficiência Energética – CGIEE. Nesta lei foi estabelecido que deveriam ser criados “níveis máximos de consumo de energia, ou mínimos de eficiência energética, de máquinas e aparelhos consumidores de energia fabricados ou comercializados no País, bem como para as edificações construídas”. Para que estudos fossem desenvolvidos, foi criado o PROCEL-EDIFICA. Entre suas principais ações, consta o desenvolvimento do Regulamento Técnico da Qualidade para Eficiência Energética de Edifícios Comerciais, de Serviços e Públicos – RTQ-C (BRASIL, 2010a) e do Regulamento Técnico da Qualidade para Edifícios Residenciais - RTQ-R (BRASIL, 2010b).

A etiquetagem das edificações comerciais, de serviços e públicos deverão atender aos requisitos relativos ao desempenho da envoltória, à potência instalada do sistema de iluminação e à eficiência do sistema de condicionamento do ar. A classificação é feita para cada requisito variando de A (mais eficiente) a E (menos eficiente). Em seguida são atribuídos pesos aos itens avaliados: envoltória (30%), sistema de iluminação (30%) e sistema de condicionamento de ar (40%) (BRASIL, 2010a)

Nota-se o grande peso dado aos aspectos relativos ao balanço térmico do edifício – a envoltória e o sistema de condicionamento artificial de ar representam 70% do peso da avaliação de eficiência energética de um edifício. A envoltória tem a função primordial de controlar os ganhos térmicos de forma a gerar um balanço térmico que propicie um menor número de horas do uso dos sistemas de condicionamento artificial de ar. Com isso, as cores, materiais e a composição e espessuras dos componentes construtivos utilizadas influenciam no maior ou menor consumo de energia elétrica de uma edificação e, portanto, devem ser considerados no projeto (CARVALHO, ROVERE, GONC, 2010; DORNELLES, 2008; SANTOS, SOUZA, 2012; SANTANA, 2006; SOZER, 2010; SUN, GILES, LIAN, 2014).

Em países cujas regulamentações de eficiência energética já se mostram consolidadas ou em fase de consolidação, um importante parâmetro a ser considerado é o consumo relativo

de energia elétrica de acordo com as tipologias das edificações. Estes levantamentos são chamados de marcos de consumo ou *benchmarking*, que são comumente conhecidos como um processo contínuo e sistemático que permite a comparação das performances das organizações e respectivas funções. A partir de uma base de dados levantados, consegue-se tanto propor novos critérios para a construção, quanto realizar avaliação de critérios existentes e melhorar o gerenciamento de edificações de diferentes desempenhos (CHUNG, HUI, LAM, 2006).

Para Chung (CHUNG, HUI, LAM, 2006), o *benchmarking* é um processo que compara o uso da energia em um edifício ou grupo de edifícios com características semelhantes ou analisa a forma como o uso de energia varia de acordo com um nível estabelecido. Desta forma, permite identificar a rentabilidade de medidas para redução dos custos com o consumo de energia e facilita a melhoria contínua, fornecendo medidas para se estabelecer metas de conservação de energia em edifícios.

Uma forma de se agrupar as edificações para sua classificação dentro de um processo de *benchmarking* é através de um indicador de eficiência, por exemplo, o estabelecimento do consumo de energia pela área do piso (kWh/m<sup>2</sup>). Para que sejam estabelecidos marcos de eficiência para as edificações, estas devem ser agrupadas por atividade comum, para que se possa comparar se uma edificação é mais eficiente do que outra (MEIER; OLOFSSON; LAMBERTS, 2002).

Meier et al. (MEIER, OLOFSSON, LAMBERTS, 2002) também discutem que o consumo de energia pela área de piso pode não ser suficiente para descrever a eficiência de uma edificação, pois esta pode ser alterada de acordo com as dimensões da edificação ou de suas cargas internas. Por exemplo, um edifício de baixo consumo de energia não pode ser confundido com um edifício energeticamente eficiente ou um edifício com um elevado consumo de energia não é necessariamente ineficiente, pois este pode estar operando 24 horas por dia ou porque contém atividades que demandam muita energia.

Desta forma, um método mais complexo de se avaliar as edificações é através de equações de regressão múltipla para que diversos parâmetros que influenciam na edificação, como descritos por Chung *et al.* (2006), sejam contemplados, tais como: padrão de uso da edificação, número de ocupantes ou visitantes e rotina de manutenção, além do tipo de sistema de climatização, iluminação e controles de iluminação. Este método, no entanto, requer um

levantamento de uma grande amostra de edifícios e de seus consumos específicos de uso de energia.

Para Lamberts *et al.* (2014), um edifício é considerado energeticamente mais eficiente que outro quando proporciona as mesmas condições ambientais de conforto ao seu usuário, com menor consumo de energia. A definição de marcos de consumo pode ser feita através da determinação de características primárias semelhantes, como atividades, volumetrias, grupos de abastecimento de energia, ano de construção e depois comparados com características secundárias como padrão de uso da edificação, número de ocupantes, sistema de climatização, de iluminação, controles de iluminação, dentro da mesma atividade analisada (CARLO, 2008).

De acordo com Carlo (2008), o consumo de energia é função de variáveis que utilizam diretamente a energia, como os sistemas de iluminação artificial, de equipamentos e de condicionamento de ar, e de variáveis que interferem nestes sistemas, como partes do envoltório da edificação e a forma de uso de tais sistemas consumidores de energia. Além disso, a edificação contribui para o consumo por meio das trocas térmicas entre os ambientes interno e externo. Por exemplo, em climas quentes os ganhos térmicos são maiores e, juntamente com os ganhos internos de ocupação e de equipamentos e da iluminação, produzem uma carga térmica que deve ser compensada pelo sistema de condicionamento de ar em edificações condicionadas artificialmente.

A partir das constatações feitas anteriormente, a presente pesquisa visa desenvolver metodologia para avaliar a influência das decisões de projeto no consumo de energia elétrica em edificações tomando como estudo de caso as torres dos edifícios de escritório localizadas na cidade de Belo Horizonte – MG. A partir dos dados de consumo de energia elétrica medidos, dos dados construtivos e das informações sobre tipos de sistemas de condicionamento, foi verificada a existência ou não de correlação entre decisões de projeto e o maior ou menor consumo anual por área de energia elétrica das torres de edificações de escritório. Espera-se que as correlações encontradas possam indicar para os projetistas e *stakeholders* as estratégias de projeto mais adequadas para minimizar o uso de energia elétrica nos edifícios dentro do universo estudado.

## 1.2 Objetivo geral e Objetivos Específicos

O objetivo deste trabalho é analisar, através de dados medidos de consumo de energia elétrica, de dados construtivos e tipos de sistema de condicionamento de ar instalados, a influência das decisões de projeto no consumo de energia nas torres de edifícios de escritório tomando como estudo de caso a cidade de Belo Horizonte - MG.

Além do objetivo principal também se propõem alguns objetivos específicos:

- a) Desenvolver metodologia para o refinamento dos dados de consumo de energia elétrica das torres de edificações de escritório;
- b) Aplicar metodologia para levantamento das características construtivas, de projeto e de sistemas instalados nas edificações analisadas;
- c) Aplicar metodologia de classificação das edificações a partir do seu consumo de energia elétrica;
- d) Analisar a sensibilidade do consumo dos parâmetros de projeto em relação aos parâmetros de classificação das edificações e ao consumo de energia elétrica.

## 1.3 Estrutura do trabalho

O presente trabalho está organizado em cinco capítulos. O primeiro capítulo apresenta uma introdução do tema proposto, abordando a contribuição do consumo de energia das edificações comerciais na matriz energética brasileira e o seu potencial de economia de energia. Assim, foram desenvolvidas as justificativas e estabelecidos os objetivos do trabalho.

O segundo capítulo apresenta a revisão da bibliografia, ressaltando o consumo de energia nos edifícios comerciais e as variáveis de projeto que influenciam neste consumo. Além disso, também foram levantados a experiência internacional e nacional com relação aos regulamentos de eficiência energética e aos processos de *benchmarking* dos edifícios comerciais e identificados autores que desenvolveram *benchmarkings* para esta tipologia de edificações. Foram abordados ainda no segundo capítulo, métodos de análise de sensibilidade.

No terceiro capítulo é apresentado o procedimento metodológico utilizado na presente pesquisa de forma a atender aos objetivos propostos. Ele se inicia com a descrição do

procedimento para a identificação do universo das edificações a serem estudadas, assim como a seleção das edificações da amostra. Foram estabelecidos os procedimentos para o levantamento das características construtivas, a forma de classificação das edificações e a metodologia adotada para análise de sensibilidade dos dados.

No quarto capítulo são apresentados os resultados da pesquisa. No item 4.1 foi apresentada a classificação das edificações em relação ao seu consumo de energia, numa escala de A a E. No item 4.2 foram apresentados os resultados das análises de sensibilidade das variáveis em relação à classificação definida anteriormente e no item 4.3, foi apresentado e analisado o resultado de análise de regressão linear multivariada feita a partir das variáveis consideradas influentes no consumo de energia elétrica das edificações estudadas.

Por último, foram apresentadas as conclusões da pesquisa desenvolvidas com base nos resultados e na revisão bibliográfica. Também foram apresentadas as limitações da pesquisa e as recomendações para os trabalhos futuros.

# 2.

## REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 Consumo de energia nos edifícios comerciais

A energia é um fator essencial nos esforços globais para alcançar o desenvolvimento sustentável (VERA; LANGLOIS, 2007) e os edifícios podem ser a chave para conseguir chegar a esse objetivo (REY et.al, 2007). Apesar das edificações, de um modo geral, terem colaborado com o aumento no consumo de energia nas últimas décadas, elas também devem ser vistas como um forte potencial para a maior racionalização deste consumo.

A construção, operação e uso dos edifícios significam uma parcela importante no consumo de energia disponível no país e representam um grande potencial para a conservação de energia. Atualmente para a maioria dos administradores e projetistas, a eficiência energética nos edifícios emergiu como um permanente fator de desempenho a ser considerado nas equações ambientais e financeiras (SIGNOR, 1999). Para tal, entende-se que características como conforto ambiental, eficiência energética e redução do consumo de água, devem ser concebidas desde a etapa inicial do projeto.

No Brasil, os edifícios existentes, nos setores residencial, comercial e público, representam 50% do consumo total de energia elétrica do Brasil (BEN, 2016) e, de acordo com o Plano Nacional de Energia 2030 (MME, 2007), o consumo energético dos edifícios tem um crescimento projetado em 3,7% ao ano até 2030. Entende-se, portanto, que o entendimento dos fatores influentes no consumo de energia elétrica das edificações terá um papel fundamental no estabelecimento de metas para as novas edificações a serem construídas.

Projetando um cenário futuro, o PNE - Plano Nacional de Energia - 2030 (MME,2007) prevê que, com ações de eficiência energética, a tendência de aumento na demanda do consumo de energia no Brasil tende se arrefecer caso continuem havendo políticas governamentais nesse setor. O Plano Nacional de Eficiência Energética (PNEf) 2030 (MME,2011) estima que o

potencial de redução de consumo de aproximadamente 30% com implementação de ações de eficiência energética nos sistemas de iluminação, ar condicionado e intervenções arquitetônicas na envoltória no que diz respeito às edificações existentes e este percentual pode ser de 50% em edificações novas.

Para Lamberts, Pereira, Dutra, (2014), um bom projeto arquitetônico deveria incluir análise sobre o seu desempenho energético, pois cada decisão tomada durante o processo de projeto pode influenciar no desempenho térmico e luminoso do edifício. Tem-se ainda que os edifícios passivos, com baixo consumo de energia e com estratégias de controle climático, oferecem uma maior oportunidade para se adaptar às mudanças climáticas (KWOK; RAJKOVICH, 2010).

A implantação de estratégias de eficiência energética nos edifícios não só reduz o pico de demanda de energia, como também reduz o uso de energia em geral e o seu impacto no meio ambiente (KNEIFEL, 2010; NIKOLAOU *et al.*, 2015). O princípio básico de melhorar a eficiência energética de um edifício é usar menos energia para aquecimento, arrefecimento e iluminação, sem afetar a saúde e conforto dos seus ocupantes (KOLOKOTSA; NIKOLAOU; STRAVRAKAKIS, 2011). O consumo de energia elétrico é influenciado principalmente por seis fatores: (1) clima, (2) envoltória do edifício, (3) equipamentos, (4) operação e manutenção da construção, (5) as atividades de uso e ocupação e (6) qualidade ambiental interna. Os três últimos fatores estão relacionados com o comportamento humano e estes podem ter uma influência tão grande quanto os três primeiros fatores (INTERNATIONAL ENERGY AGENCY, 2013).

Em especial, tem-se que a economia gerada no pico da demanda de energia, normalmente calculada durante o período de pico do sistema elétrico (STERN, 2013) juntamente com o controle desta demanda, podem reduzir significativamente a necessidade da implementação de novas fontes de geração de energia.

A falta de conhecimento sobre os fatores que determinam o uso de energia nas edificações é uma das barreiras mais expressivas para a eficiência energética e para o controle da demanda de energia. Em geral, o desconhecimento dos fatores que mais influenciam nas variações de demanda e consumo por parte de projetistas e *stakeholders* levam a diferenças significativas entre o uso de energia projetado e o atual consumo de energia das edificações (INTERNATIONAL ENERGY AGENCY, 2013).

Os diversos parâmetros que influenciam no consumo de energia do edifício precisam ser investigados visando a possibilidade de alteração de projeto para que a edificação se torne mais eficiente. A arquitetura deve reassumir o papel de minimizar os efeitos climáticos (MASCARÓ; MASCARÓ, 1992; ROMÉRO; REIS, 2012). Avaliar a eficiência energética de um edifício é uma tarefa mais difícil do que em equipamentos, pois a eficiência abrange uma inter-relação de fatores, tais como a arquitetura, variáveis ambientais, como temperatura e umidade externas, sistemas (iluminação, ar condicionado etc), entre outros (MEIER; OLOFSSON; LAMBERTS, 2002).

Este trabalho de tese apresenta diversos estudos realizados em cidades de climas diferentes e que, portanto, possuem resultados dependentes das características climáticas locais. Em países de clima quente, o principal consumo das edificações se dá para o arrefecimento da temperatura interna, enquanto, em países de clima frio, há significativo consumo para a calefação. No entanto, apesar do clima de Belo Horizonte (estudo de caso desta tese) ser do tipo Cwa, temperado com inverno suave, sem necessidade de aquecimento artificial no inverno, o intuito da revisão dos diversos trabalhos da literatura sobre o tema foi o de buscar as variáveis mais comumente avaliadas em processos de análise de eficiência energética e de *benchmarking*, bem como levantar as métricas usadas para determinação de índices de consumo, que servissem de referência para o estudo desenvolvido nesta tese. Para o leitor ter uma maior clareza sobre os resultados obtidos pelos autores ao longo do texto, os climas das cidades serão citados de acordo com a tabela de classificação de Köppen, usada internacionalmente e apresentada na Figura 1 e na Tabela 1.



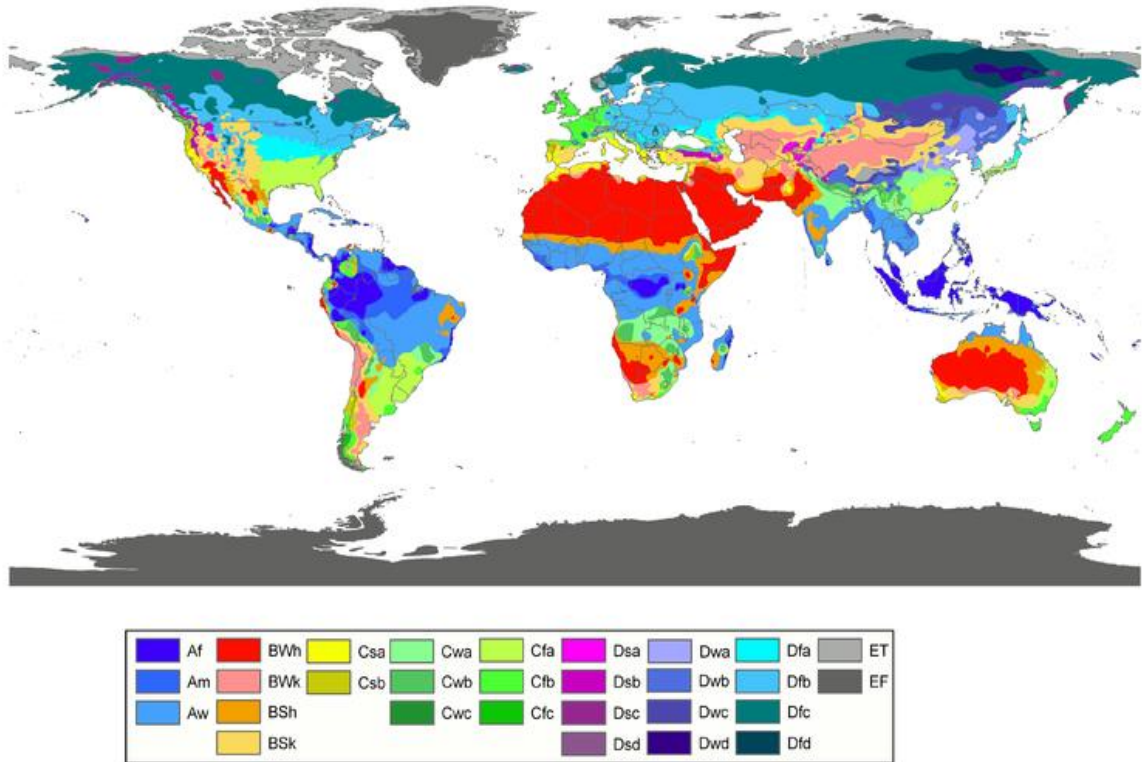


Figura 1: Mapa mundial da classificação climática de Köppen

Fonte: Classificação climática de Köppen-Geiger - Portais UFG

Tabela 1: Resumo da classificação climática de Köppen

Classificação climática de Köppen-Geiger										
		Temperatura do ar			Precipitação					
		T	F	M	S	W	f	m	w	s
<b>A</b>	Tropical	-	-	-	-	-	Equatorial <i>Af</i>	Monções <i>Am</i>	Savana, chuva de Verão <i>Aw</i>	Savana, chuva de Inverno <i>As</i>
<b>B</b>	Árido	-	-	-	Estepário <i>BS</i>	Desértico <i>BW</i>	-	-	-	-
<b>C</b>	Temperado	-	-	-	-	-	Subtropical <i>Cfa</i> , Oceânico <i>Cfb</i>	-	Pampeano <i>Cwa</i> , <i>Cwb</i>	Mediterrânico <i>Csa</i> , <i>Csb</i>
<b>D</b>	Continental	-	-	-	-	-	Continental <i>Dfa</i> , <i>Dfb</i> , Subártico <i>Dfc</i> , <i>Dfd</i>	-	Manchuriano <i>Dwa</i> , <i>Dwb</i>	-
<b>E</b>	Glacial	Tundra <i>ET</i>	Polar <i>EF</i>	Alpino <i>EM</i>	-	-	-	-	-	-

Fonte: Classificação climática de Köppen-Geiger - Portais UFG

A morfologia do edifício é um fator importante que pode influenciar em um aumento ou diminuição da energia necessária para aquecer ou arrefecer o espaço ocupado (CATALINA, VIRGONE, IORDACHE, 2011). Com isso, um grande número de estudos tem sido conduzido para examinar a relação entre forma de construção e consumo de energia. Ourghi *et al.* (2007) utilizou de várias combinações de geometria de construção, WWR, transmitância térmica dos vidros e clima para criar uma equação de previsão do consumo de energia de resfriamento e assim poder analisar o impacto da forma do edifício de escritório no consumo total de energia nas cidades de Tunis, Kuwait, Gabes, Cairo, Roma, Frankfurt, Atlanta, Chicago, Denver. O trabalho de Ourghi *et al.* (2007) foi estendido por Alanzi *et al.* (2009), incluindo outras formas de construção, WWR e tipos de vidro. Utilizando a regressão múltipla, os autores desenvolveram uma equação com uma alta correlação dos dados para prever o consumo de energia nas edificações do Kuwait.

Depecker *et al.* (2001) relacionaram a forma dos edifícios em Paris (classificação Köppen – Cfb) e Carpentras (classificação Köppen – Csa) com o consumo energia para aquecimento. Para tal, estabeleceram um fator de forma em função da área da envoltória e do volume. Os autores verificaram uma boa correlação entre o fator de forma e o consumo de energia em Paris ao contrário de Carpentras, que, por ter um clima quente, não apresentou correlação. Também na França, em Nice (classificação Köppen – Csa) e Lyon (classificação Köppen – Csb), Catalina *et al.* (2011) desenvolveram uma regressão linear para calcular o consumo de energia a partir das variáveis: relação entre a superfície do piso e a janela, coeficiente climático, área de fachada sul, transmitância térmica média e idade da construção. Essa correlação obteve um  $R^2 = 0.9935$ . Mottahedi *et al.* (2015) também desenvolveram uma regressão linear para prever o consumo de energia por tipo de forma da edificação a partir de 17 variáveis.

Tian *et al.* (2017) analisaram um edifício de clima escritórios em Harbin, China (classificação Köppen – Dwa), e verificaram, através de análise de sensibilidade global, que os resultados indicaram relações não lineares entre as variáveis de entrada (número de andares, área, orientação, WWR e fator de forma) e que as variáveis de área e números de andares foram os que mais tiveram efeito no consumo. Já Raji *et al.* (2015) analisaram as variáveis da envoltória – tipo de vidro, WWR, coeficiente de sombreamento e transmitância térmica da cobertura e das paredes – na Holanda. As melhores estratégias foram simuladas em conjunto

obtendo uma maior economia de energia, com cerca de 42% para o uso total de energia, 64% no aquecimento e 34% na iluminação artificial.

Carvalho et al. (2010) verificaram que a radiação solar é a principal fonte de ganho de calor em edifício de escritório totalmente envidraçado e climatizado artificialmente no Rio de Janeiro (classificação Köppen – Am). Para tentar diminuir o consumo de energia elétrica na edificação, foram implementadas proteções solares externas, resultando em redução no consumo do ar condicionado de 6,35% e no consumo total de energia elétrica de 3,93%. Como a edificação possuía poucos pavimentos, foi analisada a introdução de árvores na área externa. Os resultados indicaram uma redução no consumo total de energia elétrica de 1,85%.

Alguns autores ressaltam que o uso de proteções solares externas é uma importante estratégia para as edificações no Brasil, pois bloqueiam a radiação solar direta antes que ela possa penetrar pelos vidros (CARVALHO *et. al.*, 2010; SANTOS, SOUZA, 2012). Santos e Souza (2012) discutiram, em seu trabalho, como o método prescritivo do RTQ-C aborda o efeito de proteções solares no desempenho energético de envoltórias a partir de um estudo de caso. Foram avaliados brises e prateleiras de luz, tanto pelo método prescritivo do Regulamento quanto por simulação computacional. Pela classificação do método prescritivo, o indicador de consumo da edificação alcançou o nível A. Quando foram introduzidos os brises, a classificação manteve-se a mesma, mas houve uma redução de até 12,9% no consumo de energia elétrica.

Santana (2006) verificou que para, os edifícios de escritórios simulados para Florianópolis (classificação Köppen – Cfa), houve uma economia de até 12% com a presença de dispositivos de proteção solar e que a cada 10° de aumento do ângulo vertical de sombreamento, o consumo de energia elétrica foi reduzido em 1,8%. Entretanto, Fossati e Lamberts (2010) observaram que essa é uma estratégia pouco explorada nos edifícios de escritório no Brasil. O mesmo foi encontrado por Carlo (2008) em levantamento feito para avaliação de eficiência energética com uma amostra em cinco cidades brasileiras, sendo que 80% das edificações de escritório de grande porte não possuíam brises horizontais e quase 100% dos edifícios da amostra não possuíam brises verticais de sombreamento. Já nas edificações de escritório de pequeno porte, 60% não possuíam brises horizontais e 95% não possuíam brise vertical.

Segundo Dornelles (2008), o meio mais eficaz do projetista poder controlar a quantidade de calor que chega até o interior de uma edificação é considerar cuidadosamente o modo como a envoltória absorve ou reflete a radiação solar. O impacto da carga térmica dos edifícios resultante da incidência de radiação solar dependerá, entre outros fatores, da absorvância à radiação solar que é definida como a razão entre a energia solar absorvida por uma superfície e a energia total incidente sobre a mesma.

Nos edifícios comerciais de Hong Kong, foi analisada a relação entre o ganho de calor pelas envoltórias e a demanda de carga de resfriamento. Chan e Chow, (1998) verificaram que, em climas subtropicais, as edificações utilizam, na maior parte do ano, o sistema de refrigeração e esse corresponde a cerca de 60% do consumo de eletricidade total da edificação. Os autores definiram para o estudo realizado o valor total de transferência térmica (OTTV), que é calculado a partir dos valores de WWR, transmitância térmica das paredes, transmitância térmica dos vidros e coeficiente de sombreamento das janelas. Eles encontraram que a economia de energia com refrigeração pode chegar a 35% com valores mais baixos de OTTV.

No estudo de Kontoleon e Eumorfopoulou (2010), foi avaliado o desempenho térmico de um ambiente que tem uma das suas paredes revestidas com cobertura vegetal numa cidade no norte da Grécia. Foram variadas a orientação solar dessa parede e a porcentagem de vegetação nela contida. Concluíram que as diferenças de temperatura entre as superfícies interior e exterior da parede coberta com a vegetação são reduzidas quando comparadas com paredes convencionais.

Em outro estudo foram feitas sete alterações nas fachadas de uma edificação de escritórios em Eskişehir (classificação Köppen – Cfb) e verificou-se a influência no consumo total da edificação, no consumo para resfriamento e para aquecimento. Verificou-se que a alteração do vidro duplo por um vidro *low-e* não diminuiu o consumo total de energia da edificação. Já as opções que utilizaram isolamento das fachadas, conseguiu-se redução de 0,56 a 8,61% (GÜÇYETER; GÜNAYDIN, 2014).

O percentual de abertura na fachada é considerada a variável de maior impacto no indicador de consumo da envoltória, segundo a classificação do Regulamento Técnico da Qualidade para Edifícios Comerciais, de Serviços e Públicos -RTQ-C (BRASIL, 2010a). Em testes feitos para edifícios de escritórios de Florianópolis – SC, quanto maior o percentual de abertura, menor tende a ser o nível de eficiência da envoltória (FOSSATI, LAMBERTS, 2010).

O aumento do percentual de abertura na fachada atingiu uma variação de 41,6% do consumo de energia total em testes feitos em edifícios de escritórios localizados em Florianópolis (SANTANA, GHISI, 2007).

Com o aumento da relevância dada às preocupações com as questões ambientais, a ventilação natural mostra-se como uma alternativa extremamente interessante para diminuir o consumo de energia elétrica nos edifícios e, conseqüentemente, o impacto ambiental gerado pelo uso indiscriminado dos sistemas de ar condicionado (EMMERICH, 2011; VERA; LANGLOIS, 2007).

É dito que uma edificação possui ventilação híbrida quando ela utiliza tanto o sistema de ventilação natural quanto o sistema de condicionamento de ar mecânico para o condicionamento do ar interno (JI, LOMAS, COOK, 2009; RUPP, GHISI, 2013; SANTAMOURIS, WOUTERS, 2006). O sistema híbrido permite que o edifício utilize dos benefícios da ventilação natural, com a segurança de que, quando não for possível se obter conforto em face de condições extremas de temperatura no meio externo, o edifício poderá operar com o sistema artificial, garantindo condições de conforto térmico para os usuários (ZHAI, JOHNSON, KRARTI, 2011).

O trabalho desenvolvido em Hangzhou, China, apresentou um potencial de economia de 30-35% com o sistema de resfriamento híbrido em relação ao sistema mecânico operando o ano todo [33]. Potenciais econômicos também podem ser vistos em edificações projetadas em diferentes tipos de clima, como tropical, subtropical, temperado (HAASE; AMATO, 2009) e o árido (EZZELDIN, REES, COOK, 2009). Um estudo analisando o consumo de energia em diversas edificações na cidade de Belo Horizonte - MG, verificou que as edificações com condicionamento de ar híbrido consomem cerca de 40% menos de energia elétrica que as edificações com condicionamento de ar central (VELOSO, SOUZA, KOURY, 2015).

A implantação de estratégias de eficiência energética nos edifícios não só reduz o pico de demanda de energia, como também reduz o uso de energia em geral, bem como os impactos que os edifícios causam no meio ambiente. Como consequência disso, haverá uma redução da necessidade de novos investimentos em sistemas de geração, transmissão e distribuição de energia. Normalmente essa economia de energia, no pico da demanda, é calculada durante o período de pico do sistema elétrico (STERN, 2013).

Os ocupantes são um dos fatores importantes na equação do consumo de energia nos edifícios e, possivelmente, também na determinação da demanda de energia do edifício (JAZIZADEH et al., 2012). Nos edifícios residenciais, os ocupantes são responsáveis por controlar os custos de energia e com isso, eles têm uma motivação para manter o equilíbrio entre o uso desta e as suas preferências de conforto. No entanto, no setor comercial, os ocupantes não estão envolvidos e cientes das consequências de seus comportamentos em relação ao consumo de energia, fazendo com que essas duas tipologias tenham padrões diferenciados de consumo (JAZIZADEH et al., 2012).

## **2.2 Etiquetagem energética**

O objetivo global da política energética dos edifícios é o de poupar energia elétrica sem comprometer o conforto, a saúde e os níveis de produtividade, ou seja, consumir menos energia, proporcionando serviços de construção iguais ou melhorados em termos energéticos. Os organismos reguladores (governo, agências energéticas, autoridades locais, etc.) dispõem de três instrumentos básicos para incentivar a economia de energia e maximizar a eficiência energética nos edifícios: regulamentação, auditoria e certificação. (PÉREZ-LOMBARD et al., 2009).

As informações do desempenho da edificação e os indicadores implementados na regulamentação devem ser claros e detalhados para que o usuário saiba o nível atingido pela edificação (NIKOLAOU et al., 2015; LEWANDOWSKA et al., 2015).

A certificação energética pode ter carácter obrigatório ou voluntário. Os sistemas obrigatórios de certificação energética podem introduzir encargos adicionais para os organismos reguladores, enquanto os voluntários não. No entanto, considera-se que, apenas através de um sistema de certificação obrigatória de energia, este mecanismo possa desenvolver todo o potencial de melhoria energética no setor da construção civil. (CASALS, 2007).

A "classificação energética de edifícios" engloba qualquer procedimento que permita a determinação da qualidade de um edifício (em termos de utilização de energia) em comparação com outros. Diversas cidades e países possuem sistemas de certificação. Algumas serão apresentadas nos itens abaixo.

### 2.2.1 União Europeia

Na União Europeia, a rotulagem energética teve seu início na década de 1990 e teve como objetivo informar os consumidores sobre o desempenho energético dos dispositivos consumidores de energia e promover a economia de energia e a eficiência energética (NIKOLAOU et al., 2015). A *EN 15217- Energy performance of buildings - Methods for expressing energy performance and for energy certification of buildings* (Desempenho energético dos edifícios - Métodos de expressão do desempenho energético e de certificação energética dos edifícios) define as formas de cálculo do desempenho energético das edificações e os procedimentos para definir os valores de referência (EN 15217, 2007).

Na avaliação das edificações, o desempenho energético está relacionado com uma escala que foi definida a partir da determinação do Índice de Classificação de Referência ( $\alpha$ ), definida pela razão entre o valor de consumo de energia típico das edificações ( $EPI_R$  - Índice de Performance da Edificação de Referência) e o desempenho energético atingido por 50% do parque imobiliário ( $EPI_S$ ), como definido pela Equação 1.

$$\alpha = \frac{EPI_R}{EPI_S} \quad \text{Equação 1}$$

De acordo com essa metodologia, os limites entre as classificações são definidos conforme apresentado na Tabela 2. Vale ressaltar que as classificações das edificações variam de A a G, diferentemente do Brasil, em que essa classificação varia de A a E.

Tabela 2: Tabela dos limites do consumo de energia elétrica.

A	B	C	D	E	F	G
$0,5\alpha$	$\alpha$	$0,5(\alpha+1)$	1	1,25	1,5	

Fonte: EN 15217- Energy performance of buildings - Methods for expressing energy performance and for energy certification of buildings

### 2.2.2 Nova York

Em 2007, o governo da cidade de Nova York aprovou um conjunto de leis chamado de PlaNYC - Greener, Greater Buildings Plan (GGBP) (PLANYC, 2012), que visa aumentar a eficiência energética dos grandes edifícios não residenciais e multifamiliares. Para isso, foram

criados quatro regulamentos: *Benchmarking* (*Local Law 84*), Código de Conservação de Energia (*Local Law 85*), Auditorias Energéticas (*Local Law 87*) e Medição de Iluminação (*Local Law 88*). O objetivo desse plano foi preparar a cidade para um crescimento mais sustentável e, assim, fortalecer a economia, combater as alterações climáticas e melhorar a qualidade de vida dos seus habitantes. A política exige que todos os dados de água e energia das edificações sejam divulgados publicamente e que uma auditoria e o comissionamento destas sejam feitos a cada dez anos.

A *Local Law 84* também estabelece também, que os proprietários e/ou locatários dos edifícios acima de 4.560,00 m<sup>2</sup> e lotes com dois edifícios que somados tenham mais de 9.290,00 m<sup>2</sup>, devem apresentar, anualmente, um Relatório de Conformidade com as informações do consumo anual de energia e consumo de água por área bruta da edificação. Caso a edificação seja ocupada por um inquilino, este, quando sair da edificação, deve fornecer ao proprietário as informações de “*benchmarking*” do edifício.

### **2.2.3 Hong Kong**

Detectado um consumo significativo de energia por parte dos edifícios, o governo de Hong Kong, através do Departamento de Serviços de Elétrica e Mecânica (EMSD), criou em, 1998, um conjunto de códigos de construção, BEC (Building Energy Codes), para promover a eficiência energética das edificações em áreas urbanas. Os códigos de energia têm como objetivo fornecer requisitos mínimos de eficiência energética dos edifícios (EMSD, 2007).

O objetivo desses códigos é alcançar uma economia de energia de pelo menos 25% até 2030, tendo como ano base 2005 (PROPOSED MANDATORY IMPLEMENTATION OF THE BUILDING ENERGY CODES, 2008). Para alcançar esse objetivo, Hong Kong terá que evitar a emissão de 20 milhões de toneladas de gases de efeito estufa até 2030. Com isso, em 2010, foi promulgada a Portaria de Eficiência Energética de Edifícios e, em setembro de 2012, ela se tornou obrigatória. Nela se estabelece que os construtores e/ou proprietários devem assegurar que os parâmetros mínimos dos cinco tópicos estabelecidos sejam atendidos e que, a cada 10 anos, seja feita uma auditoria na edificação. Até março de 2014, 3.664 certificados de registro foram emitidos para 1.605 locais de construção, envolvendo 3.804 instalações.

As ferramentas de *benchmarking* de energia foram desenvolvidas de acordo com os resultados dos fatores que influenciam no consumo e resultou em indicadores de consumo de



energia. Para a comparação dos edifícios, foi desenvolvida uma plataforma eletrônica, de acesso online (<http://ecib.emsd.gov.hk/en/index.htm>), em que o proprietário e/ou construtor pode consultar o desempenho energético da sua edificação.

De acordo com os autores, essa ferramenta facilita avaliar o desempenho do consumo de energia em função de seus sistemas de utilização final de energia e equipamentos, em comparação com outros indivíduos no mesmo grupo de consumo de energia em Hong Kong. Para os edifícios comerciais, por exemplo, os dados que o usuário deve registrar são: o período de consumo e o total de consumo por tipo de energia (eletricidade, gás natural, LPG, diesel), área útil da edificação, idade da edificação, horas de operação, número de computadores, a temperatura de *set point* e outros dados do sistema de ar condicionado. Com essas informações, a plataforma compara a edificação com outras da mesma categoria e apresenta o consumo anual de energia em MJ/m<sup>2</sup>/ano.

#### **2.2.4 Austrália**

Em 2011, o governo australiano publicou um pacote de propostas de energia limpa, o que incluía a introdução de mecanismos de preços de carbono e o incentivo à inovação em tecnologias de energia limpa. Para conseguir atingir os objetivos propostos, o governo australiano vem, nos últimos anos, implementando práticas de eficiência energética nos edifícios. Com isso, cada estado australiano tem a responsabilidade de implantar os regulamentos de construção, mas estes são baseados no *Building Code of Australia* (BCA). O BCA fornece padrões técnicos mínimos para a concepção e construção de edifícios na Austrália. O *Australian Building Codes Board* (ABCB) produz e mantém o BCA.

Na Austrália, existe uma variedade de ferramentas para avaliar o desempenho ambiental e o efeito estufa dos edifícios, tanto na concepção quanto na fase operacional. O *National Australian Built Environment Rating System* (NABERS) é um sistema de classificação baseado no desempenho do edifício que mede o impacto ambiental de utilização do mesmo.

A classificação é feita através do número de estrelas. Quanto maior o número de estrelas, menores são as emissões dos gases de efeito estufa, como é apresentado na Tabela 3. O número de estrelas é calculado pela avaliação comparativa do consumo de energia do edifício com um edifício base da mesma categoria. Para garantir uma comparação justa dos valores de

consumo, são ajustados fatores como área da construção, horas de uso, clima, densidade dos equipamentos e a intensidade do efeito estufa da fonte de energia.

Tabela 3: Classificação do edifício segundo NABERS.

Classificação NABERS		Desempenho
6 estrelas	★★★★★	Desempenho do edifício líder de mercado
5 estrelas	★★★★	Desempenho excelente do edifício
2.5 – 3 estrelas	★★★	Desempenho do edifício médio de mercado

Fonte: National Australian Built Environment Rating System

Em 2010, o governo australiano através da iniciativa do Conselho de Governos da Austrália (COAG), criou o programa de divulgação do consumo de energia dos edifícios comerciais (*Commercial Building Disclosure - CBD*). Esse programa teve sua obrigatoriedade a partir de novembro 2011 e exige que os vendedores e locatários de imóveis comerciais, com área acima de 2.000 m<sup>2</sup>, forneçam informações de eficiência energética para os potenciais inquilinos e compradores. O objetivo desse programa é incentivar, a partir da divulgação dos dados, que os edifícios se tornem energeticamente mais eficientes e com emissões de gases reduzidos. Assim, após o registro da edificação, o edifício recebe o Certificado de Eficiência Energética de Edifícios (BEEC). O BEEC contém informações do desempenho energético da edificação, confirmado pela quantidade estrelas. Além disso, a etiqueta apresenta a quantidade de emissões de CO<sub>2</sub> por ano [Kg.CO<sub>2</sub>/ano] e o consumo de energia em ano [MJ/ano] da edificação.

### 2.2.5 Brasil

Após a crise de energia elétrica ocorrida no Brasil em 2001, a preocupação com a redução do consumo de energia elétrica se tornou um assunto de grande relevância no cenário nacional, reforçado, recentemente, pela crise de abastecimento devida à escassez de chuvas no país. Nas áreas de edificações, este tópico se mostra bastante relevante, pois, segundo o Balanço Energético Nacional (BEN, 2015), em 2015, as edificações foram responsáveis por 50% do consumo total de energia elétrica no país, ressaltando-se que 17,1% são consumidos pelos edifícios comerciais.

Em outubro de 2001, foi criada a Lei nº 10.295 que dispõe sobre a Política Nacional de Conservação e Uso Racional de Energia, que visa à alocação eficiente de recursos energéticos e a preservação do meio ambiente. Em dezembro do mesmo ano, o decreto nº 4.059

regulamenta a Lei nº 10.295 e estabelece “os níveis máximos de consumo de energia, ou mínimos de eficiência energética, de máquinas e aparelhos consumidores de energia fabricados ou comercializados no País, bem como de edificações construídas”.

Em julho de 2009, foi lançado no Brasil, o Regulamento Técnico da Qualidade para os Níveis de Eficiência Energética de Edifícios Comerciais, de Serviços e Públicos (Portaria nº163 do INMETRO), em que foi revisto em 17 de setembro de 2010 (Portaria nº372 do INMETRO). Esse Regulamento tem como objetivo “criar condições para a etiquetagem do nível de eficiência energética de edifícios comerciais, de serviços e públicos” (BRASIL, 2010). Em novembro de 2010, foi lançado o regulamento para edifícios residenciais – RTQ-R (Regulamento Técnico da Qualidade para o Nível de Eficiência Energética dos Edifícios Residenciais – Portaria nº449 do INMETRO).

A classificação das edificações varia de acordo com cinco níveis, sendo o “A” o mais eficiente e “E” o menos eficiente. A avaliação da edificação pode ser feita por dois métodos: método prescritivo e método de simulação. O método prescritivo utiliza pré-requisitos e equações que resultam em parâmetros que devem alcançar valores determinados para cada nível da classificação. Já o método de simulação deve utilizar um programa computacional de simulação termo-energética.

O desenvolvimento do RTQ-C, foi feito através de levantamentos fotográficos dos parâmetros que eram mais frequentes nos edifícios comerciais de 1.103 edificações, em cinco cidades brasileiras: Florianópolis, Belo Horizonte, Salvador, Recife e São Paulo. As características investigadas, de acordo com Carlo (2008), foram:

- do envoltório: percentual de área de janelas nas fachadas, o tipo de vidro e espessura, a cor e a existência de películas nos vidros, o tipo de parede incluindo sua espessura e identificação de suas camadas, as camadas da cobertura e a existência e dimensões das proteções solares;
- do edifício: a forma, o número de pavimentos e a orientação do edifício;
- dos sistemas: as cargas internas, o padrão de uso de ocupação e dos sistemas de iluminação, equipamentos e condicionamento de ar e suas características.

Como resultados, foram gerados modelos representativos de edificações comerciais em que foram possíveis avaliar, por meio de simulação computacional, seu desempenho energético. Assim, uma classificação geral de edifícios pode ser obtida quando os sistemas

individuais forem avaliados. A pontuação final foi estabelecida considerando os seguintes pesos: 30% para envoltória, 30% para iluminação e 40% para o condicionamento de ar.

### 2.3 Benchmarking

Um dos objetivos gerais da política de eficiência energética em edifícios é economizar energia sem comprometer os níveis de conforto, saúde e produtividade. Em outras palavras, a meta é, consumindo menos energia, proporcionar serviços iguais ou melhores no edifício (PÉREZ-LOMBARD et al., 2009). Em países cujas regulamentações de eficiência energética já se mostram consolidadas ou em fase de consolidação, um importante parâmetro a ser levantado é o consumo de energia elétrica de acordo com as tipologias das edificações. Este tipo de levantamento é chamado de marco de consumo ou “*benchmarking*”, que é um método aplicado para comparar a energia e/ou a eficiência de um edifício com um valor de referência. (PÉREZ-LOMBARD et al., 2009; SIGNOR, 1999; U.S. DEPARTMENT OF ENERGY’S COMMERCIAL BUILDING INITIATIVE, 2009), A partir de uma base de dados levantados, consegue-se tanto propor novos critérios para a construção, quanto realizar avaliação de critérios existentes e melhorar o gerenciamento de edificações de diferentes desempenhos (CHUNG; HUI; LAM, 2006).

Originalmente, a palavra *benchmark* era usada exclusivamente em topografia para definir com precisão um ponto de referência no terreno ou na análise geológica (GAO, MALKAWI, 2014). Na definição do dicionário Merriam-Webster, a palavra *benchmark* significa "algo que pode ser usado como uma forma de julgar a qualidade ou o nível de outras coisas semelhantes".

A avaliação de desempenho de energia nas edificações é importante para determinar a eficiência no uso de energia, pois ela pode fornecer aos proprietários e/ou inquilinos do edifício informações sobre a quantidade de energia que está sendo consumida e como está o desempenho da edificação em relação a outras edificações. Conseqüentemente, isso propicia aos proprietários dos edifícios um parâmetro de comparação para melhorar o desempenho energético quando o desempenho da edificação for considerada deficiente, permitindo ainda identificar oportunidades de economia de energia (WANG, YAN, XIAO, 2012).

No ambiente construído, o *benchmarking* é muitas vezes utilizado como parte de uma prática de gestão energética em edifícios já existentes para avaliar e melhorar a sua eficiência

energética (HONG et al., 2014). Já para Chung (CHUNG, HUI, LAM, 2006), o *benchmarking* é um processo que compara o uso da energia em um edifício ou grupo de edifícios com características semelhantes ou analisa a forma como o uso de energia varia de acordo com um nível estabelecido.

A partir do levantamento e tratamento estatístico de uma base de dados de consumo de energia em edificações de uma certa tipologia, consegue-se propor novos critérios para a sua construção, indicar estratégias para sua reabilitação ou *retrofit*, realizar avaliação do desempenho de critérios existentes para esta tipologia, melhorar o gerenciamento deste tipo de edificação e estabelecer metas de consumo para esta tipologia (CHUNG, HUI, LAM, 2006).

A elaboração de uma correta base de comparação deve levar em conta edificações de mesma tipologia para o estabelecimento de um correto *benchmarking*. Nas edificações de escritório, hospitais, hotéis, escolas, bancos, lojas de varejo, supermercados, hipermercados e shopping centers, as características que interferem de forma significativa no perfil de consumo são o uso e ocupação (SILVA, 2013).

O processo de *benchmarking* consiste em determinar se um edifício utiliza energia de maneira mais eficiente do que outros edifícios similares. Para tal, é preciso desenvolver um sistema de avaliação comparativa (ou modelo de simulação) a partir de uma amostra significativa de edifícios de referência (CHUNG, 2011). O *benchmarking* pode indicar aos proprietários os pontos fortes e fracos de sua edificação em relação àqueles de melhor desempenho e prática e assim, verificar, caso necessário, a possibilidade de implementar medidas de conservação de energia. As diferenças de desempenho entre as práticas de *benchmarking* são apresentadas na Figura 2 (STAPENHURST, 2009).

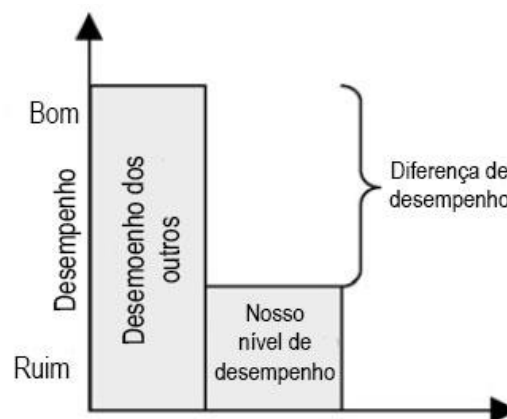


Figura 2: Diferença entre as melhores práticas de *benchmarking*  
Fonte: Adaptado de Stanpenhurst (2009)

Chung (2011) especifica no seu trabalho que o sistema de *benchmarking* deve levar em consideração dois tipos de fatores: fatores aleatórios, tais como as condições meteorológicas do local, características da gestão dos edifícios e as diferenças na forma e como os ocupantes utilizam essas edificações; e fatores não aleatórios, tais como: características físicas de idade, número de pisos e volumetria. O autor indica ainda que desempenho do uso de energia reais dos edifícios de referência deve ser normalizado em consideração aos fatores citados.

Para Gao e Malkawi (2014) e Pérez-Lombard *et al.* (2009), um processo de *benchmarking* deve conter, pelo menos, as seguintes fases:

- Manter ou desenvolver um banco de dados com informações sobre o desempenho energético de um número significativo de edifícios. Esta informação deve ser classificada, no mínimo, por tipo e área de construção;
- Obter de informações relevantes para a avaliação do desempenho de energia do edifício;
- Analisar comparativamente o desempenho energético do edifício com as amostras do banco de dados, em relação ao seu uso de energia;
- Desenvolver recomendações de medidas de eficiência energética viáveis a partir de perspectivas técnicas e econômicas.

Essas etapas de *benchmarking* estão apresentadas na Figura 3.

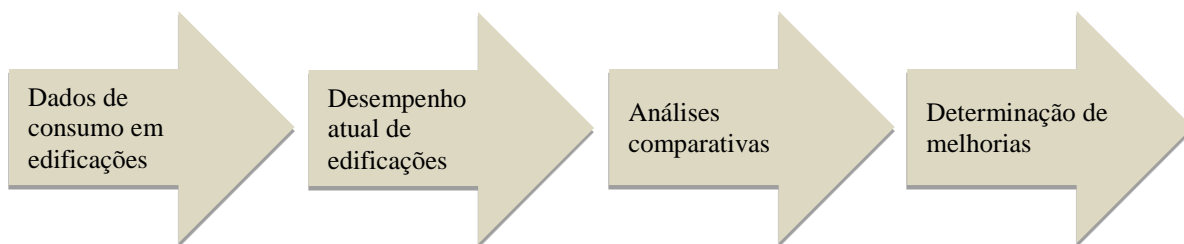


Figura 3: Processo de *benchmarking* de energia dos edifícios  
Fonte: Adaptado de Perez-Lombard et al. (2009)

Para Meier et al (2002), mesmo que seja difícil definir um único indicador de eficiência energética para os edifícios, existem três elementos presentes em edifícios energeticamente eficientes:

- O edifício deve conter tecnologias eficientes que, quando operando como projetado, irão reduzir o uso de energia;

- O edifício deve fornecer instalações e serviços adequados ao uso pretendido do edifício;
- O edifício deve ser operado de forma a ter um baixo consumo de energia em comparação com outros edifícios semelhantes

De acordo com Nikolaou et al. (2015), as técnicas de *benchmarking* são divididas em quatro categorias: *Benchmarking* de Análise Estatística, Sistemas de Classificação baseados em Pontos, *Benchmarking* baseado em modelos de simulação e Métricas Hierárquicas e de Uso Final. Estas técnicas são especificadas a seguir:

- *Benchmarking* de Análise Estatística consiste em recolher os dados da pesquisa e comparar uma unidade com as outras;
- Os Sistemas de Classificação baseados em Pontos não permite comparações com outros edifícios, mas fornecem padrões e diretrizes para medir o quão eficiente é a edificação em relação a padrões de melhores práticas;
- *Benchmarking* baseado em modelos de simulação estabelece um modelo matemático para calcular o consumo de energia teórica e faz uma comparação entre este consumo e o consumo de energia observado;
- Métricas hierárquicas e de Uso Final referem-se à geração de referências que ligam o uso de energia ao clima e aos requisitos funcionais. Este método é útil para explicar as diferenças em características que afetam o uso de energia.

A seleção das edificações que fazem parte da amostra avaliada deve ser feita com base em critérios de avaliação utilizados por empresas de consultoria e de avaliação imobiliária como forma de categorização das edificações quanto ao padrão de qualidade destas. Relação de área privativa por vaga de garagem, pé-direito mínimo dos conjuntos-tipo, área mínima de laje são exemplos de variáveis usadas na seleção das edificações. Este filtro se faz necessário, pois comparar edificações de escritórios de lajes corporativas com edifícios com pequenas salas comerciais não traz resultados efetivos em termos de *benchmarking* (SILVA, 2013).

Para comparar o desempenho calculado ou medido de um edifício é necessário que haja um valor de referência (Borgstein *et al.* (2016). Um indicador de desempenho energético (EPI, *Energy Performance Index*) ou intensidade de uso de energia (EUI, *energy use intensity*) é definido geralmente como o consumo de energia normalizado por área útil, ou seja,

kWh/m<sup>2</sup>/ano (BORGSTEIN *et al.* (2016); MEIER *et al.* (2002); SIGNOR, 1999; US ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY, 2010).

Trabalhos desenvolvidos sobre *benchmarking* em edificações de escritório em cidades dos países como Tailândia, Alemanha, Malásia, Estados Unidos, Hong Kong, China, Taiwan, Reino Unido e Singapura (ARMITAGE *et al.*, 2015; CHIRARATTANANON *et al.*, 2010; CHUNG, HUI, 2009; FUMO, MAGO, LUCK, 2010; GAO, MALKAWI, 2014; LEE, RAJAGOPALAN, 2008; LEE, BURNETT, 2008; LEE, 2010; LI *et al.*, 2013; MATSON, PIETTE, 2005; SAIDUR, 2009), usaram como variáveis, em 82% dos casos, a área da edificação e o número de ocupantes, em 91% a densidade de carga interna (ILD), em 45% a rotina de ocupação. Outras variáveis também avaliadas em uma menor porcentagem (entre 9 e 27%) foram: transmitância das paredes e coberturas, WWR, número de andares, tipo de vidro e clima.

No Reino Unido, o *benchmarking* das edificações é definido como uma relação entre os consumos de energia típicos e as melhores práticas em diferentes tipos de construção. Os valores de referência determinados estabelecem uma medida do consumo de energia das edificações em geral e separa o consumo de combustíveis fósseis e de eletricidade, uma vez que estes têm custos e emissões de CO<sub>2</sub> muito diferentes (CIBSE GUIDE F, 2004). Neste país, o consumo de energia das novas edificações deve ter como alvo os valores determinados como sendo os de boas práticas. Os edifícios de escritórios são divididos em 4 categorias: (condicionados artificialmente, com categorias padrão e luxo e naturalmente ventilados com categorias de escritórios celulares e de plantas livres). Os consumos de energia destes edifícios estão detalhados na Tabela 4.

Tabela 4: Consumo de energia das edificações de escritório no Reino Unido.

	Boas práticas (kWh/m <sup>2</sup> /ano)		Típico (kWh/m <sup>2</sup> /ano)	
	Combustíveis fósseis	Eletricidade	Combustíveis fósseis	Eletricidade
Condicionado artificialmente, padrão	97	128	178	226
Condicionado artificialmente, luxo	114	234	210	358
Ventilado naturalmente, celular	79	33	151	54
Ventilado naturalmente, planta livre	79	54	151	85

Fonte: Adaptado de BRECSU (2000)



Filippín (2000) utilizou em seu trabalho uma amostra de dados de consumo de energia e área de piso para calcular a intensidade de uso de energia (EUI) nos edifícios escolares na região central da Argentina. O objetivo do trabalho foi avaliar o consumo anual de energia de 15 escolas avaliadas em relação às outras da cidade e verificar seu desempenho de energia e determinar melhorias para as escolas. Foram levantados dados de consumo, idade da edificação, ocupação (horas/dia), número de ocupantes. Os dados de intensidade de uso de energia foram calculados, tabelados e por fim, foi desenvolvida uma tabela de referência.

No Brasil, uma das primeiras iniciativas de *benchmarking* foi desenvolvido por Silva (2013), avaliando as áreas comuns de edificações comerciais de alto padrão na região metropolitana de São Paulo. Foram criadas regressões múltiplas de elementos que afetam o consumo de energia e estabelecidas faixas com níveis de eficiência energética. As variáveis utilizadas foram: idade da edificação ( $x_1$ ), relação área/pessoa ( $x_2$ ), tipo de ar condicionado ( $x_3$ ), sistema de distribuição de água gelada ( $x_4$ ), sistema de distribuição de ar ( $x_5$ ), alimentação dos condicionadores ( $x_6$ ). Para a análise as edificações foram divididas em dois grupos pelo tipo de sistema de condicionamento de ar: edifícios com condicionadores de ar central e edifícios com ar condicionado unitário.

Para os edifícios com condicionamento de ar central, a equação de predição do consumo de energia é a Equação 2 e a Tabela 5 fornece os valores de *benchmarking* para essa tipologia. Já para os edifícios com condicionamento de ar unitário, a equação de predição é a Equação 3 e os valores de *benchmarking* estão apresentados na Tabela 6 . Como os edifícios com ar condicionado unitário como não possuem sistema de distribuição de água gelada ( $x_4$ ), sistema de distribuição de ar ( $x_5$ ), alimentação dos condicionadores ( $x_6$ ), estes foram retirados da equação.

$$EUI = 145,70 - 9,58 \cdot \left( \frac{x_1 \cdot 13,61}{8,968} \right) + 6,35 \cdot \left( \frac{x_2 \cdot 10,924}{3,786} \right) - 10,83 \cdot \left( \frac{x_3 \cdot 0,242}{0,435} \right) + 15,84 \cdot \left( \frac{x_5 \cdot 0,424}{0,502} \right) + 17,28 \cdot \left( \frac{x_6 \cdot 0,394}{0,496} \right)$$

Equação 2

Tabela 5: Tabela de *benchmarking* energético para os edifícios com condicionamento de ar central.

Classificação	EUI (kWh/m <sup>2</sup> /ano)
A	< 99,60
B	99,60 ≥ EUI < 131,80
C	131,80 ≥ EUI < 159,60
D	159,60 ≥ EUI < 191,90
E	≥ 191,90

Fonte: Silva (2013)

$$EUI = 53,42 + 11,40 \cdot \left( \frac{x_1 \cdot 12,05}{11,16} \right) + 15,65 \cdot \left( \frac{x_2 \cdot 13,51}{7,54} \right) + 25,62 \cdot \left( \frac{x_3 \cdot 0,22}{0,44} \right)$$

Equação 3

Tabela 6: Tabela de *benchmarking* energético para os edifícios com condicionamento unitário.

Classificação	EUI (kWh/m <sup>2</sup> /ano)
A	< 42,34
B	42,34 ≥ EUI < 50,09
C	50,09 ≥ EUI < 56,76
D	56,76 ≥ EUI < 64,51
E	≥ 64,51

Fonte: Silva (2013)

Outra iniciativa de *benchmarking* foi feita para agências bancárias de todo o Brasil. O estudo desenvolvido pelo Conselho Brasileiro de Construção Sustentável (CBCS) criou uma metodologia de *benchmarking* para esta tipologia através da análise de regressão linear utilizando os dados de consumo de energia elétrica, auditorias energéticas, e correções climáticas (BORGSTEIN; LAMBERTS, 2014). Para criação da regressão linear para a previsão do consumo de energia, levou-se em consideração os graus-hora de resfriamento da cidade da agência, calculados a partir da temperatura de bulbo úmido e com uma temperatura de base de 15 °C. Assim, o consumo de energia foi calculado de acordo com a Equação 4.

$$EUI = 136,5 + 0,001984 \times GHR_{bu,15}$$

Equação 4

$GHR_{bu,15}$  = Graus – hora de resfriamento com base 15°C, bulbo umido

Para verificar a eficiência da agência em relação às demais, no site do CBCS (<http://benchmarkingenergia.cbcs.org.br/>) há uma plataforma que calcula o consumo de

energia e classifica a edificação como eficiente, típica ou ineficiente. A forma de como a plataforma realiza os cálculos está exemplificada na Figura 4.

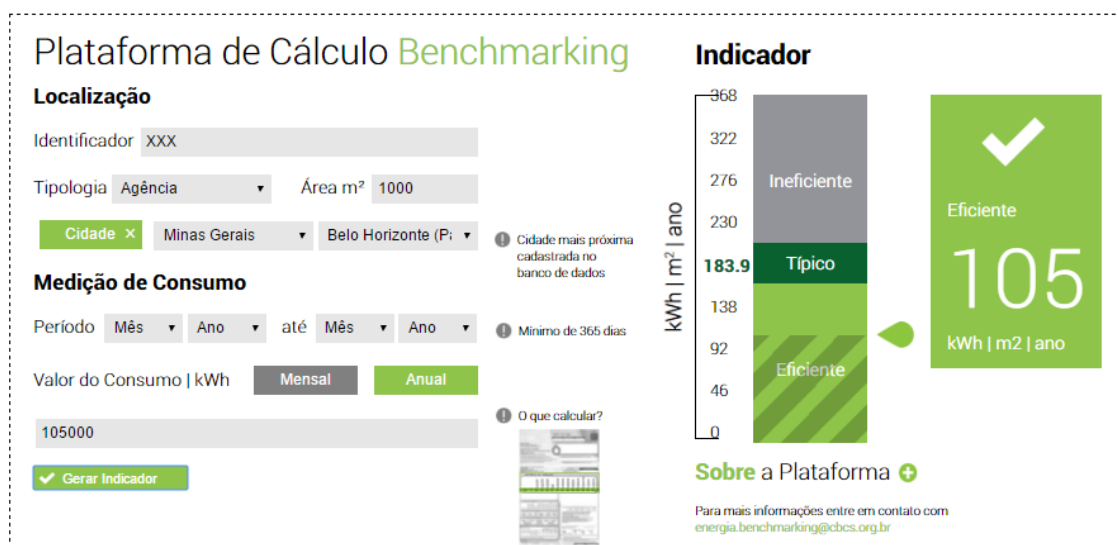


Figura 4: Plataforma de cálculo do *benchmarking* para as agências bancárias no Brasil.

Fonte: [http://benchmarkingenergia.cbcs.org.br/plataforma\\_calculo.html](http://benchmarkingenergia.cbcs.org.br/plataforma_calculo.html)

O CBCS Também desenvolveu um *benchmarking* para escritórios corporativos, caracterizados como possuindo mais de 18 andares, área de laje acima de 700m<sup>2</sup> e alta densidade de consumo energético, devido ao número de computadores e presença de centrais de processamento de dados (CPDs). A área condicionada é próxima a 100% de sua área útil, com predominância de sistemas centrais de ar condicionado utilizando água gelada e VRFs (CBCS, 2016).

Para o estudo, foram utilizadas 249 edificações das cidades de São Paulo, Rio de Janeiro, Brasília, Florianópolis, Curitiba, Salvador e Porto Alegre: 95 edifícios disponibilizaram dados para consumo de áreas comuns, 157 edifícios contaram com dados de consumo total (apenas três edifícios tinham consumos medidos de áreas comuns e áreas privadas separadamente). Para o cálculo do *benchmarking* foram levados em consideração os Grau-horas de resfriamento, bulbo úmido, com temperatura base de 15°C<sub>BU</sub> (GHR), área dos estacionamentos cobertos (Aestac), área útil condicionada da edificação (Autil), densidade média de funcionários (Nf,média), número de andares (Nandar), número de elevadores (Nelev), consumo energético anual medido do CPD (ECPD) e consumo elétrico anual da cozinha (ECOZ). O *benchmarking* pôde ser calculado de acordo com a Equação 5.

$$E_{benchmarking} = c_0 + c_1 \cdot GHR + c_2 \cdot A_{estac} \cdot A_{util} + c_3 \cdot N_{f,média} - N_f + c_4 \cdot N_{andar} \cdot N_{elev} \cdot A_{util} + E_{CPD} \cdot A_{util} + E_{COZ} \cdot A_{util} \quad \text{Equação 5}$$

Para o cálculo do benchmark típico, são adotados os seguintes valores dos coeficientes de regressão  $c$ :

$$c_0 = 145,15; c_1 = 0,39; c_2 = 14,4; c_3 = 4,15; c_4 = 700$$

Para o cálculo do benchmark de boa prática, são adotados os seguintes valores:

$$c_0 = 111,31; c_1 = 0,33; c_2 = 10,0; c_3 = 4,15; c_4 = 700$$

Assim como no *benchmarking* das agências bancárias, no site do CBCS também há uma plataforma de cálculo para o *benchmarking* dos edifícios corporativos. A forma como a plataforma realiza os cálculos é apresentada na Figura 5.

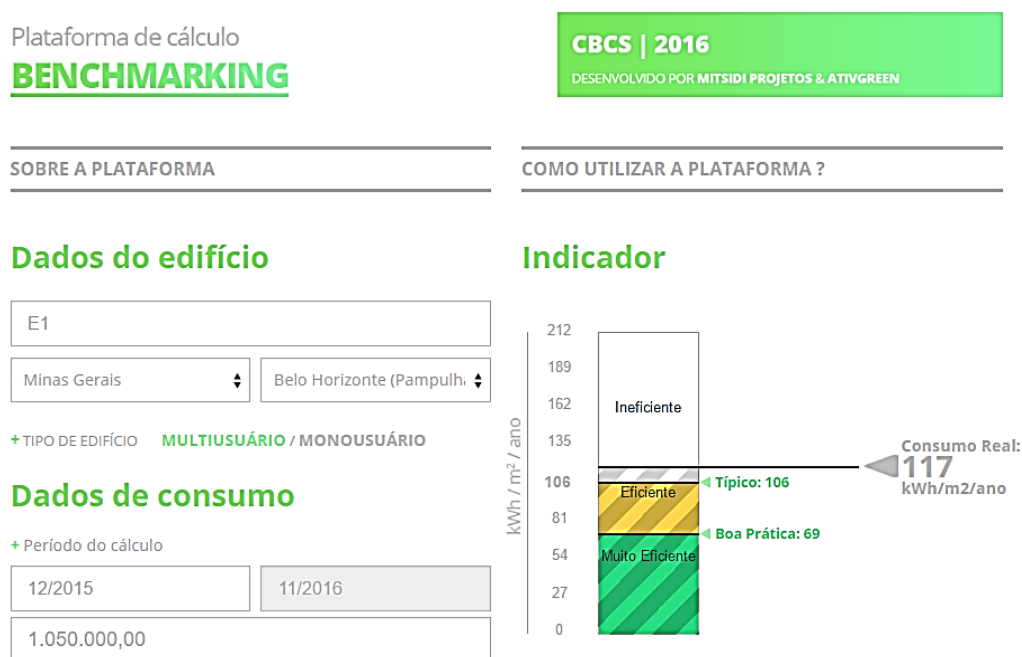


Figura 5: Plataforma de cálculo do benchmarking para os edifícios corporativos no Brasil.

Fonte: [http://benchmarkingenergia.cbcs.org.br/plataforma\\_calculo.html](http://benchmarkingenergia.cbcs.org.br/plataforma_calculo.html)

## 2.4 Análise de Sensibilidade

Pode-se entender que edificações de diferentes tipologias têm características diferentes entre si e, com isso, é de fundamental importância o planejamento do experimento para determinação de quais variáveis possuem maior influência no desempenho destas edificações quanto ao consumo de energia. Assim, com o uso de análise de sensibilidade, será possível identificar os parâmetros sensíveis ao consumo de energia elétrica das edificações da tipologia selecionada neste estudo (HOPFE, HENSEN, 2011; LAM, HUI, 1996; SANCHEZ et al., 2014).

A análise de sensibilidade pode ser útil para avaliar a relevância dos parâmetros no processo de modelagem, fornecendo critérios para o julgamento nas diferentes fases do processo de construção do modelo: identificação e discriminação, calibração, corroboração do modelo (SALTELLI, TARANTOLA, CAMPOLONGO, 2000).

A análise de sensibilidade consiste em modificar os dados do modelo, a fim de ver os seus efeitos sobre os resultados (LAM, WAN, YANG, 2008; RODRÍGUEZ et al., 2013; SALTELLI, 2002; SALTELLI, TARANTOLA, CAMPOLONGO, 2000; TIAN, 2013). Ela pode ser usada para determinar quais variáveis de projeto são responsáveis pela maior parte da variância no desempenho do edifício e assim, levar a uma melhor compreensão do desempenho energético desse (HEISELBERG et al., 2009; RODRÍGUEZ et al., 2013).

A análise de sensibilidade pode ser agrupada para dois métodos: o local e global (SALTELLI et al., 2008). O método de sensibilidade local é baseado na variação de um parâmetro de projeto, enquanto todos os outros parâmetros de projeto são mantidos constantes. Este método é útil para comparar a importância relativa de vários parâmetros de projeto. Este método não permite verificar a interação entre as variáveis. Já o método de sensibilidade global se refere à variação de todos os parâmetros simultaneamente (HEISELBERG et al., 2009; MARA; TARANTOLA, 2008; TIAN, 2013)

Um edifício de escritórios de cinco andares em Londres (classificação Köppen – Cfb), com eficiência energética classificada como boas práticas, foi escolhido por Tian *et al.* (2014) para avaliar o desempenho térmico usando o método de *bootstrap*. Este é um método de reamostragem dos dados originais, ou seja, que permite a obtenção de um novo conjunto de dados a partir dos dados existentes (EFRON; TIBSHIRANI, 1993). Para a análise de

sensibilidade foi utilizado o SRC (*Standardized Regression Coefficient*). Os parâmetros analisados foram de transmitância de paredes, cobertura e vidro, fator solar do vidro, carga de iluminação e equipamentos, temperatura de *setpoint* de resfriamento e de aquecimento, taxa de infiltração, eficiência do boiler e o COP do *chiller*. Os fatores que aumentam o consumo de energia para aquecimento, foram a temperatura de *setpoint* de aquecimento, o valor da transmitância do vidro e taxa de infiltração. Já no consumo de energia para resfriamento, o fator solar dos vidros, carga de equipamentos aumentaram o consumo e a temperatura de *set point* para resfriamento e o COP do *chiller* foram os fatores que tiveram efeito de redução no consumo de energia.

Outra forma de análise é através do experimento fatorial. Este tipo de experimento é aquele em que os fatores são variados em conjunto e, normalmente, estes experimentos se apresentam como a forma mais eficiente de se estudar e avaliar os efeitos de interação entre vários fatores (PINTO, 2003). Esse tipo de análise foi feito na cidade de Atlanta (classificação Köppen – Cfa) para entender quais variáveis que impulsionam o consumo de energia e a demanda nos edifícios comerciais (LANGNER et al., 2012). As variáveis que mostraram ter maior efeito no consumo foram a transmitância dos vidros, carga interna de iluminação, carga interna de equipamentos, pressão estática dos ventiladores e o COP dos *chillers*.

Uma análise paramétrica é aquela cujos dados são provenientes de algum tipo de distribuição de probabilidade. Lam et al (2008) fizeram uma análise de sensibilidade dos parâmetros de projeto para avaliar a sua influência no uso da energia elétrica de dez prédios de escritórios com ar-condicionado em Hong Kong (classificação Köppen – Cwa). Na primeira parte do trabalho, as dez edificações foram simuladas e sua energia calibrada com as contas de energia existentes. A partir disso, foram identificados dez parâmetros para a análise da simulação paramétrica: coeficiente de sombreamento de janela, relação de janela a parede (WWR), carga de equipamentos, carga de iluminação, densidade de ocupação, eficiência do ventilador, temperatura de suprimento da água gelada e o COP do Chiller.

Para cada parâmetro, definido por Lam et al (2008), foram atribuídas faixas de alteração dos valores e as simulações ocorreram de forma individual para verificar o peso de cada variável independente. Verificou-se que os parâmetros que têm a maior influência sobre o consumo de energia foram a carga instalada de equipamentos, a carga de iluminação e o COP do sistema de condicionamento de ar. Já o aumento do *set point* de resfriamento teve uma influência negativa, ou seja, diminuiu o consumo. Os autores verificaram baixa influência dos

parâmetros arquitetônicos como WWR e coeficiente de sombreamento de janela em relação àqueles relativos à variação da carga interna.

Outros estudos que apresentaram uma análise de sensibilidade (CHAN, CHOW, 1998; CHOU, HANG, WONG, 1993; GELETKA, SEDLÁKOVÁ, 2010; LAM, WAN, YANG, 2008; LANGNER et al., 2012; MARIE, EGAN, 2008; MELO, LAMBERTS, 2008; RAJI, TENPIERIK, VAN DEN DOBBELSTEEN, 2015; TIAN et al., 2014; WANG, MATHEW; PANG, 2012; WILDE, TIAN, 2010). Nestes trabalhos, 64% deles analisaram o WWR e o ILD, em 45%, o tipo de vidro e em 36%, a transmitância das paredes, das coberturas e proteções solares. Outros itens avaliados em menos estudos foram: o clima, os horários de uso, o número de ocupantes, a área, a forma e a orientação da edificação.

Na revisão bibliográfica, verificou-se que, na maioria dos trabalhos, as variáveis levadas em consideração para a criação do benchmarking são o ILD (densidade de carga interna) – 91%; área da edificação – 82%; rotina de ocupação – 45% e que as variáveis relativas ao projeto arquitetônico (WWR, transmitância das paredes e coberturas, tipo de vidro, entre outros) correspondem a estudos realizados numa parcela menor de trabalhos – 9 a 27%. Este trabalho utilizou então, para a criação de um benchmarking específico para a cidade de Belo Horizonte, características de projeto arquitetônico – WWR, absorvância solar das paredes, fator de forma, fator de altura, fator solar – e o modo de condicionamento de ar existente das edificações. O objetivo deste tipo de análise foi gerar subsídios para a tomada de decisão de projetistas e agentes governamentais no sentido de diminuir o consumo de energia elétrica na tipologia analisada.

# 3.

## MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo será apresentada a metodologia adotada para atingir os objetivos propostos neste trabalho. Iniciou-se com levantamento de dados de consumo de energia elétrica e das características das edificações para a criação de uma classificação ou *benchmarking*. Com essa classificação definida, foi feita uma análise das variáveis de projeto e definido os pesos destas no consumo de energia dos edifícios de escritório de Belo Horizonte – MG. Na última etapa do trabalho foi feita uma regressão linear multivariada com esses dados obtidos. Estes passos metodológicos são apresentados na Figura 6.

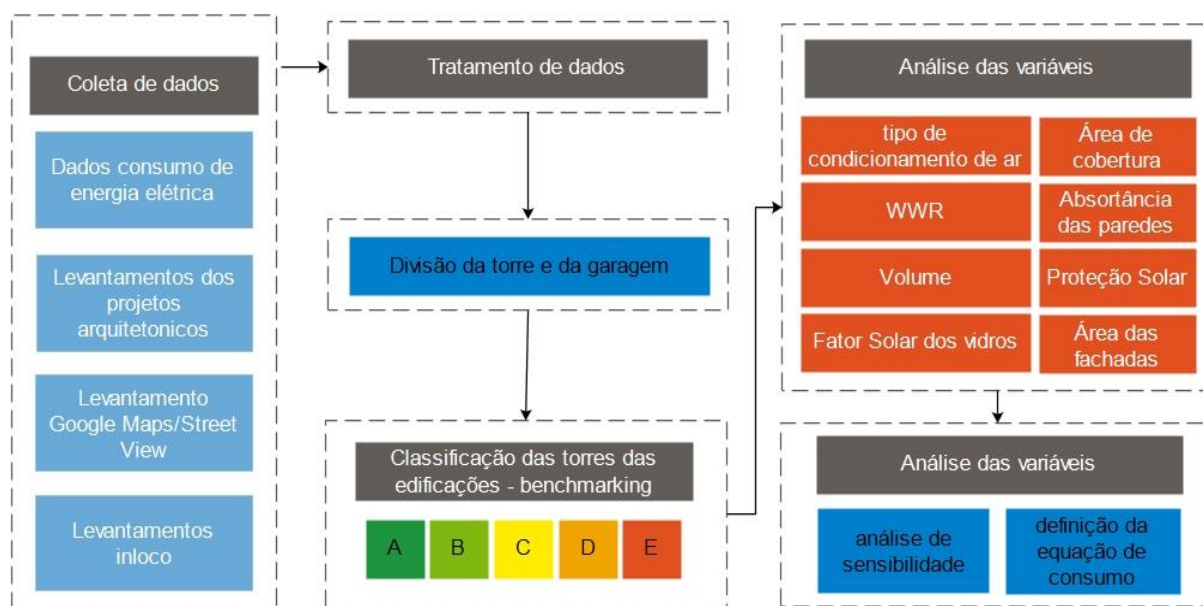


Figura 6: Fluxograma da metodologia proposta.



### **3.1 Levantamento das edificações de escritório de Belo Horizonte**

A estimativa da quantidade de edificações de escritórios presentes na cidade de Belo Horizonte - MG foi desenvolvida a partir de um banco de dados fornecido pela Prefeitura Municipal. Este banco de dados contém informações do IPTU (Imposto Predial e Territorial Urbano) de todas as edificações existentes na cidade que foram aprovadas até 2011. Dentre as informações contidas nesse banco de dados, destacam-se as seguintes:

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

Na cidade de Belo Horizonte - MG, existiam, até o ano de 2011, 1.095 edificações com ocupação de edifícios de uso comercial e/ou de serviços. Para este trabalho, foram selecionadas edificações com no mínimo três pavimentos e área bruta superior a 1.000 m<sup>2</sup>. Com esses critérios estabelecidos, foi identificado um universo de 568 edificações.

Nos projetos levantados, foi possível dividir-se, claramente, as edificações em duas partes: a área de garagens e área da torre. A decisão de dividir a edificação nessas duas partes se deve ao fato de que o maior uso e ocupação da edificação se concentrar na torre, sendo que a parte das garagens é considerada como de uso temporário da edificação. Com isso, para a análise da influência dos parâmetros de projeto no consumo de energia elétrica dos edifícios, este trabalho se ateve somente na análise da torre.

### **3.2 Dados de consumo**

Para a análise do consumo de energia elétrica, foram solicitados à Companhia de Energia de Minas Gerais (CEMIG), os dados de consumo das 568 edificações selecionadas do universo de edificações na cidade de Belo Horizonte - MG. Foram disponibilizados os dados de consumo de 101 edificações. Com isso, essa será a amostra de dados utilizadas neste trabalho.

Para o cálculo da confiabilidade de uma população menor do que 100.000 casos, a equação para populações finitas é:

$$n = \frac{z^2 \times p(1 - p) \times N}{(N - 1) \times ME^2 + z^2 \times p(1 - p)} \quad \text{Equação 6}$$

Para descobrir o nível de confiabilidade (z), consideramos a seguinte equação:

$$z = \sqrt{\frac{n \times (N - 1) \times ME^2}{p(1 - p) \times (N - n)}} \quad \text{Equação 7}$$

Sendo: n - número da amostra; z - nível de confiabilidade; p - proporção amostral (neste trabalho usamos o valor de 0,50, que é o valor da maior variância de uma distribuição Binomial); N - universo de edificações; ME - margem de erro sendo neste caso adotada a probabilidade de erro de 5%.

Com o valor de “z” encontrado, verifica-se na Tabela de Áreas na Cauda Direta sob a Distribuição Normal Padronizada (ANEXO 3), o percentual que representa esse nível de confiabilidade.

Na análise estatística para o dimensionamento de amostras, essas 101 edificações representam uma confiabilidade de 72,86% do que é o universo de edificações de, no mínimo, três pavimentos e com área total bruta acima de 1.000,00 m<sup>2</sup> em Belo Horizonte – MG.

Os dados disponibilizados do consumo de energia elétrica são dos anos de 2012, 2013, 2014, divididos mensalmente e por unidade medidora da CEMIG, sem identificação dessa unidade medidora. Para análise destes dados mensalmente, foram somadas as unidades medidoras de cada edificação no mês específico. O consumo de energia elétrica médio anual de cada edificação utilizado no presente trabalho representa a soma do consumo mensal dividido pelo número de meses da amostra (considerada útil) multiplicado por 12.

No banco de dados recebido, não foi possível discriminar qual era o andar ou a sala ou as áreas de uso comum da edificação, por razões de sigilo da Concessionária, o que levou à necessidade da criação de uma metodologia para obter-se o consumo da torre de escritórios de cada edificação. Esta metodologia tem seus passos descritos a seguir.

### 3.2.1 Taxa de Vacância

Um ponto relevante observado nos dados de consumo de energia das edificações recebidas pela CEMIG foi relativo à taxa de vacância. Em muitos meses, algumas das unidades medidoras apresentaram consumo de energia elétrica de 0 a 10 kWh. Com isso, foram descartados os meses que tiveram estes consumos, uma vez que, para este estudo, foi considerado que se tratavam de unidades medidoras desocupadas.

Para o cálculo da taxa de vacância (TxVac), foram considerados, meses de consumo fornecidos pela CEMIG (n), as unidades medidoras que tinham o consumo menor que 10 kWh, dividido pelo número total de unidades medidoras, como pode ser visto na Equação 8 e na Equação 9. Com isso, foi possível determinar qual o percentual de meses em que o consumo de energia da edificação esteve em vacância.

$$TxVac_{mensal} = \frac{n^{\circ} \text{ de unidades medidoras com consumo } \leq 10kWh}{n^{\circ} \text{ total de unidades medidoras enviados pela CEMIG}} [\%] \quad \text{Equação 8}$$

$$TxVac = \frac{\sum TxVac_{mensal}}{n} \quad \text{Equação 9}$$

Ressalta-se que esta taxa de vacância corresponde somente à vacância do consumo de energia das unidades medidoras fornecidas pela Concessionária, não correspondendo à vacância por área da edificação. Outro ponto importante a ser ressaltado é que esta taxa de vacância foi aplicada somente na porção da torre já que, nas garagens, não existe ambientes que possam existir a vacância.

### 3.3 Levantamento das características das edificações

A partir da seleção das edificações que seriam estudadas neste trabalho, foi necessário o levantamento das características das edificações por *Google Maps/Street View*, por uma base de dados da Prodabel, por visitas *in loco* e, posteriormente, foram obtidos dados refinados de 50 edificações da base de dados da Prefeitura Municipal.

Em um primeiro momento, utilizou-se a base de dados da Prodabel, que está em formato .dwg e contém a projeção de todas as edificações de Belo Horizonte - MG. Para estimar

o volume, área de envoltória e percentual de abertura nas fachadas (WWR, *Window to Wall Ratio*) somente da parte da torre, utilizou-se da metodologia descrita a seguir:

### 1. Volume

Para estimar o volume das edificações foi necessário levantar três itens: número de andares, altura piso a piso e área de projeção da edificação. O número de andares foi levantando pela base de dados do IPTU e foi verificado pelo *Google Maps/ Street View* quantos destes andares estavam acima do nível da rua, ou seja, quantos não eram considerados subsolo. A altura piso a piso foi determinado da seguinte forma: prédios totalmente condicionados – altura piso a piso de 3,15 metros e prédios com modo misto de condicionamento de ar (MM) ou sem condicionamento de ar – altura piso a piso de 2,90 metros. Assim, o volume foi determinado da seguinte forma:

$$V = n^{\circ} \text{ de andares} \times \text{pé direito} \times \text{área de projeção da edificação} \quad \text{Equação 10}$$

### 2. Área das fachadas

Para estimar a área de fachada das edificações, foi utilizado o perímetro da projeção da edificação, a altura piso a piso e o número de andares. Vale ressaltar que, em alguns prédios, as fachadas faziam divisa com outros prédios e, assim, foi necessária a retirada dessas áreas do cálculo final da área de fachada, uma vez que a presente análise é relativa às superfícies que trocam calor diretamente com o ambiente externo. Assim, a área das fachadas foi determinada da seguinte forma:

$$A_{\text{fach}} = n^{\circ} \text{ de andares} \times \text{pé direito} \times \text{perímetro da projeção da edificação} \quad \text{Equação 11}$$

### 3. Percentual de abertura nas fachadas

Para determinar o percentual de abertura nas fachadas (WWR, *window to wall ratio*) foi feito um levantamento visual, via *Google Maps/ Street View*, e foram estabelecidos 5 faixas percentuais: 10%, 20%, 30%, 40% e 50%. Além disso, foram também levantados a absorvância solar das paredes, o fator solar dos vidros, o modo de condicionamento de ar e a existência de proteção solar. Abaixo serão detalhados os critérios adotados para o levantamento de cada item.

#### 4. Absortância à Radiação Solar das paredes

Segundo a NBR 15220-1 (ABNT, 2005), a absortância à radiação solar ( $\alpha$ ) é o “quociente da taxa de radiação solar absorvida por uma superfície pela taxa de radiação solar incidente sobre esta mesma superfície”.

No caso das amostras deste trabalho, há uma grande variação entre as cores existentes nas fachadas tanto entre e nas próprias edificações. Com o difícil acesso aos dados de especificação de projeto ou à edificação para uma possível medição, foi necessário estabelecer faixas de absortância que correspondessem à média ponderada de absortância das fachadas.

Para determinar a absortância das paredes foi utilizado a dissertação de Ribeiro (2016) na qual foi apresentada uma tabela de absortância de várias tintas com base nas absortâncias medidas para tintas comercializadas no Brasil (acrílica fosca, acrílica semi-brilho e látex PVA fosca). Foram utilizados os valores estabelecidos para a absortância de pintura envelhecida, uma vez que as edificações analisadas não são novas.

A escala da tabela apresenta 5 escalas de cores: brancos; amarelos; vermelhos e marrons; azul e verdes; cinzas e pretos. Para simplificar a categorização das edificações quanto à absortância à radiação solar, foi feita uma média das absortâncias de cada categoria. Não havia amostras de edificações com a cor vermelho e, portanto, na categoria Vermelho e Marrom, foram selecionadas somente as absortâncias das cores marrom. Assim, os valores de absortância utilizados neste trabalho estão apresentados na Tabela 7.

Tabela 7: Absortância das cores.

Categoria	Absortância para pintura envelhecida	
	Lisa (%)	Rugosa (%)
Branco	39,1	50,5
Amarelos	51,5	54,8
Azuis e Verdes	66,1	68,7
Marrons	72,5	78,2
Cinzas e Pretos	75,8	78,8

Fonte: Ribeiro (2016) adaptado pelo autor

A Figura 7 mostra as cores mais predominantes na amostra. É clara a predominância das cores amarelas (39%), cinzas e pretas (27%) e marrons (25%) nas edificações da amostra. As cores menos frequentes verificadas foram as brancas (5%) e as azuis e verdes (4%).

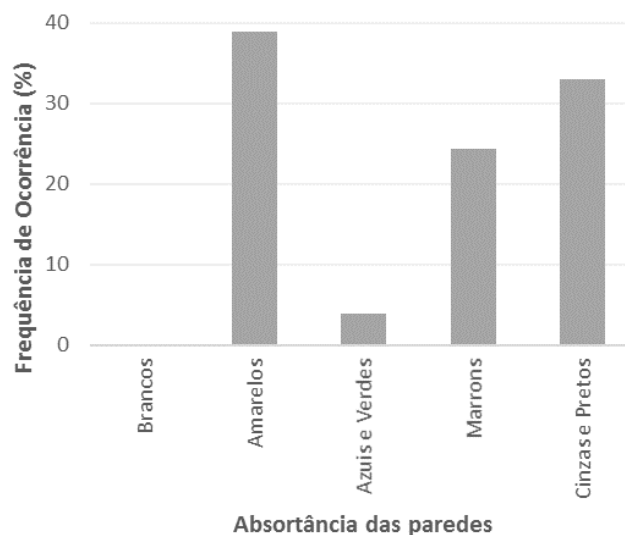


Figura 7: Frequência de Ocorrência das Absortâncias solar das Paredes presente na amostra de edificações.

## 5. Fator Solar dos Vidros, FS

De acordo com a NBR 15220-1 (ABNT, 2005), o FS é calculado pela razão entre o ganho de calor em um ambiente, através de uma abertura, e a radiação solar incidente nesta mesma abertura. Uma das maiores dificuldades encontradas nos levantamentos foi identificar o tipo de vidro instalado nas edificações, já que os projetos arquitetônicos não trazem este tipo de especificação.

Nos trabalhos de Carlo (2008) e Ribeiro (2016) foram discutidas a mesma dificuldade. As autoras usaram uma estimativa feita a partir do ano de construção da edificação, das cores dos vidros, da existência de película e de sua espessura aproximada para a determinação do Fator Solar do Vidro. Ribeiro (2016) dividiu os vidros em 02 grupos: vidros produzidos antes de 1990 - identificados primordialmente como os vidros *float* incolor, coloridos e com películas; e vidros produzidos a partir do ano 2000, chamados de vidros de controle solar. Os dados de Fator Solar determinados pela autora, e que serão utilizados neste trabalho, estão apresentados na Tabela 8.

Tabela 8: Tabela de Fatores Solares dos vidros.

Tipo de vidro	Incolor	Fume	Verde	Azul	Cinza	Bronze
Monólíticos						
Sem reflexão	0,83	0,63	0,66	0,58	0,55	0,58
Baixa reflexividade	0,46	-	0,52	0,38	0,47	0,54
Alta refletividade	0,44	-	0,36	0,32	0,39	0,45
Laminados						
Sem reflexão	0,57	-	0,45	0,32	0,43	0,54
Baixa reflexividade	0,42	-	0,39	0,36	0,41	0,45
Alta refletividade	0,29	-	0,31	0,31	0,27	0,42

Fonte: Ribeiro (2016)

A Figura 8 apresenta as cores predominantes dos vidros das edificações da amostra. Cerca de 37% das edificações possui vidro incolor sem reflexão. Outro tipo de vidro, que tem representatividade na amostra, são os vidros cinzas, com 28% de predominância, e os cinzas, de alta refletividade com 12%. Além disso, os vidros sem reflexão são a maioria da amostra, com cerca de 54%. A menor predominância são os de cores azuis (4%) e verdes (9%) e com os vidros de alta reflexão (16,5%).

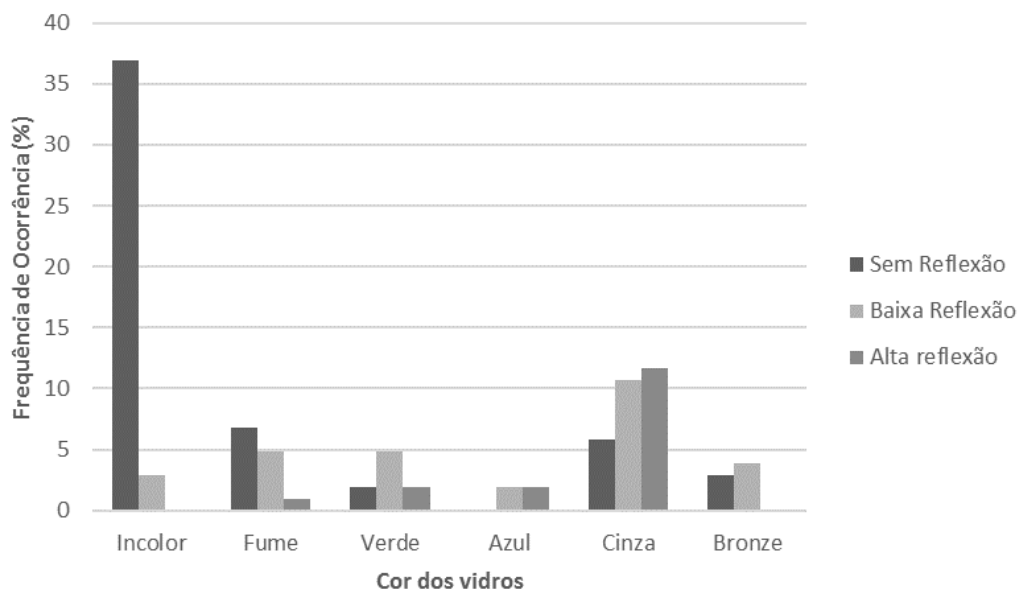


Figura 8: Frequência de ocorrência das cores e reflexões dos vidros presente na amostra de edificações.

## 6. Modos de condicionamento de ar

Foram determinados dois tipos de edificações em relação à presença de condicionamento: totalmente condicionadas (TC) e condicionadas em modo misto (MM).

Além disso, foram identificadas edificações que não tinham nenhum tipo de condicionamento de ar (NC). A caracterização das edificações está determinada abaixo:

- Edificações totalmente condicionadas (TC): são aquelas edificações que apresentam algum dos sistemas: Sistema Central de Água Gelada (CAG / Fancoil), VRF, Sells);
- Edificações de modo misto (MM): são aqueles em que algumas salas são condicionadas por unidades individuais de Split, Multisplit ou de Janela e que tem seu funcionamento de maneira híbrida, ou seja, permite a abertura de janelas para ventilação natural e se utiliza de condicionamento artificial parte do tempo de uso.

Nas edificações de modo misto de condicionamento de ar (MM) não foram determinadas a quantidade de unidades condicionadoras existentes e nem o percentual de espaços condicionados por dificuldade de acesso ao interior das edificações. A Figura 9 apresenta exemplos de cada tipologia de edificação em relação ao seu condicionamento de ar.



(a) Edifício totalmente condicionado



(b) Edifício de modo misto de condicionamento de ar



(c) Edifício naturalmente ventilado

Figura 9: Edificações exemplo de cada tipologia edificação.

Para a determinação do modo de condicionamento de ar que as edificações possuem, foi utilizado somente o *Google Maps* com *Street View*. Como não foi possível a visita nessas edificações, não foram feitas a caracterização desses sistemas, como COP de chillers para os



edifícios com condicionamento central de ar e classificação de eficiência energética junto ao PBE (Programa Brasileiro de Etiquetagem do INMETRO) para os aparelhos Split/Janela.

A Figura 10 mostra o modo de condicionamento de ar mais predominante na amostra de edificações presentes na cidade de Belo Horizonte - MG. É evidente na amostra que a maioria das edificações apresenta o modo misto de condicionamento de ar (MM), com cerca de 65% do total. As edificações que não apresentam qualquer modo de condicionamento (NC) são as que apresentam menor representatividade, sendo 11% da amostra.

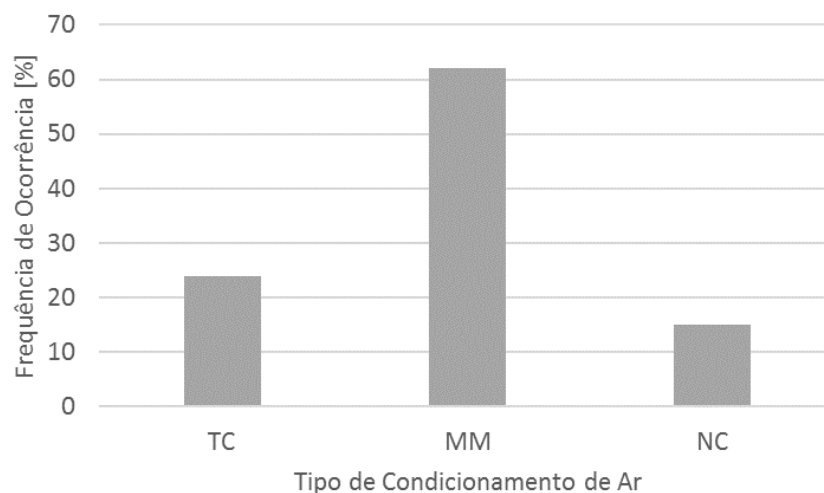


Figura 10: Frequência de ocorrência do modo de condicionamento de Ar presente na amostra de edificações.

## 7. Proteção solar

Foi analisada, nas edificações da amostra, a existência ou não de algum tipo de proteção solar. As edificações que possuíam algum tipo proteção solar (brise horizontal ou vertical) em pelo menos uma fachada foi contabilizada. Não foram levantados o tamanho ou o ângulo dessas proteções por não existirem nas plantas dos projetos arquitetônicos tais detalhamentos. A maior frequência de ocorrência da amostra é de edificações que não apresentam proteção solar nas fachadas, cerca de 86% (Figura 11).

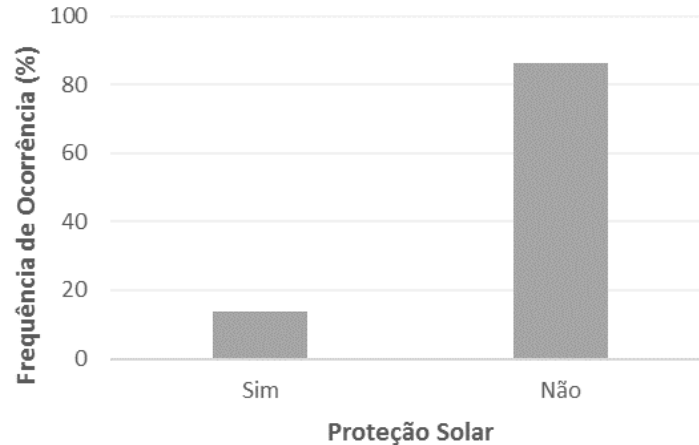


Figura 11: Frequência de ocorrência da presença ou não de proteção solar nas fachadas da amostra de edificações.

Além dos levantamentos feitos pelo *Google Maps*, foram feitas 64 visitas *in loco* às edificações da amostra para o levantamento da potência instalada de iluminação das garagens, número de elevadores e verificação de eventuais alterações no projeto arquitetônico que não se pode verificar via *Google Maps* e nem nas plantas arquitetônicas. Foi possível identificar nos projetos arquitetônicos, que 23 edificações da amostra não apresentavam garagens, e nestas foram consideradas que a área da edificação fornecida pelo IPTU ou pelas plantas arquitetônicas é igual à área da torre. Abaixo são detalhados os critérios usados em cada item do levantamento realizado.

Para que se pudesse subtrair do consumo das torres o consumo das garagens e parte do consumo das áreas de uso comum, foram levantadas as características do sistema de iluminação instalado e o número de elevadores das edificações da amostra. A potência instalada multiplicada pelo número de horas de uso foi usada para definir-se então, o consumo de energia elétrica destes dois itens.

#### 1. Potência instalada de iluminação das garagens e dos elevadores

No levantamento da potência instalada das garagens e dos elevadores foram definidos:

- Iluminação: levantamento da quantidade de lâmpadas com suas respectivas potências e a quantidade de luminárias. Com isso, para a potência instalada de iluminação, multiplicou-se o número de lâmpadas por sua respectiva potência, acrescentando 10% de carga para considerar a dissipação dos reatores da luminária;

- Elevadores: foi considerado que os elevadores tinham a mesma característica em todas as edificações. Foi determinado que a capacidade média dos elevadores era de 6 pessoas. Assim, verificou-se no mercado os fornecedores e os produtos disponíveis. A média de potência destes equipamentos foi feita analisando os dados fornecidos dos catálogos dos fabricantes Otis, ThyssenKrupp e Hyundai. Com isso, foi considerada uma potência média dos elevadores de 7,5 kW.

## 2. Horário de funcionamento

Para o cálculo de consumo de energia, é necessário o levantamento do tempo de uso dos sistemas e equipamentos instalados. Dessa forma, durante as visitas, foram questionados os horários e os dias de funcionamento do edifício e também das garagens.

- Iluminação: verificado o tempo que as luminárias ficam acesas e a existência de sistema de automação;
- Elevadores: foi determinado o tempo de uso dos elevadores de acordo com os *schedules* de uso determinados na ASHRAE 90.1 (ASHRAE, 2013). Foram considerados em todas as edificações os mesmos horários de uso dos elevadores.

Com isso, para o cálculo de consumo de energia elétrica das torres, foi considerado:

$$C_{torre} = C_{total} - [(P_{ilu} \times t_1 \times d_1) - (P_{elev} \times t_2 \times d_2)] \quad \text{Equação 12}$$

Sendo:

$C_{torre}$  = Consumo de energia elétrica médio anual da torre;

$C_{total}$  = Consumo de energia elétrica médio anual da edificação;

$P_{ilu}$  = Potência total instalada de iluminação das garagens;

$P_{elev}$  = Potência total dos elevadores;

$t_1$  e  $t_2$  = Tempo de uso diário;

$d_1$  e  $d_2$  = Dias de funcionamento no ano.

### 3.4 Projeto arquitetônico

Foi possível obter somente 50 projetos completos. Para o desenvolvimento deste trabalho, as edificações cujos projetos arquitetônicos não puderam ser obtidos tiveram seus dados levantados conforme os procedimentos descritos no item 3.3. Para as edificações em que foi possível obter-se os projetos arquitetônicos o procedimento adotado para os levantamentos realizados é descrito a seguir.

Os microfilmes do projeto da edificação foram recebidos em formato *pdf* e muitos deles estavam incompletos, ou seja, só foram fornecidas as plantas dos andares. Com isso, foi necessário que se redesenhasse todos os projetos no programa AutoCad para que fosse possível quantificar as informações de área, altura piso a piso e para que se pudesse estimar o percentual de aberturas nas fachadas.

As informações que não estavam claras foram estabelecidas os seguintes critérios:

1. Altura piso a piso
  - a. Nos projetos que apresentavam cortes, o valor da altura piso a piso foi retirado do próprio desenho;
  - b. Nos projetos que não apresentavam cortes, mas nos quais as plantas tinham níveis, o valor da altura piso a piso foi estabelecido pela diferença entre os níveis;
  - c. Nos projetos que não apresentavam cortes e nos quais as plantas não tinham níveis, a altura piso a piso foi estabelecido pelo número de degraus da escada multiplicado por 0,18m de espelho.

2. Área das fachadas

As áreas das fachadas foram determinadas a partir do perímetro de cada andar, multiplicado pela altura piso a piso de cada andar. Quando a edificação fazia divisa com outra edificação, ou seja, estava encostada em outra edificação vizinha, essa área não foi contabilizada como área de fachada.

3. Percentual de abertura nas fachadas

Para o levantamento das aberturas presentes nas edificações, foram utilizados os quadros de esquadrias presentes nas plantas. Para os projetos que não tinham quadro de

esquadrias, as aberturas foram levantadas pelos cortes e fachadas. Para os projetos que só apresentavam as plantas, foram utilizadas as larguras presentes nas plantas e por proporção estimou-se as alturas. O percentual de abertura nas fachadas foi determinado dividindo a área total das aberturas pela área total de fachada da edificação.

#### 4. Pilotis

Em todas as edificações que possuíam pilotis no projeto arquitetônico aprovado, estes foram fechados, constituindo salas ou áreas comuns. Com isso, essa área que inicialmente foi retirada no cômputo de área total pela Prefeitura de Belo Horizonte, fornecida no banco de dados, foi alterada e acrescentada à área da torre da edificação.

Também foram levantadas nas plantas as áreas dos andares, considerando o perímetro externo da edificação. Foi possível ainda identificar nesses projetos quantidade de elevadores existentes nas edificações e o número de subsolos presentes.

Com esses projetos analisados e as questões limitadoras definidas, foi possível obter-se os seguintes dados:

- Área total da edificação;
- Área da torre e das garagens;
- Área total de abertura na fachada;
- Volume da edificação;
- Área de cobertura.

### 3.5 Indicador de desempenho

O indicador de desempenho escolhido para analisar a amostra de dados foi o de Intensidade no Uso de Energia (EUI, *Energy Use Intensity*). Este geralmente é definido como o consumo de energia medido por área útil, ou seja, kWh/m<sup>2</sup>/ano.

### 3.6 Classificação das edificações

Para a classificação das edificações foram somente utilizados o consumo de energia da torre das edificações, pela área correspondente. Com isso, utilizou-se da metodologia da *EN 15217: Energy Performance of Buildings — Methods for expressing energy performance and*

*for energy certification of buildings*. Esta norma apresenta uma metodologia para estabelecer um certificado de eficiência energética para as edificações, incluindo indicadores de desempenho energético e suas classes energéticas em comparação com o *benchmark*.

Para que se pudesse utilizar essa metodologia, algumas alterações tiveram que ser feitas. Primeiramente, um dos parâmetros determinados pela EN 15217 é o  $EUI_R$  - valor consumo de energia típico das edificações – este valor ainda não está determinado para as edificações no Brasil. Assim, o índice para a referência da regulamentação não pode ser calculado como previsto na norma.

Outro índice determinado pela EN 15217 é o valor de consumo de referência do parque imobiliário ( $EUI_S$ ). A norma indica que quando não se tem informações de todo parque imobiliário, este pode ser utilizado de uma amostra de dados existentes. Este índice é então calculado pelo valor mediano de consumo anual de energia elétrica por área das torres da amostra. No caso das edificações da amostra deste trabalho, a distribuição de consumo anual de energia elétrica por área das torres não se caracteriza como normal, e por isso, foi testado para o estabelecimento do  $EUI_S$  tanto o valor da mediana quanto a média. Assim, ao se estabelecer políticas públicas poder-se-á analisar no futuro qual índice apresenta uma distribuição de classificação entre as edificações considerada mais adequada para o cenário a ser proposto.

O cálculo do índice de referência ( $\alpha$ ) está descrito na EN 15217 pela Equação 1, no item 2.2.1 desta tese. Como o  $EUI_R$  não está determinado no Brasil, foi utilizado para este índice ( $\alpha$ ) o valor estabelecido pelo Plano Nacional de Eficiência Energética, que estima um potencial de redução no consumo de eletricidade de aproximadamente 50% com a implementação de ações de eficiência energética. Com isso, neste trabalho  $\alpha = 0.50$ .

A EN 15217 estabelece sete níveis de eficiência – de A a G. No Brasil, para as edificações comerciais, de serviços, públicas e residenciais, este índice varia de A a E. Para que a classificação ficasse com a mesma escala utilizada nas edificações no Brasil, os limites mais extremos estabelecidos na EN 15217 não serão utilizados para a determinação da classificação das edificações no presente trabalho.

O valor de referência do parque imobiliário determinado pela da EN 15217 (2007) é o limite entre as classificações D e E, conforme apresentado na Tabela 9. No caso dos limites

estabelecidos para Belo Horizonte - MG, adotou-se uma escala de A a E, para que esta estivesse de acordo com o sistema de classificação do Programa Brasileiro de Etiquetagem. Neste caso, o valor de referência do parque imobiliário passou a ter seu valor limite estabelecido entre as classificações C e D, seguindo a lógica do sistema da EN 15217 (2007) sem os valores extremos de A e G. Os demais limites estão representados na Tabela 10.

Tabela 9: Tabela dos limites do consumo de energia elétrica estabelecido pela EN 15217.

A	B	C	D	E	F	G
0,5 $\alpha$ EUIs	$\alpha$ EUIs	0,5 (1+ $\alpha$ )EUIs	EUIs	1,25 EUIs	1,5 EUIs	
$\alpha = 0,50$						

Tabela 10: Tabela dos limites do consumo de energia elétrica.

A	B	C	D	E
$\alpha$ EUIs	0,5 (1+ $\alpha$ ) EUIs	EUIs	1,25 EUIs	
$\alpha = 0,50$				

Neste trabalho foram utilizados estes limites para classificação de toda a amostra de edificações. Esta classificação foi objeto de análise de sensibilidade dos dados levantados como representativos do consumo anual de energia elétrica por área das torres da amostra. Também foi apresentada neste trabalho uma proposta de classificação por tipologia de edificação: TC (edifícios totalmente condicionados), MM (edifícios com condicionamento de modo misto) e NC (edifícios não condicionados - naturalmente ventilados). No entanto, esta segunda proposta não foi objeto de análise de sensibilidade pois o número de amostras em cada categoria não o permitiu.

### 3.7 Variáveis analisadas

Assim, as variáveis escolhidas para a análise no presente trabalho são aquelas que também foram utilizadas em alguns trabalhos de *benchmarking* e/ou foram utilizadas no Regulamento Técnico da Qualidade para edifícios Comerciais de Serviços e Públicos (BRASIL,2010). O modo de condicionamento foi utilizado por causa da análise feita no trabalho de Veloso et al. (2017) para as edificações em Belo Horizonte.

As variáveis que foram utilizadas são:

- WWR;

- Fator solar dos vidros;
- Fator de forma (  $\frac{\text{Área da envoltória}}{\text{Volume}}$  );
- Fator de altura (  $\frac{\text{Área da cobertura}}{\text{Área total}}$  );
- Modo de condicionamento de ar;
- Absortância solar das paredes.

### 3.8 Análise de sensibilidade dos dados

Como as edificações têm características diferentes entre si, considera-se de fundamental importância a determinação de quais variáveis possuem maior influência no desempenho destas edificações quanto ao consumo anual de energia elétrica por área das torres. Assim, com o uso de análise de sensibilidade, foi possível identificar os parâmetros sensíveis ao consumo anual de energia elétrica por área das torres da amostra.

Neste trabalho serão utilizados os testes de qui-quadrado, análise de variância e a regressão linear múltipla para verificar essa relação entre as variáveis de projeto e o consumo anual de energia elétrica por área das torres.

#### 3.8.1 Teste de Qui-quadrado de Pearson

O teste de qui-quadrado de independência está associado a duas variáveis categóricas, ou seja, a uma análise bidimensional. Este teste serve para comparar se as frequências observadas em certas categorias se desvia significativamente ou não das frequências esperadas (FIELD, 2009). A estatística resultante do qui-quadrado de Pearson ( $x^2$ ) é dada pela equação:

$$x^2 = \sum \frac{(fo - fe)^2}{fe} \quad \text{Equação 13}$$

Onde  $fo$  é a frequência observada e  $fe$  é a frequência esperada.



As frequências observadas são obtidas pelos dados da amostra e as frequências esperadas são calculadas de acordo com a equação 12. Portanto, para aplicação destes testes, os grupos devem ser independentes e as observações pertencerem somente a uma categoria.

$$fe = \frac{(total\ da\ linha) \times (total\ da\ coluna)}{total\ geral} \quad \text{Equação 14}$$

Além disso, deve-se calcular os graus de liberdade. Estes são determinados em função do número de linhas (categorias) e do número de colunas (amostras). Com isso, os graus de liberdade são calculados de acordo com a Equação 15.

$$GL = (h - 1) \cdot (k - 1) \quad \text{Equação 15}$$

Onde h o número de linhas e k o número de colunas.

Os valores críticos de qui-quadrado de Pearson são tabelados (Anexo 1) em função dos graus de liberdade e pelos níveis de significância. Assim, deve-se comparar o valor tabelado e o valor calculado. Caso o valor calculado seja menor que o valor crítico tabelado ( $\chi^2_{calculado} \leq \chi^2_{critico}$ ), aceita-se a hipótese nula ( $H_0$ ), caso contrário,  $H_0$  é rejeitada.

Neste trabalho as variáveis qualitativas analisadas foram: modo de condicionamento de ar, fator solar dos vidros, absorvância solar das paredes e presença ou não de proteção solar. Estas variáveis foram associadas às classificações de eficiência energética obtidas pelas edificações de acordo com a metodologia proposta no item 3.6 desta metodologia.

### **3.8.2 Análise de variância**

A análise de variância (ANOVA) é uma técnica que pode ser usada para determinar se as médias de duas ou mais populações são iguais (STEVENSON, 2001). Os pressupostos da ANOVA são:

- Normalidade: a variável quantitativa deve ter uma distribuição aproximadamente normal;

- Homocedasticidade: a variável quantitativa deve ter variâncias semelhantes entre os grupos da variável qualitativa;
- Aleatoriedade: amostras devem ser probabilísticas;
- Independência: os grupos da variável qualitativa devem ser independentes.

A variância de uma amostra é a média dos quadrados dos desvios em relação à média do grupo (STEVENSON, 2001). Com isso, o cálculo da variância *entre* as amostras (VEA) é dado pela Equação 16 e a variância *dentro* das amostras (VDA) é dada pela Equação 17.

$$VEA = \frac{\sum n_i(x_a - x_t)^2}{n_t - 1} \quad \text{Equação 16}$$

$$VDA = \frac{\sum (n_i - 1)^2 s_i}{n_t - k} \quad \text{Equação 17}$$

Onde:

$n_i$ : é o tamanho de cada amostra;

$x_a$ : é a média de cada amostra;

$x_t$ : é a média das médias;

$n_t$ : é o número total de casos de todas as amostras;

$s_i$ : é a variância de cada amostra;

$k$ : é o número de grupos sendo comparados.

As frequências esperadas ( $fe$ ) são obtidas pela divisão das variâncias entre as amostras (VEA) e as variâncias dentro das amostras (VDA) (Equação 18). Neste teste, a hipótese nula é de que as diferenças observadas entre as médias amostrais são devidas as variações aleatórias das amostras e com isso, as médias populacionais são consideradas iguais.

$$fe = \frac{\text{Variância entre as amostras (VEA)}}{\text{Variância dentro das amostras (VDA)}} \quad \text{Equação 18}$$

O valor de frequência crítica ( $F_{\text{crítico}}$ ) é tabelado e para verificar o seu valor, deve-se considerar o nível de significância do teste ( $\alpha$ ), os graus de liberdade do numerador ( $k-1$ ) e graus de liberdade do denominador ( $n_t - k$ ) (Anexo 1).

Neste trabalho as variáveis qualitativas analisadas foram: fator de forma, fator de altura e WWR. Estas variáveis serão associadas às classificações de eficiência energética obtidas pelas edificações.

### 3.8.3 Regressão Linear Multivariada

A análise de Regressão Linear Multivariada é uma metodologia estatística de previsão de valores de uma ou mais variáveis de resposta (Dependentes) através de um conjunto de variáveis explicativas (Independentes) (KASZNAR). Este tipo de análise pode ser utilizado para avaliação dos efeitos das variáveis em relação às outras (STEVENSON, 2001), verificando uma relação de causa e efeito entre duas variáveis.

Para o desenvolvimento das análises de Regressão Linear Multivariada, foi utilizada como variável dependente o consumo anual de energia elétrica por área das torres das edificações. As variáveis independentes utilizadas foram as mesmas utilizadas no RTQ-C: Fator de Forma, Fator de Altura, WWR, absorvância solar das paredes, Fator Solar dos Vidros além da variável Modo de condicionamento de ar. Foram utilizados para gerar as regressões dados de 75 torres.

Como já foram testadas a correlação entre essas variáveis e o consumo anual de energia elétrica por área das torres, neste item foram verificados também as prováveis inter-relações entre as variáveis. Assim, as variáveis que continham essa relação foram reunidas, e foi elaborada uma regressão linear multivariada. O programa utilizado para gerar as regressões foram o Excel® e o Minitab®.

O formato geral de uma equação de Regressão Linear Múltipla é:

$$Y = a + b_1X_1 + b_2X_2 + \dots + b_xX_x \quad \text{Equação 19}$$

Onde Y é a variável dependente, b são os coeficientes técnicos e x as variáveis independentes.

A respostas das análises destes testes incluem:

- Coeficiente de correlação – R<sup>2</sup>: é o quociente entre a variação explicada e a variação total para todas as Variáveis Independentes. Pode assumir valores entre

0 e 1, sendo o último o que representa a situação onde toda a variação é explicada pelas variáveis independentes;

- Coeficiente de correlação ajustado -  $R^2$  ajustado: é a porcentagem da variação da variável de resposta explicada pela relação com uma ou mais variáveis independentes, ajustada para o número de independentes no modelo. Pode assumir valores entre 0 e 1, sendo o último o que representa a situação onde toda a variação é explicada pelas variáveis independentes;
- O teste F: indica se a equação de regressão é significativa – ou seja, se a relação funcional estabelecida entre a Variável Dependente e os efeitos combinados das Variáveis Independentes são relevantes. Se o valor calculado for maior que o tabelado, a variável independente é significativa para explicar a variável dependente e o contrário, se o valor calculado é menor que o tabelado, a variável não é significativa;
- Teste t: Este teste consiste em calcular a variância de cada coeficiente da regressão e, através de sua raiz quadrada, estabelecer o erro padrão, o que determina se o valor de cada coeficiente é significativamente diferente de 0.

# 4.

## RESULTADOS

### 4.1 Classificação das edificações

Para a classificação das edificações, foi necessário dividir a edificação nas partes que concentram os escritórios (torre) e as garagens. Para que isso fosse possível, foram verificadas as áreas dessas partes plantas fornecidas pela PBH e nos levantamentos *in loco*. Nesses levantamentos *in loco*, foi possível saber que, em 13 edificações da amostra, não haviam garagens, considerando toda a área aprovada como área da torre.

Das 101 edificações, foi possível obter dados de projeto de 50 e, com isso, verificou-se que a área da torre da edificação corresponde, em média, a 80,2% da área total da edificação. Assim, para questão de cálculos futuros referentes às edificações em que não foi possível obter dados de projeto, foi considerada essa porcentagem de área para a torre.

A Figura 12 apresenta a variação das áreas totais das edificações. Nas pontas, estão representadas as variações máximas e mínimas absolutas, e a parte inferior e superior da caixa representam os percentis de 25 e 75% das variações da área total respectivamente. Verifica-se que a variação de área encontrada na amostra é: área total varia de 1.028,43m<sup>2</sup> a 28.643,90m<sup>2</sup>, com um desvio padrão de 5.719,4m<sup>2</sup>; área da torre varia de 745,63m<sup>2</sup> a 25.452,76m<sup>2</sup>, com um desvio padrão de 4.715,34m<sup>2</sup>, a garagem varia de 0,00m<sup>2</sup> a 13.625,00m<sup>2</sup>, com um desvio padrão de 2.036,33 m<sup>2</sup>.

Verifica-se também que a maioria das edificações tem área total até 11.000m<sup>2</sup>, uma área de torre de até 8.900m<sup>2</sup> e de garagem de até 2.200m<sup>2</sup>.

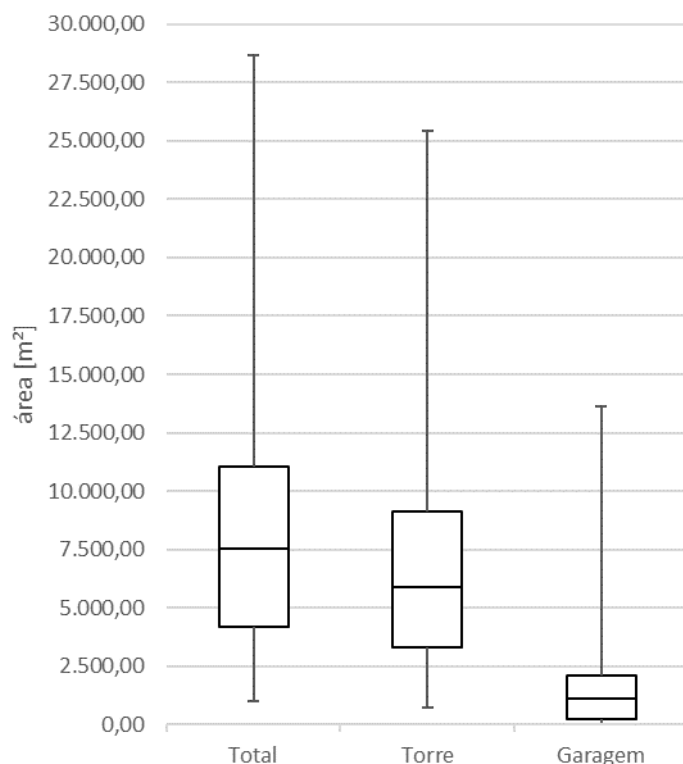


Figura 12. Área total, da torre e das garagens das edificações.

A Figura 13 mostra a variação do consumo de energia elétrica das torres das edificações da amostra. Das 101 edificações da amostra, foi possível levantar o consumo de energia das garagens e, conseqüentemente, estimar, com maior precisão, o consumo da torre em 64 edificações. Com isso, verificou-se que o consumo de energia elétrica da torre corresponde, em média, a 88,3% do consumo total da edificação. Esse percentual foi utilizado nos cálculos das edificações em que não foi possível estimar-se os dados de consumo da garagem.

Em todas as edificações, foi possível saber a taxa de vacância. O percentual dessa taxa de vacância foi acrescentado ao consumo total da torre. A taxa de vacância média das edificações foi de 13,85%.

De acordo com a Figura 13, o consumo de energia elétrica da maior parte das torres está acima de 270.000 kWh por ano, com uma média de 22.500 kWh por mês. As garagens apresentaram consumo de energia elétrica máximo de 299.200 kWh/ano. Assim, como na análise das áreas, poucas edificações consomem muito, apresentando um desvio muito grande entre as edificações.

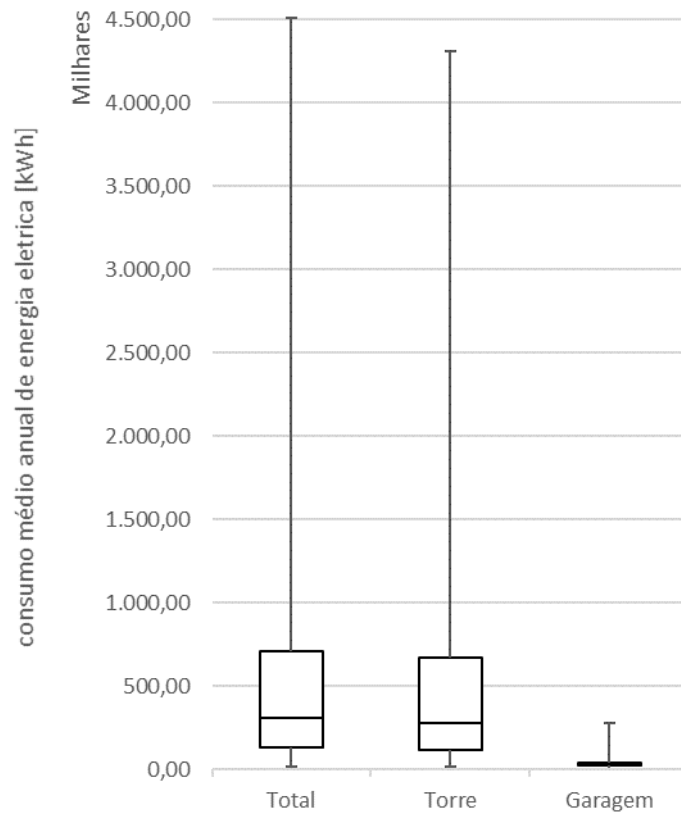


Figura 13: Consumo de energia elétrica total, da torre e das garagens das edificações.

Uma vez determinada a variação do consumo de energia elétrica das edificações e das áreas correspondentes ao prédio total, da torre e das garagens foi possível apresentar a variação do consumo de energia elétrica por área das edificações, como demonstrado na Figura 14. Verifica-se que na torre há uma grande variação no consumo e que 75% das edificações consomem até 100 kWh/m<sup>2</sup>/ano. Outro feito a ser observado é que o valor da mediana é menor do que o valor da média dos valores, devido a essa grande variação no consumo.

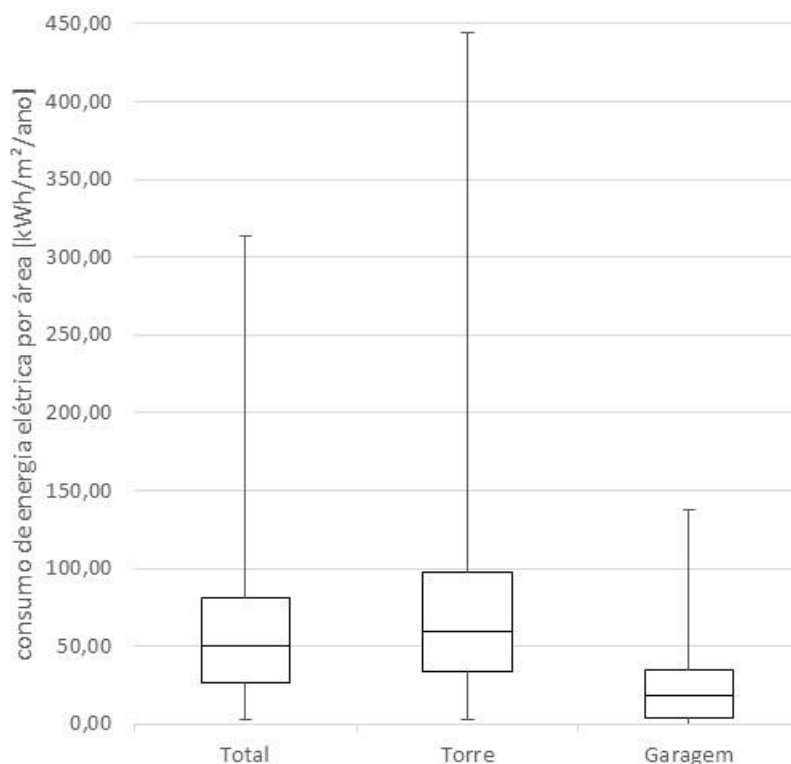


Figura 14: Consumo de energia elétrica por área total, da torre e das garagens das edificações.

Para a criação da classificação das edificações, foi utilizado somente a estimativa do consumo de energia elétrica e da área relativa à torre. Conforme a metodologia utilizada na EN 15217 (2007), foi utilizado o índice de referência ( $\alpha$ ) igual a 0.50. O EUI das 101 amostras de edifícios de escritório de Belo Horizonte - MG varia de 2,57 kWh/m<sup>2</sup>/ano a 444,53 kWh/m<sup>2</sup>/ano, o valor mediano encontrado foi de 60,45 kWh/m<sup>2</sup>/ano e o valor médio de 80,82 kWh/m<sup>2</sup>/ano. Assim, os dois valores de EUI foram testados para a determinação da classificação.

Os valores limites de consumo de energia elétrica anual por área, para a classificação das edificações de Belo Horizonte - MG utilizando o EUIs com o valor da mediana, pode ser visto na Tabela 11.

Tabela 11: Tabela dos limites do consumo de energia elétrica por área de todas as edificações da amostra [kWh/m<sup>2</sup>/ano].

A	B	C	D	E
30,22	45,34	60,45	75,56	



Com os limites estabelecidos, todas as torres foram classificadas e esta classificação pode ser vista na Figura 15. Por essa classificação, cerca de 38% das edificações recebeu a menor classificação, ou seja, E e 24% a maior classificação, A. A classificação que teve o menor número de edifícios foi a classificação B. Observa-se que 50% das torres receberam classificação D e E.

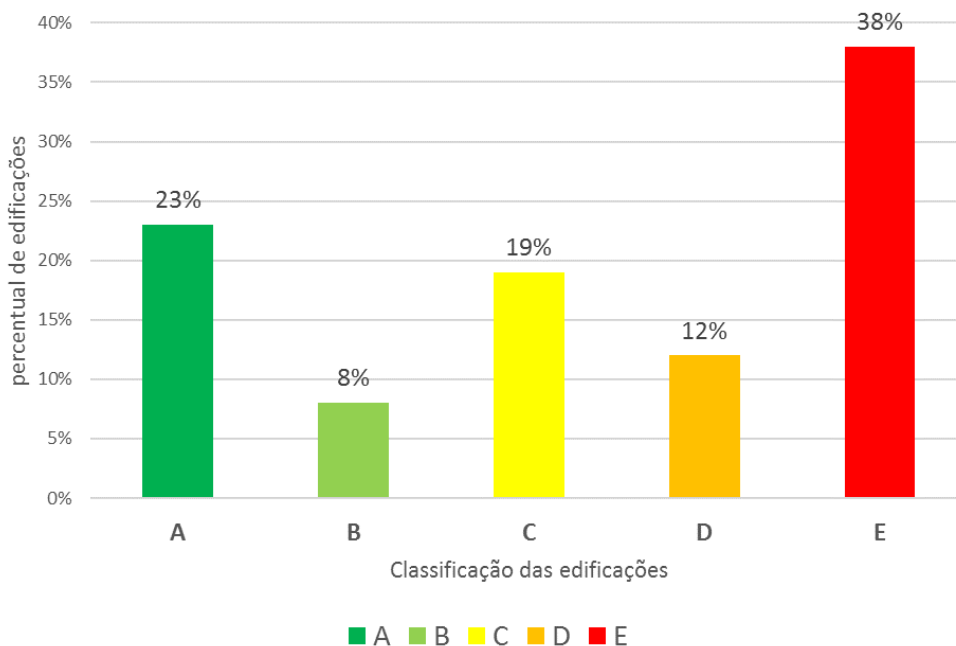


Figura 15: Porcentagem de edificações por classificação.

Utilizando o valor de EUIs como sendo o valor da média de consumo de energia elétrica de todas as edificações da amostra, ou seja, EUIs= 80,82 kWh/m<sup>2</sup>/ano, os valores limites para a classificação estão apresentados na Tabela 12.

Tabela 12: Tabela dos limites do consumo de energia elétrica por área de todas as edificações da amostra [kWh/m<sup>2</sup>/ano].

A	B	C	D	E
40,25	60,38	80,51	100,63	

Na Figura 16 está apresentada a porcentagem de edificações em cada classificação a partir do valor da média de EUI. O que se pode observar é que 50% das edificações receberam classificações C, D e E. Devido à grande variação do consumo anual de energia elétrica por área das torres, a utilização da média no valor do EUIs faz com que haja uma melhor distribuição da classificação das torres e, como sugestão para uma eventual política pública, de

forma a não gerar excessiva resistência no mercado, essa forma de calcular a classificação foi utilizada nas análises a seguir. Um maior número de dados de consumo poderia gerar uma melhor distribuição usando-se a mediana, o que não aconteceu com os dados da presente amostra. Acredita-se que a decisão por se usar a média ou a mediana é uma decisão de âmbito mais político do que técnico.

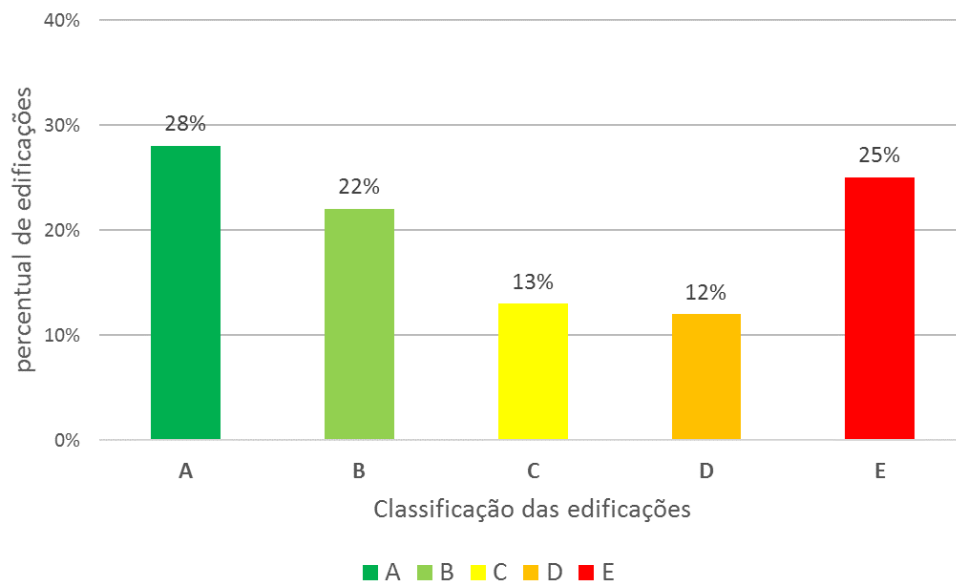


Figura 16: Porcentagem de edificações por classificação.

Outra análise foi feita para verificar as variações no consumo anual de energia elétrica por área das torres em relação ao modo de condicionamento de ar da edificação. Este teste foi feito para a verificação do comportamento e da variação do consumo anual de energia elétrica por área das torres por tipologia de condicionamento de ar.

Assim, as torres foram divididas em três grupos: as torres totalmente condicionadas (TC), as que apresentavam o modo misto de condicionamento de ar (MM) e as que não apresentavam nenhum modo de condicionamento de ar (NC), ou seja, as consideradas como naturalmente ventiladas. Foi aplicada a mesma metodologia utilizada para classificar as torres.

A tipologia de torres totalmente condicionadas (TC), teve 25 amostras. O consumo anual de energia elétrica por área das torres variou de 21,98 a 444,53 kWh/m<sup>2</sup>/ano. A média desta amostra é de 144,51 kWh/m<sup>2</sup>/ano. Assim, os valores limites foram definidos e apresentados na Tabela 13. A quantidade de edifícios, em cada classificação, está apresentada na Figura 17. Verifica-se que os limites entre cada classificação foram aproximadamente duas

vezes superiores aos limites estabelecidos para todas as torres e o número de torres com classificação B foi a que apresentou a maior quantidade de torres.

Tabela 13: Tabela dos limites do consumo de energia elétrica por área das edificações totalmente condicionadas [kWh/m<sup>2</sup>/ano].

A	B	C	D	E
72,25	108,38	144,51	180,63	

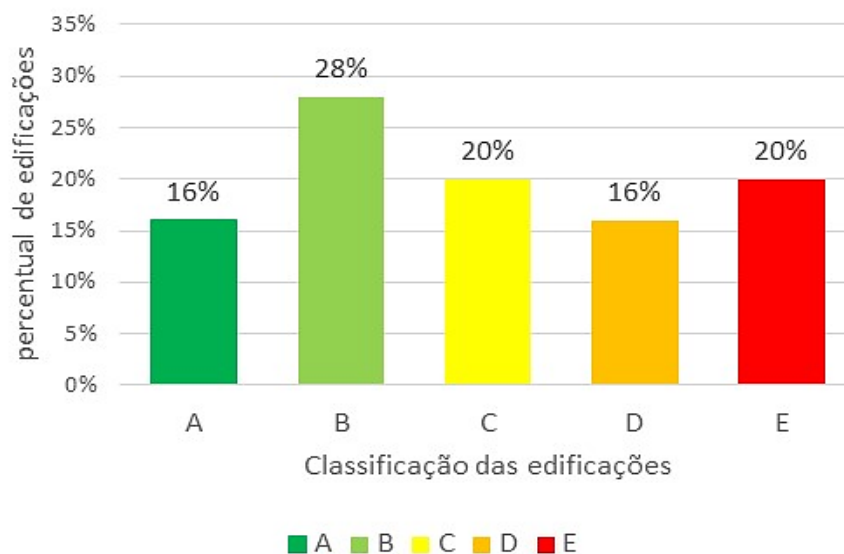


Figura 17: Percentagem de torres totalmente condicionadas (TC) por classificação.

As torres que foram consideradas como sendo operadas em modo misto de condicionamento de ar (MM) representaram 61% da amostra. O consumo anual de energia elétrica por área das torres variou de 2,57 a 216,21 kWh/m<sup>2</sup>/ano. A média desta amostra foi de 61,93 kWh/m<sup>2</sup>/ano. A Tabela 14 apresenta a classificação destas torres e a Figura 18 apresenta a quantidade de torres por classificação. Cabe salientar que para a classificação das torres com modo misto de condicionamento de ar (MM), não foi verificado o percentual de área condicionada e nem a quantidade de aparelhos unitários existentes.

Pode-se também verificar, nas torres de modo misto, que o maior percentual de torres está presente na classificação A (30%), seguido pela classificação E (24%). Os limites estabelecidos são 23% menores que aqueles obtidos para a classificação de todas as torres e, 57% menor do que a classificação obtida para as torres totalmente condicionadas (TC).

Tabela 14: Tabela dos limites do consumo de energia elétrica por área das edificações com modo misto de condicionamento de ar [kWh/m<sup>2</sup>/ano].

A	B	C	D	E
31,80	47,70	63,60	79,50	

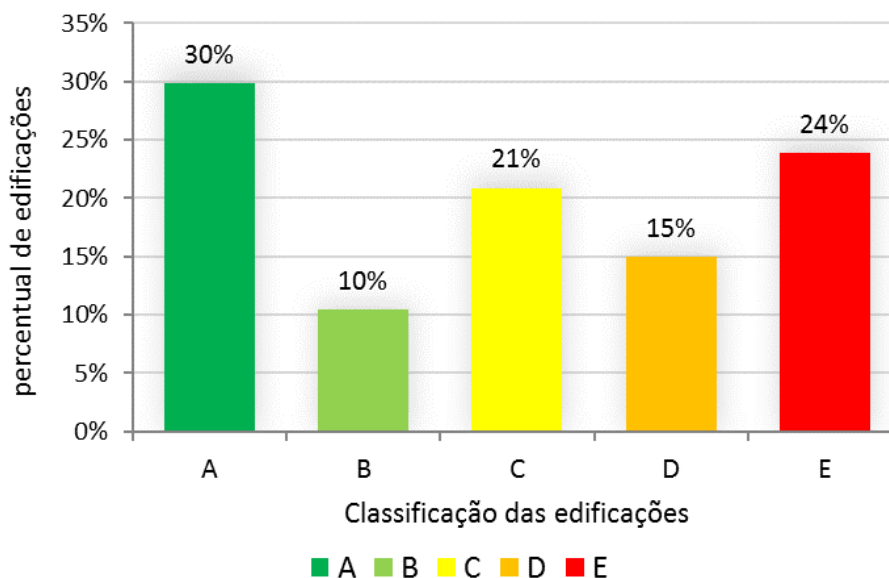


Figura 18: Porcentagem de torres com modo misto de condicionamento de ar (MM) por classificação.

Na amostra haviam 9 torres em que não foi verificada a existência de sistemas de condicionamento artificial de ar (NC). O consumo anual de energia elétrica por área das torres destas variou de 10,09 a 75,84 kWh/m<sup>2</sup>/ano. Os limites para a classificação destas torres estão apresentados na

Tabela 15 e os valores entre as classificações são 46% menores do que a classificação de todas as torres, 60% menores do que a classificação das torres totalmente condicionadas e 25% menores do que a classificação das torres com modo misto de condicionamento de ar (MM).

Tabela 15: Tabela dos limites do consumo de energia elétrica por área das edificações sem condicionamento de ar [kWh/m<sup>2</sup>/ano].

A	B	C	D	E
18,33	27,50	36,67	45,84	

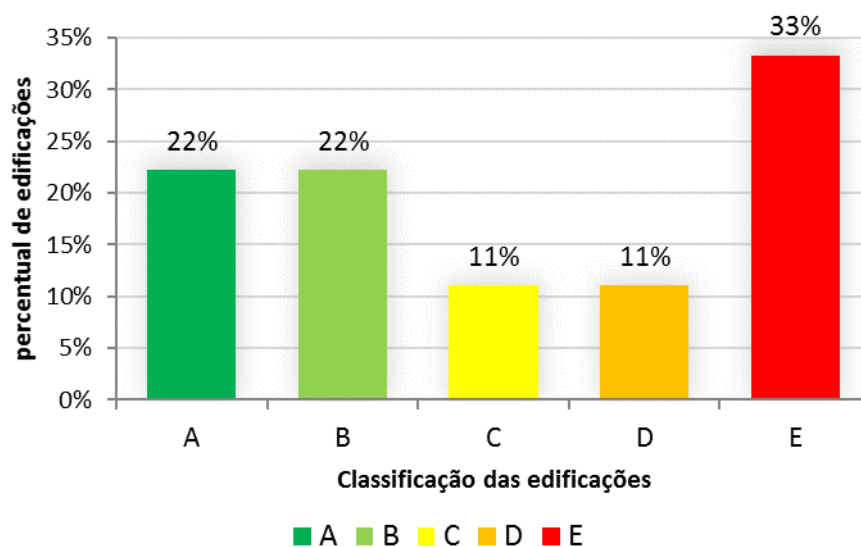


Figura 19: Porcentagem de torres sem condicionamento de ar (NC) por classificação.

Na Figura 20, pode-se verificar que, ao se classificar as torres de edificações como um todo (CG), prejudica-se, de maneira significativa, as torres de edificações com condicionamento de ar central (CC), pois, caso fossem classificadas de maneira específica, elas poderiam ter sua classificação elevada em até 2 níveis. Já para as torres de edificações consideradas como sendo condicionadas naturalmente (CN), a classificação geral faz com que a maioria delas seja classificada como A ou B, enquanto na classificação individualizada por modo de condicionamento, elas teriam classificações variando até a D. O comportamento mais próximo entre as das classificações foi observado entre a classificação geral (CG) e classificação para as torres consideradas como possuindo condicionamento misto (MM).

Nos próximos itens desta dissertação, cabe ressaltar que a classificação utilizada foi a classificação de todas as torres, devido ao pequeno número de amostras existentes para cada modo de condicionamento de torre. Na Figura 20 apresenta os limites de consumo de energia elétrica por área anual encontrados para as Torres sem condicionamento de ar (NC), as Torres com modo misto de condicionamento de ar (MM), as Torres totalmente condicionadas (TC) e a Classificação geral de todas as torres da amostra (CG).

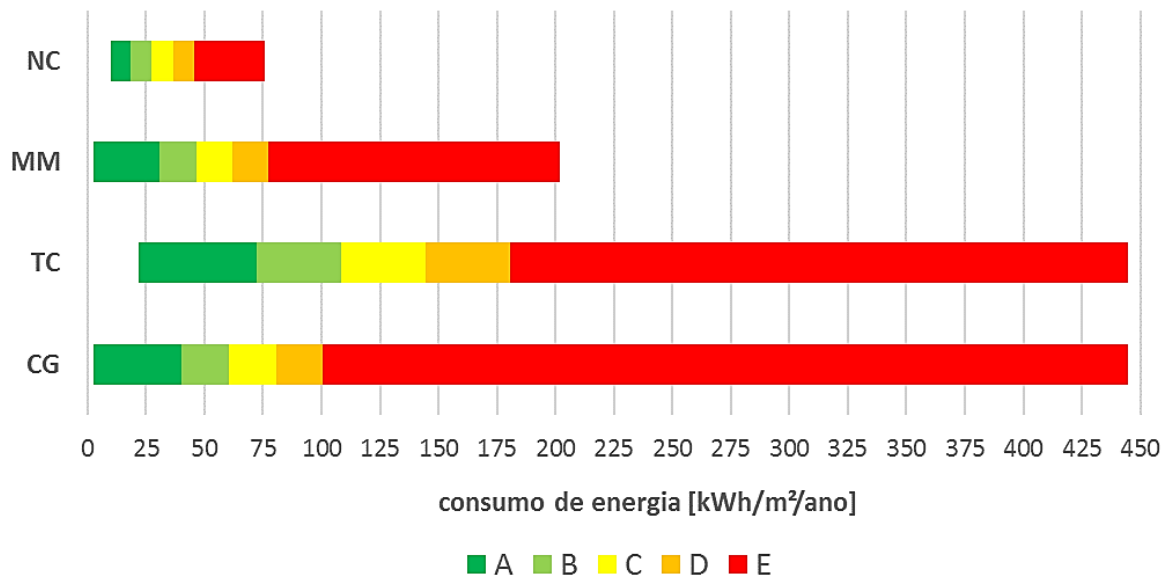


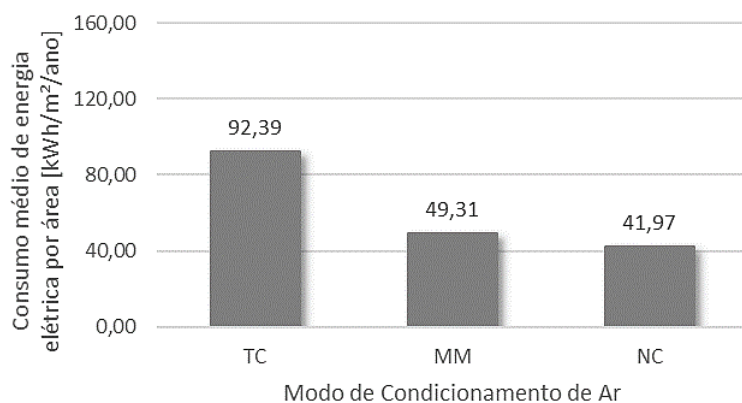
Figura 20: Limite dos consumos de energia elétrica por área de todas as tipologias de torres.

## 4.2 Análise de sensibilidade

Para a análise de sensibilidade dos dados, foi considerada somente a parcela de consumo anual de energia elétrica por área das torres das edificações.

### 4.2.1 Modo de condicionamento de ar

O consumo anual de energia elétrica por área das edificações como um todo por modo de condicionamento de ar é apresentado na Figura 21. Os edifícios totalmente condicionados (TC) foram os que apresentaram o maior consumo anual de energia elétrica por área. O seu consumo anual de energia elétrica por área é 187% maior do que as torres que tem o modo misto de condicionamento de ar (MM) e 220% maior que as edificações consideradas como não possuindo condicionamento artificial do ar. Os edifícios sem condicionamento de ar são aqueles que apresentam o menor consumo anual de energia elétrica por área e esse é 15% menor do que os edifícios que apresentam o modo misto de condicionamento de ar (MM).

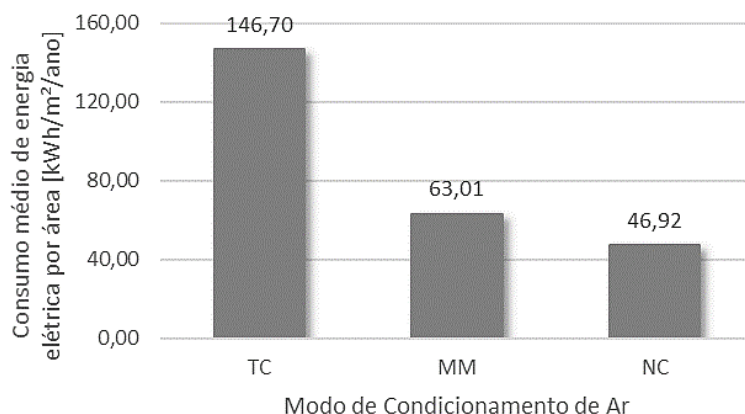


LEGENDA:

TC: torres totalmente condicionadas  
 MM: torres com modo misto de condicionamento de ar;  
 NC: torres sem condicionamento de ar.

Figura 21: Consumo médio anual de energia elétrica por área das edificações como um todo [kWh/m²/ano] por modo de condicionamento de ar.

A Figura 22 compara o consumo anual de energia elétrica por área geral das torres das edificações em relação ao modo de condicionamento de ar. Pode verificar que o consumo anual de energia elétrica por área médio dos edifícios totalmente condicionados (TC) é 233% maior do que o dos edifícios com modo misto de condicionamento de ar (MM) e 313% maior que o dos edifícios sem nenhum tipo condicionamento de ar (NC). Os edifícios sem nenhum tipo condicionamento de ar (NC) têm a menor média dos três tipos. O seu consumo é 26% menor em relação aos edifícios com modo misto de condicionamento ar (MM).



LEGENDA:

TC: torres totalmente condicionadas  
 MM: torres com modo misto de condicionamento de ar;  
 NC: torres sem condicionamento de ar.

Figura 22: Consumo médio anual de energia elétrica por área das torres das edificações [kWh/m²/ano] por modo de condicionamento de ar.

Fazendo uma comparação entre os consumos anuais de energia elétrica por área médios da torre e da edificação como um todo por modo de condicionamento de ar, verifica-se que, quando se acrescenta a área e o consumo anual de energia elétrica por área das garagens, as

torres totalmente condicionadas (TC) têm o consumo anual de energia elétrica por área médio de energia elétrica das torres 37% menor. Nas torres com o modo misto de condicionamento de ar (MM), houve uma diminuição de 22%, e nas torres sem condicionamento de ar de 15%. Isso acontece porque as garagens têm uma área significativa e uma potência instalada baixa em relação à torre.

Para a análise do coeficiente de correlação de Pearson entre consumo anual de energia elétrica por área das torres das edificações em relação ao seu modo de condicionamento de ar, foram utilizados somente os edifícios que tinham algum condicionamento de ar, ou seja, torres totalmente condicionadas (TC) e com o modo misto de condicionamento de ar (MM). O coeficiente encontrado foi de 0,49. Este valor é considerado um efeito positivo grande entre as duas variáveis, ou seja, quanto maior o uso do condicionamento de ar (no caso deste trabalho, as torres totalmente condicionadas - TC), maior será o consumo anual de energia elétrica por área das torres.

Na análise do qui-quadrado de Pearson entre os tipos de condicionamento de ar e a classificação das torres apresentada no item 4.1, foi estipulado que:

- Hipótese nula ( $H_0$ ): não há diferença significativa entre as classificações e os tipos de ar condicionado;
- Hipótese alternativa ( $H_1$ ): há diferença significativa entre as classificações e os tipos de ar condicionado.

O coeficiente de correlação de Pearson entre a classificação das torres em relação ao seu modo de condicionamento de ar foi de -0,49. Isso significa que os dados são inversamente proporcionais, ou seja, quanto maior a classificação, menor é o uso do condicionamento de ar (no caso deste trabalho, as torres o modo misto de condicionamento de ar - MM). Além disso, esse valor da correlação possui um efeito significativo na classificação.

Calculando-se os graus de liberdade e encontrando o valor crítico na Tabela de Qui-quadrado (Anexo 1), verificou-se que o valor de graus de liberdade foi de  $GL = 8$ , e assim, o valor crítico tabelado foi de 15,51. O valor resultante calculado do qui-quadrado de Pearson foi de  $\chi^2 = 27,99$ . Assim, como o qui-quadrado calculado é maior que o tabelado, conclui-se que essa variável é significativa para avaliar-se o consumo anual de energia elétrica por área das torres da amostra de dados deste trabalho. Os valores tabelados estão no Anexo 4.



## 4.2.2 Absortância solar das paredes

Na avaliação da absorvância solar das paredes, foram estabelecidos os valores a partir da cor predominante presente na edificação. A Figura 23 apresenta os valores médios de consumo anual de energia elétrica por área das torres por grupo de absorvância solar das paredes das torres. Verifica-se que as torres que apresentam a maior média são aquelas que tem as cores marrons e cinzas, cerca de 134% maior do que as cores amarelas.

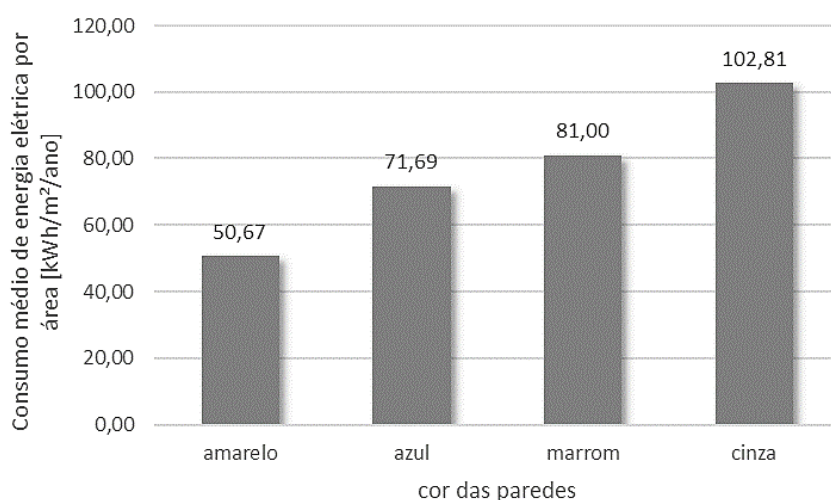


Figura 23: Consumo médio anual de energia elétrica por área das torres [kWh/m²/ano] por absorvância solar média das paredes externas.

Na análise do coeficiente de correlação de Pearson entre consumo anual de energia elétrica por área das torres em relação à absorvância solar das paredes, nas torres TC e MM, o coeficiente encontrado foi de 0,43. Esse fator, portanto, apresenta um efeito entre médio e grande no consumo anual de energia elétrica por área das torres.

Quando se separa as torres por modo de condicionamento de ar, verifica-se que o coeficiente de correlação de Pearson dos edifícios totalmente condicionados (TC) é 0,07, ou seja, a absorvância representa um efeito pequeno no consumo anual de energia elétrica por área das torres e, nos edifícios com o modo misto de condicionamento de ar (MM), esse coeficiente é de 0,42, ou seja, a absorvância representa um efeito significativo no consumo anual de energia elétrica por área das torres. Já quando se compara a classificação das torres com a absorvância solar das paredes, o coeficiente de correlação de Pearson é de -0,51, o que significa que quanto menor é a absorvância solar das paredes das torres, maior a classificação.

Na análise do qui-quadrado de Pearson entre a absorptância solar das paredes e a classificação das torres, foi estipulado que:

- Hipótese Nula ( $H_0$ ): não há diferença significativa entre as classificações e a absorptância solar das paredes;
- Hipótese alternativa ( $H_1$ ): há diferença significativa entre as classificações e a absorptância solar das paredes.

Calculando os graus de liberdade e encontrando o valor crítico na Tabela de Qui-quadrado (Anexo 1), verificou-se que o valor de graus de liberdade foi de  $GL= 12$  e o valor crítico tabelado foi de 21,03. O valor resultante calculado do qui-quadrado de Pearson foi de  $\chi^2= 33,89$ . Assim, como o qui-quadrado calculado é maior que o tabelado, conclui-se que essa variável é significativa para avaliar-se o consumo anual de energia elétrica por área das torres da amostra de dados deste trabalho quando se tem algum modo de condicionamento de ar. Os valores tabelados estão no Anexo 4.

### 4.2.3 Proteção Solar

Apenas 13,9% das amostras de edifícios apresentou algum tipo de proteção solar. De acordo com a Figura 24, as torres que possuem algum tipo de proteção solar consomem, em média, 40% menos energia do que as torres sem proteção solar nas fachadas.

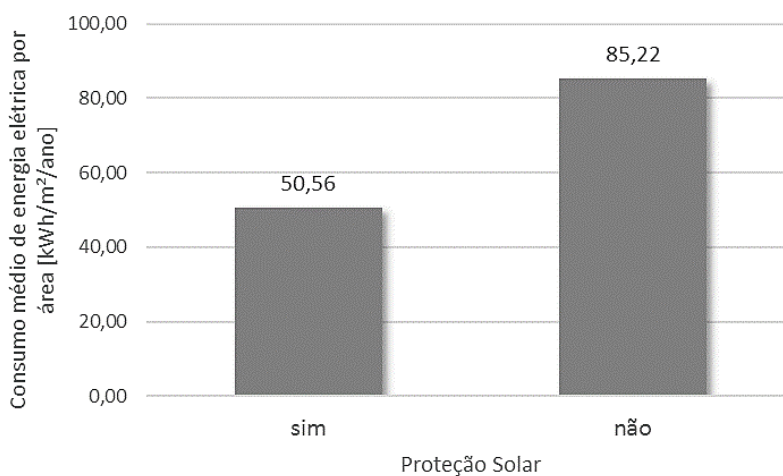


Figura 24: Consumo médio anual de energia elétrica por área das torres [kWh/m²/ano] em comparação com a existência ou não de proteção solar nas fachadas.

O coeficiente de correlação de Pearson encontrado entre consumo anual de energia elétrica por área das torres TC e MM em relação à existência ou não de proteção solar foi de 0,21. Esse fator tem um efeito considerado médio no consumo anual de energia elétrica por área das torres. Este fator com sinal positivo indica que a inexistência da proteção solar tende a aumentar o consumo anual de energia elétrica por área das torres.

Quando separado por modo de condicionamento de ar, o coeficiente de correlação de Pearson, é de 0,00, nas torres totalmente condicionadas (TC), indicando ausência de relacionamento linear entre as variáveis. Já nos edifícios com o modo misto de condicionamento de ar (MM), essa correlação foi de 0,23. Quando comparada a classificação da edificação em relação a existência ou não de proteção solar, o coeficiente de correlação de Pearson foi de -0,22, apresentando, portanto, um efeito considerado médio, indicando que a existência da proteção solar tende a aumentar a classificação.

Este pequeno efeito identificado no coeficiente de correlação de Pearson, também foi verificado no qui-quadrado de Pearson. Calculando-se os graus de liberdade e encontrando-se o valor crítico na Tabela de Qui-quadrado (Anexo 1), verificou-se que o valor de graus de liberdade foi de  $GL= 4$  e o valor crítico tabelado foi de 9,41. O valor resultante calculado do qui-quadrado de Pearson foi de  $\chi^2= 4,25$ . Assim, como o qui-quadrado calculado é menor que o tabelado, conclui-se que essa variável não é significativa para avaliar o consumo anual de energia elétrica por área das torres da amostra deste trabalho. Os valores tabelados estão no Anexo 4.

#### **4.2.4 Fator solar dos vidros**

Para se fazer a análise do consumo anual de energia elétrica por área das torres em relação ao fator solar, FS, dos vidros, foram utilizados os limites de FS apresentados na Tabela 8. Para facilitar o entendimento, na Figura 25, os valores foram simplificados para o valor de 5 tipos existentes de FS, representativos das faixas indicadas na Tabela 8 desta tese.

Na Figura 25, verifica-se que, quanto maior o Fator Solar, menor será o consumo anual de energia elétrica por área das torres. Esse resultado é contrário ao que se esperava, já que o Fator Solar representa a fração de ganho térmico devido à radiação solar que a abertura transmite para o interior da edificação e, com isso, quanto maior o Fator Solar, maior o ganho de calor e, conseqüentemente, maior deveria ser o consumo anual de energia elétrica por área

das torres. No entanto, ao analisarmos as torres que apresentam o fator solar de 0,87, correspondente ao do vidro simples, verifica-se que apenas as torres com o modo misto de condicionamento de ar (MM) e os naturalmente condicionados (NC) apresentam este tipo de envidraçamento. Já vidros de fator solar considerado baixo, ou seja 0,36 ou 0,45, estão presentes em 72% dos prédios totalmente condicionadas (TC) e em 18% dos edifícios com o modo misto de condicionamento de ar (MM), ou seja, nas torres com maior tendência em apresentar maior consumo anual de energia elétrica por área.

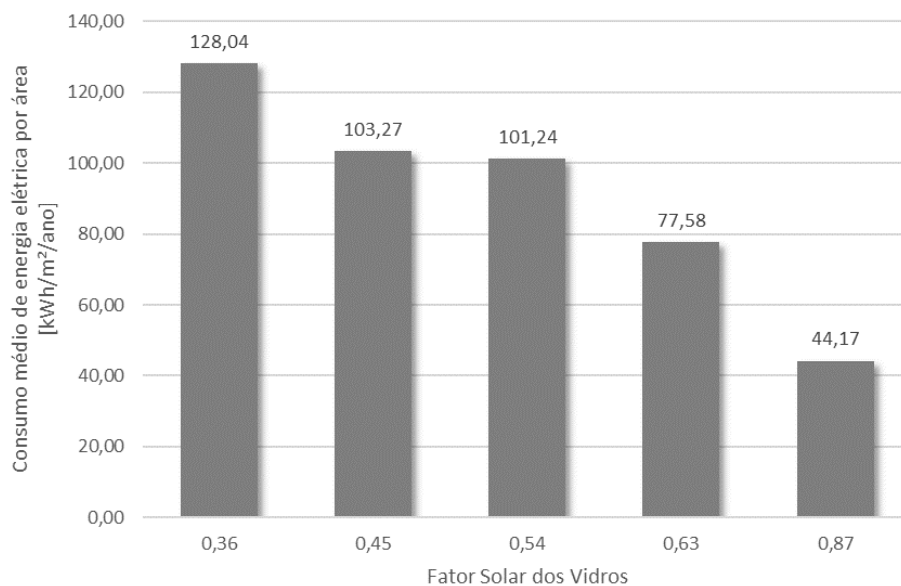


Figura 25: Consumo médio anual de energia elétrica por área das torres [kWh/m<sup>2</sup>/ano] por Fator Solar.

Na análise do coeficiente de correlação de Pearson entre o consumo de energia elétrica da torre das edificações em relação ao fator solar apenas das torres TC e MM, verifica-se uma correlação de -0,42, que significa um efeito grande entre as variáveis. Quando se analisam somente as torres totalmente condicionadas (TC), essa correlação é de -0,16 e nas torres com o modo misto de condicionamento de ar (MM) é de -0,27. Esse efeito negativo significa que, quanto menor é o fator solar dos vidros, maior é o consumo anual de energia elétrica por área das torres. O efeito da correlação entre a classificação das torres e o fator solar dos vidros é de 0,49, efeito esse considerado grande para a correlação.

Na análise do qui-quadrado de Pearson entre o fator solar (FS) dos vidros e a classificação das torres, foi estipulado que:

- Hipótese Nula ( $H_0$ ): não há diferença significativa entre as classificações e o Fator Solar dos vidros;
- Hipótese alternativa ( $H_1$ ): há diferença significativa entre as classificações e o Fator Solar dos vidros.

Calculando-se os graus de liberdade e encontrando-se o valor crítico na tabela de Qui-quadrado (Anexo 1), verificou-se que o valor de graus de liberdade foi de  $GL= 44$  e o valor crítico tabelado foi de  $61,66$ . O valor resultante calculado do qui-quadrado de Pearson foi de  $\chi^2= 63,62$ . Assim, como o qui-quadrado calculado é maior que o tabelado, conclui-se que essa variável é significativa para avaliar o consumo anual de energia elétrica por área das torres da amostra de dados deste trabalho. Os valores tabelados estão no Anexo 4.

#### 4.2.5 Relação entre área de abertura e área de fachada opaca, WWR

Para a análise da relação do consumo anual de energia elétrica por área das torres em relação ao WWR, foram estabelecidas quatro faixas de WWR, apresentadas na Figura 26. O menor WWR encontrado na amostra foi de 4% e o maior valor foi de 57%. Na Figura 26 constata-se que, com o aumento do percentual de abertura nas fachadas, há um aumento do consumo anual de energia elétrica por área das torres. A maior diferença percentual no consumo anual de energia elétrica por área das torres foi entre as faixas de WWR de 15-30% e 30-45%, que apresentaram 18% de aumento. O aumento no consumo anual de energia elétrica por área entre a menor e a maior faixa foi de 48%.

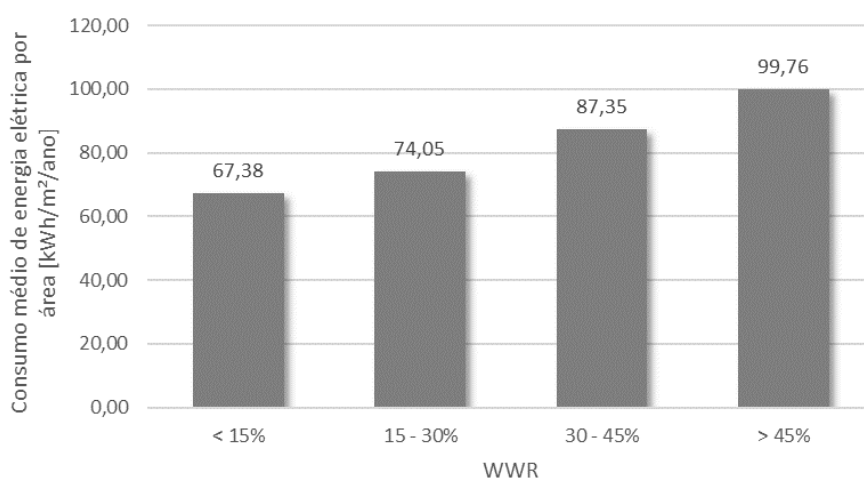


Figura 26: Consumo médio anual de energia elétrica por área das torres [kWh/m²/ano] por faixa de WWR.

Com relação ao coeficiente de correlação de Pearson entre o consumo anual de energia elétrica por área das torres das edificações e o WWR, foi encontrado o valor de 0,19. Esse valor tem uma correlação média entre as variáveis, ou seja, quanto maior é o WWR, maior o consumo anual de energia elétrica por área das torres.

O coeficiente indica uma baixa correlação quando analisamos somente as torres totalmente condicionadas (TC), com valor calculado de 0,08 e as torres que tem o modo misto de condicionamento de ar (MM), com valor de 0,07. Quando se analisa a classificação da edificação em relação ao seu WWR, o coeficiente segue indicando uma baixa correlação, com valor de -0,10, ou seja, quanto menor é o WWR, maior a classificação.

Utilizando-se a técnica da análise de variância (ANOVA) para comparar as médias das variâncias entre e dentro dos grupos, os valores da variação de WWR dentro de cada classificação estão apresentados na Figura 27. Para esta análise foi estabelecido que:

- Hipótese Nula ( $H_0$ ): não há diferença significativa dos valores de WWR entre as classificações;
- Hipótese alternativa ( $H_1$ ): há pelo menos um valor médio de cada classificação diferente das outras classificações.

Calculando os graus de liberdade e encontrando o valor crítico na tabela de valores críticos da distribuição F (Anexo 2), verificou-se que o valor de graus de liberdade entre os grupos de é de 4,00 e dentro dos grupos de 97,00. Com isso, o valor crítico tabelado foi de 2,47. O valor resultante calculado foi de  $F= 9,67$ . Assim, como o valor calculado é maior que o tabelado, conclui-se que essa variável é significativa para avaliar o consumo anual de energia elétrica por área das torres da amostra de dados deste trabalho. Os valores tabelados estão no Anexo 4.

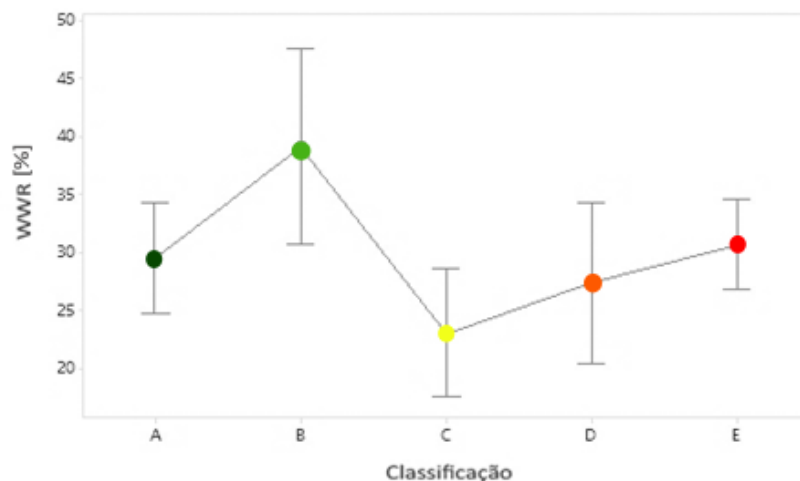


Figura 27: Variação dos valores de WWR dentro de cada classificação e entre as classificações.

#### 4.2.6 Volume

Na análise da relação do consumo anual de energia elétrica por área das torres em relação ao volume, verifica-se, de acordo com a Figura 28, que maioria das torres concentram-se na faixa com volume até de 30.000 m<sup>3</sup>. Além disso, a maioria das torres dessa faixa, cerca de 52,5%, consomem até 150 kWh/m<sup>2</sup>/ano.

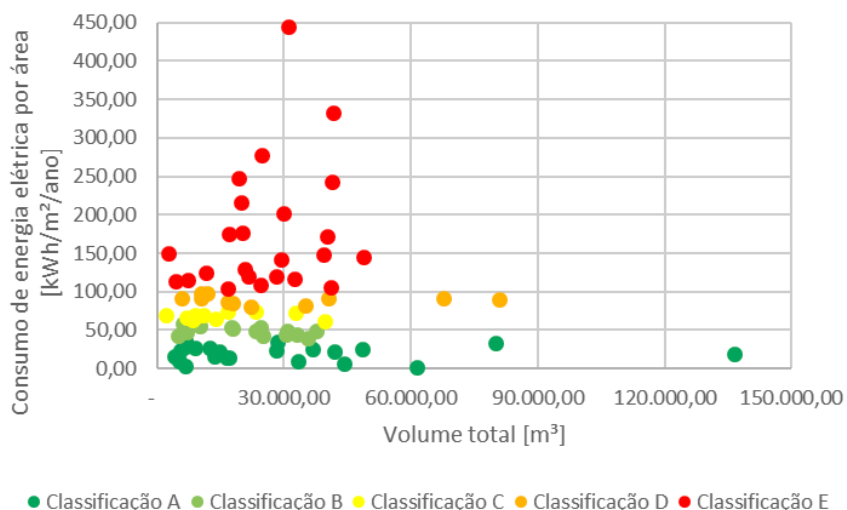


Figura 28: Consumo médio anual de energia elétrica por área das torres [kWh/m<sup>2</sup>/ano] por volume total.

Com relação ao coeficiente de correlação de Pearson entre o consumo anual de energia elétrica por área das torres das edificações e o Volume, foi encontrado o valor de 0,01. Valores

próximos ou iguais a 0 indicam ausência de um relacionamento linear, isto é, quando se altera o volume não há influência sobre o consumo anual de energia elétrica por área das torres.

Isso também acontece quando analisamos somente as torres totalmente condicionadas (TC), com valor calculado do coeficiente de correlação de Pearson é de 0,12 e com as torres que têm o modo misto de condicionamento de ar (MM). Este valor é maior e igual a -0,26, apresentando uma correlação de efeito médio entre as variáveis. Quando a correlação é feita entre a classificação final da edificação em relação ao seu Volume, este coeficiente permanece baixo, com valor de 0,05.

Utilizando-se a técnica da análise de variância (ANOVA) para comparar as médias das variâncias entre e dentro dos grupos em relação ao volume, foi estabelecido que:

- Hipótese Nula ( $H_0$ ): não há diferença significativa do Volume entre as classificações;
- Hipótese alternativa ( $H_1$ ): há pelo menos um valor médio de cada classificação diferente das outras classificações.

Na Figura 29, é possível verificar-se essa variância dentro do grupo de cada classificação e entre as classificações. Calculando-se os graus de liberdade, e encontrando-se o valor crítico na Tabela de Valores Críticos da Distribuição F, verificou-se que o valor de graus de liberdade entre os grupos é de 4,00 e dentro dos grupos de 81,00. O valor crítico tabelado foi de 2,48. O valor resultante calculado foi de  $F= 1,90$ . Assim, como o valor calculado é menor que o tabelado, conclui-se que essa variável não é significativa para avaliar o consumo anual de energia elétrica por área das torres da amostra de dados deste trabalho. Os valores tabelados estão no Anexo 4.

Verifica-se, também na Figura 29, que a maior variação dentro de cada classificação acontece na classificação B, que varia de 6.722,36 a 35.555,36m<sup>3</sup>. A média dos volumes da classificação C e D são muito próximos, mas na classificação D o desvio padrão é maior. A maior média está na classificação B, bem como o maior desvio padrão.



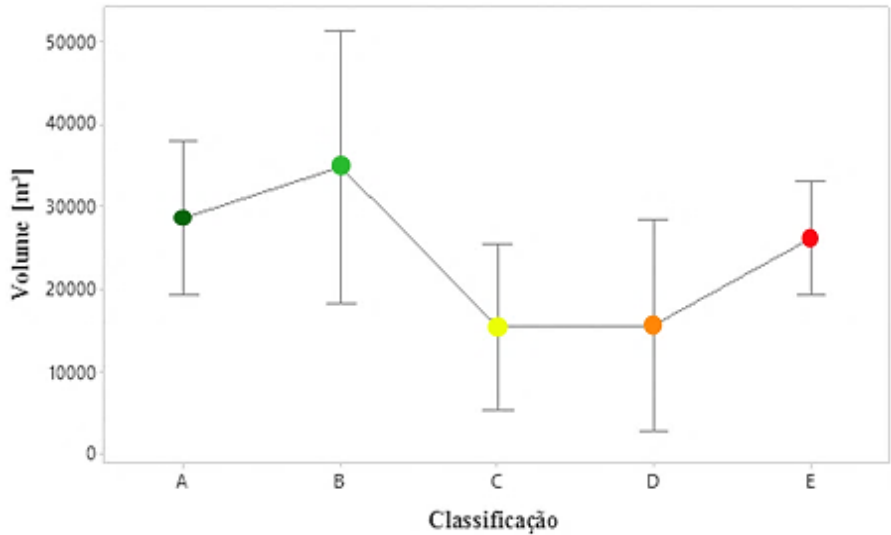


Figura 29: Variação dos valores de volume dentro de cada classificação e entre as classificações.

#### 4.2.7 Área de projeção da cobertura (Apcob)

Na análise da Área de projeção da cobertura em relação ao consumo anual de energia elétrica por área das torres está apresentado na Figura 30, verifica-se que a maioria das torres que receberam classificação E tem grandes áreas de cobertura, acima de 500 m<sup>2</sup>. Cerca de 33% das torres possuem área de cobertura menor que 500m<sup>2</sup> e consumo anual de energia elétrica por área das torres de até 100kWh/m<sup>2</sup>/ano.

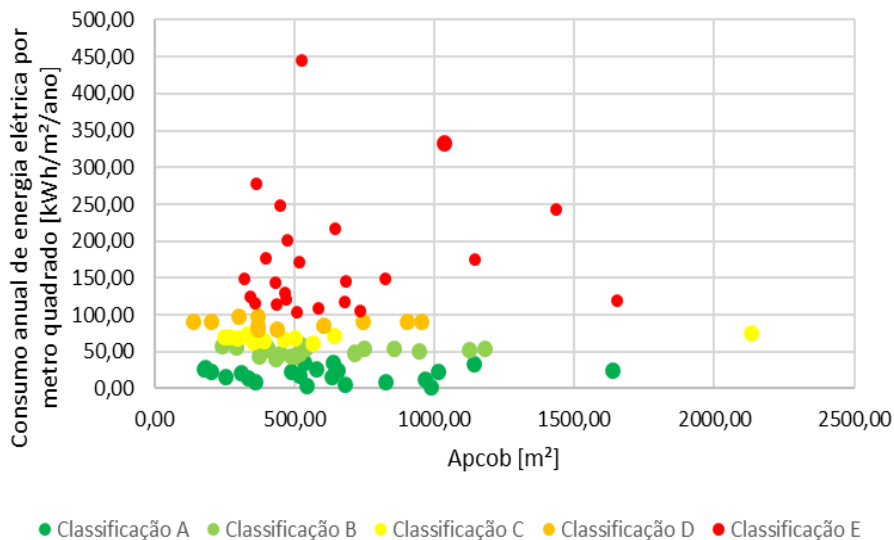


Figura 30: Consumo médio anual de energia elétrica por área das torres [kWh/m<sup>2</sup>/ano] por área de projeção da cobertura da torre.

Com relação ao coeficiente de correlação de Pearson entre o consumo anual de energia elétrica por área das torres das edificações e a área de projeção das edificações que têm algum condicionamento de ar, foi encontrado o valor de 0,02. Valores próximos a 0 indicam ausência de um relacionamento linear, ou seja, quando se altera a área de projeção da cobertura, não há efeito no consumo anual de energia elétrica por área das torres.

Diferentemente do resultado encontrado na amostra completa, quando analisamos somente as torres totalmente condicionadas (TC), com valor calculado de 0,12 e com as torres que têm o modo misto de condicionamento de ar (MM), este valor é oposto, com uma correlação de -0,14, apresentando uma correlação de efeito baixo entre as variáveis. Quando a correlação é feita entre a classificação final da edificação em relação à área de projeção das edificações, este coeficiente permanece baixo, com valor de 0,03.

Utilizando-se a técnica da análise de variância (ANOVA) para comparar as médias das variâncias entre e dentro dos grupos em relação ao volume, foi estabelecido que:

- Hipótese Nula ( $H_0$ ): não há diferença significativa da área de projeção da cobertura entre as classificações;
- Hipótese alternativa ( $H_1$ ): há pelo menos uma média diferente entre as classificações.

Na Figura 31, é possível verificar essa variância dentro do grupo de cada classificação e entre as classificações. Calculando os graus de liberdade e encontrando o valor crítico na tabela de valores críticos da distribuição F (Anexo 2), verificou-se que o valor de graus de liberdade entre os grupos de é de 4, e dentro dos grupos de 83 e assim, o valor crítico tabelado foi de 2,48. O valor resultante calculado foi  $F= 0,42$ . Assim, como o valor calculado é menor que o tabelado, conclui-se que essa variável não é significativa para avaliar o consumo anual de energia elétrica por área das torres da amostra de dados deste trabalho. Os valores tabelados estão no Anexo 4.

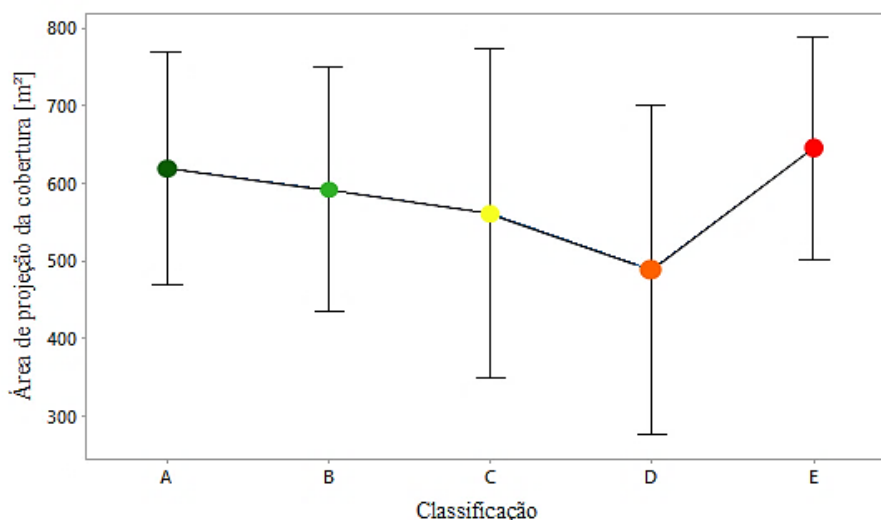


Figura 31: Variação dos valores de Área de projeção da cobertura dentro de cada classificação e entre as classificações.

#### 4.2.8 Área da envoltória

Outro item de análise foi da área da envoltória em relação ao consumo anual de energia elétrica por área das torres. Na Figura 32 mostra a relação entre área e consumo de energia elétrica das torres das edificações e cerca de 41% dos edifícios tem área até 6.000,00 m² e consumo anual de energia elétrica por área das torres de até 100 kWh/m²/ano.

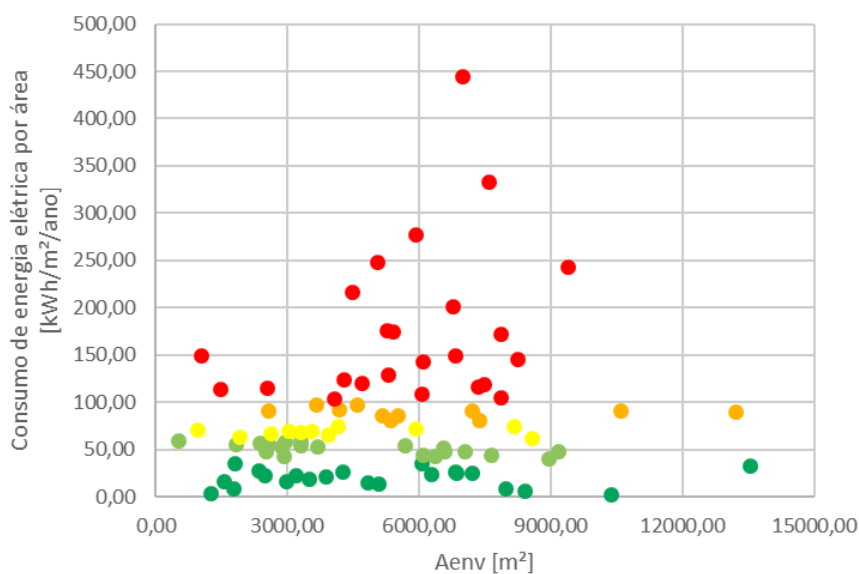


Figura 32: Consumo médio anual de energia elétrica das torres das edificações por área [kWh/m²/ano] por Área da envoltória.

Com relação ao coeficiente de correlação de Pearson entre o consumo anual de energia elétrica por área das torres das edificações e a área da envoltória das torres que tem algum condicionamento de ar, foi encontrado o valor de 0,13, considerado um valor de efeito pequeno de correlação entre as variáveis. Já nos resultados encontrados na amostra completa, quando analisamos somente as torres totalmente condicionadas (TC), a correlação representa um efeito médio, com valor calculado de 0,23 e com as torres que tem o modo misto de condicionamento de ar (MM), este valor é o oposto, com uma correlação de -0,18, apresentando uma correlação de efeito médio entre as variáveis. Quando a correlação é entre a classificação final da edificação em relação à área de envoltória das torres, este coeficiente permanece baixo, com valor de -0,11.

Utilizando a técnica da análise de variância (ANOVA) para comparar as médias das variâncias entre e dentro dos grupos em relação ao volume, foi estabelecido que:

- Hipótese Nula ( $H_0$ ): não há diferença significativa do volume entre as classificações;
- Hipótese alternativa ( $H_1$ ): há pelo menos uma média diferente entre as classificações.

Na Figura 33, é possível verificar essa variância dentro do grupo de cada classificação e entre as classificações. Calculando-se os graus de liberdade e encontrando o valor crítico na tabela de valores críticos da distribuição F (Anexo 2), verificou-se que o valor de graus de liberdade entre os grupos de é de 4,00 e dentro dos grupos de 83,00. O valor crítico tabelado foi de 2,48. O valor resultante calculado foi de  $F= 1,35$ . Assim, como o valor calculado é menor que o tabelado, conclui-se que essa variável não é significativa para avaliar o consumo anual de energia elétrica por área das torres da amostra de dados deste trabalho. Os valores tabelados estão no Anexo 4.

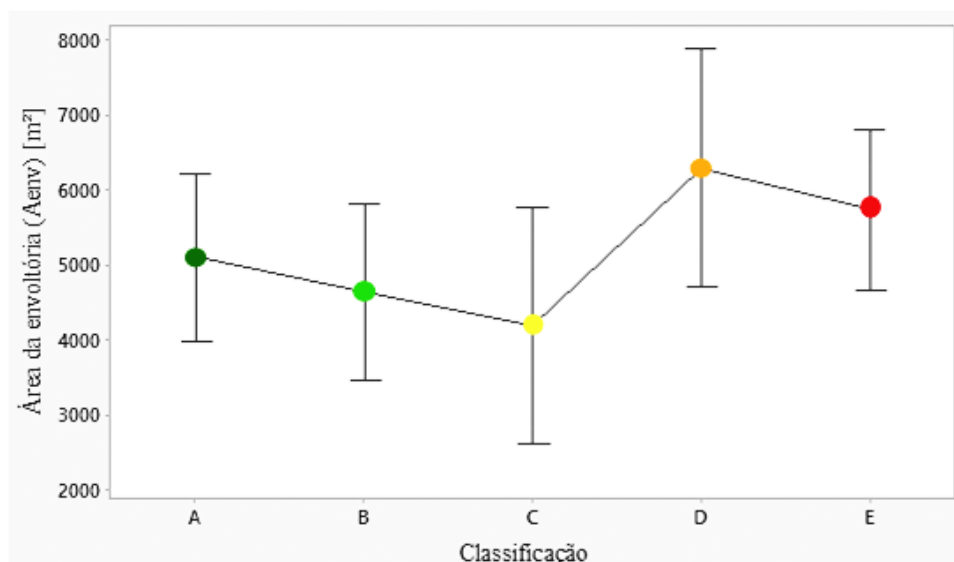


Figura 33: Variação dos valores de área da envoltória dentro de cada classificação e entre as classificações.

#### 4.2.9 Fator de Forma, FF e Fator de Altura, FA

As equações de Índice de Consumo do Requisitos Técnicos da Qualidade para o Nível de Eficiência Energética de Edifícios Comerciais, de Serviços e Públicos – RTQ-C usam duas variáveis na sua análise: o fator de forma, FF, e fator de altura, FA. O Fator de Forma é caracterizado pela razão entre a área da envoltória pelo volume da edificação e o fator de altura é pela razão entre área de projeção da cobertura pela área total da edificação.

Como as correlações das variáveis de área de envoltória, volume e área de projeção da cobertura tiveram correlações baixas em relação ao consumo anual de energia elétrica por área das torres e as análises de variância (ANOVA) mostrou não ser significativa, as correlações de consumo anual de energia elétrica por área das torres usando-se FF e FA também não foram fatores significativos na amostra de dados deste trabalho.

Na Figura 34 e na Figura 35, é possível verificar-se a variância dentro do grupo de cada classificação e entre as classificações. Calculando-se os graus de liberdade e encontrando o valor crítico na tabela de valores críticos da distribuição F (Anexo 2), verificou-se que o valor de graus de liberdade entre os grupos de é de 4,00 e dentro dos grupos de 83,00 e o valor crítico tabelado foi de 2,48. O valor resultante calculado para o fator de forma foi de  $F= 0,95$  e o fator de altura foi de  $F= 2,08$ . Assim, como o valor calculado é menor que o tabelado, conclui-se que essa variável não é significativa para avaliar o consumo anual de energia elétrica por área das torres da amostra de dados deste trabalho. Os valores tabelados estão no Anexo 4.

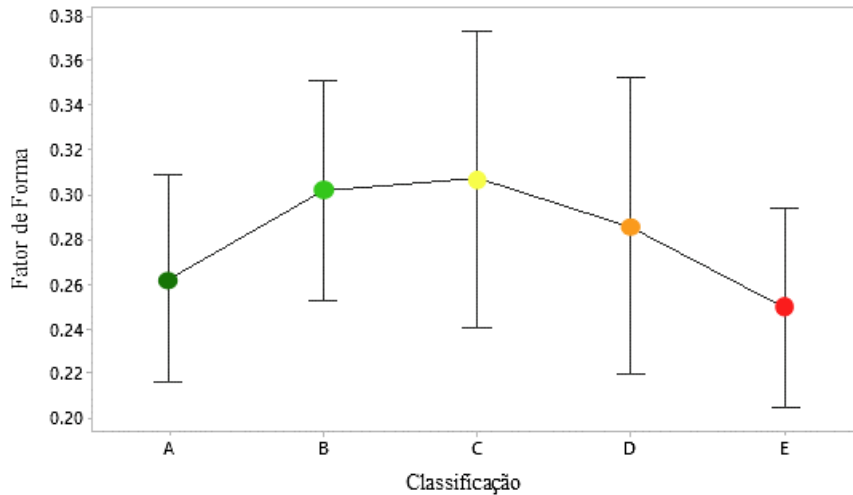


Figura 34: Variação dos valores do Fator de Forma dentro de cada classificação e entre as classificações.

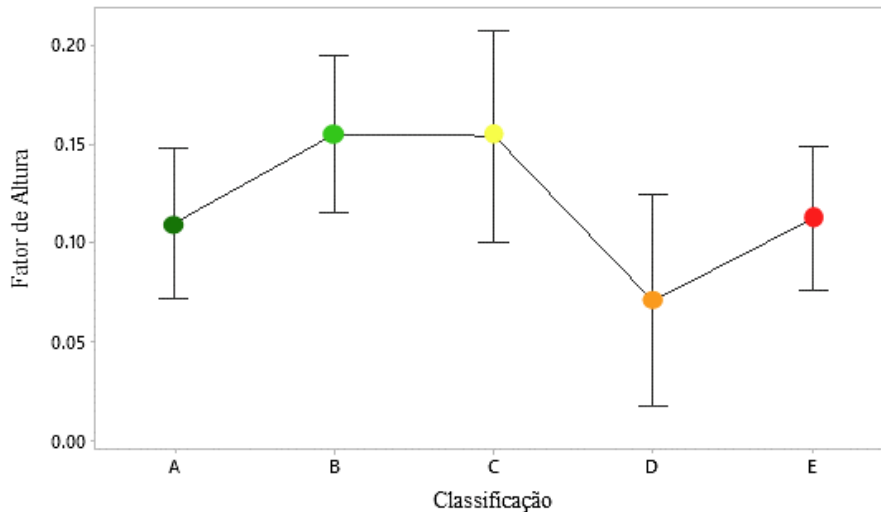


Figura 35: Variação dos valores do Fator de Altura dentro de cada classificação e entre as classificações.

### 4.3 Regressão Linear Multivariada

A primeira análise regressão linear feita, utilizou-se de todas as variáveis testadas neste trabalho, ou seja, Modo de condicionamento de ar, WWR, absorvância das paredes, fator solar dos vidros, proteção solar, volume, área de projeção da cobertura e área da envoltória. As variáveis utilizadas para compor o modelo de regressão estão listadas na Tabela 16.

Para entrada na regressão linear multivariada foi necessário definir-se valores numéricos para todas as variáveis independentes. Para WWR, absorvância solar das paredes e

fator solar dos vidros foram utilizados os valores conforme definido referente à capítulo de metodologia. Já para a variável modo de condicionamento de ar, decidiu-se usar como valor numérico o peso do consumo de energia elétrica médio de cada categoria. Assim, foi definido que o valor de consumo médio das edificações TC seria igual a 1 e que os valores para MM e NC seriam obtidos pela divisão do consumo médio destas categorias pelo valor médio de TC, resultando respectivamente, nos valores de 0,44 e 0,30. Para este peso, foram tomados os valores de 101 edificações.

Tabela 16: Variáveis explicativas do modelo de regressão.

Variável	Nome/caracterização	Tipo de dado	Varição
x <sub>1</sub>	Modo de condicionamento de Ar	Numérico	0,30; 0,44; 1,00
x <sub>2</sub>	WWR	Numérico	0,04 – 0,57
x <sub>3</sub>	Absortância solar das paredes	Numérico	0,515 – 0,782
x <sub>4</sub>	Fator Solar dos vidros	Numérico	0,36 – 0,87
x <sub>5</sub>	Proteção Solar	Bidimensional	0 – 1
x <sub>6</sub>	Volume	Numérico	2.023,39 – 136.338,80
x <sub>7</sub>	Área de projeção da cobertura	Numérico	136,69 – 2130,00
x <sub>8</sub>	Área da envoltória	Numérico	949,20 – 13.532,99

Para a obtenção de uma melhor correlação das variáveis em relação ao consumo de energia elétrica, foram retiradas da regressão as edificações que apresentavam valores de consumo inferior a 9kWh/m<sup>2</sup>/ano e superior a 200kWh/m<sup>2</sup>/ano, utilizando-se então, 75 edificações do universo de 88. Através do software Minitab®, os coeficientes de regressão deste teste estão apresentados na Equação 20 e o teste F e o valor P estão apresentados na Tabela 17.

$$EUI = -29,3 + 58,4x_1 + 1,9x_2 + 119,5x_3 - 27,8x_4 + 4,4x_5 - 0,000458x_6 + 0,0036x_7 + 0,00229x_8$$

Equação 20

Tabela 17: Coeficientes de regressão.

Variável	Nome/caracterização	Teste F	Valor P
x <sub>1</sub>	Modo de condicionamento de Ar	2,97	0,004
x <sub>2</sub>	WWR	0,05	0,960
x <sub>3</sub>	Absortância solar das paredes	3,22	0,002
x <sub>4</sub>	Fator Solar dos vidros	-1,07	0,288
x <sub>5</sub>	Proteção Solar	0,35	0,727
x <sub>6</sub>	Volume	-1,75	0,085
x <sub>7</sub>	Área de projeção da cobertura	0,29	0,776
x <sub>8</sub>	Área da envoltória	1,02	0,311

A Figura 36 apresenta o gráfico de dispersão dos resultados do EUI preditos e reais. Como foram poucos casos existentes para gerar a equação de predição, esta obteve um R múltiplo de 67,2%, R<sup>2</sup> de 45,2%, R<sup>2</sup> ajustado de 38,4% e um erro de 32,96.

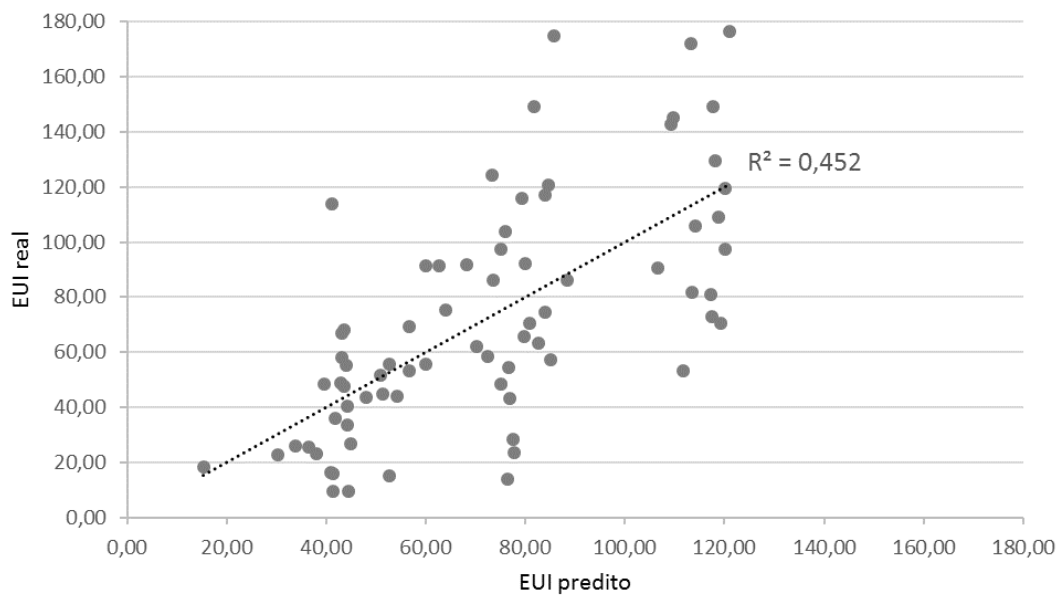


Figura 36: Dispersão entre os EUI real e previsto com o universo de 75 torres gerado a partir dos dados de Modo de condicionamento de ar, WWR, absortância das paredes, fator solar dos vidros, proteção solar, volume, área de projeção da cobertura e área da envoltória.

De acordo com as análises das variáveis feitas anteriormente, foram selecionadas neste segundo teste somente aquelas variáveis que mostraram correlação significativa em relação ao



consumo anual de energia elétrica por área das torres. As variáveis selecionadas, bem como a variação de valores encontradas na amostra, estão listadas na Tabela 18.

Tabela 18: Variáveis explicativas do modelo de regressão.

Variável	Nome/caracterização	Tipo de dado	Variação
x <sub>1</sub>	Modo de condicionamento de Ar	Numérico	0,30; 0,44; 1,00
x <sub>2</sub>	WWR	Numérico	0,04 – 0,57
x <sub>3</sub>	Absortância solar das paredes	Numérico	0,515 – 0,782
x <sub>4</sub>	Fator Solar dos vidros	Numérico	0,36 - 0,87

A expressão do índice de consumo anual de energia elétrica por área das torres gerado a partir das variáveis está apresentada na Equação 21. Foram utilizados para gerar as regressões dados de 75 torres. Os valores do Teste F e Valor P estão apresentados na

Tabela 19.

$$EUI = -5,02 + 58,66x_1 - 17,22x_2 + 110,34x_3 - 37,96x_4 \quad \text{Equação 21}$$

Tabela 19: Coeficientes de regressão.

Variável	Nome/caracterização	Teste T	Valor P
x <sub>1</sub>	Modo de condicionamento de Ar	3,07	0,003
x <sub>2</sub>	WWR	-0,54	0,594
x <sub>3</sub>	Absortância solar das paredes	3,05	0,003
x <sub>4</sub>	Fator Solar dos vidros	-1,53	0,130

A Figura 37 mostra o gráfico de dispersão dos resultados de EUI preditos e reais. Como foram poucos os casos existentes para gerar a equação de predição, esta apresentou um R múltiplo de 65,2%, R<sup>2</sup> de 42,6%, R<sup>2</sup> ajustado de 39,2% e um erro de 32,75.

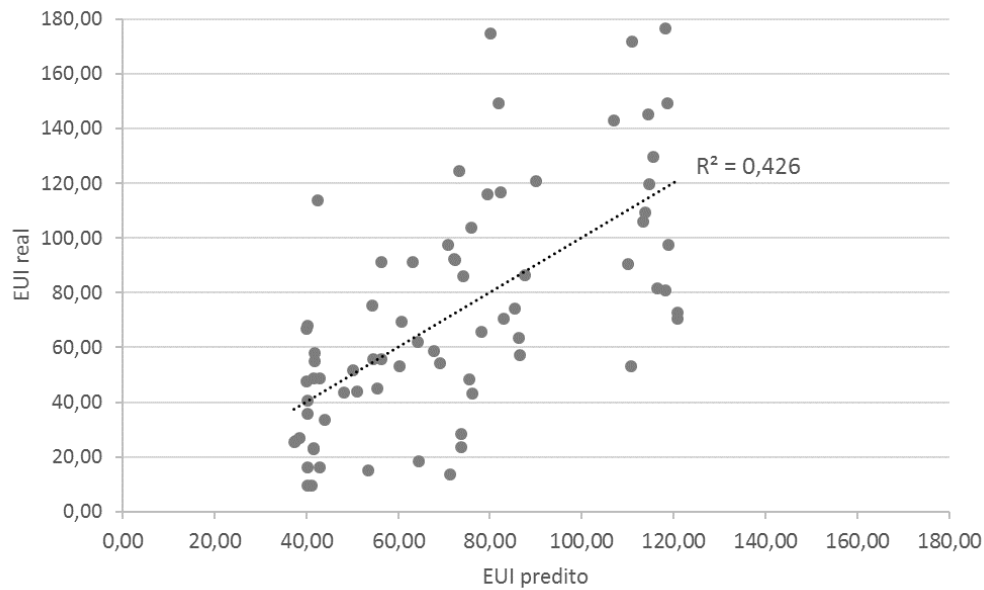


Figura 37: Dispersão entre os EUI real e previsto com o universo de 75 torres gerado a partir dos dados de Modo de condicionamento de Ar, WWR, Absortância solar das paredes e fator solar dos vidros.

Como verificado, nas equações de regressão geradas, as variáveis de projeto escolhidas foram capazes de explicar somente 45,2%, no primeiro teste, e 42,6% no segundo teste, do consumo de energia elétrica anual por área. Verificou-se também que as equações tem uma limitação no consumo de energia por área da torre que varia de 9kWh/m<sup>2</sup>/ano e superior a 200kWh/m<sup>2</sup>/ano. O aumento do número de variáveis não proporcionou um aumento significativo na explicação do consumo de energia elétrica das torres e com isso, considera-se que a segunda equação mais adequada para o cálculo.

# 5.

## CONCLUSÃO

Este trabalho foi desenvolvido com o objetivo de analisar a influência das decisões de projeto no consumo anual de energia elétrica por área dos edifícios de escritórios de Belo Horizonte - MG. Para o desenvolvimento desta análise foi necessário o levantamento do tamanho da população de edificações existentes em Belo Horizonte e definição da amostra. Com a amostra definida, conseguiu-se cerca de 45% dos dados desta amostra, especificadamente, dados de consumo de energia elétrica de 36 meses de 101 edificações e 50 projetos arquitetônicos completos.

Para o desenvolvimento de um *benchmarking*, foram separados os consumos das torres de escritórios do restante da edificação. Para a determinação do consumo de energia elétrica das torres de edificações de escritório de Belo Horizonte, foram utilizados dados recolhidos em campo, como o consumo de energia elétrica e as características de projeto. O estudo foi, portanto, categorizado como um *Benchmarking* de Análise Estatística, como estabelecido por Nikolaou *et al.* (2015). Além disso, o estudo seguiu as três primeiras fases de um processo de *benchmarking* desenvolvido por Pérez-Lombard *et al.* (2009) e Gao e Malkawi (2014): desenvolver um banco de dados com informações sobre o desempenho energético de um número significativo de edifícios, com classificação mínima por tipo e área de construção; obter informações relevantes para a avaliação do desempenho de energia do edifício e permitir análise comparativa do desempenho energético do edifício com as amostras do banco de dados, em relação ao uso de energia das torres de edificações.

Na criação do *benchmarking* desenvolvido por Silva (2013), para as edificações de alto padrão em São Paulo, utilizou-se uma classificação variando de “A” a “E” e as edificações foram divididas pelo modo de condicionamento de ar. Os limites desenvolvidos para os edifícios totalmente condicionados, foram em média 88% superiores aos daqueles encontrados neste trabalho. Já para as edificações com condicionamento de ar unitário, que neste trabalho

foram denominadas de uso misto de condicionamento de ar, os limites foram em média 33% superiores. A metodologia para o estabelecimento destes limites foi diferente entre os dois trabalhos, mas principalmente para os edifícios totalmente condicionados (TC), os valores limites de EUI se mostraram próximos.

Já no *benchmarking* desenvolvido pelo CBCS (2016) para escritórios corporativos, as variáveis escolhidas para a predição do consumo anual de energia elétrica por área foram diferentes das definidas nessa tese, considerando as características das cargas instaladas internas e áreas. Além disso, não houve a classificação das edificações de “A” a “E”, somente do estabelecimento do consumo anual de energia elétrica por área Típico e da Boa Prática.

Na análise do *benchmarking* de todas as torres de edificações, verificou-se que as torres que não apresentam condicionamento artificial de ar (NC) obtiveram as melhores classificações, ou seja, A, B e C. As torres de edificações totalmente condicionadas (TC), quando analisadas em separado, apresentaram piores classificações do que quando analisadas na classificação geral. Com isso, muitas torres que receberiam classificação A ou B na classificação de torres totalmente condicionadas, receberam classificações que variam de A a E na classificação geral das torres.

Para entender a importância que as características de projeto têm no consumo de energia, é importante o planejamento do experimento para determinação de que variáveis possuem maior influência no desempenho relativo ao consumo de energia. Com isso, foi feita uma análise de sensibilidade das variáveis na qual foram analisadas as seguintes variáveis: condicionamento de ar, WWR, volume, fator solar dos vidros, área de cobertura, absorvância solar das paredes, proteção solar, área das fachadas, área de projeção da cobertura, fator de forma e fator de altura. Estas foram comparadas com o consumo de energia elétrica das torres.

Das variáveis estudadas, verificou-se que pela análise do qui-quadrado que o modo de condicionamento de ar, a absorvância solar das paredes e fator solar dos vidros são relevantes para a caracterização do consumo de energia, dentro da amostra estudada. Já pela análise de variância (ANOVA), verificou-se que o WWR também é um fator relevante no consumo anual de energia elétrica por área das torres analisadas.

Com relação ao modo de condicionamento de ar, verificou-se que as torres naturalmente (NC) ventiladas consomem 70% menos energia por área em comparação aos edifícios totalmente condicionados e as torres com modo misto de condicionamento de ar

(MM) consomem 56% a menos em relação aos totalmente condicionados. No trabalho de Haase e Amato (2009) encontrou-se uma economia de energia um pouco menor, de 30 a 35% com o uso do resfriamento híbrido em relação ao totalmente condicionado o ano todo em três cidades quentes e úmidas – Singapura, Hong Kong e Pequim.

Em relação à absorvância solar das paredes, quanto maior a absorvância, maior foi o consumo anual de energia elétrica por área das torres. Já em relação ao fator solar dos vidros, era esperado que quanto maior o fator solar dos vidros, maior seria o consumo anual de energia elétrica por área das torres. Mas na amostra ocorreu o contrário, ou seja, quando maior o fator solar dos vidros, menor foi o consumo anual de energia elétrica por área das torres. Isso ocorreu pelo fato de que foram analisadas as torres de edificações em conjunto, independentemente do modo de condicionamento de ar. Assim, as torres totalmente condicionadas, são aquelas que utilizam de vidros com fator solar baixos e também são aquelas que consomem mais, mas não devido ao tipo de vidro e sim pelo tipo de sistema de condicionamento de ar.

Com relação ao WWR, Santana e Ghisi (2007) concluíram que com o aumento do percentual de abertura na fachada, houve uma variação de até 41,6% no consumo de energia por área dos edifícios de escritório em Florianópolis. A variação no consumo de energia encontrada nas torres de Belo Horizonte foi próxima à de Florianópolis, chegando a 48% de variação.

Foram feitos dois testes usando-se regressão linear multivariada de dados: o primeiro considerando todas as variáveis testadas neste trabalho e verificou-se uma correlação média dos dados com um  $R^2$  de 0,452. O segundo utilizou somente as variáveis significantes encontradas na análise de qui-quadrado e de variância. Verificou-se, também, uma correlação média dos dados, com um  $R^2$  de 0,426. Para melhoria destes índices é necessária uma amostra maior de dados, pois utilizou-se somente 75 edifícios com dados completos. Além disso, seria necessário investigar dados como ILD (carga interna instalada), pois a grande maioria dos estudos utilizaram este como variável de projeto e acredita-se que esta variável irá melhorar a correlação dos dados. No entanto, não se teve acesso ao interior dos escritórios ao longo deste trabalho de tese.

Esta pesquisa mostrou que diversas variáveis influenciaram no consumo de energia das torres analisadas, mesmo em alguns casos, sem significância estatística. Com isso, verificou-se a relevância de analisar-se o consumo de energia elétrica de torres de escritório a partir das

características de projeto. Para que as análises obtenham maior relevância, é necessário obter um maior acesso aos dados de consumo e de projeto das edificações.

## 5.1 Limitações do trabalho

Durante o desenvolvimento deste trabalho, algumas limitações foram encontradas. As principais limitações se restringem ao acesso às informações das edificações e assim, destaca-se:

- Para a criação de um *benchmarking* de energia, quanto maior o número de amostras para o seu desenvolvimento, mais próximo à realidade estará. Com isso, a amostra mínima necessária para corresponder à população de edificações de escritório de Belo Horizonte - MG seria de 229 e se obteve da concessionária o consumo de energia de apenas 101 edificações. O acesso à essas informações de consumo de energia estão restritas às concessionárias e não são de acesso público;
- Também para o desenvolvimento de um *benchmarking*, considera-se necessário o projeto arquitetônico de todas as edificações. O acesso à essas informações são de uso restrito da Prefeitura de Belo Horizonte - MG e obter essas informações, ou parte delas, foi um processo moroso;
- Para a verificação das características de projeto e as possíveis alterações posteriores dos projetos registrados na Prefeitura, seriam necessárias visitas às essas edificações. A maioria dessas liberou o acesso somente às garagens das edificações;
- Não ter acesso às edificações limitou o entendimento e levantamento das cargas internas instaladas – iluminação artificial, número de equipamentos, existência de CPD - itens importantes para o entendimento do consumo de energia elétrica;
- Os horários de uso das edificações foram considerados padrão para todas as edificações uma vez que as edificações não contam com sistema que permita o controle e determinação das horas de uso exatas;
- Considerou-se que todos os elevadores tinham o mesmo gasto energético e horário de uso por não se ter acesso à essas informações;
- A porcentagem de área condicionada artificialmente nas edificações com o modo misto de condicionamento de ar (MM) não foi considerada, pela limitação de acesso aos locais;

- Para a aprovação dos projetos arquitetônicos não é necessário a especificação de materiais das fachadas e coberturas das edificações. Com isso, para avaliação deste item, seria necessário o projeto executivo das edificações e para ter acesso à essas informações, seria necessário contato com as construtoras responsáveis pela construção, o que não foi possível ao longo do trabalho.

## **5.2 Recomendação para trabalhos futuros**

A partir dos resultados obtidos nesta tese e das limitações encontradas, sugerem-se algumas linhas de estudo para o desenvolvimento do *benchmarking* de edificações:

- Desenvolvimento de uma metodologia para a captação dos dados de carga interna instalada das edificações para a análise e comparação do consumo por uso final das edificações;
- Desenvolvimento de uma metodologia para a captação de informação do comportamento do usuário nas edificações para a melhor especificação das rotinas de uso;
- Verificar o percentual de área condicionada das edificações e as características dos condicionadores de ar presentes nas edificações;
- Aumentar o número de informações de consumo de energia e de projetos arquitetônicos da amostra para o desenvolvimento de uma equação de predição do consumo de energia para essa tipologia de edificação;
- Criação de uma plataforma de acesso aos dados de consumo de energia elétrica e de projetos arquitetônicos, onde os usuários de forma voluntária pudessem disponibilizar à comunidade as informações.

# 6.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 15220-1: Desempenho térmico de edificações - Parte 1: Definições, símbolos e unidades. Rio de Janeiro, 2005.

ALANZI, A.; SEO, D.; KRARTI, M. Impact of building shape on thermal performance of office buildings in Kuwait. *Energy Conversion and Management*, v. 50, n. 3, p. 822–828, 2009.

ARMITAGE, P. et al. Using Display Energy Certificates to quantify public sector office energy consumption. *Building Research & Information*, v. 43, n. 6, p. 691–709, 2015.

ASHRAE. ANSI/ASHRAE Standard 90.1—2013: Energy Standard for Building Except Low-Rise Residential Buildings. Atlanta, GA: ASHRAE, 2013.

BORGSTEIN, E. H.; LAMBERTS, R. Developing energy consumption benchmarks for buildings: Bank branches in Brazil. *Energy and Buildings*, v. 82, p. 82–91, 2014.

BORGSTEIN, E. H.; LAMBERTS, R.; HENSEN, J. L. M. Evaluating energy performance in non-domestic buildings: A review. *Energy and Buildings*, v. 128, p. 734–755, 2016.

BRASIL. Ministério de Minas e Energia. Plano Nacional de Energia 2030 / Ministério de Minas e Energia; colaboração Empresa de Pesquisa Energética. Brasília: MME: EPE, 2007.

BRASIL. Regulamento Técnico da Qualidade para Eficiência Energética de Edifícios Comerciais, de Serviços e Públicos – RTQ-C. Ministério do Desenvolvimento, Indústria e Comércio Exterior. Instituto Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial (INMETRO). Portaria no 372, de 17 de setembro de 2010, 2010a.

BRASIL. Regulamento Técnico da Qualidade do Nível de Eficiência Energética de Edifícios Residenciais (RTQ-R). Ministério do Desenvolvimento, Indústria e Comércio Exterior.



Instituto Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial (INMETRO). Portaria no 18, de 16 de janeiro de 2012., 2010b.

BRASIL. Ministério do Desenvolvimento, Indústria e Comércio Exterior. Instituto Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial (INMETRO). Portaria N.O 50, De 01 De Fevereiro De 2013. Manual para a Aplicação do RTQ-C., 2013.

BRASIL, Ministério das Minas e Energia. BEN - Balanço Energético Nacional. Brasília, disponível em: [http:// www.epe.gov.br](http://www.epe.gov.br), acessado em: novembro, 2016.

BRECSU. Energy Consumption Guide 19: Energy Use in Offices. Building Research Energy Conservation Support Unit, Watford, 2000.

CARLO, J. C. Desenvolvimento de Metodologia de Avaliação da Eficiência Energética do Envoltório de Edificações. [Tese de Doutorado] Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis - SC, 2008.

CARVALHO, M. M. Q.; ROVERE, E. L. LA; GONC, A. C. M. Analysis of variables that influence electric energy consumption in commercial buildings in Brazil. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 14, p. 3199–3205, 2010.

CASALS, X. G. Analysis of building energy regulation and certification in Europe : Their role, limitations and differences. *Energy and Buildings*, v. 38, n. 2006, p. 381–392, 2007.

CATALINA, T.; VIRGONE, J.; IORDACHE, V. Study on the Impact of the Building Form on the Energy Consumption. *Proceedings of Building Simulation*, p. 1726–1729, 2011.

CBCS. Benchmarking de escritórios corporativos e recomendações para certificação DEO no Brasil. Conselho Brasileiro de Construção Sustentável - CBCS, 2016.

CHAN, K. T.; CHOW, W. K. Energy impact of commercial-building envelopes in the sub-tropical climate. *Applied Energy*, v. 60, n. 1, p. 21–39, 1998.

CHIRARATTANANON, S. et al. Assessment of energy savings from the revised building energy code of Thailand. *Energy*, v. 35, n. 4, p. 1741–1753, 2010.

CHOU, S. K.; CHANG, W. L.; WONG, Y. W. Effects of multi-parameter changes on energy use of large buildings. *International Journal of Energy Research*, v. 17, n. 9, p. 885–903, 1993.

CHUNG, W. Review of building energy-use performance benchmarking methodologies. *Applied Energy*, v. 88, n. 5, p. 1470–1479, 2011.

CHUNG, W.; HUI, Y. V. A study of energy efficiency of private office buildings in Hong Kong. *Energy and Buildings*, v. 41, n. 6, p. 696–701, 2009.

CHUNG, W.; HUI, Y. V.; LAM, Y. M. Benchmarking the energy efficiency of commercial buildings. *Applied Energy*, v. 83, n. 1, p. 1–14, 2006.

CIBSE GUIDE F: Energy efficiency in buildings. *Energy Efficiency in Buildings*, The Chartered Institution of Building Services Engineers London, 2nd Edition, p. 204, 2004.

DEPECKER, P. et al. Design of buildings shape and energetic consumption. *Building and Environment*, v. 36, n. 5, p. 627–635, 2001.

DORNELLES, K. A. Absortância solar de superfícies opacas : métodos de determinação e base de dados para tintas látex acrílica e PVA. [Tese de Doutorado] Universidade Estadual de Campinas, Campinas - SP, 2008.

SANTOS, I. G.; SOUZA, R. V. G. Proteções solares no regulamento brasileiro de eficiência energética de edifícios comerciais, de serviços e públicos. *Ambiente Construído*, v. 12, p. 227–241, 2012.

EFRON, B.; TIBSHIRANI, R. J. *An Introduction to the Bootstrap*. Chapman and Hall/CRC, 1993.

EMMERICH, S. J. Simulated Performance of Natural and Hybrid Ventilation Systems in an Office Building. *HVAC&R Research*, v. 21:4, n. June 2015, p. 97–1004, 2011.

EMSD - ELECTRICAL & MECHANICAL SERVICES DEPARTMENT, H. K. *Hong Kong Energy Efficiency Registration Scheme for Buildings*, 2007.

EN 15217. *Energy performance of buildings-methods for expressing energy performance and for energy certification of buildings*, 2007.

EZZELDIN, S.; REES, S.; COOK, M. Performance of Mixed-Mode cooling strategies for office buildings in arid climates. *Building Simulation 2009*, p. 1053–1060, 2009.

FIELD, A. *Descobrimos a Estatística usando o SPSS*. 2a edição ed. Artmed, 2009.

FILIPPÍN, C. Benchmarking the energy efficiency and greenhouse gases emissions of school buildings in central Argentina. *Building and Environment*, v. 35, n. 5, p. 407–414, 2000.

FOSSATI, M.; LAMBERTS, R. Eficiência energética da envoltória de edifícios de escritórios de Florianópolis: discussões sobre a aplicação do método prescritivo do RTQ-C. *Ambiente Construido*, v. 10, n. 2, p. 59–69, 2010.

FUMO, N.; MAGO, P.; LUCK, R. Methodology to estimate building energy consumption using EnergyPlus Benchmark Models. *Energy and Buildings*, v. 42, n. 12, p. 2331–2337, 2010.

GAO, X.; MALKAWI, A. A new methodology for building energy performance benchmarking: An approach based on intelligent clustering algorithm. *Energy and Buildings*, v. 84, p. 607–616, 2014.

GELETKA, V.; SEDLÁKOVÁ, A. Energy Consumption Conditioned. p. 4–11, 2010.

GÜÇYETER, B.; GÜNAYDIN, H. M. Optimization of an envelope retrofit strategy for an existing office building. *Energy and Buildings*, v. 55, n. 2012, p. 647–659, 2014.

HAASE, M.; AMATO, A. An investigation of the potential for natural ventilation and building orientation to achieve thermal comfort in warm and humid climates. *Solar Energy*, v. 83, n. 3, p. 389–399, 2009.

HEISELBERG, P. et al. Application of sensitivity analysis in design of sustainable buildings. *Renewable Energy*, v. 34, n. 9, p. 2030–2036, 2009.

HONG, S. et al. A comparative study of benchmarking approaches for non-domestic buildings : Part 1 – Top-down approach. n. 2013, p. 119–130, 2014.

HOPFE, C. J.; HENSEN, J. L. M. Uncertainty analysis in building performance simulation for design support. *Energy and Buildings*, v. 43, n. 10, p. 2798–2805, 2011.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. Total energy use in buildings: Analysis and evaluation methods, 2013.

JAZIZADEH, F. et al. Human-Building Interaction for Energy Conservation in Office Buildings. *Construction Research Congress*, p. 1830–1839, 2012.

JI, Y.; LOMAS, K. J.; COOK, M. J. Hybrid ventilation for low energy building design in south

China. *Building and Environment*, v. 44, n. 11, p. 2245–2255, 2009.

KASZNAR, I. K. *Regressão Multipla: uma digressão sobre seus usos*. IBCI – Institutional Business Consultoria Internacional.

KNEIFEL, J. Life-cycle carbon and cost analysis of energy efficiency measures in new commercial buildings. *Energy and Buildings*, v. 42, n. 3, p. 333–340, 2010.

KOLOKOTSA, D.; NIKOLAOU, T.; STRAVRAKAKIS, G. Review on methodologies for energy benchmarking, rating and classification of buildings. *Advances in Building Energy Research*, v. 5, p. 53–70, 2011.

KWOK, A. G.; RAJKOVICH, N. B. Addressing climate change in comfort standards. *Building and Environment*, v. 45, n. 1, p. 18–22, 2010.

LAM, J. C.; HUI, S. A. M. C. M. Sensitivity Analysis of Energy Performance of Office Buildings. *Building and Environment*, v. 31, n. I, p. 27–39, 1996.

LAM, J. C.; WAN, K. K. W.; YANG, L. Sensitivity analysis and energy conservation measures implications. *Energy Conversion and Management*, v. 49, n. 11, p. 3170–3177, 2008.

LAMBERTS, R.; PEREIRA, F. O. R.; DUTRA, L. *Eficiência Energética na Arquitetura*. 3a edição ed. Rio de Janeiro: 2014.

LANGNER, M. R. et al. An investigation of design parameters that affect commercial high-rise office building energy consumption and demand. *Journal of Building Performance Simulation*, v. 5, n. 5, p. 313–328, 2012.

LEE, S. E.; RAJAGOPALAN, P. Building energy efficiency labeling programme in Singapore. *Energy Policy*, v. 36, n. 10, p. 3982–3992, 2008.

LEE, W. L.; BURNETT, J. Benchmarking energy use assessment of HK-BEAM , BREEAM and LEED. *Building and Environment*, v. 43, p. 1882–1891, 2008.

LEE, W. S. Benchmarking the energy performance for cooling purposes in buildings using a novel index-total performance of energy for cooling purposes. *Energy*, v. 35, n. 1, p. 50–54, 2010.

LI, J. et al. Survey and analysis of energy consumption in office buildings in Tianjin. *Frontiers*

in Energy, v. 7, n. 1, p. 69–74, 2013.

MARA, T. A.; TARANTOLA, S. Application of Global Sensitivity Analysis of Model Output to Building Thermal Simulations. p. 290–302, 2008.

MARIE, A.; EGAN, A. The use of computer building simulation to predict the energy efficiency of Australian office buildings – two case studies. n. November, 2008.

MASCARÓ, J. L.; MASCARÓ, L. Incidência das variáveis projetivas e de construção no consumo energético dos edifícios. Porto Alegre: Sagra: DC Luzzatto, 1992.

MATSON, N. E.; PIETTE, M. A. Review of California and National Methods for Energy-Performance Benchmarking of Commercial Buildings Ernest Orlando Lawrence Berkeley National Laboratory, 2005.

MEIER, A.; OLOFSSON, T.; LAMBERTS, R. What Is an Energy-Efficient Building? IX Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído. Anais...Foz do Iguaçu - Paraná - Brasil: 2002

MELO, A. P.; LAMBERTS, R. Opaque envelope parameters versus energy consumption in commercial buildings in Brazil. Journal of Building Performance Simulation, v. 1, p. 37–41, 2008.

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA (MME). Empresa de Pesquisa Energética. Plano Nacional de Energia 2030. Rio de Janeiro: EPE, 2007. 408 p. ISSN: 978-85-60025-02-2, disponível em: <http://www.epe.gov.br>.

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA (MME). Plano Nacional de Eficiência Energética. Premissas e Diretrizes Básicas, p. 156, 2011.

MOTTAHEDI, M. et al. Multi-linear Regression Models to Predict the Annual Energy Consumption of an Office Building with Different Shapes. Procedia Engineering, v. 118, p. 622–629, 2015.

NIKOLAOU, T. et al. Managing Indoor Environments and Energy in Buildings with Integrated Intelligent Systems. Green Energy and Technology, p. 261, 2015.

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*, v. 48, n. 1, p. 300–305, 2007.

PÉREZ-LOMBARD, L. et al. A review of benchmarking, rating and labelling concepts within the framework of building energy certification schemes. *Energy and Buildings*, v. 41, n. 3, p. 272–278, 2009.

PINTO, R. D. O. Avaliação Pós-Ocupação do Desempenho Térmico em Edifícios de Escritórios. [Dissertação de Mestrado] Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais. Belo Horizonte - MG, 2003.

PLANYC. Inventory of New York City Greenhouse Gas Emissions. A Greener, Greater New York. The City of New York, 2012.

RAJI, B.; TENPIERIK, M. J.; VAN DEN DOBBELSTEEN, A. An assessment of energy-saving solutions for the envelope design of high-rise buildings in temperate climates: A case study in the Netherlands. *Energy and Buildings*, v. 124, p. 210–221, 2015.

REY, F. J.; VELASCO, E.; VARELA, F. Building Energy Analysis (BEA): A methodology to assess building energy labelling. *Energy and Buildings*, v. 39, n. 6, p. 709–716, 2007.

RIBEIRO, N. F. Procedimentos simplificados para a avaliação da envoltória pelo método prescritivo do RTQ-C, com foco em edificações existentes. [Dissertação de Mestrado] Universidade Federal de Minas Gerais, 2016.

RODRÍGUEZ, G. C. et al. Uncertainties and sensitivity analysis in building energy simulation using macroparameters. *Energy and Buildings*, v. 67, p. 79–87, 2013.

ROMÉRO, M. DE A.; REIS, L. B. DOS. Eficiência energética em edifícios. 1a edição ed. Barueri - SP: Editora Manoele Ltda, 2012.

RUPP, R. F.; GHISI, E. Potencial de economia de energia elétrica através do uso da luz natural e da ventilação híbrida em edifícios comerciais em Florianópolis. *Ambiente Construído*, v. 13, p. 75–86, 2013.

SAIDUR, R. Energy consumption, energy savings, and emission analysis in Malaysian office buildings. *Energy Policy*, v. 37, n. 10, p. 4104–4113, 2009.

SALTELLI, A. Sensitivity analysis for importance assessment. *Risk Analysis*, v. 22, p. 579–590, 2002.

SALTELLI, A. et al. *Global Sensitivity Analysis. The Primer*. John Wiley & Sons, Ltd, 2008.

SALTELLI, A.; TARANTOLA, S.; CAMPOLONGO, F. Sensitivity Analysis as an Ingredient of Modeling. *Statistical Science*, v. 15, p. 377–395, 2000.

SANCHEZ, D. G. et al. Application of sensitivity analysis in building energy simulations : Combining first- and second-order elementary effects methods. *Energy and Buildings*, v. 68, p. 741–750, 2014.

SANTAMOURIS, M.; WOUTERS, P. *Building Ventilation: The State of the Art*. Routledge, 2006.

SANTANA, M. V. Influência de parâmetros construtivos no consumo de energia de edifícios de escritório localizados em Florianópolis–SC. [Dissertação de Mestrado] Universidade Federal de Santa Catarina, 2006.

SANTANA, M. V.; GHISI, E. Influência do percentual de área de janela na fachada e da absorvância de paredes externas no consumo de energia em edifícios de escritório da cidade de Florianópolis-SC. Ouro Preto: Encontro Nacional de Conforto no Ambiente Construído, 9, Encontro Latino-Americano sobre Conforto no Ambiente Construído, 2007

SIGNOR, R. Análise de regressão do consumo de energia elétrica frente a variáveis arquitetônicas para edifícios comerciais climatizados em 14 capitais brasileiras. [Dissertação de Mestrado] Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC, 1999.

SILVA, H. L. N. DA. Benchmarking de consumo energético em edifícios comerciais multiusuários de alto padrão na região metropolitana de São Paulo. [Dissertação de Mestrado] Universidade Federal do ABC, 2013.

SOZER, H. Improving energy efficiency through the design of the building envelope. *Building and Environment*, v. 45, n. 12, p. 2581–2593, 2010.

STAPENHURST, T. *The Benchmarking Book*. Routledge, 2009.

STERN, F. Demand and Time-Differentiated Energy Savings Cross-Cutting Protocols.

National Renewable Energy Laboratory (NREL), 2013.

STEVENSON, W. J. Estatística Aplicada à Administração. Harbra, 2001.

SUN, C.; GILES, H.; LIAN, Z. ScienceDirect The dynamic impact of window characteristics on shading factor and energy consumption. *Solar Energy*, v. 102, p. 1–13, 2014.

TIAN, W. A review of sensitivity analysis methods in building energy analysis. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 20, p. 411–419, 2013.

TIAN, W. et al. Bootstrap techniques for sensitivity analysis and model selection in building thermal performance analysis. *Applied Energy*, v. 135, p. 320–328, 2014.

TIAN, W. et al. Relationship between built form and energy performance of office buildings in a severe cold Chinese region. *Building Simulation*, v. 10, n. 1, p. 11–24, 2017.

U.S. DEPARTMENT OF ENERGY'S COMMERCIAL BUILDING INITIATIVE. Buildings Performance Metrics Terminology. Disponível em: <[http://energy.gov/sites/prod/files/2013/12/f5/metrics\\_terminology\\_20090203.pdf](http://energy.gov/sites/prod/files/2013/12/f5/metrics_terminology_20090203.pdf)>. Acesso em: 20 jun. 2016.

US ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. ENERGY STAR® Performance Ratings Technical Methodology, 2010.

VELOSO, A. C. O.; SOUZA, R. V. G.; KOURY, R. N. N. Evaluation of electric power consumption of non-residential buildings in the city of Belo Horizonte - correlation with design decisions in a study case of a hybrid building. *Energy Procedia*, v. 78, p. 747–752, 2015.

VELOSO, A. C. O.; SOUZA, R. V. G.; KOURY, R. N. N. Research of design features that influence energy consumption in office buildings in Belo Horizonte, Brazil. *Energy Procedia*, v. 111, p. 101-110, 2017.

VERA, I.; LANGLOIS, L. Energy indicators for sustainable development. *Energy*, v. 32, n. 6, p. 875–882, 2007.

WANG, L.; MATHEW, P.; PANG, X. Uncertainties in energy consumption introduced by building operations and weather for a medium-size office building. *Energy and Buildings*, v. 53, p. 152–158, 2012.

WANG, S.; YAN, C.; XIAO, F. Quantitative energy performance assessment methods for



existing buildings. *Energy and Buildings*, v. 55, p. 873–888, 2012.

WILDE, P. DE; TIAN, W. Predicting the performance of an office under climate change: A study of metrics , sensitivity and zonal resolution. *Energy and Buildings*, v. 42, n. 10, p. 1674–1684, 2010.

ZHAI, Z. J.; JOHNSON, M.; KRARTI, M. Assessment of natural and hybrid ventilation models in whole-building energy simulations. *Energy and Buildings*, v. 43, n. 9, p. 2251–2261, 2011.

## ANEXO 1

### Valores críticos da distribuição qui-quadrado

TABELA A-4 Distribuição Qui-Quadrado ( $\chi^2$ )										
Graus de Liberdade	Área à Direita do Valor Crítico									
	0,995	0,99	0,975	0,95	0,90	0,10	0,05	0,025	0,01	0,005
1	—	—	0,001	0,004	0,016	2,706	3,841	5,024	6,635	7,879
2	0,010	0,020	0,051	0,103	0,211	4,605	5,991	7,378	9,210	10,597
3	0,072	0,115	0,216	0,352	0,584	6,251	7,815	9,348	11,345	12,838
4	0,207	0,297	0,484	0,711	1,064	7,779	9,488	11,143	13,277	14,860
5	0,412	0,554	0,831	1,145	1,610	9,236	11,071	12,833	15,086	16,750
6	0,676	0,872	1,237	1,635	2,204	10,645	12,592	14,449	16,812	18,548
7	0,989	1,239	1,690	2,167	2,833	12,017	14,067	16,013	18,475	20,278
8	1,344	1,646	2,180	2,733	3,490	13,362	15,507	17,535	20,090	21,955
9	1,735	2,088	2,700	3,325	4,168	14,684	16,919	19,023	21,666	23,589
10	2,156	2,558	3,247	3,940	4,865	15,987	18,307	20,483	23,209	25,188
11	2,603	3,053	3,816	4,575	5,578	17,275	19,675	21,920	24,725	26,757
12	3,074	3,571	4,404	5,226	6,304	18,549	21,026	23,337	26,217	28,299
13	3,565	4,107	5,009	5,892	7,042	19,812	22,362	24,736	27,688	29,819
14	4,075	4,660	5,629	6,571	7,790	21,064	23,685	26,119	29,141	31,319
15	4,601	5,229	6,262	7,261	8,547	22,307	24,996	27,488	30,578	32,801
16	5,142	5,812	6,908	7,962	9,312	23,542	26,296	28,845	32,000	34,267
17	5,697	6,408	7,564	8,672	10,085	24,769	27,587	30,191	33,409	35,718
18	6,265	7,015	8,231	9,390	10,865	25,989	28,869	31,526	34,805	37,156
19	6,844	7,633	8,907	10,117	11,651	27,204	30,144	32,852	36,191	38,582
20	7,434	8,260	9,591	10,851	12,443	28,412	31,410	34,170	37,566	39,997
21	8,034	8,897	10,283	11,591	13,240	29,615	32,671	35,479	38,932	41,401
22	8,643	9,542	10,982	12,338	14,042	30,813	33,924	36,781	40,289	42,796
23	9,260	10,196	11,689	13,091	14,848	32,007	35,172	38,076	41,638	44,181
24	9,886	10,856	12,401	13,848	15,659	33,196	36,415	39,364	42,980	45,559
25	10,520	11,524	13,120	14,611	16,473	34,382	37,652	40,646	44,314	46,928
26	11,160	12,198	13,844	15,379	17,292	35,563	38,885	41,923	45,642	48,290
27	11,808	12,879	14,573	16,151	18,114	36,741	40,113	43,194	46,963	49,645
28	12,461	13,565	15,308	16,928	18,939	37,916	41,337	44,461	48,278	50,993
29	13,121	14,257	16,047	17,708	19,768	39,087	42,557	45,722	49,588	52,336
30	13,787	14,954	16,791	18,493	20,599	40,256	43,773	46,979	50,892	53,672
40	20,707	22,164	24,433	26,509	29,051	51,805	55,758	59,342	63,691	66,766
50	27,991	29,707	32,357	34,764	37,689	63,167	67,505	71,420	76,154	79,490
60	35,534	37,485	40,482	43,188	46,459	74,397	79,082	83,298	88,379	91,952
70	43,275	45,442	48,758	51,739	55,329	85,527	90,531	95,023	100,425	104,215
80	51,172	53,540	57,153	60,391	64,278	96,578	101,879	106,629	112,329	116,321
90	59,196	61,754	65,647	69,126	73,291	107,565	118,145	118,136	124,116	128,299
100	67,328	70,065	74,222	77,929	82,358	118,498	124,342	129,561	135,807	140,169

## ANEXO 2

### Valores críticos da distribuição F



Os graus de liberdade do numerador estão relacionados no topo da tabela e os graus de liberdade do denominador nas colunas extremas. O primeiro valor listado (menor valor) é o valor de  $F$ , à direita do qual ficam 0,05 da área sob a curva, e o segundo valor (maior valor) é o valor de  $F$ , à direita do qual fica 0,01 da área sob a curva.

graus de liberdade do numerador

	1	2	3	4	5	6	8	10	12	16	20	30	40	50	100
1	161 4,052	200 4,999	216 5,403	225 5,625	230 5,764	234 5,859	239 5,981	242 6,056	244 6,106	246 6,169	248 6,208	250 6,258	251 6,286	252 6,302	253 6,334
2	18,51 98,49	19,00 99,00	19,16 99,17	19,25 99,25	19,30 99,30	19,33 99,33	19,37 99,36	19,39 99,40	19,41 99,42	19,43 99,44	19,44 99,45	19,46 99,47	19,47 99,48	19,47 99,48	19,49 99,49
3	10,13 34,12	9,55 30,82	9,28 29,46	9,12 28,71	9,01 28,24	8,94 27,91	8,84 27,49	8,78 27,23	8,74 27,05	8,69 26,83	8,66 26,69	8,62 26,50	8,60 26,41	8,58 26,35	8,56 26,23
4	7,71 21,20	6,94 18,00	6,59 16,69	6,39 15,98	6,26 15,52	6,16 15,21	6,04 14,80	5,96 14,54	5,91 14,37	5,84 14,15	5,80 14,02	5,74 13,83	5,71 13,74	5,70 13,69	5,66 13,57
5	6,61 16,26	5,79 13,27	5,41 12,06	5,19 11,39	5,05 10,97	4,95 10,67	4,82 10,27	4,74 10,05	4,68 9,89	4,60 9,68	4,56 9,55	4,50 9,38	4,46 9,29	4,44 9,24	4,40 9,13
6	5,99 13,74	5,14 10,92	4,76 9,78	4,53 9,15	4,39 8,75	4,28 8,47	4,15 8,10	4,06 7,87	4,00 7,72	3,92 7,52	3,87 7,39	3,81 7,23	3,77 7,14	3,75 7,09	3,71 6,99
7	5,59 12,25	4,74 9,55	4,35 8,45	4,12 7,85	3,97 7,46	3,87 7,19	3,73 6,84	3,63 6,62	3,57 6,47	3,49 6,27	3,44 6,15	3,38 5,98	3,34 5,90	3,32 5,85	3,28 5,75
8	5,32 11,26	4,46 8,65	4,07 7,59	3,84 7,01	3,69 6,63	3,58 6,37	3,44 6,03	3,34 5,82	3,28 5,67	3,20 5,48	3,15 5,36	3,08 5,20	3,05 5,11	3,03 5,06	2,98 4,96

graus de liberdade do numerador

	1	2	3	4	5	6	8	10	12	16	20	30	40	50	100	$\phi_4$
9	5.12 10.56	4.26 8.02	3.86 6.99	3.63 6.42	3.48 6.06	3.37 5.80	3.23 5.47	3.13 5.26	3.07 5.11	2.98 4.92	2.93 4.80	2.86 4.64	2.82 4.56	2.80 4.51	2.76 4.41	9
10	4.96 10.04	4.10 7.56	3.71 6.55	3.48 5.99	3.33 5.64	3.22 5.39	3.07 5.06	2.97 4.85	2.91 4.71	2.82 4.52	2.77 4.41	2.70 4.25	2.67 4.17	2.64 4.12	2.59 4.01	10
11	4.84 9.65	3.98 7.20	3.59 6.22	3.36 5.67	3.20 5.32	3.09 5.07	2.95 4.74	2.86 4.54	2.79 4.40	2.70 4.21	2.65 4.10	2.57 3.94	2.53 3.86	2.50 3.80	2.45 3.70	11
12	4.75 9.33	3.88 6.93	3.49 5.95	3.26 5.41	3.11 5.06	3.00 4.82	2.85 4.50	2.76 4.30	2.69 4.16	2.60 3.98	2.54 3.86	2.46 3.70	2.42 3.61	2.40 3.56	2.35 3.46	12
13	4.67 9.07	3.80 6.70	3.41 5.74	3.18 5.20	3.02 4.86	2.92 4.62	2.77 4.30	2.67 4.10	2.60 3.96	2.51 3.78	2.46 3.67	2.38 3.51	2.34 3.42	2.32 3.37	2.26 3.27	13
14	4.60 8.86	3.74 6.51	3.34 5.56	3.11 5.03	2.96 4.69	2.85 4.46	2.70 4.14	2.60 3.94	2.53 3.80	2.44 3.62	2.39 3.51	2.31 3.34	2.27 3.26	2.24 3.21	2.19 3.11	14
15	4.54 8.68	3.68 6.36	3.29 5.42	3.06 4.89	2.90 4.56	2.79 4.32	2.64 4.00	2.55 3.80	2.48 3.67	2.39 3.48	2.33 3.36	2.25 3.20	2.21 3.12	2.18 3.07	2.12 2.97	15
16	4.49 8.53	3.63 6.23	3.24 5.29	3.01 4.77	2.85 4.44	2.74 4.20	2.59 3.89	2.49 3.69	2.42 3.55	2.33 3.37	2.28 3.25	2.20 3.10	2.16 3.01	2.13 2.96	2.07 2.86	16
17	4.45 8.40	3.59 6.11	3.20 5.18	2.96 4.67	2.81 4.34	2.70 4.10	2.55 3.79	2.45 3.59	2.38 3.45	2.29 3.27	2.23 3.16	2.15 3.00	2.11 2.92	2.08 2.86	2.02 2.76	17
18	4.41 8.28	3.55 6.01	3.16 5.09	2.93 4.58	2.77 4.25	2.66 4.01	2.51 3.71	2.41 3.51	2.34 3.37	2.25 3.19	2.19 3.07	2.11 2.91	2.07 2.83	2.04 2.78	1.98 2.68	18
19	4.38 8.18	3.52 5.93	3.13 5.01	2.90 4.50	2.74 4.17	2.63 3.94	2.48 3.63	2.38 3.43	2.31 3.30	2.21 3.12	2.15 3.00	2.07 2.84	2.02 2.76	2.00 2.70	1.94 2.60	19
20	4.35 8.10	3.49 5.85	3.10 4.94	2.87 4.43	2.71 4.10	2.60 3.87	2.45 3.56	2.35 3.37	2.28 3.23	2.18 3.05	2.12 2.94	2.04 2.77	1.99 2.69	1.96 2.63	1.90 2.53	20

graus de liberdade do numerador

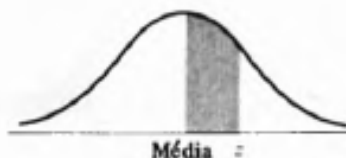
	1	2	3	4	5	6	8	10	12	16	20	30	40	50	100	$\phi_4$
25	4.24 7.77	3.38 5.57	2.99 4.68	2.76 4.18	2.60 3.86	2.49 3.63	2.34 3.32	2.24 3.13	2.16 2.99	2.06 2.81	2.00 2.70	1.92 2.54	1.87 2.45	1.84 2.40	1.77 2.29	25
30	4.17 7.56	3.32 5.39	2.92 4.51	2.69 4.02	2.53 3.70	2.42 3.47	2.27 3.17	2.16 2.98	2.09 2.84	1.99 2.66	1.93 2.55	1.84 2.38	1.79 2.29	1.76 2.24	1.69 2.13	30
40	4.08 7.31	3.23 5.18	2.84 4.31	2.61 3.83	2.45 3.51	2.34 3.29	2.18 2.99	2.07 2.80	2.00 2.66	1.90 2.49	1.84 2.37	1.74 2.20	1.69 2.11	1.66 2.05	1.59 1.94	40
50	4.03 7.17	3.18 5.06	2.79 4.20	2.56 3.72	2.40 3.41	2.29 3.18	2.13 2.88	2.02 2.70	1.95 2.56	1.85 2.39	1.78 2.26	1.69 2.10	1.63 2.00	1.60 1.94	1.52 1.82	50
60	4.00 7.08	3.15 4.98	2.76 4.13	2.52 3.65	2.37 3.34	2.25 3.12	2.10 2.82	1.99 2.63	1.92 2.50	1.81 2.32	1.75 2.20	1.65 2.03	1.59 1.93	1.56 1.87	1.48 1.74	60
80	3.96 6.96	3.11 4.88	2.72 4.04	2.48 3.56	2.33 3.25	2.21 3.04	2.05 2.74	1.95 2.55	1.88 2.41	1.77 2.24	1.70 2.11	1.60 1.94	1.54 1.84	1.51 1.78	1.42 1.65	80
100	3.94 6.90	3.09 4.82	2.70 3.98	2.46 3.51	2.30 3.20	2.19 2.99	2.03 2.69	1.92 2.51	1.85 2.36	1.75 2.19	1.68 2.06	1.57 1.89	1.51 1.79	1.48 1.73	1.39 1.59	100
150	3.91 6.81	3.06 4.75	2.67 3.91	2.43 3.44	2.27 3.14	2.16 2.92	2.00 2.62	1.89 2.44	1.82 2.30	1.71 2.12	1.64 2.00	1.54 1.83	1.47 1.72	1.44 1.66	1.34 1.51	150
200	3.89 6.76	3.04 4.71	2.65 3.88	2.41 3.41	2.26 3.11	2.14 2.90	1.98 2.60	1.87 2.41	1.80 2.28	1.69 2.09	1.62 1.97	1.52 1.79	1.45 1.69	1.42 1.62	1.32 1.48	200
400	3.86 6.70	3.02 4.66	2.62 3.83	2.39 3.36	2.23 3.06	2.12 2.85	1.96 2.55	1.85 2.37	1.78 2.23	1.67 2.04	1.60 1.92	1.49 1.74	1.42 1.64	1.38 1.57	1.28 1.42	400
1000	3.85 6.66	3.00 4.62	2.61 3.80	2.38 3.34	2.22 3.04	2.10 2.82	1.95 2.53	1.84 2.34	1.76 2.20	1.65 2.01	1.58 1.89	1.47 1.71	1.41 1.61	1.36 1.54	1.26 1.38	1000
$\infty$	3.84 6.64	2.99 4.60	2.60 3.78	2.37 3.32	2.21 3.02	2.09 2.80	1.94 2.51	1.83 2.32	1.75 2.18	1.64 1.99	1.57 1.87	1.46 1.69	1.40 1.59	1.35 1.52	1.24 1.36	$\infty$

Fonte: Reproduzido, com permissão, de *Statistical Methods* de George W. Snedecor e William G. Cochran, 6th ed., copyright © 1967 por The Iowa State University Press, Ames, Iowa 50010.

### ANEXO 3

#### Áreas na Cauda Direita sob a Distribuição Normal Padronizada

Cada valor da tabela indica a proporção da área total sob a curva normal contida no segmento delimitado por uma perpendicular levantada na média e uma perpendicular levantada à distância de  $z$  desvios padrões unitários.



Ilustrando: 43,57% da área sob uma curva normal estão entre a ordenada máxima e um ponto 1,52 desvios padrões adiante.

$z$	0.00	0.01	0.02	0.03	0.04	0.05	0.06	0.07	0.08	0.09
0.0	0.0000	0.0040	0.0080	0.0120	0.0160	0.0199	0.0239	0.0279	0.0319	0.0359
0.1	0.0398	0.0438	0.0478	0.0517	0.0557	0.0596	0.0636	0.0675	0.0714	0.0753
0.2	0.0793	0.0832	0.0871	0.0910	0.0948	0.0987	0.1026	0.1064	0.1103	0.1141
0.3	0.1179	0.1217	0.1255	0.1293	0.1331	0.1368	0.1406	0.1443	0.1480	0.1517
0.4	0.1554	0.1591	0.1628	0.1664	0.1700	0.1736	0.1772	0.1808	0.1844	0.1879
0.5	0.1915	0.1950	0.1985	0.2019	0.2054	0.2088	0.2123	0.2157	0.2190	0.2224
0.6	0.2257	0.2291	0.2324	0.2357	0.2389	0.2422	0.2454	0.2486	0.2518	0.2549
0.7	0.2580	0.2612	0.2642	0.2673	0.2704	0.2734	0.2764	0.2794	0.2823	0.2852
0.8	0.2881	0.2910	0.2939	0.2967	0.2995	0.3023	0.3051	0.3078	0.3106	0.3133
0.9	0.3159	0.3186	0.3212	0.3238	0.3264	0.3289	0.3315	0.3340	0.3365	0.3389
1.0	0.3413	0.3438	0.3461	0.3485	0.3508	0.3531	0.3554	0.3577	0.3599	0.3621
1.1	0.3643	0.3665	0.3686	0.3708	0.3729	0.3749	0.3770	0.3790	0.3810	0.3830
1.2	0.3849	0.3869	0.3888	0.3907	0.3925	0.3944	0.3962	0.3980	0.3997	0.4015
1.3	0.4032	0.4049	0.4066	0.4082	0.4099	0.4115	0.4131	0.4147	0.4162	0.4177
1.4	0.4192	0.4207	0.4222	0.4236	0.4251	0.4265	0.4279	0.4292	0.4306	0.4319
1.5	0.4332	0.4345	0.4357	0.4370	0.4382	0.4394	0.4406	0.4418	0.4429	0.4441
1.6	0.4452	0.4463	0.4474	0.4484	0.4495	0.4505	0.4515	0.4525	0.4535	0.4545
1.7	0.4554	0.4564	0.4573	0.4582	0.4591	0.4599	0.4608	0.4616	0.4625	0.4633
1.8	0.4641	0.4649	0.4656	0.4664	0.4671	0.4678	0.4686	0.4693	0.4699	0.4706
1.9	0.4713	0.4719	0.4726	0.4732	0.4738	0.4744	0.4750	0.4756	0.4761	0.4767
2.0	0.4772	0.4778	0.4783	0.4788	0.4793	0.4798	0.4803	0.4808	0.4812	0.4817
2.1	0.4821	0.4826	0.4830	0.4834	0.4838	0.4842	0.4846	0.4850	0.4854	0.4857
2.2	0.4861	0.4864	0.4868	0.4871	0.4875	0.4878	0.4881	0.4884	0.4887	0.4890
2.3	0.4893	0.4896	0.4898	0.4901	0.4904	0.4906	0.4909	0.4911	0.4913	0.4916
2.4	0.4918	0.4920	0.4922	0.4925	0.4927	0.4929	0.4931	0.4932	0.4934	0.4936
2.5	0.4938	0.4940	0.4941	0.4943	0.4945	0.4946	0.4948	0.4949	0.4951	0.4952
2.6	0.4953	0.4955	0.4956	0.4957	0.4959	0.4960	0.4961	0.4962	0.4963	0.4964
2.7	0.4965	0.4966	0.4967	0.4968	0.4969	0.4970	0.4971	0.4972	0.4973	0.4974
2.8	0.4974	0.4975	0.4976	0.4977	0.4977	0.4978	0.4979	0.4979	0.4980	0.4981
2.9	0.4981	0.4982	0.4982	0.4983	0.4984	0.4984	0.4985	0.4985	0.4986	0.4986
3.0	0.4986	0.4987	0.4987	0.4988	0.4988	0.4989	0.4989	0.4989	0.4990	0.4990
3.1	0.4990	0.4991	0.4991	0.4991	0.4992	0.4992	0.4992	0.4992	0.4993	0.4993
3.2	0.4993	0.4993	0.4994	0.4994	0.4994	0.4994	0.4994	0.4995	0.4995	0.4995
3.3	0.4995	0.4995	0.4995	0.4996	0.4996	0.4996	0.4996	0.4996	0.4996	0.4997
3.4	0.4997	0.4997	0.4997	0.4997	0.4997	0.4997	0.4997	0.4997	0.4998	0.4998
3.5	0.4998	0.4998	0.4998	0.4998	0.4998	0.4998	0.4998	0.4998	0.4998	0.4998
3.6	0.4998	0.4998	0.4999	0.4999	0.4999	0.4999	0.4999	0.4999	0.4999	0.4999
3.7	0.4999	0.4999	0.4999	0.4999	0.4999	0.4999	0.4999	0.4999	0.4999	0.4999
3.8	0.4999	0.4999	0.4999	0.4999	0.4999	0.4999	0.4999	0.5000	0.5000	0.5000
3.9	0.5000	0.5000	0.5000	0.5000	0.5000	0.5000	0.5000	0.5000	0.5000	0.5000

## ANEXO 4

### Dados das edificações

n°	tipo	Atorre	EUI torre	WWR (%)	FS	brise?	Afach	FA	FF	cob	abs	classif
#1	MM	12114.47	25.39	41.87	0.87	sim	6532.94	0.05	0.19	652.25	0.515	A
#2	MM	13501.66	91.34	31.84	0.66	não	6446.88	0.06	0.18	744.86	0.661	D
#3	MM	3511.20	97.50	18.16	0.87	não	3270.88	0.10	0.35	368.22	0.782	D
#4	MM	3332.47	58.64	21.57	0.87	não	2888.40	0.12	0.37	399.61	0.758	B
#5	MM	7805.21	116.88	25.00	0.54	não	6653.34	0.09	0.23	680.61	0.782	E
#6	MM	1953.04	66.88	26.31	0.87	não	2161.23	0.24	0.38	461.21	0.515	C
#7	MM	8703.16	23.93	25.00	0.87	não	-	-	-	-	0.758	A
#8	MM	7961.78	48.43	22.02	0.66	sim	6128.13	0.06	0.28	447.81	0.758	B
#9	TC	9102.62	149.14	40.00	0.38	não	5993.79	0.09	0.17	824.78	0.782	E
#10	MM	9703.27	201.97	55.98	0.63	não	6290.20	0.05	0.23	475.79	0.758	E
#11	MM	8852.00	43.50	50.00	0.55	sim	5993.33	0.04	0.25	371.78	0.515	B
#12	MM	14080.51	25.83	40.00	0.87	sim	5214.13	0.12	0.14	1636.90	0.515	A
#13	TC	8721.19	119.56	17.00	0.52	não	5830.75	0.19	0.27	1651.39	0.758	E
#14	MM	25452.76	33.38	55.83	0.63	não	12394.60	0.04	0.17	1138.39	0.515	A
#15	MM	2467.22	23.18	17.94	0.87	sim	2269.40	0.08	0.45	200.00	0.515	A
#16	MM	12599.95	48.56	16.90	0.87	sim	8637.41	0.04	0.24	518.79	0.515	B
#17	MM	4598.27	65.74	25.00	0.58	não	3521.93	0.09	0.29	390.93	0.758	C
#18	MM	5757.65	51.65	20.61	0.63	sim	5598.04	0.16	0.37	944.31	0.515	B
#19	MM	2136.70	91.19	25.00	0.87	não	2347.99	0.10	0.44	203.00	0.661	D
#20	MM	6252.92	103.87	43.85	0.55	sim	3563.88	0.08	0.24	507.08	0.758	E
#21	MM	3456.44	92.13	47.84	0.63	não	4044.47	0.04	0.40	136.69	0.758	D
#22	TC	10276.21	35.25	49.08	0.47	não	5508.87	0.05	0.21	536.22	0.758	A
#23	TC	11072.43	90.48	35.00	0.63	não	12242.55	0.09	0.16	950.90	0.782	D
#24	TC	11925.80	444.53	28.29	0.39	não	6448.06	0.04	0.22	524.14	0.782	E
#25	MM	5604.49	86.35	9.78	0.47	não	4907.93	0.11	0.33	601.75	0.782	D
#26	NC	5562.58	53.84	40.00	0.47	não	-	-	-	-	0.515	B
#27	NC	5613.06	32.38	28.00	0.87	não	-	-	-	-	0.515	A
#28	MM	1414.00	35.91	25.00	0.87	não	1169.64	0.45	0.27	637.07	0.515	A
#29	MM	3761.07	124.45	18.91	0.45	não	3946.14	0.09	0.37	340.94	0.661	E
#30	MM	4880.24	14.92	25.00	0.52	não	4490.04	0.07	0.28	334.80	0.515	A
#31	MM	1778.00	113.77	11.87	0.87	não	1021.95	0.25	0.32	437.80	0.515	E

n°	tipo	Atorre	EUI torre	WWR (%)	FS	brise?	Afach	FA	FF	cob	abs	classif
#32	MM	21928.00	18.49	40.00	0.87	não	2977.56	0.02	0.03	517.86	0.758	A
#33	MM	12082.95	40.39	24.72	0.87	não	8507.88	0.04	0.25	431.53	0.515	B
#34	MM	1800.80	9.43	19.82	0.87	não	1416.60	0.20	0.33	360.16	0.515	A
#35	MM	6433.00	9.38	25.00	0.87	não	7140.56	0.13	0.24	826.29	0.515	A
#36	NC	5800.00	8.89	25.00	0.87	não	-	-	-	-	0.515	A
#37	NC	5556.34	48.10	25.00	0.87	sim	-	-	-	-	0.782	B
#38	MM	2589.86	59.42	25.00	0.87	não	-	-	-	522.40	0.515	B
#39	MM	4593.00	63.44	20.00	0.39	não	1545.48	0.08	0.22	352.67	0.758	C
#40	MM	10347.44	16.05	25.00	0.87	não	2338.42	0.06	0.22	633.87	0.515	A
#41	MM	2022.01	57.91	15.93	0.87	não	2700.63	0.12	0.48	238.95	0.515	B
#42	MM	2285.27	53.20	14.53	0.39	não	2449.86	0.18	0.45	405.06	0.515	B
#43	MM	3150.94	69.26	11.66	0.39	não	3240.62	0.09	0.40	294.59	0.515	C
#44	TC	4889.00	21.98	35.04	0.54	não	3558.48	0.06	0.26	306.55	0.782	A
#45	NC	1630.30	38.05	40.00	0.87	não	-	-	-	-	0.515	A
#46	MM	2583.15	47.75	25.65	0.87	não	1785.19	0.28	0.36	713.56	0.515	B
#47	MM	1097.30	149.37	25.00	0.55	não	705.59	0.29	0.40	320.39	0.782	E
#48	MM	1878.72	55.53	25.00	0.87	não	979.13	0.46	0.26	855.44	0.661	B
#49	MM	745.63	70.47	20.80	0.47	não	682.87	0.36	0.47	266.33	0.758	C
#50	TC	7341.06	142.85	37.35	0.63	não	5639.72	0.06	0.21	431.55	0.758	E
#51	TC	8788.46	81.54	17.55	0.47	não	7005.10	0.04	0.21	367.72	0.758	D
#52	MM	11277.45	43.95	50.00	0.47	não	7138.13	0.04	0.23	488.35	0.515	B
#53	MM	6520.70	54.33	13.79	0.87	não	4505.02	0.18	0.32	1176.81	0.758	B
#54	MM	3607.51	55.12	16.50	0.87	não	2541.70	0.21	0.33	746.12	0.515	B
#55	MM	2713.62	115.98	17.56	0.58	não	2168.82	0.13	0.34	359.68	0.758	E
#56	TC	2474.19	70.39	25.00	0.39	não	2777.97	0.10	0.27	250.15	0.782	C
#57	MM	14944.27	22.65	16.74	0.87	não	2168.82	0.07	0.08	1013.19	0.515	A
#58	NC	1104.74	16.15	40.00	0.87	não	-	-	-	-	0.515	A
#59	MM	6248.08	28.20	40.00	0.63	não	2161.78	0.03	0.35	178.58	0.758	A
#60	MM	5908.02	174.75	17.62	0.63	não	4254.66	0.19	0.32	1145.39	0.782	E
#61	TC	6205.08	80.85	25.00	0.39	não	4898.04	0.07	0.24	435.71	0.758	D
#62	TC	8248.86	243.01	18.00	0.39	não	7957.70	0.17	0.23	1435.74	0.758	E
#63	TC	5591.89	129.47	40.00	0.39	não	4811.61	0.08	0.26	466.65	0.758	E
#64	MM	5811.24	23.70	40.00	0.63	não	5773.06	0.08	0.22	485.69	0.758	A
#65	TC	6158.31	248.53	43.47	0.47	não	4586.04	0.07	0.26	447.10	0.782	E
#66	TC	4675.89	97.49	23.82	0.38	não	4274.56	0.06	0.39	299.92	0.758	D



n°	tipo	Atorre	EUI torre	WWR (%)	FS	brise?	Afach	FA	FF	cob	abs	classif
#67	TC	5884.80	176.66	40.00	0.39	não	4870.50	0.07	0.26	397.29	0.782	E
#68	TC	7678.52	109.23	50.00	0.39	não	5478.65	0.08	0.25	586.15	0.758	E
#69	TC	9130.53	72.73	25.00	0.39	não	5286.66	0.07	0.18	641.94	0.782	C
#70	MM	11943.06	6.45	50.00	0.87	sim	7720.27	0.06	0.19	681.11	0.782	A
#71	MM	13592.96	61.95	57.42	0.87	sim	7988.34	0.04	0.22	562.06	0.782	C
#72	NC	18196.31	60.55	40.00	0.87	sim	-	-	-	-	0.515	C
#73	MM	10105.00	2.57	25.00	0.38	sim	9385.79	0.10	0.17	988.13	0.782	A
#74	NC	1498.00	86.16	25.00	0.87	não	-	-	-	-	0.515	D
#75	MM	7754.00	14.02	25.00	0.55	não	-	-	-	-	0.782	A
#76	MM	3822.00	3.50	29.64	0.63	não	712.41	0.14	0.19	543.51	0.758	A
#77	NC	6840.06	25.39	10.00	0.47	não	-	-	-	-	0.515	A
#78	NC	9130.53	72.56	30.00	0.58	não	-	-	-	-	0.782	C
#79	NC	2073.13	26.82	25.00	0.87	não	6635.60	0.09	0.76	177.03	0.782	A
#80	NC	6036.18	86.09	4.00	0.63	não	4787.10	0.06	0.29	367.32	0.782	D
#81	NC	5571.57	13.77	20.56	0.63	não	4105.06	0.17	0.31	963.19	0.782	A
#82	MM	3658.24	26.80	34.75	0.87	não	3683.83	0.16	0.34	576.97	0.515	A
#83	MM	5340.37	16.12	10.00	0.87	não	1299.73	0.05	0.38	253.41	0.515	A
#84	TC	12386.98	105.80	40.00	0.45	não	7107.90	0.06	0.19	732.77	0.758	E
#85	MM	2664.43	55.58	18.46	0.52	não	2031.26	0.20	0.36	537.27	0.515	B
#86	MM	9879.42	211.02	37.35	0.63	não	-	-	-	-	0.758	E
#87	TC	7934.26	120.69	14.72	0.47	não	4204.53	0.06	0.22	470.82	0.515	E
#88	NC	1815.51	43.26	10.09	0.55	não	2478.38	0.24	0.57	431.32	0.782	B
#89	TC	12283.62	145.30	53.54	0.36	sim	7543.65	0.06	0.17	682.60	0.758	E
#90	MM	4085.32	74.35	25.00	0.39	não	3824.49	0.08	0.25	327.88	0.758	C
#91	TC	6630.40	277.31	25.00	0.39	não	5554.24	0.05	0.24	362.91	0.758	E
#92	MM	6428.36	44.92	25.00	0.47	não	5579.60	0.08	0.20	498.90	0.515	B
#93	TC	10012.20	332.81	55.59	0.54	não	6539.80	0.10	0.18	1036.00	0.758	E
#94	MM	1850.64	67.99	25.00	0.87	não	2793.74	0.27	0.36	498.82	0.515	C
#95	NC	23400.63	91.85	35.00	0.54	não	9667.90	0.04	0.16	903.30	0.782	D
#96	MM	2869.97	57.10	25.00	0.36	não	2083.73	0.10	0.34	289.93	0.758	B
#97	MM	2321.94	216.21	40.00	0.55	não	3833.87	0.28	0.23	645.58	0.758	E
#98	TC	14767.66	171.89	50.00	0.47	não	7340.63	0.03	0.19	515.21	0.758	E
#99	MM	8813.58	48.76	10.00	0.87	não	6329.23	0.08	0.23	714.99	0.515	B
#100	MM	8153.03	75.17	20.96	0.52	não	6036.68	0.26	0.35	2130.00	0.515	C
#101	TC	4505.64	53.29	40.16	0.52	não	2557.47	0.25	0.15	1123.06	0.758	B

## ANEXO 5

### 1- Valores de Qui-Quadrado de Pearson

#### Modo de Condicionamento de Ar

OBSERVADO			
Classificação	TC	MM	NC
A	2	20	7
B	1	18	3
C	2	9	2
D	4	5	3
E	15	10	0

#### Modo de Condicionamento de Ar

ESPERADO			
Classificação	TC	MM	NC
A	7	18	4
B	5	14	3
C	3	8	2
D	3	7	2
E	6	15	4

#### Cores

OBSERVADO				
Classificação	Amarelo	Marrom	Azul	Cinza
A	17	6	0	6
B	14	2	1	5
C	5	4	0	4
D	1	5	2	4
E	2	7	1	15

#### Cores

ESPERADO				
Classificação	Amarelo	Marrom	Azul	Cinza
A	11	7	1	10
B	8	5	1	7
C	5	3	1	4
D	5	3	0	4
E	10	6	1	8

#### Proteção Solar

OBSERVADO		
Classificação	Sim	Não
A	5	24
B	5	17
C	2	11
D	0	12
E	2	23

#### Proteção Solar

ESPERADO		
Classificação	Sim	Não
A	4	25
B	3	19
C	2	11
D	2	10
E	3	22

Fator Solar						Fator Solar					
OBSERVADO						ESPERADO					
Classificação	0,36	0,45	0,54	0,63	0,87	Classificação	0,36	0,45	0,54	0,63	0,87
A	1	2	3	5	17	A	4	4	5	4	11
B	2	3	4	2	12	B	4	3	4	3	9
C	4	1	3	0	5	C	2	2	2	2	5
D	2	2	1	4	3	D	2	2	2	2	5
E	7	5	7	4	2	E	4	3	4	4	10

## 2- Valores de ANOVA

FA					FF				
Classificação					Classificação				
A	B	C	D	E	A	B	C	D	E
0,05	0,25	0,10	0,09	0,09	0,21	0,15	0,27	0,16	0,17
0,06	0,21	0,07	0,04	0,19	0,26	0,00	0,18	0,21	0,27
0,05	0,12	0,24	0,07	0,04	0,19	0,37	0,38	0,24	0,22
0,12	0,07	0,09	0,06	0,06	0,14	0,28	0,29	0,39	0,21
0,04	0,04	0,08	0,06	0,17	0,17	0,25	0,22	0,18	0,23
0,08	0,04	0,09	0,10	0,09	0,45	0,24	0,40	0,35	0,26
0,46	0,16	0,36	0,10	0,07	0,27	0,37	0,47	0,44	0,26
0,07	0,04	0,05	0,04	0,07	0,28	0,25	0,22	0,40	0,26
0,02	0,12	0,08	0,11	0,08	0,03	0,48	0,25	0,33	0,25
0,20	0,18	0,28	0,06	0,06	0,33	0,45	0,36	0,29	0,19
0,13	0,28	0,26	0,04	0,06	0,24	0,36	0,35	0,16	0,22
0,06	0,47			0,06	0,22	0,26			0,17
0,07	0,04			0,05	0,08	0,23			0,24
0,03	0,18			0,10	0,35	0,32			0,18
0,09	0,21			0,04	0,22	0,33			0,19
0,06	0,20			0,09	0,19	0,36			0,23
0,10	0,08			0,05	0,17	0,20			0,23
0,26	0,10			0,08	0,19	0,34			0,24
0,16	0,08			0,09	0,34	0,23			0,37
0,05	0,24			0,25	0,38	0,57			0,32
0,09				0,30	0,76				0,40
0,17				0,13	0,31				0,34
				0,19					0,32
				0,29					0,23

Aenv					Volume				
Classificação					Classificação				
A	B	C	D	E	A	B	C	D	E
6045,09	3680,53	3028,12	13193,45	6818,57	36883,35	25095,15	8871,20	6960,89	40504,98
3865,03	522,40	5928,60	7372,82	7482,14	48615,93	80046,25	23258,41	13721,64	10535,99
7185,19	3288,01	2622,44	5333,75	6972,20	5472,65	28607,50	37590,36	8462,88	32494,45
6851,03	6575,94	3912,86	4574,48	6071,27	17074,80	6772,36	17916,04	8854,72	39259,53
13532,99	6365,11	1898,15	7191,74	9393,44	136338,80	35555,63	6066,03	2023,39	29852,33
2469,40	9156,20	3535,21	3639,10	5278,26	5402,40	32963,63	6381,11	11056,63	28133,93
1806,71	6542,35	949,20	2550,99	5033,14	33464,75		7026,17	32738,94	5773,08
4824,84	8939,41	8550,40	4181,16	5267,79	13691,59		6929,06	39506,12	16703,07
3495,42	2939,58	4152,37	5509,68	6064,80	14689,50		17660,34	9248,47	10500,90
1776,76	2854,92	3292,56	5154,42	7840,67	41843,96		10097,24	23357,15	80826,50
7966,85	2498,75	8166,68	10571,20	4675,35	6754,10		7193,96		16637,55
2972,29	1834,57			8226,25	28072,88		5118,41		11530,11
3182,01	7626,48			5917,15	44135,93		30527,78		4553,12
2340,36	5681,83			7575,80	61362,87		7045,30		2595,16
6258,75	3287,82			7855,84	6713,20		30887,57		29192,82
8401,38	2568,53			7333,95	8992,05		24330,50		34913,79
10373,92	6078,50			6765,99	16365,51				7381,05
1255,92	2373,66			4070,96	12439,02				17074,18
4260,80	7044,22			4287,08	4105,24				22221,21
1553,14	2909,70			1459,75					41481,18
6812,63				1025,98					20625,93
5068,25				2528,50					19370,68
				5400,05					11729,80
				4479,45					20261,79
									24516,82
									17851,75
									40950,69
									21619,49
									48726,30
									16721,88
									24677,88
									41582,40
									67566,84
									19754,75
									40289,42

WWR					Apcob				
Classificação					Classificação				
A	B	C	D	E	A	B	C	D	E
0,42	0,22	0,25	0,32	0,40	536,22	1123,06	250,15	950,90	824,78
0,56	0,22	0,26	0,18	0,56	306,55	522,40	641,94	367,72	1651,39
0,18	0,17	0,25	0,48	0,50	652,25	399,61	461,21	435,71	524,14
0,49	0,21	0,25	0,35	0,40	1636,90	447,81	390,93	299,92	431,55
0,20	0,25	0,25	0,10	0,17	1138,39	371,78	352,67	744,86	1435,74
0,35	0,16	0,25	0,18	0,44	200,00	518,79	294,59	368,22	466,65
0,17	0,15	0,25	0,24	0,28	637,07	944,31	266,33	203,00	447,10
0,30	0,26	0,25	0,04	0,40	334,80	431,53	562,06	136,69	397,29
0,10	0,14	0,25	0,35	0,19	517,86	238,95	327,88	601,75	586,15
0,21	0,17	0,25		0,12	360,16	405,06	498,82	367,32	732,77
0,35	0,18	0,25		0,40	826,29	713,56	2130,00	903,30	470,82
0,10	0,10	0,20		0,40	633,87	855,44			682,60
0,10	0,40	0,25		0,50	1013,19	488,35			362,91
0,28		0,12		0,40	178,58	1176,81			1036,00
		0,25		0,37	485,69	746,12			515,21
		0,25		0,50	681,11	537,27			680,61
		0,21		0,18	988,13	498,90			475,79
		0,25		0,40	543,51	289,93			507,08
		0,25		0,40	576,97	714,99			340,94
		0,25		0,40	253,41	431,32			437,80
		0,25		0,18	177,03				320,39
		0,57		0,18	963,19				359,68
		0,25		0,40					1145,39
		0,25		0,40					645,58
		0,25		0,43					
		0,30		0,40					
		0,25		0,50					
		0,25		0,50					
		0,25		0,40					
		0,25		0,40					
		0,25		0,37					
		0,25		0,15					
		0,21		0,54					
				0,56					