

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO ESCOLA POLITÉCNICA

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

**DETERMINAÇÃO DE INDICADORES DO DESEMPENHO ENERGÉTICO DE
SHOPPING CENTERS**

Edvalson Moreira Firmino Junior

São Paulo

2010

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO ESCOLA POLITÉCNICA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

**DETERMINAÇÃO DE INDICADORES DO DESEMPENHO ENERGÉTICO DE
SHOPPING CENTERS**

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

Edvalson Moreira Firmino Junior

Orientador: Prof. Dr. Alberto Hernandez Neto

Área de concentração:
Engenharia Mecânica

São Paulo
2010

FICHA CATALOGRÁFICA

Firmino Junior, Edvalson Moreira

Determinação de indicadores do desempenho energético de shopping centers / E.M. Firmino Junior. – São Paulo, 2010. 45p.

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

1. Energia térmica (Eficiência) 2. Shopping centers 3. Indicadores de produtividade (Eficiência) 4. Software livre I. Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia Mecânica II. t.

RESUMO

O trabalho realizado teve como objetivo identificar e analisar a sensibilidade dos parâmetros que influenciam no gasto energético e determinar indicadores que consigam avaliar a eficiência energética de uma edificação típica de “shopping center”. Em primeiro lugar, baseado nas normas da ASHRAE 90.1, foi feito um estudo de como avaliar os materiais que compõem a construção, foram estabelecidos os parâmetros utilizados no modelo e definiu-se uma geometria padrão para análise. Em seguida, utilizando as informações definidas, simulações no programa “Energy Plus” foram realizadas. Essa ferramenta auxiliou na avaliação do consumo total da edificação, usando dados climáticos de cinco cidades brasileiras para simular a influência do clima. Por fim, um estudo da sensibilidade realizado com os resultados das variações de alguns parâmetros mostrou a influência destes no consumo energético. Também foram estabelecidos alguns indicadores, como $(\text{kWh}/\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C} \cdot \text{ano})$ e $(\text{kWh}/\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C} \cdot \text{mês})$, e avaliados comparativamente entre as cinco cidades simuladas. Concluiu-se que tais indicadores podem ser considerados bons avaliadores de eficiência, pois os valores obtidos para diferentes regiões climáticas brasileiras estão muito próximos, com diferença de menos de 10%.

ABSTRACT

This work had, as the main goal, the identification and analysis of sensibility of the parameters that influence the energy consumption and determine indexes that can value the energy efficiency of a benchmarking building with a occupancy profile of a shopping center. In first place, based on standard ASHRAE 90.1, it was realized a study of how to evaluate the composition of the materials of the building envelope. It was also established parameters used in the model and a geometry of building envelope was defined. After that, based on those information, simulations using the software Energy Plus were done. This tool helped in the evaluation of the total energy consumption of the building, using the climate data for five Brazilian cities in order to evaluate the influence of different weather conditions. Finally, a sensibility analysis was performed with the results of the variation of some parameters for showing its influence in the energy consumption of the building. Also some energy indexes were established, such as ($\text{kWh/m}^2 \cdot ^\circ\text{C} \cdot \text{year}$) and ($\text{kWh/m}^2 \cdot ^\circ\text{C} \cdot \text{month}$), and their values were compared for five cities climates. It was concluded that such indexes can be considered as good representation of building efficiency, because the indexes determined for different Brazilian climate regions are with less than 10% difference among them.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1: PERFIL DE OCUPAÇÃO PARA OS DIAS ÚTEIS.	10
FIGURA 2: PERFIL DE UTILIZAÇÃO DA ILUMINAÇÃO PARA DIAS ÚTEIS.	10
FIGURA 3: PERFIL DE UTILIZAÇÃO DO SISTEMA DE CLIMATIZAÇÃO.	11
FIGURA 4: VISTA DO MODELO - FACHADA NORTE.....	13
FIGURA 5: VISTA DO MODELO - FACHADA OESTE	13
FIGURA 6: DISTRIBUIÇÃO DO CONSUMO ENERGÉTICO POR USO FINAL.	15
FIGURA 7: DIVISÃO DO CONSUMO DE ENERGIA ELÉTRICA POR USO FINAL.	15
FIGURA 8: DISTRIBUIÇÃO DO CONSUMO ENERGÉTICO POR USO FINAL	17
FIGURA 9: CONSUMO MENSAL POR USO FINAL DO MODELO DE REFERÊNCIA	18
FIGURA 10: COMPARAÇÃO ENTRE TBS E CONSUMO DO AQUECIMENTO ELÉTRICO.	19
FIGURA 11: ANÁLISE DE SENSIBILIDADE DA ILUMINAÇÃO NA CIDADE DE SÃO PAULO.	20
FIGURA 12: ANÁLISE DE SENSIBILIDADE DA OCUPAÇÃO NA CIDADE DE SÃO PAULO ..	21
FIGURA 13: ANÁLISE DE SENSIBILIDADE DO COP NA CIDADE DE SÃO PAULO.....	22
FIGURA 14: MATRIZ ENERGÉTICA POR USO FINAL DA CIDADE DE BELÉM.	24
FIGURA 15: MATRIZ ENERGÉTICA POR USO FINAL DA CIDADE DE BRASÍLIA.	25
FIGURA 16: MATRIZ ENERGÉTICA POR USO FINAL DA CIDADE DE FORTALEZA.	26
FIGURA 17: MATRIZ ENERGÉTICA POR USO FINAL DA CIDADE DE PORTO ALEGRE.	27
FIGURA 18: MATRIZ ENERGÉTICA POR USO FINAL DA CIDADE DO RIO DE JANEIRO.	28
FIGURA 19: MATRIZ ENERGÉTICA DOS 4 SHOPPING MALL DE HONG KONG. JOSEPH E DANNY (2002).	29
FIGURA 20: ÍNDICE DO CONSUMO TOTAL PELA ÁREA PARA AS CIDADES SIMULADAS...	30
FIGURA 21: ÍNDICE DO CONSUMO TOTAL PELA ÁREA POR TBS DAS CIDADES SIMULADAS.	31
FIGURA 22: CORRELAÇÃO DO CONSUMO ANUAL PELA TBS.	32
FIGURA 23: CONSUMO ANUAL DO SISTEMA DE CLIMATIZAÇÃO PELA ÁREA.....	33
FIGURA 24: CONSUMO ANUAL DO SISTEMA DE CLIMATIZAÇÃO PELA (ÁREA X TBS)...	34
FIGURA 25: CORRELAÇÃO DO CONSUMO DE CLIMATIZAÇÃO PELA TBS.	35
FIGURA 26: CORRELAÇÃO DO CONSUMO TOTAL POR MÊS PELA TBS.....	36
FIGURA 27: CONSUMO TOTAL MENSAL PELA (ÁREA X TBS).	37
FIGURA 28: CORRELAÇÃO DO CONSUMO MENSAL DA CLIMATIZAÇÃO PELA TBS.	37
FIGURA 29: CONSUMO MENSAL DA CLIMATIZAÇÃO PELA (ÁREA X TBS)	38
FIGURA 30: CONSUMO DA CLIMATIZAÇÃO PELA TBS.	39

LISTA DE TABELAS

TABELA 1: COMPOSIÇÃO DAS PAREDES EXTERNAS.	12
TABELA 2: PORCENTAGEM DA ÁREA DE ABERTURA POR FACHADA ORIENTADA.	12
TABELA 3: CONSUMO POR USO FINAL	14
TABELA 4: INTENSIDADE DE ENERGIA ELÉTRICA DAS UTILIDADES PELA ÁREA CONDICIONADA.	14
TABELA 5: CONSUMO ENERGÉTICO ANUAL POR USO FINAL DO MODELO REFERÊNCIA.	17
TABELA 6: CONSUMO ANUAL POR USO FINAL PARA CIDADE DE BELÉM.	23
TABELA 7: CONSUMO ANUAL POR USO FINAL PARA A CIDADE DE BRASÍLIA.	24
TABELA 8: CONSUMO ANUAL POR USO FINAL PARA A CIDADE DE FORTALEZA.	25
TABELA 9: CONSUMO ANUAL POR USO FINAL PARA A CIDADE DE PORTO ALEGRE.	26
TABELA 10: CONSUMO ANUAL POR USO FINAL PARA CIDADE DO RIO DE JANEIRO.	27
TABELA 11: COMPARAÇÃO ENTRE MODELO SIMULADO PARA RIO DE JANEIRO E “SHOPPING MALL 1”	29
TABELA 12: ÍNDICE DO CONSUMO TOTAL PELA ÁREA PARA CADA CIDADE.	30
TABELA 13: ÍNDICE DO CONSUMO TOTAL PELA ÁREA PELO TBS PARA CADA CIDADE.	31
TABELA 14: ERROS DA CORRELAÇÃO ENTRE CONSUMO TOTAL E TBS.	32
TABELA 15: CONSUMO ANUAL DO SISTEMA DE CLIMATIZAÇÃO PELA ÁREA.	33
TABELA 16: CONSUMO ANUAL DO SISTEMA DE CLIMATIZAÇÃO PELA (ÁREA x TBS).	34
TABELA 17: ERROS DA CORRELAÇÃO ENTRE CONSUMO DE CLIMATIZAÇÃO E TBS.	35
TABELA 18: ERROS DA CORRELAÇÃO ENTRE CONSUMO MENSAL PELA TBS.	36
TABELA 19: ERROS DA CORRELAÇÃO ENTRE O CONSUMO MENSAL DE CLIMATIZAÇÃO E A TBS.	38

LISTA DE SÍMBOLOS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ABRASCE	Associação Brasileiras de Shopping Centers
ASHRAE	American Society of Heating, Refrigerating Air Engineering
COP	Coeficiente de eficácia
kWh	kiloWatt por hora
DPL	Densidade de potência luminosa. [W/m ²]
IPLV	Integrated part load value
SHGC	Coeficiente de ganho de calor solar, adimensional
TBS	Temperatura de bulbo seco, [°C]
WWR	Razão janela-parede, [%]

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	1
2. OBJETIVO	2
3. LEVANTAMENTO BIBLIOGRÁFICO	2
4. NORMA DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA- ASHRAE 90.1	4
5. FERRAMENTA DE SIMULAÇÃO ENERGY PLUS	5
6. CARACTERIZAÇÃO DA EDIFICAÇÃO	6
7. MONTAGEM DA SIMULAÇÃO	7
7.1. Aspectos construtivos	7
7.2. Sistema de climatização	8
8. GANHOS INTERNOS DE CARGA TÉRMICA	8
8.1. Ocupação	8
8.2. Iluminação	8
8.3. Equipamentos internos	9
9. PERFIL DO HORÁRIO DE FUNCIONAMENTO	9
10. RESULTADOS DA SIMULAÇÃO	11
11. ANÁLISE DE SENSIBILIDADE	19
11.1. Análise de sensibilidade da densidade luminosa	20
11.2. Análise de sensibilidade da densidade de ocupação	21
11.3. Análise de sensibilidade do COP de refrigeração e aquecimento	22
12. SIMULAÇÃO PARA OUTRAS CIDADES BRASILEIRAS	23
12.1. Simulação para cidade de Belém	23
12.2. Simulação para cidade de Brasília	24
12.3. Simulação para cidade de Fortaleza	25
12.4. Simulação para cidade de Porto alegre	26
12.5. Simulação para cidade de Rio de Janeiro	27
13. INDICADORES DE DESEMPENHO ENERGÉTICO	30
13.1. Consumo total pela área	30
13.1.1. Correlação do consumo total anual pela TBS	32
13.2. Consumo anual do sistema de climatização pela área	33
13.2.1 Correlação do consumo de climatização pela TBS	35

13.3.	Consumo mensal total pela área pela TBS	36
13.4.	Consumo mensal do sistema de climatização pela área pela TBS	37
14.	CONCLUSÃO	40
	Anexo- A – Padrão de ocupação e de operação de sistemas e equipamentos	43
	Anexo-B – Definição da área, volume e densidades de ocupação e de equipamentos	44
15.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	45

1. INTRODUÇÃO

Nos últimos anos, o tópico sustentabilidade vem sendo gradativamente absorvido e colocado em prática pela sociedade. O consumo de energia é o principal ponto a ser avaliado. Muito desperdício energético é realizado no Brasil, pois as políticas de conservação existentes no país, que deveriam estabelecer maneiras eficientes do uso da energia, são pouco difundidas na sociedade e ainda precisam ter melhorias no quesito técnico, segundo Correna (2008).

Neste contexto, formas de avaliação do desempenho de edificações são propostas, enquanto políticas e normas brasileiras referentes ao assunto são formuladas. Nesse sentido, o desenvolvimento de indicadores de desempenho energético para edificações denominadas de referência pode ser uma ferramenta a ser utilizada.

Para que se tenha um conjunto de dados confiável, servindo como base para comparação com os níveis de consumo energético das atuais e novas instalações, é necessário um estudo detalhado para cada tipo de edificação. Dessa forma, é possível identificar quais são os melhores índices de eficiência energética que podem ser utilizados para avaliar o uso da energia nas diversas construções.

Nesse sentido, o trabalho aqui apresentado realiza o estudo de índices energéticos para “shopping centers”. O programa Energy Plus servirá como ferramenta principal, a fim de auxiliar no tratamento dos dados referentes a esse tipo de edificação.

Esse tipo de prédio vem sofrendo uma disseminação pelo país, provocada pelo desenvolvimento do setor comercial. Segundo a associação brasileira de shopping centers (ABRASCE, 2009), existem mais de 390 construções por todo o Brasil, ocupando uma área total de 19,6 milhões de metros quadrados. Portanto é um tipo de edificação que deve ter a sua eficiência energética avaliada, a fim de que se consiga verificar potenciais de redução de consumo de energia, promovendo uma maior sustentabilidade deste tipo de edificação.

2. OBJETIVO

Almeja-se, com esse trabalho, fazer uma avaliação energética de um prédio típico de “Shopping Center”, baseado no método da norma ASHRAE 90.1 2007 (ASHRAE, 2007 e 2008). Com os dados levantados através das simulações feitas pelo programa Energy Plus, será realizada uma análise dos índices energéticos, e serão indicados os melhores os quais consigam avaliar o desempenho energético de um Shopping Center localizado em 05 cidades brasileiras.

3. LEVANTAMENTO BIBLIOGRÁFICO

Algumas teses e artigos referentes ao assunto eficiência energética em edificações comerciais foram utilizados como embasamento para o desenvolvimento do estudo da formulação dos índices energéticos de “Shopping Centers”.

Barros Filho (2005) retrata o consumo de energia em dois “shoppings centers” da cidade de São Paulo. O objetivo desse trabalho foi traçar um perfil energético desse tipo de edificação comercial por meio da determinação de índices de desempenho do consumo de energia. Alguns valores de índices energéticos apresentados para um dos shoppings seriam: 106,8 kWh/m².ano de consumo de iluminação; 6,87 kWh/m².mês de consumo da área condicionada. Os dados apresentados nessa tese foram fornecidos pela concessionária de energia elétrica. Verificou-se um nível de imprecisão alto nestes dados, porém os resultados obtidos foram coerentes, visto a complexidade da realização de tal pesquisa. Este trabalho foi utilizado posteriormente como base de comparação entre construções de mesma finalidade. Essa referência também auxiliou na comparação dos dados que foram obtidos nas simulações feitas no Energy Plus, bem como no balizamento dos resultados obtidos com relação ao desempenho energético deste tipo de edificação.

Correna (2008) contém informações úteis da metodologia de avaliação da eficiência energética de edifícios comerciais. Este trabalho mostra como deve ser o procedimento para se determinar padrões de referências para o consumo energético de edificações específicas. Além disso, são estabelecidas características da envoltória

de uma edificação modelo para simulação no Energy Plus, como: área envidraçada, materiais utilizados na fachada e proteções solares. Essas informações foram baseadas em dados pesquisados de prédios reais. As características primárias (carga térmica interna, eficiência do condicionamento de ar e orientação solar) do modelo simulado foram avaliadas, de forma a identificar a eficiência energética da envoltória de prédios comerciais propostos. Por fim, os resultados das simulações apresentados servirão para validação dos valores que vão ser obtidos no presente trabalho.

Carrières (2007) avalia o consumo de energia e o conforto térmico de edifícios de escritório em função dos parâmetros construtivos. Apesar de focar o estudo para apenas uma região climática, a cidade de São Carlos no interior de São Paulo, essa obra apresenta informações importantes de como fazer a caracterização da edificação de forma padronizada. Além disso, mostra como identificar um padrão de uso e utilização desse tipo de edificação. Essa dissertação é mais uma fonte que auxiliará na aplicação da metodologia de avaliação do consumo de energia em prédios comerciais. Os resultados revelados nessa fonte servirão como base comparativa para o caso de “shopping centers”, ajudando, principalmente, na verificação de valores da região climática brasileira do estado de São Paulo.

Lamberts (1997) retrata a importância do estabelecimento de uma normalização da eficiência energética e conforto ambiental das edificações no Brasil. Nessa referência são descritas as experiências de outros países que já possuem normas reguladoras do consumo de energia. Em seguida, é proposta uma estrutura de atividades (definições de símbolos e unidades, cálculos de transmissões de calor de elementos, zoneamento bioclimático, tratamento dos dados climáticos, desempenho térmico de prédios residenciais e comerciais, métodos de ensaio) a serem seguidas para que a normalização do setor energético seja efetivada.

Joseph&Danny (2002) avaliaram o gasto de energia elétrica de quatro “shoppings centers” que funcionam com sistemas de climatização. As características obtidas são pertinentes à comparação com outros “shoppings” de regiões climáticas subtropicais. Relatou-se que cerca de 85% do consumo de energia se deve à iluminação elétrica e ao condicionamento do ar.

Canbay et al (2004) relata a importância de um controle eficiente sobre os sistemas de ventilação, climatização e aquecimento. Foi realizada uma auditoria em

“shoppings” para avaliar o potencial energético que pode ser economizado. Índices de eficiência foram gerados, com base nos dados auditados. Depois de normalizados, os índices serviram para fazer uma melhor avaliação da eficiência desse tipo de construção. Os valores dos índices normalizados são: 421 kWh/m².ano para consumo de eletricidade e 245 kWh/m².ano para consumo de gás natural.

4. NORMA DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA- ASHRAE 90.1

A principal referência para esse trabalho é a Norma ASHRAE 90.1 (ASHRAE, 2007). Apesar de ter origem americana, as indicações dessa norma podem ser aplicadas nas edificações brasileiras, como foi observado nos resultados obtidos das simulações feitas por Carrières (2007) e Correna (2008). Portanto, valores obtidos de tabelas da norma serão utilizados nas simulações a serem realizadas através do programa Energy Plus.

As informações mais importantes que devem ser retiradas da norma ASHRAE 90.1 (ASHRAE, 2007) são referentes às caracterizações das porções exteriores e semi-exteriores (elementos por onde ocorre transferência de calor) da edificação. Os materiais utilizados nas construções devem atender o valor do coeficiente global de transmitância específico para a região climática brasileira. Da mesma maneira, os vidros das janelas devem possuir um SHGC (“Solar Heat Gain Coefficient”), ou coeficiente de fator solar, específico para a região. Também é estipulada a porcentagem máxima de área envidraçada na vertical (40%) e na cobertura (5%).

Sobre o sistema de iluminação, existem tabelas que possuem valores máximos de densidade luminosa para cada tipo de ambiente. Dessa maneira, é possível estabelecer a potência luminosa total recomendada para a edificação.

Outros dados relevantes para a montagem do modelo para simulação utilizando o *software EnergyPlus*, retirados da Norma 90.1 (ASHRAE, 2007), são os dados de desempenho dos sistemas de aquecimento, refrigeração e ventilação das edificações. Nesse quesito, é verificado o tipo do sistema de condicionamento de ar adequado para o modelo, de acordo com a área total a ser climatizada. De acordo

com a Norma ASHRAE 90.1, é possível realizar ajustes de pressão e vazão dos equipamentos de climatização nos dados de entrada do programa *Energy Plus*.

5. FERRAMENTA DE SIMULAÇÃO ENERGY PLUS

A ferramenta de simulação a ser utilizada deve permitir uma avaliação adequada do comportamento da edificação, ter um baixo custo e proporcionar uma apresentação de resultados compatível com os níveis de análise exigidos pela pesquisa a ser desenvolvida.

Uma das ferramentas que engloba estas especificações é o Energy Plus. Atualmente, esse é o programa que apresenta a melhor configuração da modelagem e simulação de edificações climatizadas. Esse aplicativo utiliza o método de balanço de energia para fazer análises energéticas de múltiplas zonas térmicas em intervalos de tempo de até 15 minutos.

De acordo com Correna (2008), o Energy Plus surgiu através do desenvolvimento de um programa conceito, visando atender necessidades de simulação que englobassem aspectos ambientais, econômicos, de conforto e de projetos das edificações. Assim, esta ferramenta possibilita realizar simulações, integrando 3 módulos básicos: um gerenciador de simulação, um módulo de cálculo de cargas através do balanço térmico e um módulo de simulação de sistemas.

Esse programa permite que o usuário forneça a geometria do modelo. Porém, devido à dificuldade de inserir a geometria da edificação nesse aplicativo, que exige a digitação das coordenadas de cada vértice de cada superfície da edificação (transparente ou opaca), utilizou-se outra ferramenta, o Google Sketch Up. Essa ferramenta possibilita desenvolver a geometria da edificação, facilitando a visualização e a representação real da construção.

Com o Energy Plus também é possível introduzir dados dos horários de funcionamento dos equipamentos, da iluminação, do sistema de refrigeração e do sistema de automação do prédio. Pode-se diferenciar o perfil de ocupação ao longo de dias típicos (dia útil, sábado, domingo e feriado).

O detalhamento de todas as fontes internas de carga térmica pode ser inserido no modelo desenvolvido no programa. A densidade de ocupação, a fração de radiação emitida por pessoa, as potências dos equipamentos e da iluminação por ambiente, são alguns exemplos de informações que podem ser fornecidas ao aplicativo.

O sistema de refrigeração e ventilação usado no empreendimento para a climatização dos ambientes também pode ser especificado com detalhes. Para introduzir o modelo do sistema de climatização no EnergyPlus, é necessário inserir as especificações dos equipamentos como o COP, potência nominal, vazão do fluido refrigerante, temperaturas de controle e vazão de água gelada.

Outra informação importante que o Energy Plus utiliza nas simulações são os dados climáticos anuais das principais cidades brasileiras, que são encontrados em arquivos disponíveis no endereço eletrônico do departamento americano responsável pelo programa (U.S. DEPARTMENT OF ENERGY, 2010).

Os resultados das simulações são gerados detalhadamente e podem ser apresentados tanto em formato de tabela, como em gráficos. Alguns exemplos dos dados que podem ser analisados: coeficiente global de resistência térmica de todas as superfícies, o coeficiente de aquecimento solar das janelas, a potência demandada por tipo de uso final, carga térmica de cada ambiente e o consumo energético total anual. Existe também a possibilidade de avaliar os custos, de acordo com as tarifas locais apropriadas adicionadas durante a montagem da simulação.

6. CARACTERIZAÇÃO DA EDIFICAÇÃO

A edificação em estudo possui uma geometria padrão para “shoppings centers”. O modelo da construção simulado tem as seguintes características:

- Área total construída: 27536 m²;
- Área com condicionamento do ar: 27536 m²;
- Prédio com cinco pavimentos, contando com o subsolo;
- Prédio dividido em 45 zonas condicionadas;

- Em cada zona condicionada, as paredes que possuem janelas estão com no máximo 40% de área envidraçada, segundo diretrizes da norma ASHRAE 90.1 (ASHRAE, 2007);
- Em cada zona condicionada, a cobertura que possui vidro está com 5% de área envidraçada, segundo diretrizes da norma ASHRAE 90.1 (ASHRAE, 2007);
- O sistema de refrigeração utiliza dois resfriadores de COP=6,1 e uma caldeira, alimentada com gás natural, de COP= 0,8.

7. MONTAGEM DA SIMULAÇÃO

O modelo a ser analisado deve estar de acordo com a norma ASHRAE 90.1 (ASHRAE, 2007), mais especificamente, com base no apêndice G desta norma. Esse tópico descreve como se deve proceder para criar uma edificação de referência, que será usada para comparação com edificações propostas em projetos.

7.1.Aspectos construtivos

A simulação do modelo da edificação será realizada para cinco cidades brasileiras. De acordo com a norma, essas localidades estão inclusas em apenas duas zonas climáticas, zonas 1 e 2. No caso de ambas, o coeficiente de transmitância térmica das paredes externas da edificação deve estar próximo do valor de 0,705 W/m²K. Os materiais utilizados na composição dessa construção geraram nesse modelo o valor de 0,694 W/m²K para o coeficiente. Essa pequena diferença (menos de 5%) é aceitável, pois não causa discrepância considerável nos resultados.

Para as janelas verticais, o apêndice G da norma ASHRAE 90.1 (ASHRAE,2007) indica que o material translúcido a ser utilizado deve ter o índice SHGC (coeficiente de ganho de aquecimento solar) igual a 0,25. Esse parâmetro indica a parcela da energia solar que consegue atravessar o material e incide no interior do ambiente.

7.2.Sistema de climatização

O tipo do sistema de climatização também é determinado no apêndice G, de acordo com a quantidade de pavimentos, ou com a área condicionada da edificação. Para o modelo do sistema de climatização de “shopping center” em questão, o sistema de distribuição de ar seria o de volume de ar variável, utilizando dois resfriadores de água gelada com compressores centrífugos.

A quantidade de equipamentos de refrigeração que são introduzidos no modelo está baseada na área total condicionada da edificação. Pela tabela G3.1.3.7 da norma ASHRAE 90.1 (ASHRAE, 2007) foi possível determinar esse número, além da potência máxima estabelecida por resfriador instalado (2813kW). No caso foram utilizados dois “chillers”, com COP de 6,1.

8. GANHOS INTERNOS DE CARGA TÉRMICA

8.1.Ocupação

As entradas de dados necessários para dimensionar a carga térmica também são introduzidas em campos específicos do programa. Primeiro foi definida a densidade de ocupação das zonas térmicas, onde se adotou o valor de 2 pessoas/m². Como essa informação não consta na Norma ASHRAE 90.1 (ASHRAE, 2007), esse número foi baseado na experiência de pessoas do mercado, que trabalham com esse tipo de empreendimento.

8.2.Iluminação

Em seguida foi estabelecida a carga da iluminação, através da entrada da densidade luminosa por tipo de ambiente. Utilizaram-se dois valores: 18 W/m² para ambientes de área comum e lojas do shopping; e 23 W/m² para áreas de maior aglomeração, como praças de alimentação, valores obtidos no capítulo 9 da norma ASHRAE 90.1 -2007 (ASHRAE, 2007).

8.3.Equipamentos internos

Outra demanda de carga térmica seriam os equipamentos utilizados, como elevadores, escadas rolantes, bombas hidráulicas e computadores. Esse item também não está descrito na norma da mesma forma detalhada como para iluminação. Portanto, foi estabelecido um valor de 2 W/m^2 baseado nos dados adquiridos na pesquisa de campo descrita na tese de mestrado de Barros Filho (2005).

Em conjunto com as informações citadas acima, os horários de funcionamento da iluminação e dos equipamentos em geral, e a porcentagem de ocupação ao longo do dia são dados que complementam o cálculo da carga térmica realizado pelo Energy Plus. Esses horários foram avaliados com base em dados para lojas de vendas obtidos do manual do usuário da norma ASHRAE 90.1-2007(ASHRAE, 2008), que são apresentados no anexo A.

9. PERFIL DO HORÁRIO DE FUNCIONAMENTO

Para definir a distribuição horária das cargas internas ao longo de um dia típico, a fim de fazer o cálculo da carga térmica da edificação, necessita-se do estabelecimento de horários para acionamento e desligamento dos sistemas. Dessa maneira, para este modelo de “shopping center”, têm-se os seguintes perfis de horários para as principais cargas internas nas figuras 1, 2 e 3.

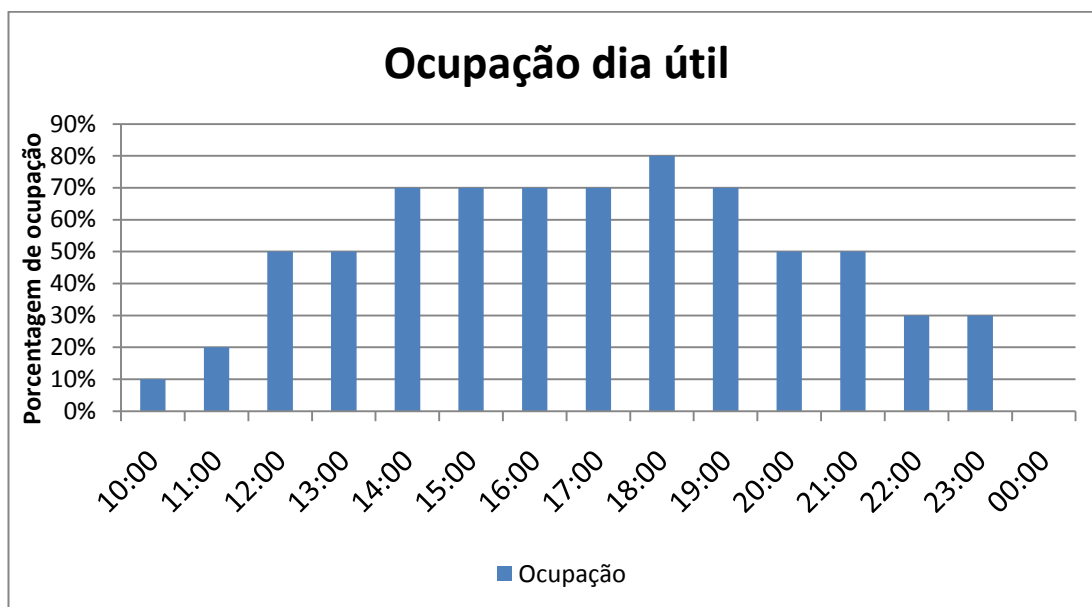


Figura 1: Perfil de ocupação para os dias úteis.

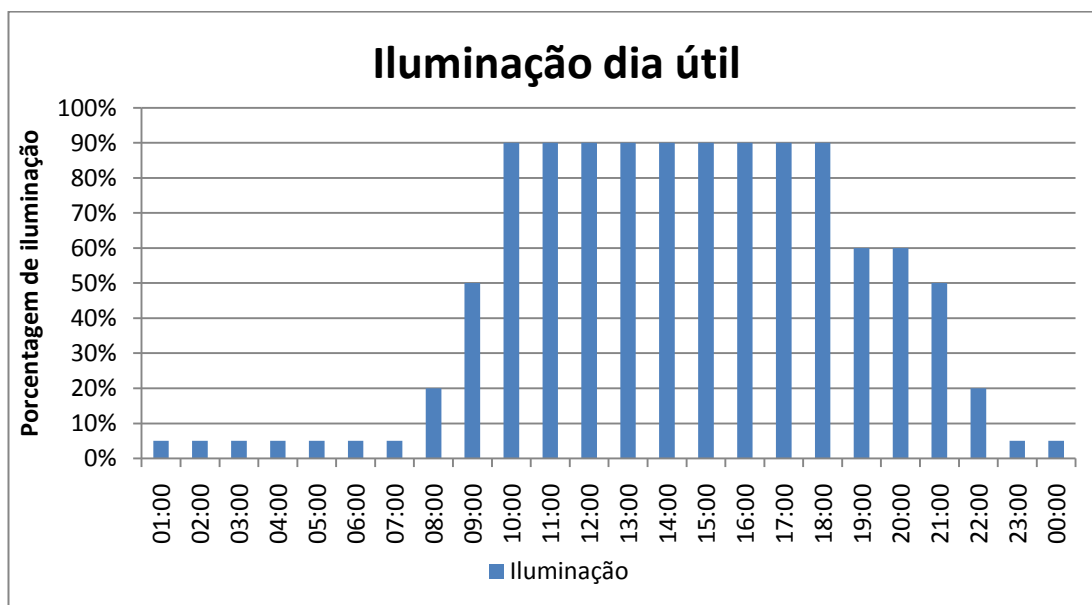


Figura 2: Perfil de utilização da iluminação para dias úteis.

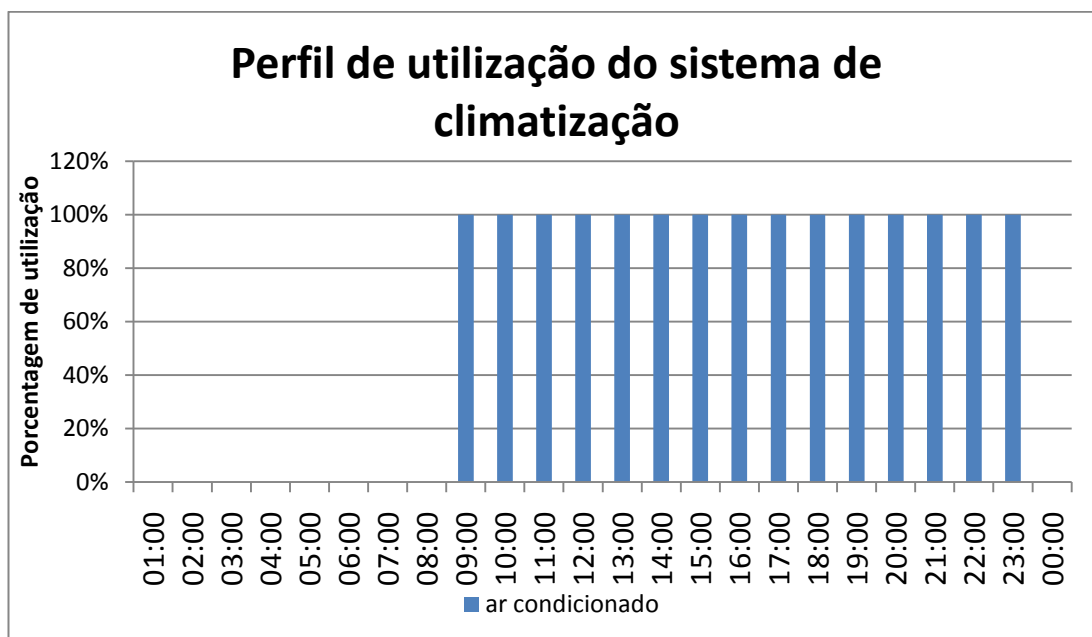


Figura 3: Perfil de utilização do sistema de climatização.

10. RESULTADOS DA SIMULAÇÃO

Com o modelo da edificação pronto e todas as entradas de dados já introduzidas, foi feita a simulação para 8760 horas com os dados climáticos da cidade de São Paulo. As figuras 4 e 5 mostram a geometria do shopping e suas características nas orientações norte e oeste. Nessas fachadas ocorre a maior incidência de radiação solar ao longo do dia. Por esse motivo, os materiais utilizados nas paredes e janelas devem ter características adequadas para evitar o aumento da carga térmica dos ambientes condicionados. Além disso, outras estratégias podem ser utilizadas como brises para sombreamento externo, impedindo a insolação direta sobre a construção. A tabela 1 mostra as características dos materiais usados na composição das paredes externas da edificação simulada.

Tabela 1: Composição das paredes externas.

Paredes externas					
Camada	Material	Espessura	Calor Específico	Condutividade térmica	Densidade
		[mm]	[J/(kg.°C)]	[W/(m.°C)]	[kg/m ³]
1 (externa)	Argamassa	20	754	0,65	1600
2	Concreto	190	1005	0,82	1700
3	Lã de rocha	10	754	0,2	190
4 (interna)	Gesso	15	910	0,35	1200

A tabela 2 relata a porcentagem de abertura (janela) por fachada, designada pela sua orientação no modelo. Esse valor é importante para mostrar em que região do prédio haverá maior impacto da energia solar, através da radiação, implicando em um aumento da carga térmica. A maior relação WWR (“Window-Wall Ratio”) está na fachada norte, sendo que esta é uma das orientações que recebe maior incidência de radiação solar ao longo do ano. Portanto, nessa simulação, a orientação norte do modelo tem uma maior contribuição no ganho de carga térmica.

Tabela 2: Porcentagem da área de abertura por fachada orientada.

	Total	Norte	Leste	Sul	Oeste
Área de parede (m²)	10482	3324	2618	3066	1473
Área de abertura de janelas (m²)	815,61	411,11	271,5	42	91
Razão janela-parede (WWR) (%)	7,8	12,4	10,4	1,4	6,2

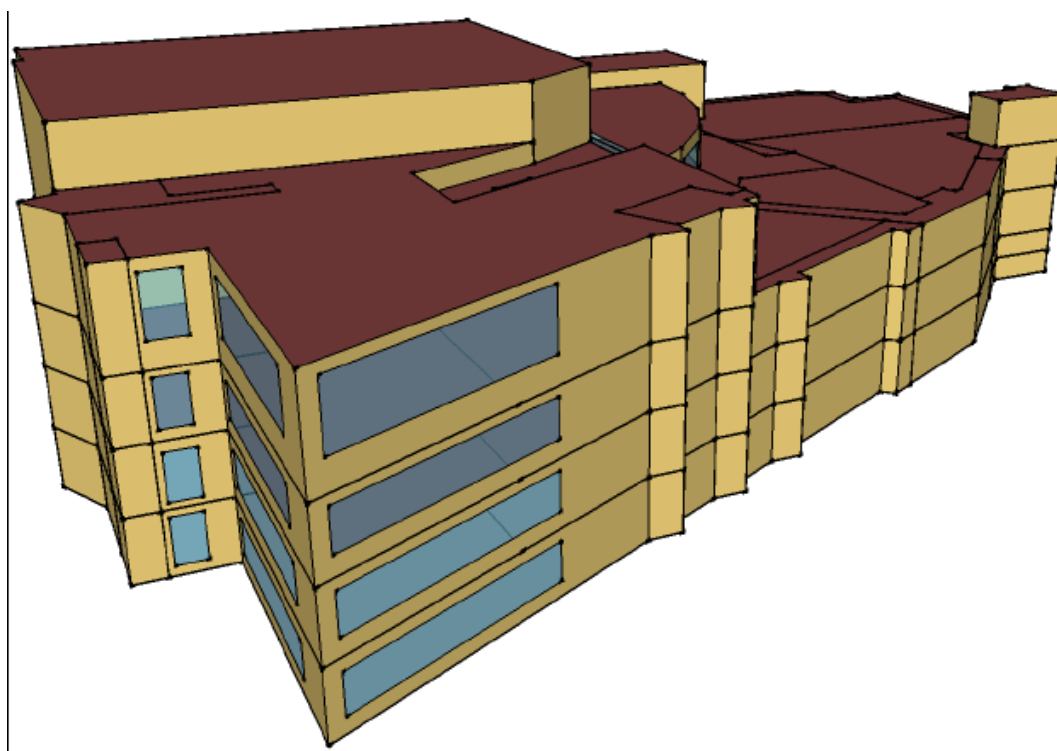


Figura 4: Vista do modelo - fachada norte

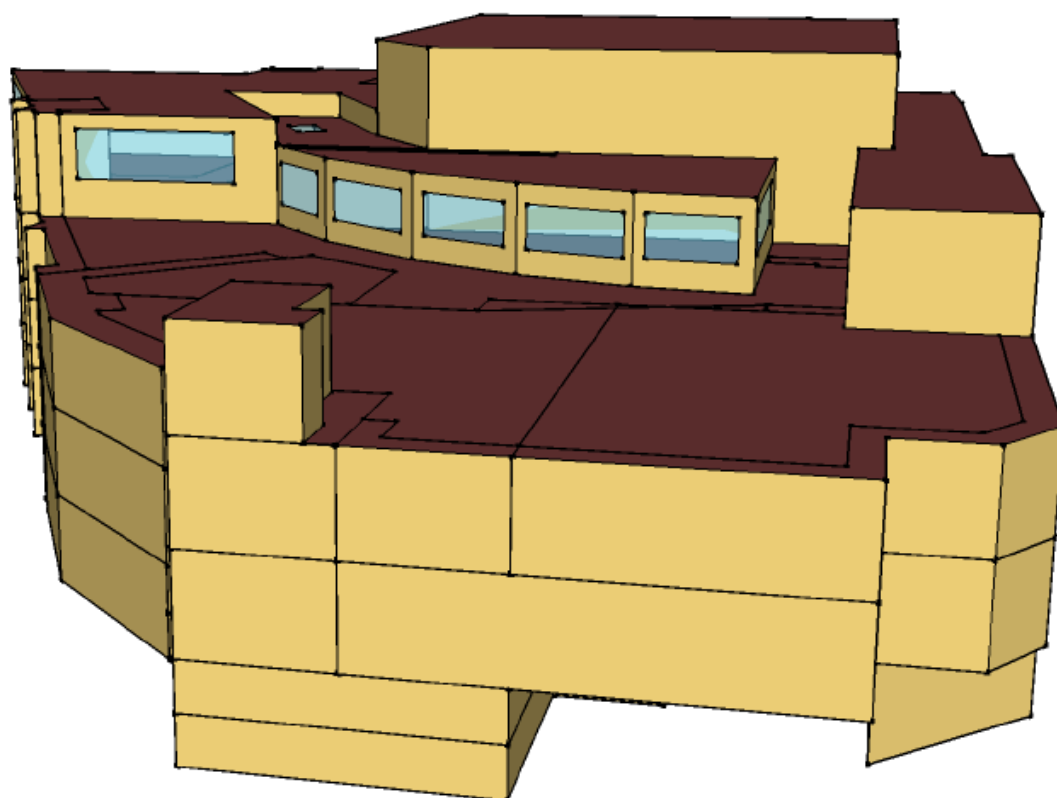


Figura 5: Vista do modelo - fachada oeste

Foi utilizado o arquivo climático anual da cidade de São Paulo, disponível no sítio do Departamento de Energia dos Estados Unidos (U.S. DEPARTMENT OF ENERGY, 2010). Inicialmente foram estudados apenas os resultados de uma cidade, a fim de verificar se os dados do modelo da edificação e seus sistemas representam adequadamente o comportamento da edificação analisada.

Depois de realizada a simulação da edificação para os dados climáticos anuais da cidade de São Paulo, foi possível obter alguns dados para a avaliação do consumo energético do prédio, sendo que os mais relevantes são:

- Consumo total de energia anual: 9.261.190 kWh;
- Consumo de energia elétrica: 7.692.864 kWh;
- Consumo de energia proveniente de gás natural para aquecimento: 1.568.326 kWh;
- Energia por metro de área condicionada: 336,3 kWh/m²;
- Carga térmica total: 3.299.282W ou 938 TR;
- Área por carga térmica: 29,36 m²/TR

A distribuição do gasto energético por tipo de uso final também pode ser avaliado, cujos resultados são mostrados na tabela 2 e no gráfico da figura 3.

Tabela 3: Consumo por uso final

Uso final	Consumo (kWh)
Ar condicionado	5.310.142
Iluminação	2.121.402
Equipamentos	261.321
Aquecimento (gás natural)	1.568.326

Tabela 4: Intensidade de energia elétrica das utilidades pela área condicionada.

Utilidade	Intensidade elétrica (kWh/m²)
Iluminação	77
AVAC	193
Equipamentos	9,5
<i>Total</i>	<i>279,4</i>

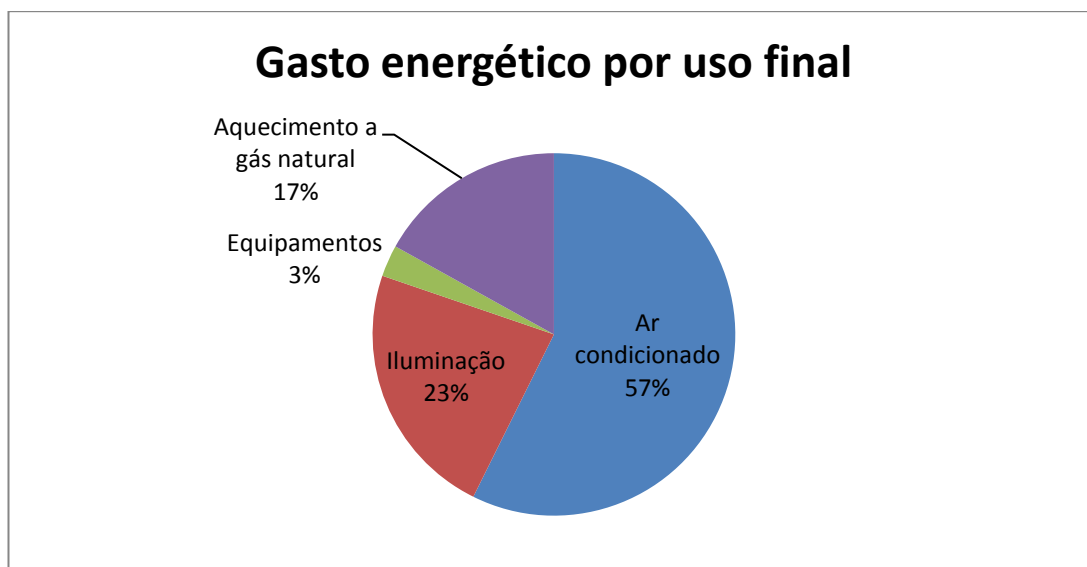


Figura 6: Distribuição do consumo energético por uso final.

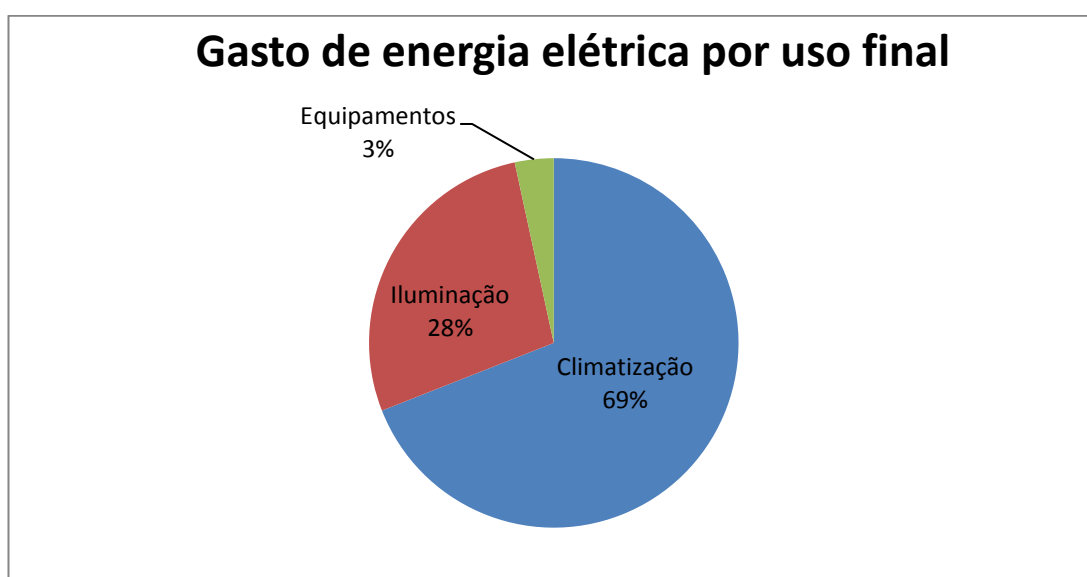


Figura 7: Divisão do consumo de energia elétrica por uso final.

A figura 7 expõe que a maior parcela do consumo de energia é devido ao sistema de climatização, seguido da iluminação da edificação. Segundo Barros Filho (2005), a pesquisa de campo realizada em dois “shoppings centers” da cidade de São Paulo mostra que o sistema de iluminação é o principal responsável pelo gasto energético desse tipo de edificação.

A contradição nos resultados mostra que os dados utilizados no modelo, retirados de normas de referência ASHRAE 90.1 2007 (ASHRAE, 2007), podem não condizer totalmente com a realidade desse tipo de edificação no Brasil. Tanto na norma ASHRAE, como na ABNT 16401 (ABNT, 2008), os valores correspondem à lojas de vendas, e não à um complexo de lojas. Portanto, faltam informações específicas para “shopping centers” nas normas citadas.

Esse maior gasto de energia elétrica com o sistema de climatização corresponde ao perfil apresentado pela maioria dos prédios comerciais. Porém, “shopping center” é um caso particular de edificação, onde a iluminação tem grande destaque no consumo. Isso ocorre porque as lojas utilizam em demasia a decoração luminosa para atrair os clientes. Além disso, as áreas comuns desse empreendimento necessitam de uma boa iluminação ao longo do período de funcionamento, a fim de atender as normas de conforto luminoso para as áreas de grande circulação.

Por essa razão, foi realizada outra simulação com dados de cargas internas diferentes do que está exposto nas normas, mas que é usualmente utilizado nos dimensionamentos de projetos de climatização para “shopping centers”. Foi realizada uma consulta a um projetista de ar condicionado, a fim de conseguir os dados de carga térmica interna para cada tipo de ambiente da edificação.

Além disso, o sistema de climatização foi alterado de ventiladores de vazão constante para ventiladores de vazão variável, e as pressões desses equipamentos foram ajustadas. Após essa nova simulação alguns dados foram avaliados para a cidade de São Paulo, sendo que os mais relevantes são:

- Consumo total de energia anual: 7.401.683 kWh;
- Consumo de energia elétrica para aquecimento: 2.311 kWh;
- Energia por metro de área condicionada: 268 kWh/m²;
- Carga térmica total demandada: 2.629.227 W ou 748 TR;
- Área por carga térmica: 36,8 m²/TR

O anexo B mostra como ficaram atribuídos os valores das densidades de iluminação, de ocupação e de equipamentos para cada zona térmica do modelo em

estudo após este novo ajuste. Assim, foi possível obter uma nova matriz energética, observada na figura 8 e na tabela 5.

Tabela 5: Consumo energético anual por uso final do modelo referência

Uso final	Consumo (kWh)
Ar condicionado	3.693.012
Iluminação	2.601.488
Equipamentos	1.104.873
Aquecimento elétrico	2.311



Figura 8: Distribuição do consumo energético por uso final

Observa-se que a matriz energética acima difere daquela apresentada por Barros Filho (2005). Porém, está em concordância com a maioria das matrizes encontradas em prédios comerciais. Na análise de Joseph e Danny (2002) para quatro “shoppings centers” em Hong Kong foi apresentado perfil de consumo muito próximo do exposto na figura 8.

Mais adiante, esse mesmo modelo será simulado para outras cidades brasileiras, e é esperado que tanto a parcela referente ao sistema de aquecimento como a do sistema de climatização variem de acordo com os dados climáticos de cada cidade brasileira.

Portanto, essa última configuração do modelo, que gerou a matriz energética da figura 8, será definida como referência para as análises de sensibilidades a serem realizadas com as principais variáveis que são determinantes na geração do consumo de energia da edificação em estudo.

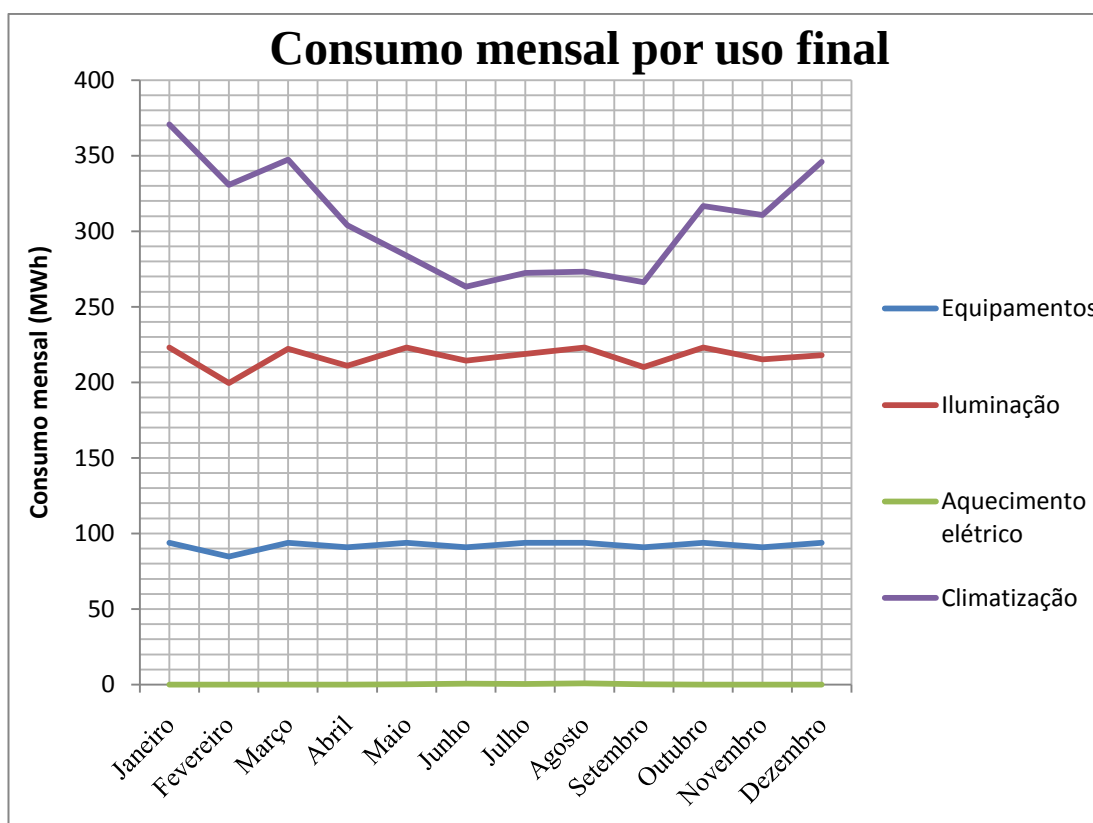


Figura 9: Consumo mensal por uso final do modelo de referência

A figura 9 demonstra como se comporta o consumo mensal de cada uso final na edificação proposta neste estudo. Observa-se que, para a cidade de São Paulo, há uma variação significativa no consumo da climatização ao longo do ano. Esse resultado está de acordo com os dados climáticos da cidade. Por exemplo, entre

os meses de maio e setembro, correspondentes ao período de inverno, o consumo da climatização diminui e o de aquecimento aumenta.

Simulando o modelo para o arquivo climático de São Paulo, houve uma pequena utilização de aquecimento elétrico durante o período de inverno. Isso pode ser justificado quando é comparada a média da temperatura de bulbo seco do ambiente externo ao longo do ano para a cidade de São Paulo e o consumo mensal do aquecimento. Para o modelo simulado, foi definido que o sistema de aquecimento é acionado quando o termostato detecta temperatura abaixo de 20°C no ambiente interno climatizado. Portanto, verifica-se que houve o acionamento do sistema de aquecimento para alguns dias do período de inverno.

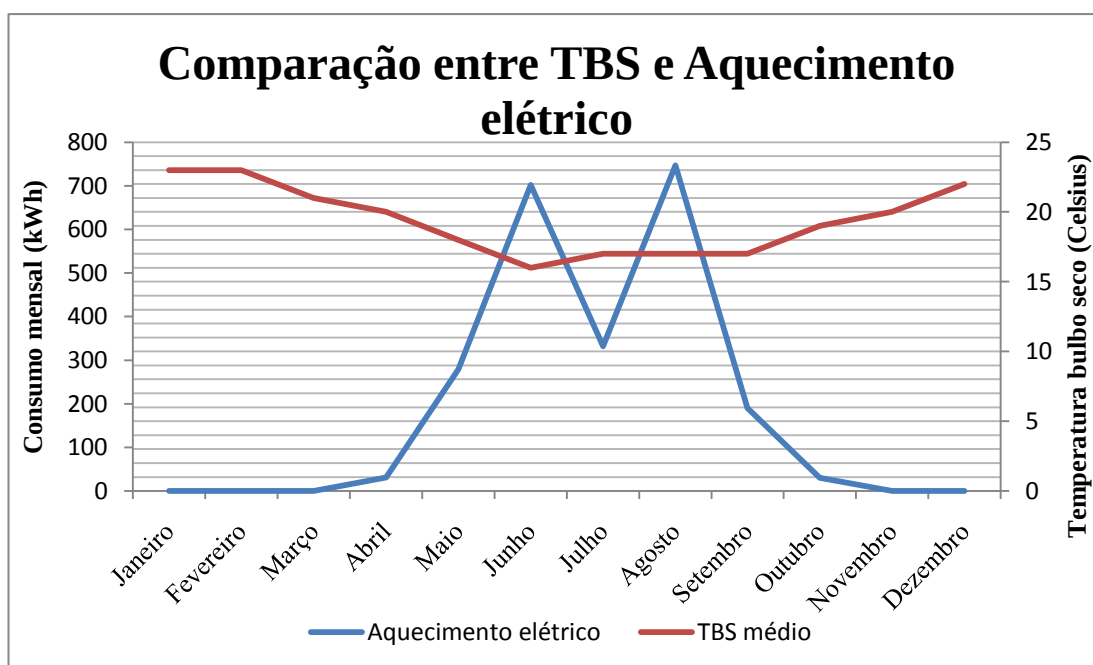


Figura 10: Comparação entre TBS e consumo do aquecimento elétrico.

Verifica-se que a média da temperatura de bulbo seco, no período de maio à setembro, apresentou valor abaixo de 20°C , ocorrendo, assim, o uso de aquecimento elétrico.

11. ANÁLISE DE SENSIBILIDADE

Após a definição do modelo de referência, realizou-se uma análise de sensibilidade do consumo energético da edificação em relação a algumas das variáveis consideradas importantes para a cidade de São Paulo.

Foram analisadas três variáveis: densidade de ocupação, densidade luminosa e o COP dos sistemas de refrigeração e aquecimento. Para o tipo de edificação em análise (prédio comercial com alto índice de ocupação), consideram-se essas três variáveis importantes na composição da carga térmica. O procedimento foi utilizar o modelo referência e realizar alterações nos valores das três variáveis em -20% e +20% em relação ao valor definido como padrão típico para esta edificação. Em seguida, é feita uma simulação do modelo para cada alteração realizada, com o objetivo de obter os dados do novo consumo total. Dessa maneira, foi feita uma análise comparativa do consumo de uso final para cada alteração das variáveis.

11.1. Análise de sensibilidade da densidade luminosa

Utilizando como referência, as densidades luminosas de cada zona térmica apresentada na tabela do anexo B, foi simulado um modelo com uma alteração no DPL de +20% e outro com alteração de -20%. O resultado dessa comparação está exposto no gráfico da figura 11.

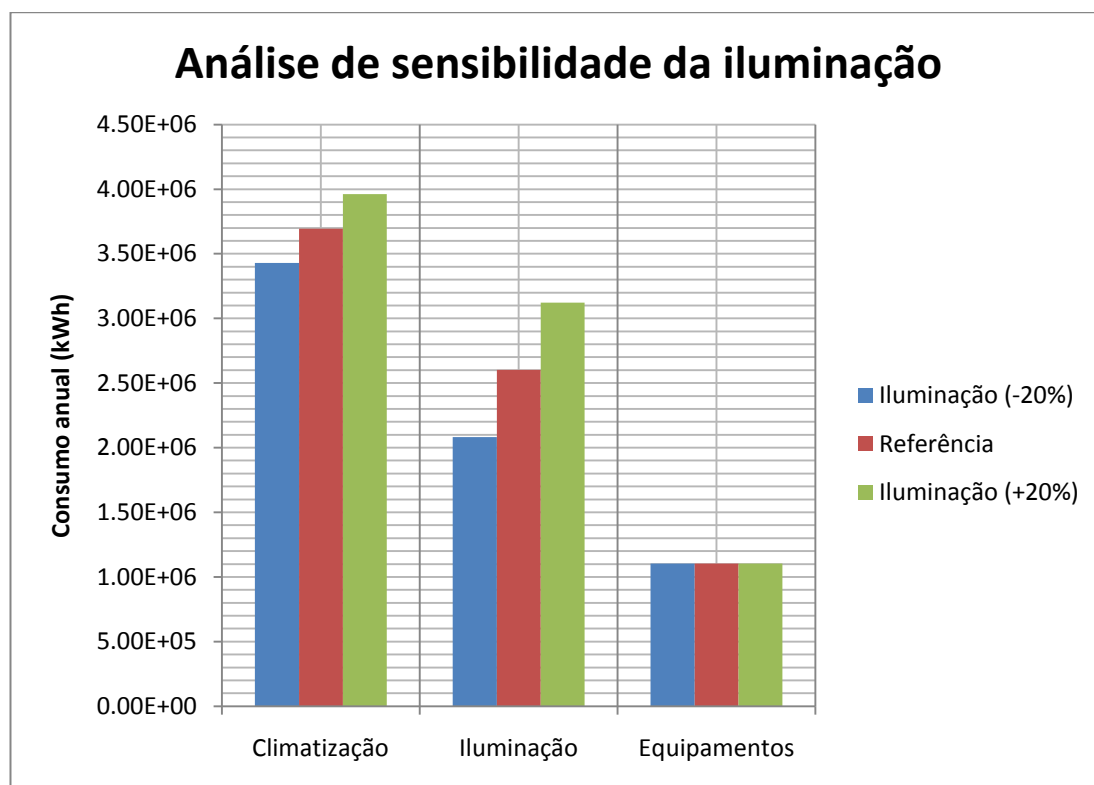


Figura 11: Análise de sensibilidade da iluminação na cidade de São Paulo.

Observa-se que a modificação na densidade luminosa provoca uma alteração esperada no consumo anual da parcela de iluminação. Porém, com o aumento dessa variável, houve uma elevação no consumo energético do sistema de climatização em torno de 7% em relação à referência. Isso mostra que a iluminação tem influência considerável no dimensionamento da carga térmica, impactando no gasto de energia da climatização do empreendimento.

11.2. Análise de sensibilidade da densidade de ocupação

A mesma metodologia aplicada no estudo da variação da densidade luminosa foi usada na análise de sensibilidade da densidade de ocupação. Utilizando como referência os valores de ocupação das zonas térmicas apresentados no anexo B, o resultado do consumo energético por uso final das três simulações esta apresentado no gráfico da figura 12.

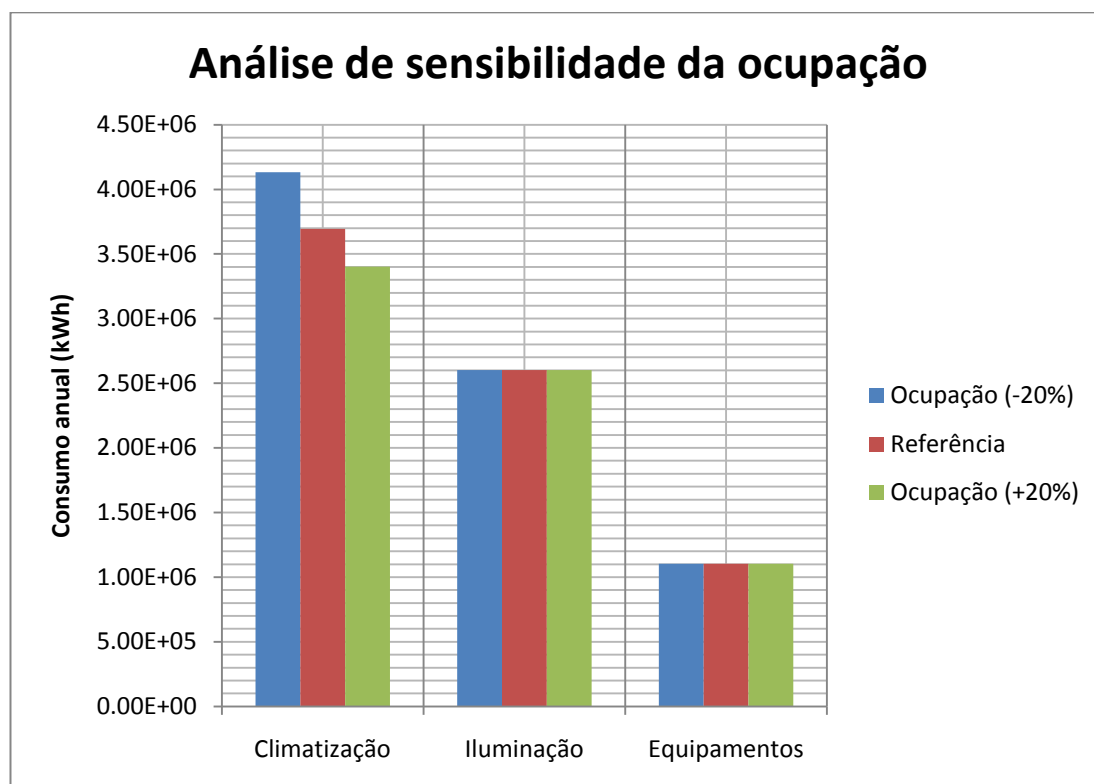


Figura 12: Análise de sensibilidade da ocupação na cidade de São Paulo

Observa-se que a densidade de ocupação provoca uma alteração sensível no consumo de energia do sistema de climatização. Diminuindo a densidade (área por pessoa), aumenta-se o número de pessoas dentro da edificação, elevando a carga térmica das zonas em 11,6%. Portanto, essa variável tem relevância na construção de um índice para avaliação do consumo energético de “Shopping Centers”.

11.3. Análise de sensibilidade do COP de refrigeração e aquecimento

Analisando da mesma maneira realizada para as densidades luminosas e de ocupação, modificou-se o valor do COP para os sistemas de climatização e de aquecimento. Apesar das variações dos valores de COP implicarem em valores muito acima dos disponíveis no mercado (por exemplo, aumentando em 20% o valor de referência, o COP obtido vale 7,3), essa análise serve como uma verificação da influência dessa variável no consumo energético da edificação. Assim, o resultado dessas variações está exposto no gráfico da figura 13.

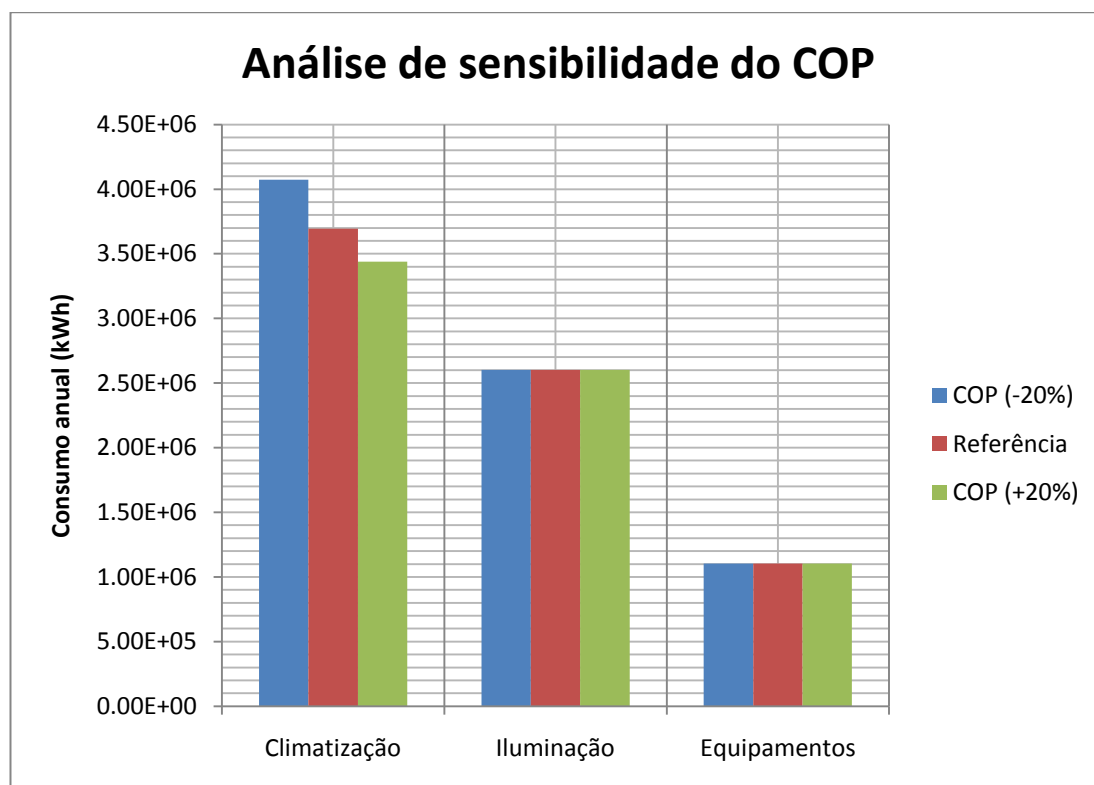


Figura 13: Análise de sensibilidade do COP na cidade de São Paulo

O resultado do gráfico da figura 13 confirma que o COP está diretamente relacionado com o desempenho dos sistemas, conseqüentemente, modificando o consumo energético. Quanto maior o COP, mais eficiente é o sistema e menor é o gasto de energia. Nesse caso, houve uma redução de aproximadamente 7% no consumo da climatização.

12. SIMULAÇÃO PARA OUTRAS CIDADES BRASILEIRAS

Utilizando a mesma configuração do modelo de referência definido anteriormente e simulado para a cidade de São Paulo, foram realizadas simulações para outras 5 cidades brasileiras de diferentes regiões climáticas.

12.1. Simulação para cidade de Belém

Simulado o modelo para o arquivo climático de 8760 horas da cidade de Belém, obtiveram-se os seguintes consumos anuais por utilização, apresentados na tabela 6.

Tabela 6: Consumo anual por uso final para cidade de Belém.

Uso final	Consumo anual (kWh)
Climatização	5.322.876
Iluminação	2.601.488
Equipamentos	1.104.873
Aquecimento elétrico	0

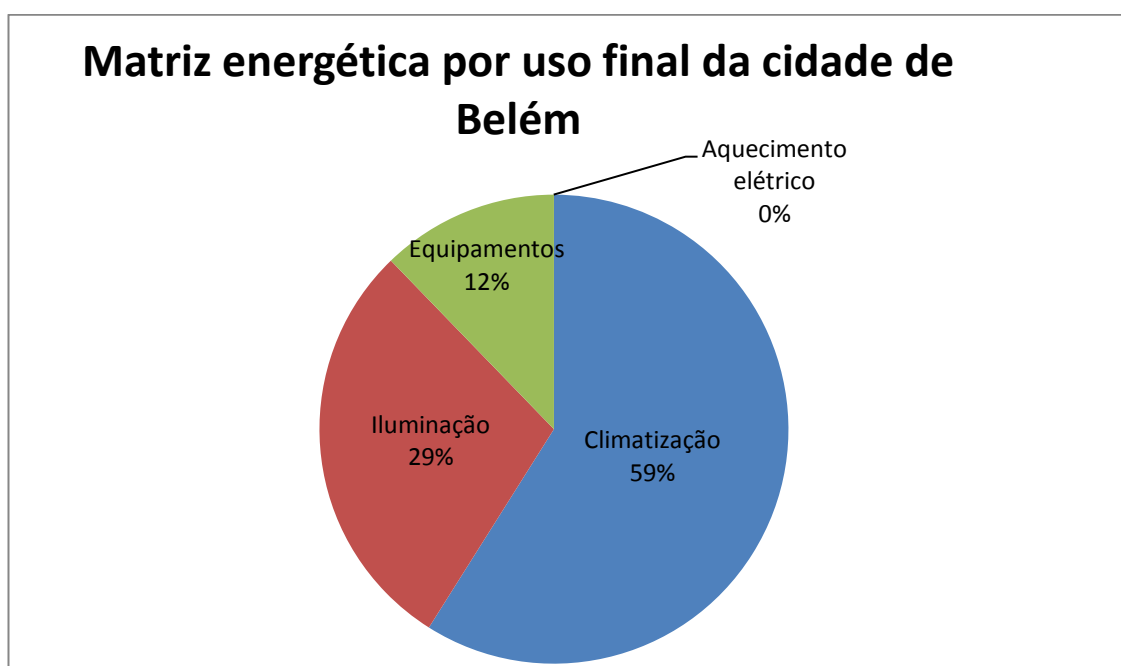


Figura 14: Matriz energética por uso final da cidade de Belém.

A matriz energética na figura 14 mostra o elevado consumo da climatização. Comparando com a matriz da simulação de referência, na cidade de São Paulo, observa-se que o gasto com ar condicionado é maior em Belém. Esse fato já era esperado, pois o clima dessa cidade é mais quente e úmido, o que provoca maior carga térmica a ser eliminada.

12.2. Simulação para cidade de Brasília

Simulado o modelo para o arquivo climático de 8760 horas da cidade de Brasília, obtiveram-se os seguintes consumos anuais por utilização, apresentados na tabela 7.

Tabela 7: Consumo anual por uso final para a cidade de Brasília.

Uso final	Consumo anual (kWh)
Climatização	3.906.398
Iluminação	2.601.488
Equipamentos	1.104.873
Aquecimento elétrico	8,3

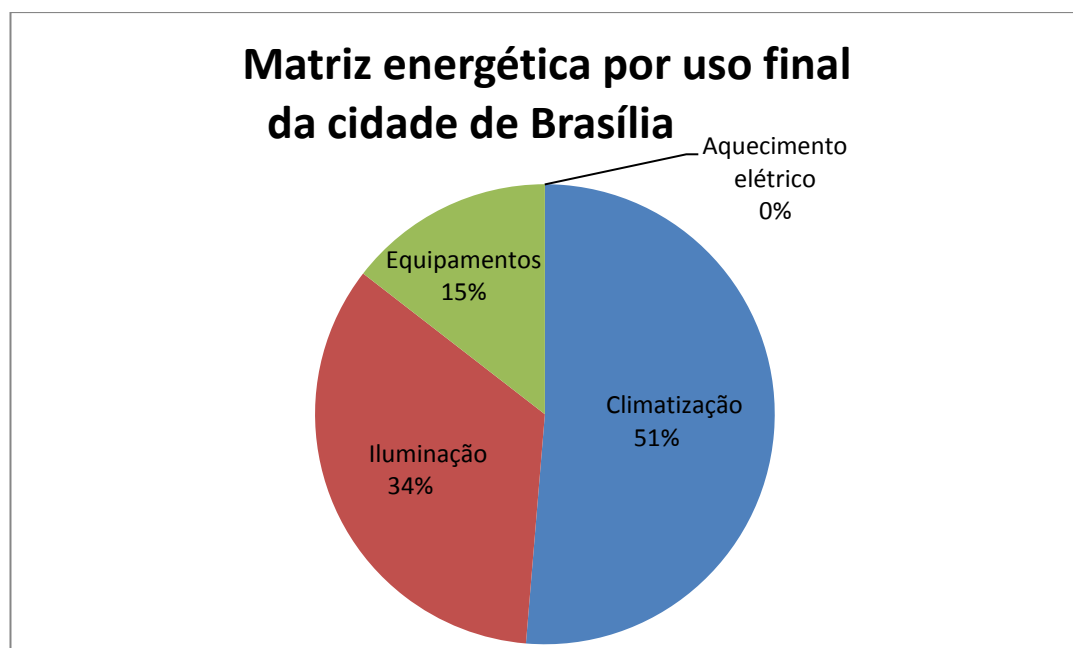


Figura 15: Matriz energética por uso final da cidade de Brasília.

Observa-se que a matriz energética para Brasília ficou muito próxima da matriz energética para São Paulo. Apenas o consumo do aquecimento elétrico foi menor, que pode ser considerado coerente devido à diferença dos climas.

12.3. Simulação para cidade de Fortaleza

Simulado o modelo para o arquivo climático de 8760 horas da cidade de Fortaleza, obtiveram-se os seguintes consumos anuais por utilização, apresentados na tabela 8.

Tabela 8: Consumo anual por uso final para a cidade de Fortaleza.

Uso final	Consumo anual (kWh)
Climatização	5.321.689
Iluminação	2.601.488
Equipamentos	1.104.873
Aquecimento elétrico	0

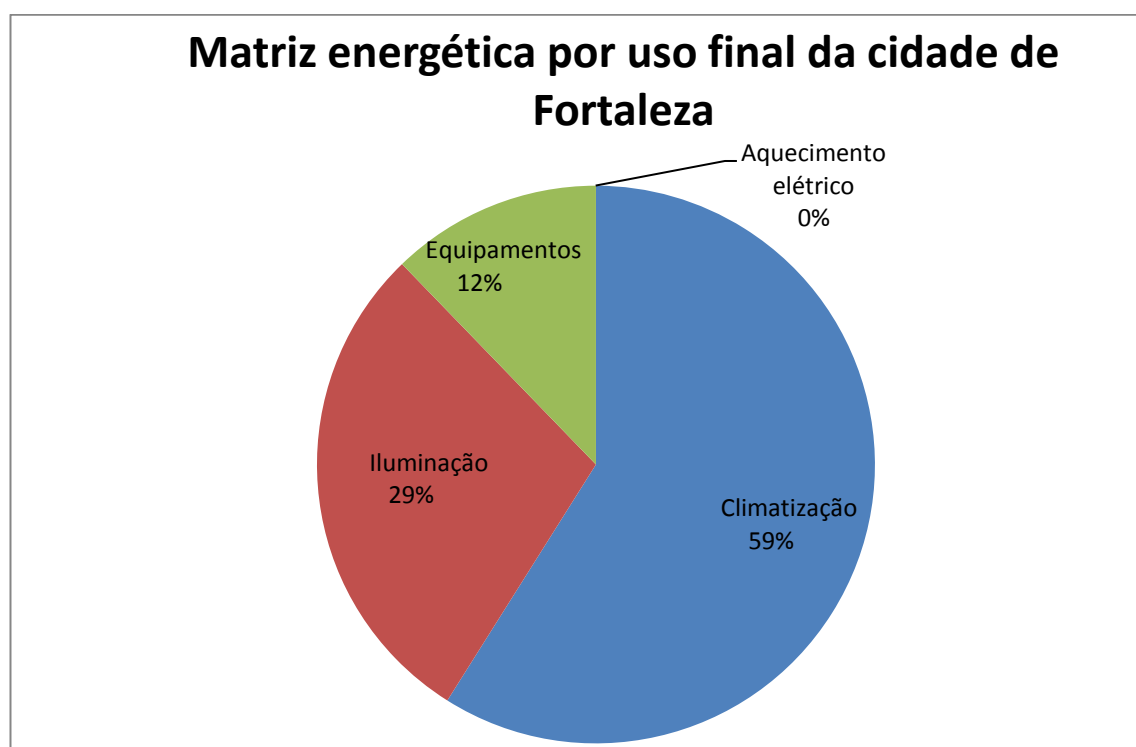


Figura 16: Matriz energética por uso final da cidade de Fortaleza.

Observa-se que a matriz energética para Fortaleza é igual à de Belém. A questão é que o clima da cidade de Fortaleza é tão quente quanto o de Belém, porém menos úmido. Isso causou uma redução de 1000 kWh no consumo anual da climatização.

12.4. Simulação para cidade de Porto alegre

Simulado o modelo para o arquivo climático de 8760 horas da cidade de Porto Alegre, obtiveram-se os seguintes consumos anuais por utilização, apresentados na tabela 9.

Tabela 9: Consumo anual por uso final para a cidade de Porto Alegre.

Uso final	Consumo anual (kWh)
Climatização	3.710.389
Iluminação	2.601.488
Equipamentos	1.104.873
Aquecimento elétrico	15.858

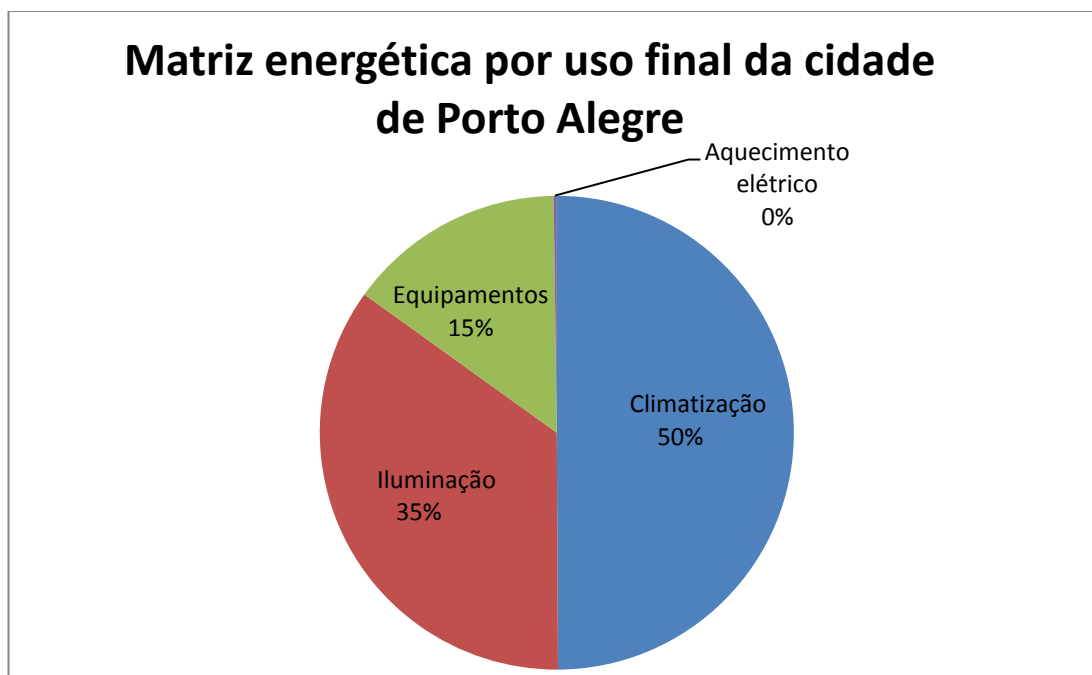


Figura 17: Matriz energética por uso final da cidade de Porto Alegre.

Observa-se que a matriz energética para Porto Alegre é igual à de São Paulo. Destaca-se apenas o maior consumo do aquecimento elétrico durante o inverno, que é mais rigoroso na região sul do Brasil. Ainda assim, esse gasto não é significativo em relação aos outros usos finais.

12.5. Simulação para cidade de Rio de Janeiro

Simulado o modelo para o arquivo climático de 8760 horas da cidade de Rio de Janeiro, obtiveram-se os seguintes consumos anuais por utilização, apresentados na tabela 10.

Tabela 10: Consumo anual por uso final para cidade do Rio de Janeiro.

Uso final	Consumo anual (kWh)
Climatização	4.454.606
Iluminação	2.601.488
Equipamentos	1.104.873
Aquecimento elétrico	2

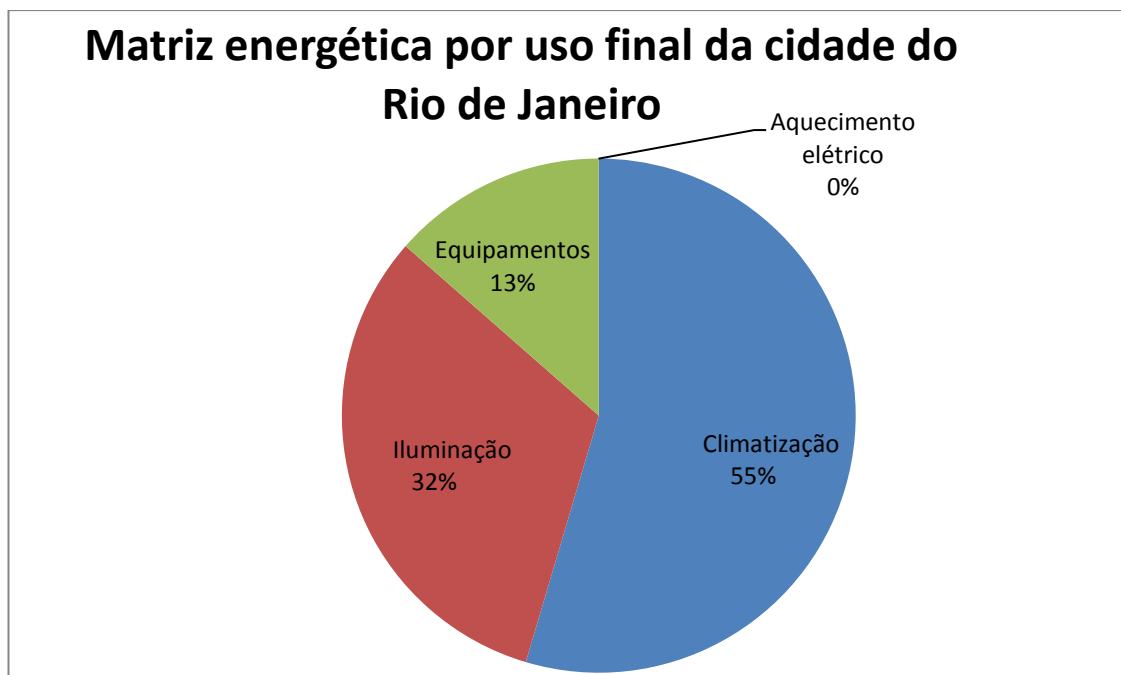


Figura 18: Matriz energética por uso final da cidade do Rio de Janeiro.

Observa-se na matriz energética para a cidade do Rio de Janeiro um maior consumo de climatização em relação à cidade de São Paulo. Isso também já era esperado, por causa da influência do clima na carga térmica da edificação.

No trabalho de Joseph e Danny (2002), foram realizados estudos de consumo para 4 “shopping centers” na cidade de Hong Kong na China. Essa cidade tem condições climáticas similares as do Rio de Janeiro. Para efeito de comparação e validação dos dados, observou-se uma semelhança nos resultados obtidos para um dos “Shoppings”, que possui área próxima do modelo utilizado.

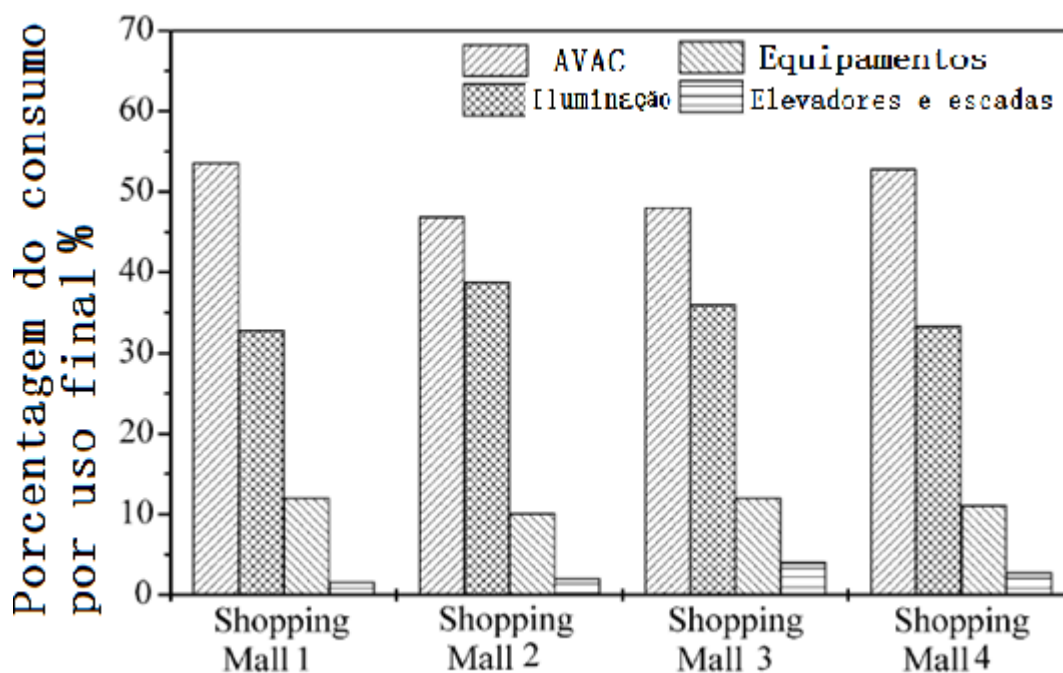


Figura 19: Matriz energética dos 4 shopping mall de Hong Kong. Joseph e Danny (2002).

A figura 19, mostra as matrizes energéticas dos 4 “Shopping Malls” analisados por Joseph e Danny (2002). O “shopping mall” 1 possui uma área próxima do modelo simulado e a sua matriz energética é muito próxima a da simulação realizada para a cidade do Rio de Janeiro. A tabela 11 mostra a comparação entre as porcentagens de uso final para o “shopping mall 1” e para o modelo simulado para a cidade do Rio de Janeiro.

Tabela 11: Comparação entre modelo simulado para Rio de Janeiro e “shopping mall 1”

Uso final	Porcentagem do consumo total (%)	
	Modelo (Rio de Janeiro)	“shopping mall 1”
Climatização	55	54
Iluminação	32	33
Equipamentos	13	12

13. INDICADORES DE DESEMPENHO ENERGÉTICO

Com os dados gerados pelas simulações, tornou-se possível criar índices que possam avaliar o desempenho energético para cidades de climas diferentes.

13.1. Consumo total pela área

Este indicador é determinado através da razão entre o consumo total (kWh) ao longo de um ano típico para cada cidade e a área da edificação. A tabela 12 e a figura 20 mostram como varia esse avaliador para diferentes regiões climáticas.

Tabela 12: Índice do consumo total pela área para cada cidade.

	kWh/m ² .ano	Desvio em relação à média
São Paulo	268,8	7%
Belém	327,9	12%
Brasília	276,5	4%
Porto Alegre	269,9	7%
Rio de Janeiro	296,4	3%

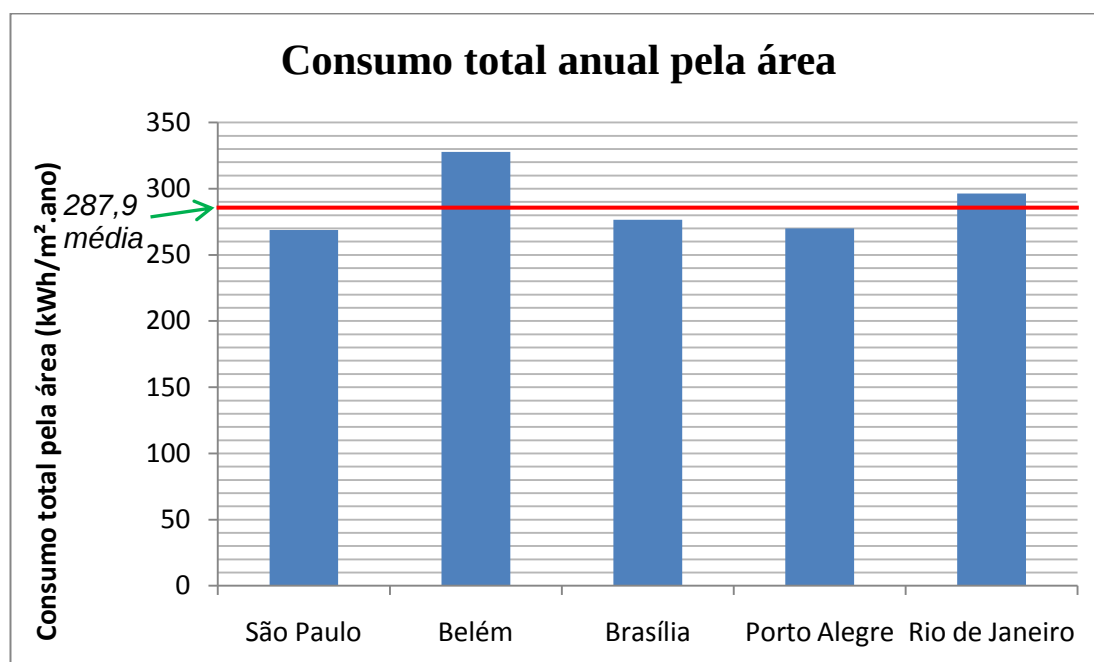


Figura 20: Índice do consumo total pela área para as cidades simuladas.

O maior desvio em relação à média desse indicador é de aproximadamente 12% para a cidade de Belém. Isso é devido ao elevado consumo do sistema de climatização dessa localidade em relação às outras.

Uma maneira de tentar corrigir essa diferença no consumo, por causa do clima, é incluir na determinação do indicador a média da temperatura de bulbo seco do ambiente externo à edificação (TBS).

Dessa maneira, a tabela 13 e a figura 21 mostram como varia esse novo avaliador para as 05 cidades simuladas. As temperaturas médias externas de bulbo seco foram determinadas através dos arquivos climáticos utilizados nas simulações.

Tabela 13: Índice do consumo total pela área pelo TBS para cada cidade.

	kWh/m ² .ano	TBS médio (°C)	kWh/m ² .°C.ano	Desvio em relação à média
São Paulo	268,8	19,9	13,5	3%
Belém	327,9	26,5	12,4	5%
Brasília	276,5	21,5	12,9	2%
Porto Alegre	269,9	19,2	14,1	8%
Rio de Janeiro	296,4	23,6	12,6	4%

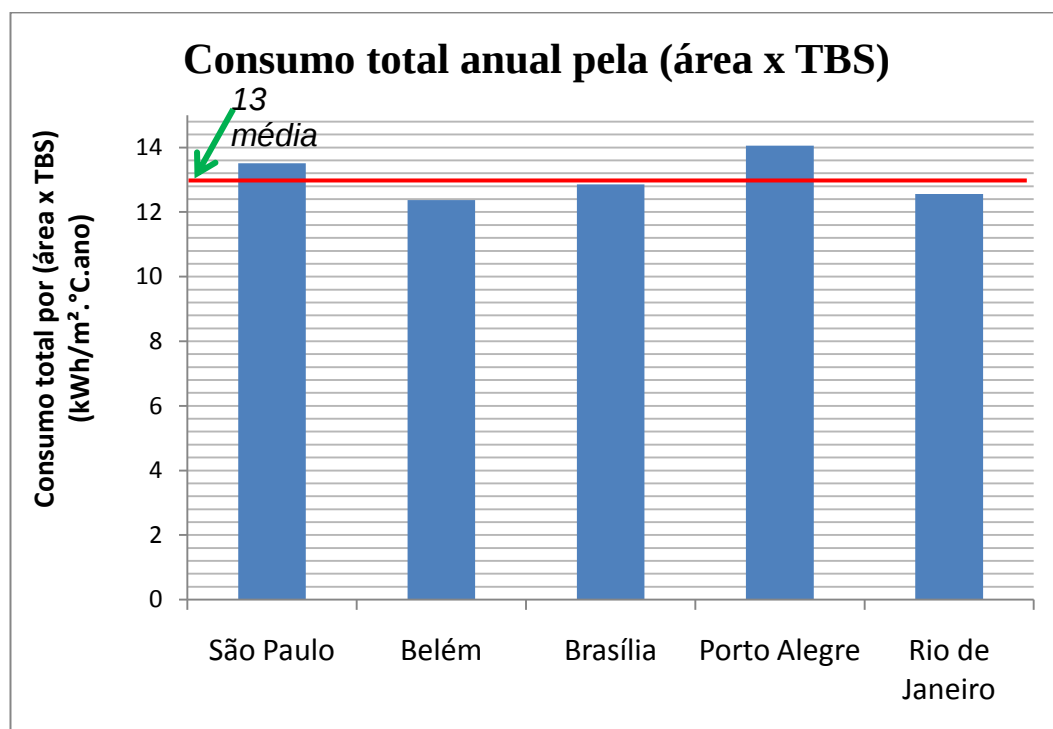


Figura 21: Índice do consumo total pela área por TBS das cidades simuladas.

Observa-se que, com essa correção, o desvio máximo em relação à média foi de 8% para a cidade de Porto Alegre. Portanto, esse novo indicador mostrou melhor regularidade para 05 regiões climáticas brasileiras.

13.1.1. Correlação do consumo total anual pela TBS

A fim de avaliar a possível correlação existente entre o consumo total pela área, realizou-se uma análise entre esse indicador de consumo e a TBS correspondente para cada uma das cinco cidades. A figura 22 mostra como ficou a correlação linear.

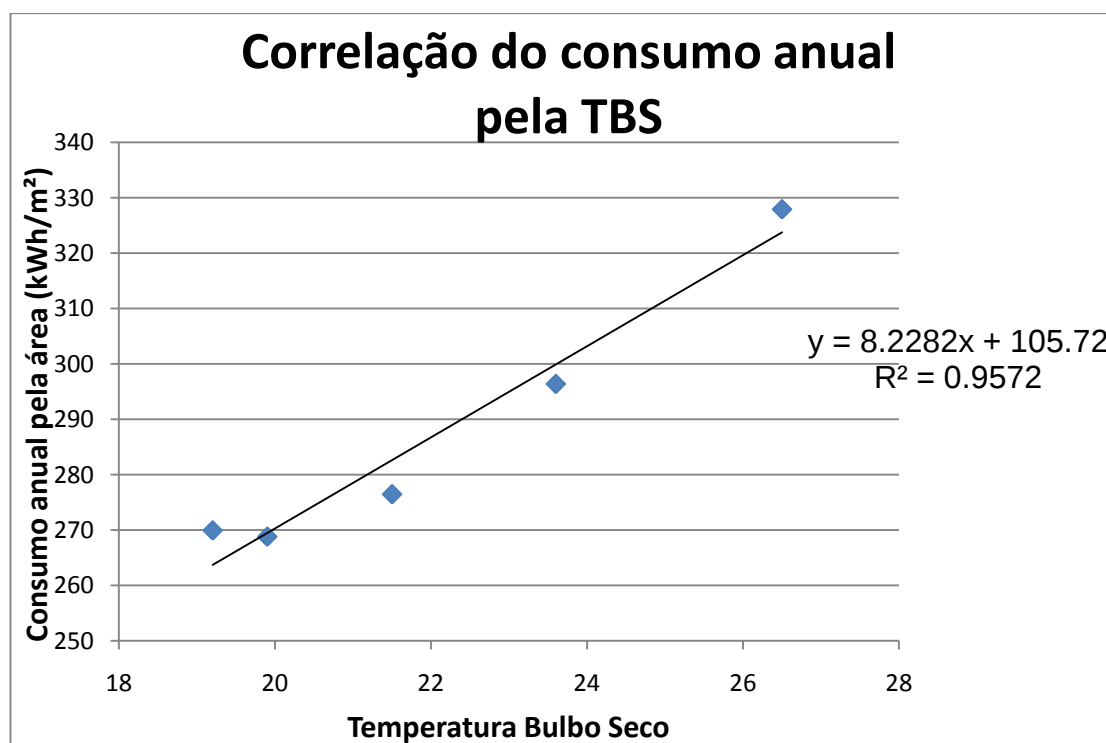


Figura 22: Correlação do consumo anual pela TBS.

A figura mostra que o coeficiente de correlação está próximo de um, declarando que os dados em análise estão correlacionados. A tabela 14 abaixo possui os valores dos erros para as cinco cidades.

Tabela 14: Erros da correlação entre consumo total e TBS.

Maior erro (%)	5,6
Menor erro (%)	-7,0
Erro médio (%)	0,2

13.2. Consumo anual do sistema de climatização pela área

Este indicador é determinado através da razão entre o consumo (kWh) agregado apenas ao sistema de climatização, ao longo de um ano típico para cada cidade, e a área da edificação. Os resultados da análise estão na tabela 15 e na figura 23.

Tabela 15: Consumo anual do sistema de climatização pela área.

	(kWh/m ² .ano)	Desvio em relação à média
São Paulo	133,8	12%
Porto Alegre	134,3	12%
Rio de Janeiro	160,6	6%
Belém	190,9	25%
Brasília	141,5	7%

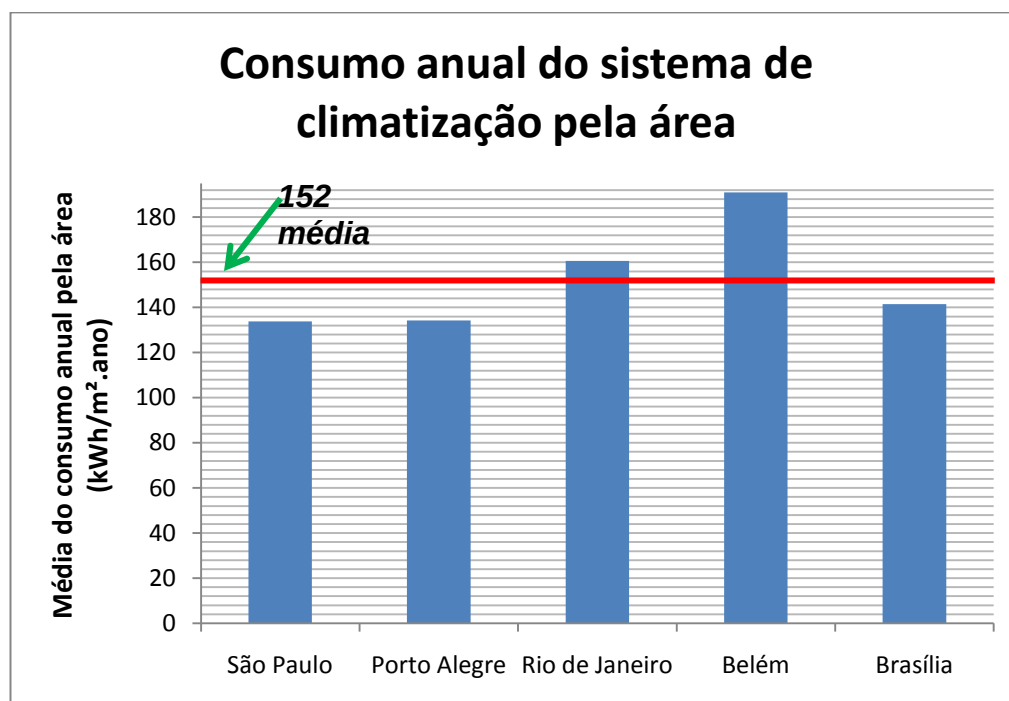


Figura 23: Consumo anual do sistema de climatização pela área.

Avaliando apenas o consumo do sistema de climatização, obteve-se maior desvio da média de 25% para a cidade de Belém. Realizando novamente a correção desse avaliador, acrescentando na composição do indicador a temperatura externa do

ambiente (TBS) para cada cidade, foram gerados os resultados que estão expostos na tabela 16 e na figura 24.

Tabela 16: Consumo anual do sistema de climatização pela (área x TBS).

	(kWh/m ² .°C.ano)	TBS médio (°C)	Desvio em relação à média
São Paulo	6,9	19,9	3%
Porto Alegre	7,3	19,2	3%
Rio de Janeiro	6,9	23,6	3%
Belém	7,4	26,5	4%
Brasília	7,0	21,5	1%

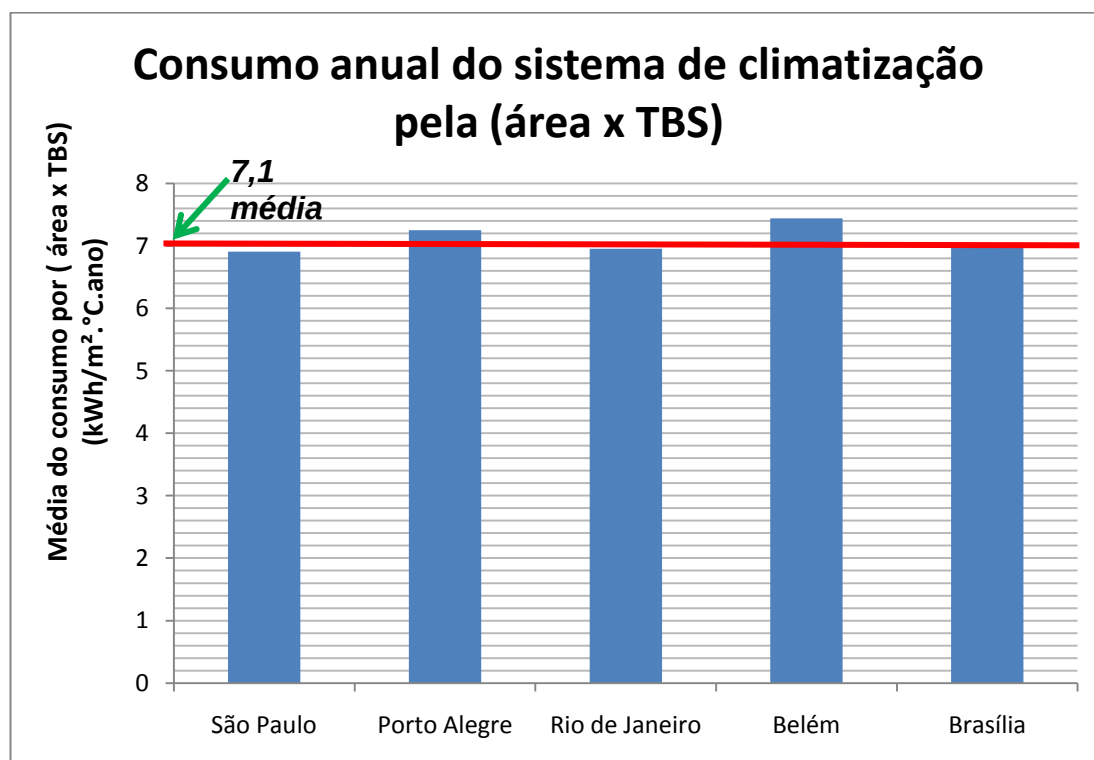


Figura 24: Consumo anual do sistema de climatização pela (área x TBS).

Observou-se que esse indicador apresentou um desvio máximo de apenas 4% para a cidade de Belém. Por causa dessa pequena diferença entre os índices para cada cidade, esse avaliador demonstra ser capaz de analisar o desempenho energético de uma edificação, independentemente da localização.

13.2.1 Correlação do consumo de climatização pela TBS

Da mesma forma como foi realizado para o consumo total anual, foi verificada a correlação entre o consumo de climatização e a TBS. A figura 25 mostra a curva e a equação da correlação.

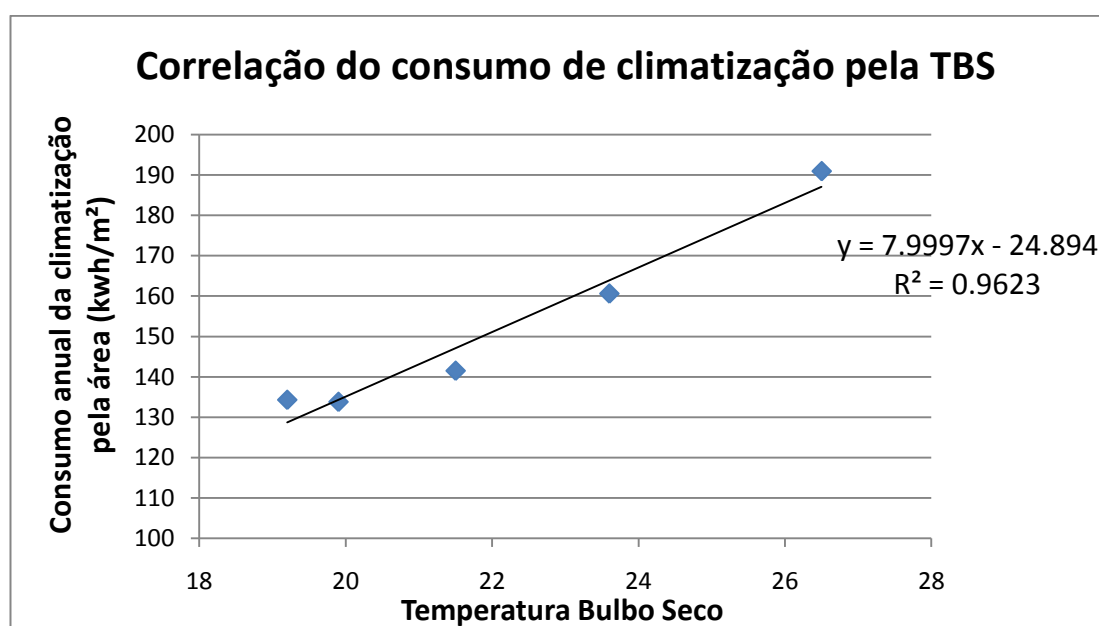


Figura 25: Correlação do consumo de climatização pela TBS.

Observa-se que o índice de correlação melhorou, mostrando a maior correlação entre os dados. Em consequência, os erros, que estão relatados na tabela 17, foram reduzidos.

Tabela 17: Erros da correlação entre consumo de climatização e TBS.

Maior erro (%)	4,3
Menor erro (%)	-4,7
Erro médio (%)	0,1

13.3. Consumo mensal total pela área pela TBS

O estudo desse indicador foi realizado de maneira diferente dos anteriores. Utilizando os resultados de consumos mensais para as cinco cidades, totalizando 60 valores, verificou-se como se comporta essa variável em relação à temperatura média mensal de bulbo seco. A figura 26 detalha como ficou a curva de tendência linear entre os pontos.

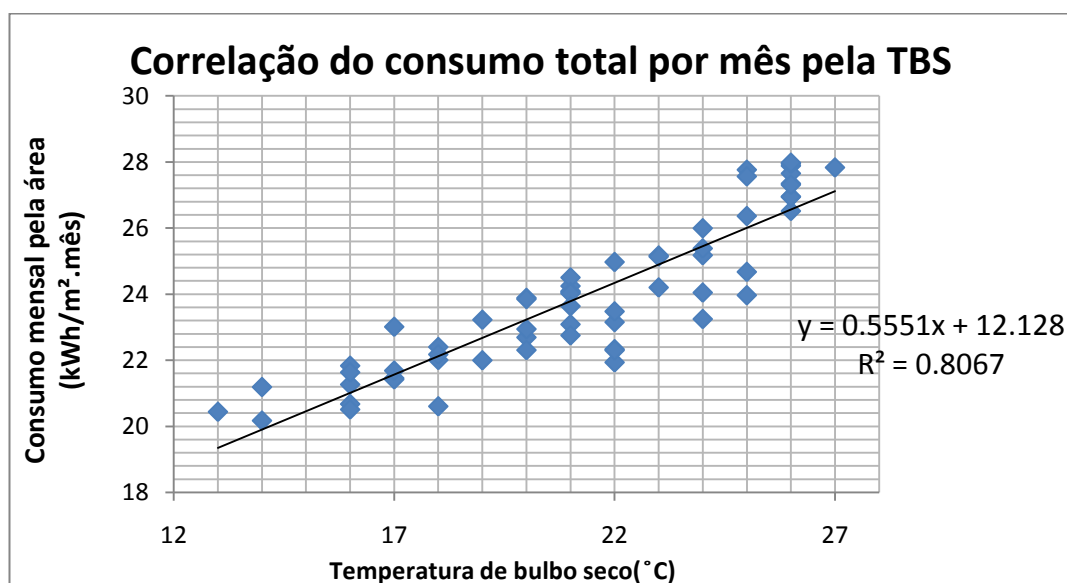


Figura 26: Correlação do consumo total por mês pela TBS.

Para analisar a eficácia desse indicador, avaliou-se o erro entre o valor do consumo mensal, resultado da simulação, e o valor calculado através do produto entre a média dos valores do indicador (kWh/m².°C.mês) pela média da TBS correspondente a cada mês. A tabela 18 relata os principais números.

Tabela 18: Erros da correlação entre consumo mensal pela TBS.

Maior erro (%)	19,6
Menor erro (%)	-27,1
Erro médio (%)	1,2

A figura 27 mostra como variou o indicador em cada mês para cada uma das cinco cidades simuladas.

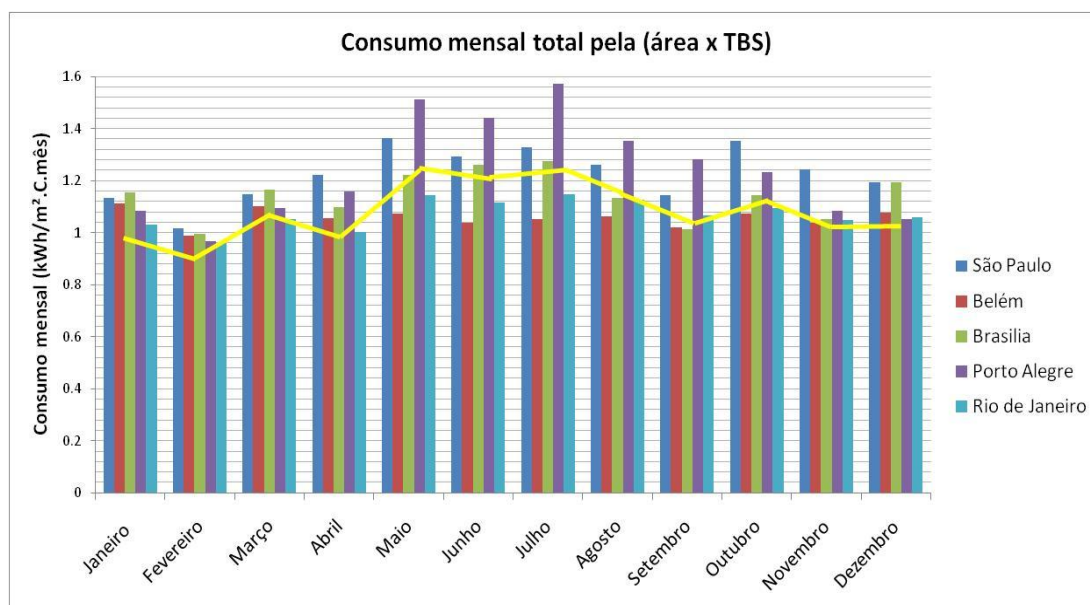


Figura 27: Consumo total mensal pela (área x TBS).

13.4. Consumo mensal do sistema de climatização pela área pela TBS

Da mesma forma como foi analisado o indicador anterior, verificou-se a correlação existente entre o consumo mensal do sistema de climatização e a TBS. A figura 28 mostra como ficou a curva.

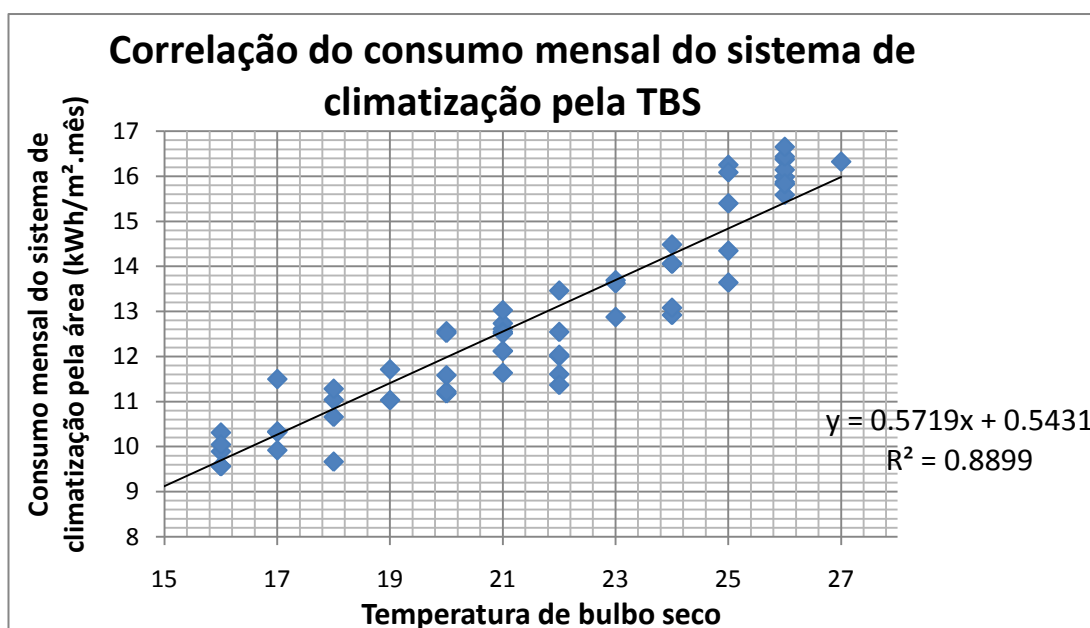


Figura 28: Correlação do consumo mensal da climatização pela TBS.

Observa-se que a correlação entre os dados de consumo de climatização mensal e a TBS média é melhor, comparado com consumo total por mês. Isso porque o coeficiente de correlação ficou mais próximo de um.

Foi verificado também o erro entre o valor encontrado com a simulação e o valor calculado através do produto entre a média dos valores do indicador ($\text{kWh}/\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C} \cdot \text{mês}$) e a média da TBS correspondente a cada mês. A tabela 19 relata os principais números.

Tabela 19: Erros da correlação entre o consumo mensal de climatização e a TBS.

Maior erro (%)	15,9
Menor erro (%)	-12,4
Erro médio (%)	0,4

A figura 29 mostra como variou o indicador em cada mês para cada uma das cinco cidades simuladas.

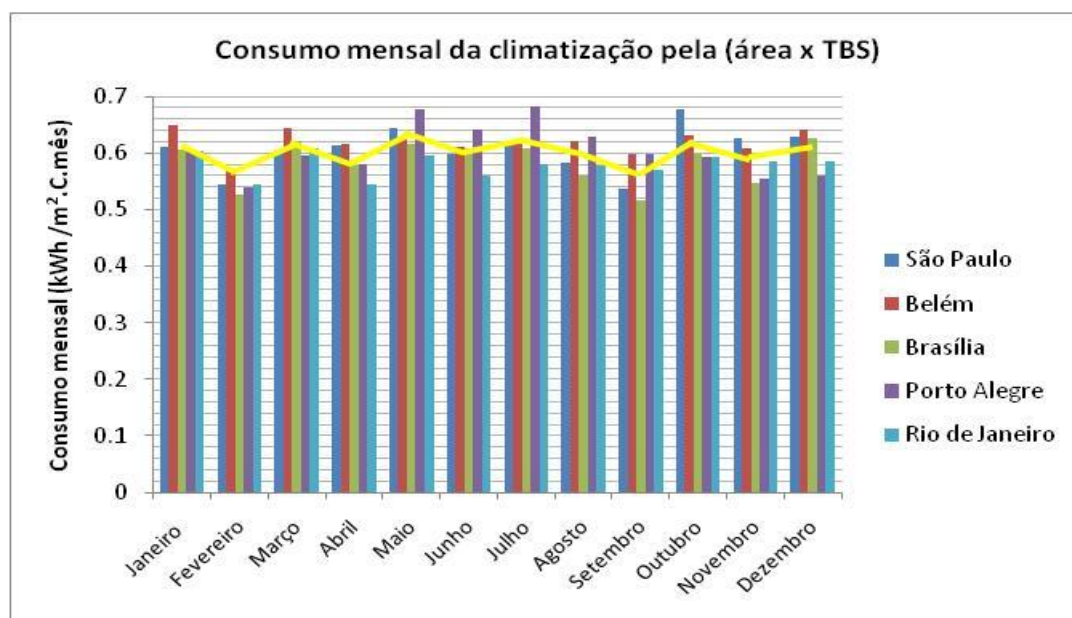


Figura 29: Consumo mensal da climatização pela (área x TBS)

Com os dados expostos, observa-se que entre os indicadores compostos pelo consumo mensal, aquele que apresentou menores erros e melhor correlação foi o

indicador que analisa somente o consumo do sistema de climatização $(\text{kWh}/\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C} \cdot \text{mês})_{\text{AVAC}}$.

Apesar da melhora, os erros ainda apresentaram valores altos, comparados com os dos indicadores de consumo anuais. Isso se deve em grande parte à maneira irregular da ocorrência das médias da temperatura de bulbo seco (TBS) ao longo dos meses do ano para as cinco cidades brasileiras simuladas. O gráfico da figura 30 mostra como ficou a distribuição das médias da TBS em função do consumo mensal da climatização.

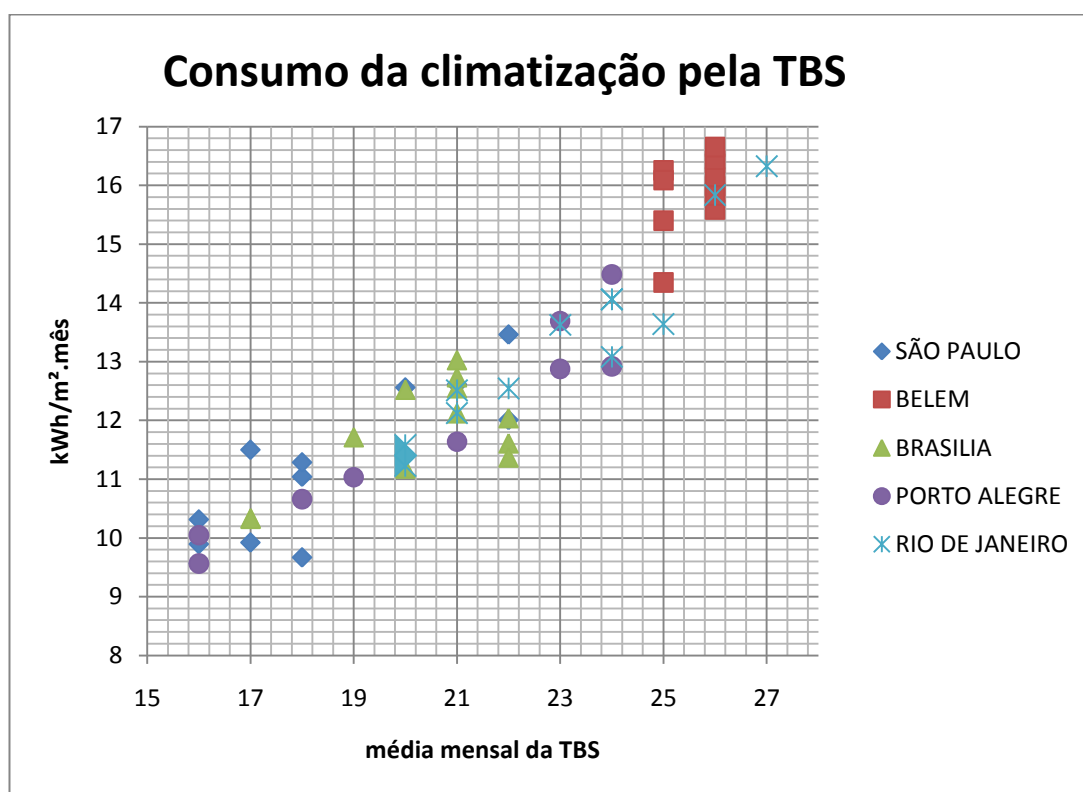


Figura 30: Consumo da climatização pela TBS.

14. CONCLUSÃO

Foi elaborado o modelo de um “shopping center”, com todas as características físicas estabelecidas com base na norma ASHRAE 90.1. O estabelecimento das cargas internas da edificação foi complexo, em função da escassez de informações detalhadas nas normas para esse tipo de construção. Dessa maneira, foi necessário obter dados de cargas internas com especialistas em dimensionamento de sistemas de climatização para “shopping centers”.

Em seguida, foi realizada uma simulação, utilizando o arquivo climático da cidade de São Paulo, e foi verificado maior consumo do sistema de climatização na matriz energética do prédio. A carga térmica foi de 748 TR e obteve-se um índice de 36,8 m²/TR.

Os resultados dessa simulação foram usados como referência para o estudo de sensibilidade de três variáveis que são consideradas definitivas para a composição do consumo energético de um “shopping center”. Os valores da densidade de iluminação, da densidade de ocupação e do COP do sistema de climatização sofreram alterações para que fosse analisada a influência de cada variável no consumo final. Essa análise visa estudar as variáveis que melhor comporiam um índice representativo do consumo energético de “shopping centers”.

Verificou-se que a mudança dos valores da densidade luminosa causou alterações significativas no sistema de climatização em torno de 7% em relação a referência.

Na alteração das densidades de ocupação, verificou-se uma variação de aproximadamente 11,6% no sistema de climatização. Isso mostra que essa variável causa impacto considerável no consumo, ressaltando sua importância na determinação do avaliador de desempenho energético.

Os coeficientes de eficácia dos sistemas de refrigeração e de aquecimento também foram alterados e simulados, apesar de alguns valores não existirem na realidade. O objetivo foi analisar quanto essa variável impacta no consumo. Constatou-se que o consumo da climatização reduz 10,3%. Portanto, a escolha de equipamentos eficazes é importante para a eficiência do empreendimento.

Após essa análise, foram realizadas simulações para outras 05 cidades brasileiras de diferentes regiões climáticas. Foram observados que os consumos dos sistemas de climatização e de aquecimento elétrico variaram de acordo com o clima das cidades. Para Belém e Fortaleza, a demanda elétrica do sistema de climatização foi mais elevada do que para as outras cidades. Isso é devido às altas temperaturas médias (TBS) que essas localidades apresentam. Os consumos das outras cargas internas se mantiveram constantes para todas as simulações.

Por fim, foram analisados alguns indicadores, como a razão do consumo pela área do empreendimento ($\text{kWh/m}^2\text{.ano}$). Verificou-se um desvio máximo de 12% em relação à média. Assim, foram feitas algumas modificações, considerando a variação climática ao longo do país. Adicionou-se ao indicador a temperatura média anual do ambiente externo para cada cidade. Averiguou-se, com esse novo indicador ($\text{kWh/m}^2\text{.}^\circ\text{C.ano}$) um desvio máximo da média de apenas 8%.

Outro estudo de indicador foi realizado considerando apenas o consumo do sistema de climatização. Constatou-se que para o indicador ($\text{kWh/m}^2\text{.ano}$) existe um desvio máximo de 25% em relação à média. Realizou-se uma correção no indicador onde foi utilizada a média das temperaturas externas (TBS) para cada cidade, obteve-se um desvio máximo de apenas 4%.

Portanto, com o refinamento do indicador, ou seja, avaliando apenas o consumo da climatização da edificação corrigido com a (TBS), foi possível obter um avaliador de desempenho energético ($\text{kWh/m}^2\text{.}^\circ\text{C.ano}$) que possui uma uniformidade para diferentes regiões climáticas.

Finalmente, mais dois indicadores foram analisados. A avaliação foi baseada no consumo mensal para cada cidade, um para o consumo total e outro apenas para o consumo da climatização. Dessa maneira, foi possível observar uma variação maior dos valores dos indicadores em relação ao valor médio, apesar de existir uma boa correlação (coeficiente de correlação próximo de 1, $R^2 = 0,88$) entre o consumo mensal e a média das temperaturas de bulbo seco para cada mês.

Foi observado que para algumas cidades, como Belém e Brasília, há uma concentração das temperaturas de bulbo seco em uma pequena faixa de valores. Como demonstrado na figura 28, as temperaturas de Belém, por exemplo, variam apenas entre 25 e 26 graus Celsius. Isso provocou a elevação dos erros, porém não

reduziu a importância do índice ($\text{kWh/m}^2 \cdot ^\circ\text{C} \cdot \text{mês}$) na análise do consumo energético de um “shopping center”.

Em suma, o indicador de consumo do sistema de climatização ($\text{kWh/m}^2 \cdot \text{ano}$) quando corrigido pela TBS apresenta bons valores, pois ocorre uma redução entre os números para diferentes regiões climáticas, ficando próximos do valor médio. Já para o indicador de consumo mensal do sistema de climatização ($\text{kWh/m}^2 \cdot \text{mês}$), quando corrigido pela TBS, a maior diferença em relação à média é menor que 16 % . Em ambos os casos, quando se restringe o consumo ao sistema AVAC, os indicadores apresentam menores erros.

Uma sugestão para um trabalho futuro seria analisar a correlação entre o consumo e o índice de radiação para cada cidade, visto que a utilização da TBS na composição dos indicadores não apresentou bons resultados para as cidades de Belém e Brasília, devido à baixa correlação entre a temperatura de bulbo seco e o consumo para essas regiões climáticas.

Outra idéia, visando complementar esse trabalho, seria a realização de uma análise da variação do IPLV do sistema de climatização ao longo do ano. Essa variável é um bom indício de como os equipamentos de climatização estão operando para diferentes condições climáticas. Assim, poder-se-ia verificar a possibilidade de incorporar essa variável na composição de um indicador de desempenho energético.

Anexo- A – Padrão de ocupação e de operação de sistemas e equipamentos

Fonte: User's manual for ANSI/ASHRAE/IESNA Standard 90.1-2007

Table G-L—Retail Occupancy

Hour of Day (Time)	Schedule for Occupancy			Schedule for Lighting Receptacle			Schedule for HVAC System			Schedule for Service Hot Water			Schedule for Elevator		
	Percent of Maximum Load			Percent of Maximum Load						Percent of Maximum Load			Percent of Maximum Load		
	Wk	Sat	Sun	Wk	Sat	Sun	Wk	Sat	Sun	Wk	Sat	Sun	Wk	Sat	Sun
1 (12-1 am)	0	0	0	5	5	5	Off	Off	Off	4	11	7	0	0	0
2 (1-2 am)	0	0	0	5	5	5	Off	Off	Off	5	10	7	0	0	0
3 (2-3 am)	0	0	0	5	5	5	Off	Off	Off	5	8	7	0	0	0
4 (3-4 am)	0	0	0	5	5	5	Off	Off	Off	4	6	6	0	0	0
5 (4-5 am)	0	0	0	5	5	5	Off	Off	Off	4	6	6	0	0	0
6 (5-6 am)	0	0	0	5	5	5	Off	Off	Off	4	6	6	0	0	0
7 (6-7 am)	0	0	0	5	5	5	On	On	Off	4	7	7	0	0	0
8 (7-8 am)	10	10	0	20	10	5	On	On	Off	15	20	10	12	9	0
9 (8-9 am)	20	20	0	50	30	10	On	On	On	23	24	12	22	21	0
10 (9-10 am)	50	50	10	90	60	10	On	On	On	32	27	14	64	56	11
11 (10-11 am)	50	60	20	90	90	40	On	On	On	41	42	29	74	66	13
12 (11-12 pm)	70	80	20	90	90	40	On	On	On	57	54	31	68	68	35
13 (12-1 pm)	70	80	40	90	90	60	On	On	On	62	59	36	68	68	37
14 (1-2 pm)	70	80	40	90	90	60	On	On	On	61	60	36	71	69	37
15 (2-3 pm)	70	80	40	90	90	60	On	On	On	50	49	34	72	70	39
16 (3-4 pm)	80	80	40	90	90	60	On	On	On	45	48	35	72	69	41
17 (4-5 pm)	70	80	40	90	90	60	On	On	On	46	47	37	73	66	38
18 (5-6 pm)	50	60	20	90	90	40	On	On	Off	47	46	34	68	58	34
19 (6-7 pm)	50	20	10	60	50	20	On	On	Off	42	44	25	68	47	3
20 (7-8 pm)	30	20	0	60	30	5	On	On	Off	34	36	27	58	43	0
21 (8-9 pm)	30	20	0	50	30	5	On	On	Off	33	29	21	54	43	0
22 (9-10 pm)	0	10	0	20	10	5	Off	On	Off	23	22	16	0	8	0
23 (10-11 pm)	0	0	0	5	5	5	Off	Off	Off	13	16	10	0	0	0
24 (11-12 am)	0	0	0	5	5	5	Off	Off	Off	8	13	6	0	0	0
Total/Day	720	750	280	1115	985	525	1500	1600	900	662	690	459	844	761	288
Total/Week	46.30 hours			70.85 hours			100 hours			44.59 hours			52.69 hours		
Total/Year	2414 hours			3694 hours			5214 hours			2325 hours			2747 hours		

Wk = Weekday

Schedules for occupancy, lighting, receptacle, HVAC system, and service hot water are from ASHRAE Standard 90.1-1989 and addendums, except that 5% emergency lighting has been added for all off hours. Elevator schedules, except for restaurants, are from the U.S. Department of Energy Standard Evaluation Techniques except changed to 0% when occupancy is 0%. These values may be used only if actual schedules are not known.

Anexo-B – Definição da área, volume e densidades de ocupação e de equipamentos

Zonas térmicas	Área (m²)	Volume (m³)	Iluminação (W/m²)	Ocupação (m²/pessoa)	Equipamentos (W/m²)
SUBSOLO1_URF	192	604,8	16	8	2
ADM_TERR	236,37	641,74	16	6	20
ADM_SUP	236,37	641,74	16	6	20
TERREO_ANCORA1	1494,6	8115,67	16	6	5
TERREO_CIRCSERV	149,18	810,05	16	8	2
TERREO_ELEV	13,89	75,4	16	8	2
TERREO_ESC1	32	173,76	16	8	2
TERREO_ESC2	92,65	503,08	16	8	2
TERREO_ESC3	437,36	2374,84	16	8	2
TERREO_GRANDEAREA	4459,68	24927,3	30	2	2
TERREO_MEGALOJA1	293,31	2162,39	50	5	5
PAV1_ANCORA2	1400,88	7606,8	16	6	5
PAV1_CIRCSERV3	67,84	368,39	16	8	2
PAV1_CIRCSERV4	94,1	510,98	16	1.6	2
PAV1_CIRCSERV1	137,68	747,6	16	8	2
PAV1_CIRCSERV2	91,84	498,71	16	8	2
PAV1_SERV	98,63	535,54	16	8	2
PAV1_ELEV	13,89	75,4	16	8	2
PAV1_ESC2	92,65	503,08	16	8	2
PAV1_ESC1	32	173,76	16	8	2
PAV1_ESC3	525,36	2852,69	16	8	2
PAV1_GRANDEAREA	4908,3	25379,66	30	2	15
PAV1_MEGALOJA1	312,05	1584,02	30	5	5
PAV2_CIRCSERV3	67,84	368,39	16	8	2
PAV2_CIRCSERV4	94,1	510,98	16	8	2
PAV2_CIRCSERV5	92,57	502,65	16	8	2
PAV2_CIRCSERV6	19,24	104,46	16	8	2
PAV2_CIRCSERV1	137,68	747,6	16	8	2
PAV2_CIRCSERV2	91,84	498,71	16	8	2
PAV2_SERV	98,63	535,54	16	8	2
PAV2_ELEV	13,89	75,4	16	8	2
PAV2_ESC2	92,65	503,08	16	8	2
PAV2_ESC1	32	173,76	16	8	2
PAV2_ESC3	525,36	2852,69	16	8	2
PAV2_GRANDEAREA	4951,33	31117,9	30	2	15
PAV2_MEGALOJA1	229,79	1247,78	50	5	5
PAV2_MEGALOJA2	624,16	3389,18	40	6	5
PAV2_MEGALOJA3	664,92	3610,51	40	6	5
PAV3_CINEMA	1970,78	26664,73	10	1.2	5
PAV3_ESC1	60,87	496,1	16	8	2
PAV3_ELEV	13,89	113,17	16	8	2
PAV3_ESC2	92,65	755,08	16	8	2
PAV3_ESC3	648,31	3962,26	16	8	2
PAV3_GRANDEAREA	1547,78	12134,5	30	2	15
PAV3_GUARITA	53,56	290,82	16	6	2

15. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASHRAE, AMERICAN SOCIETY OF HEATING, REFRIGERATING AND AIRCONDITIONING ENGINEERS. **Energy Standard for Buildings Except Low-Rise Residential Buildings**. ASHRAE Standard 90.1 – 2007. American Society of Heating, Refrigerating and Air- Conditioning Engineers, Inc. Atlanta, 2007.

ASHRAE, AMERICAN SOCIETY OF HEATING, REFRIGERATING AND AIRCONDITIONING ENGINEERS. **User's manual for ANSI/ASHRAE/IESNA Standard 90.1-2007**. Energy Standard for Buildings Except Low-Rise Residential Buildings. American Society of Heating, Refrigerating and Air- Conditioning Engineers, Inc. Atlanta, 2008.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16401**: Instalações de ar condicionado – Sistemas centrais e unitários. Rio de Janeiro, 2008.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE SHOPPING CENTERS. ABRASCE Disponível em: <http://www.portaldoshopping.com.br/index.asp>> Acesso em: 21 de outubro de 2009.

BARROS FILHO, A. M. **Consumo desagregado de energia elétrica por uso final em shopping centers na cidade de São Paulo: estudo de casos**. Tese (mestrado) - Escola Politécnica da USP, Departamento de Engenharia de Construção Civil. São Paulo, 2005. 102 p.

CANBAY C. S.; HEPBASLI A.; GOKCENC G. **Evaluating performance indices of a shopping centre and implementing HVAC control principles to minimize energy usage**. Artigo - Izmir Institute of Technology, Turquia. 2004. 12p .

CARRIÈRES, K. R. M. **Desempenho Térmico e Consumo Energético de Edifícios de Escritórios em São Carlos, SP**. Dissertação (mestrado) - Comissão de pós-graduação da Faculdade de Engenharia Civil da Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP). Campinas, 2007. 173p.

CORRENA, J. C. **Desenvolvimento de Metodologia de Avaliação da Eficiência Energética do Envolvimento de Edificações Não-residenciais**. Tese (doutorado) - Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2008. 215p.

JOSEPH C. LAM, DANNY H. W. LI. **Electricity consumption characteristics in shopping malls in subtropical climates**. Artigo - Department of Building and Construction, Building Energy Research Group, City University of Hong Kong, 2002. 8p.

LAMBERTS, R. **Normalização em eficiência energética e conforto ambiental**. Artigo – Núcleo de Pesquisa em Construção, Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 1997. 5p.

U.S. DEPARTMENT OF ENERGY/ ENERGY EFFICIENCY & RENEWABLE ENERGY. Disponível em: <http://apps1.eere.energy.gov/buildings/energyplus> > Acesso em: 10 de abril de 2010.