UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO ESCOLA POLITÉCNICA

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

AVALIAÇÃO DO USO DE ECONOMIZADORES PARA REDUÇÃO DE CONSUMO DE ENERGIA EM EDIFICAÇÕES CLIMATIZADAS

Guilherme Simões da Costa

São Paulo

2011

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO ESCOLA POLITÉCNICA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

AVALIAÇÃO DO USO DE ECONOMIZADORES PARA REDUÇÃO DE CONSUMO DE ENERGIA EM EDIFICAÇÕES CLIMATIZADAS

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

Guilherme Simões da Costa

Orientador: Prof. Dr. Alberto Hernandez Neto

São Paulo
2011

Costa, Guilherme Simões da
Avaliação do uso de economizadores para redução de consumo de ener-
gia em edificações climatizadas / G.S. da Costa. – São Paulo, 2011.
63 p.

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

1.Ar condicionado 2.Consumo de energia elétrica (Economia)
I.Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia Mecânica II.t.

RESUMO

Este trabalho tem como objetivo analisar diferentes estratégias empregadas no controle da vazão de ar externo, chamado economizador. Economizadores são utilizados em sistemas de condicionamento de ar com o objetivo de reduzir os gastos de energia em sistemas de refrigeração. Para tal, a vazão de ar externo é misturada com a de ar de retorno e direcionada para a zona a ser climatizada sempre que condições como umidade e temperatura externas são favoráveis. A análise é feita com base num prédio comercial típico, localizado em cidades de diferentes regiões do Brasil, a fim de analisar a aplicabilidade de tais estratégias no clima brasileiro. Simulações utilizando o software *EnergyPlus* são feitas tendo sempre em mente a eficiência energética atingida para garantir a qualidade do ar interno nos diversos cenários.

ABSTRACT

This work has the objective of analyzing different strategies used in the control of external air flow, called economizer. Economizers are used in the air conditioning systems with the objective of reducing energy consumptions of the refrigeration systems. In order to produce those analysis, external air is mixed with return air and directed to the zone to be cooled whenever the humidity and external temperature conditions are favorable. The analysis is done based on a typical commercial building placed on different regions of Brazil, for analyzing the applicability of such strategies in the Brazilian climate conditions. Simulations using the software *EnergyPlus* are done having always in mind the energy efficiency obtained to assure the internal air quality on the different scenarios.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Mapa dos Estados Unidos (excluindo o estado do Alasca) dividido nas zonas climáticas segundo a norma ASHRAE 90.1 (ASHRAE 90.1, 2007) 6
Figura 2. Divisão do território brasileiro em zonas bioclimáticas segundo a norma ABNT NBR 15220 (ABNT NBR 15220, 2003). 10
Figura 3: Divisão da carta psicrométrica segundo a norma ABNT NBR 15220 (ABNT NBR 15220, 2003). 11
Figura 4. Esquema de um sistema de climatização com economizador. 13
Figura 5. Carta psicrométrica com estados do sistema de climatização. 15
Figura 6. Modelo do sistema central de água gelada. 22
Figura 7. Planta de um dos pavimentos do prédio. 23
Figura 8. Vistas do modelo 3D de um dos pavimentos do prédio. 25
Figura 9. Perfil de ocupação de pessoas para dias úteis. 32
Figura 10. Perfil da utilização de iluminação para dias úteis. 33
Figura 11. Perfil da utilização de elevadores para dias úteis. 33
Figura 12. Dados climáticos das cidades de Brasília, São Paulo e Porto Alegre. 36
Figura 13. Dados climáticos das cidades de Belém e Rio de Janeiro. 37
Figura 14. Divisão climática do território brasileiro segundo IBGE (IBGE, 2011). . 38
Figura 15. Parâmetros de controle dos economizadores utilizados nas simulações (a análise de sensibilidade não foi feita para a cidade de Porto Alegre). 40
Figura 16. Divisão do consumo nas cidades classificadas na zona 1 segundo a ASHRAE (ASHRAE 90.1, 2007). 42
Figura 17. Divisão do consumo nas cidades classificadas na zona 2 segundo a ASHRAE (ASHRAE 90.1, 2007). 43
Figura 18. Consumo do sistema de climatização com e sem economizador ao longo do ano nas cidades da zona 1. 46
Figura 19. Consumo do sistema de climatização com e sem economizador ao longo do ano nas cidades da zona 2. 47
Figura 20. Sensibilidade do consumo às variações dos parâmetros de controle na cidade do Rio de Janeiro (ao longo do ano). 51
Figura 21. Monitoramento do economizador (possibilidade de utilização). 53

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Classificação das zonas climáticas com base nos critérios da norma ASHRAE 90.1 (ASHRAE 90.1, 2007). 8
Tabela 2 - Cidades brasileiras classificadas segundo o zoneamento climático da norma ASHRAE 90.1(ASHRAE 90.1, 2007) 9
Tabela 3 - Critérios para classificação das zonas bioclimáticas segundo a divisão de regiões feita na carta psicrométrica. 12
Tabela 4 - Capacidade térmica mínima para a qual economizadores são requisitados. 17
Tabela 5 - Técnicas de controle dos sistemas economizadores recomendados e proibidos para cada zona climática segundo a norma ASHRAE 90.1 (ASHRAE 90.1, 2007). 18
Tabela 6 - Limites para a utilização de cada estratégia de controle dos sistemas economizadores segundo a norma ASHRAE 90.1 (ASHRAE 90.1, 2007). 19
Tabela 7 - Coeficientes de transferência térmica globais máximos para cada tipo de elemento para as zonas climáticas 1 e 2. 27
Tabela 8 - Materiais e respectivas propriedades utilizados no modelamento das paredes 29
Tabela 9 - Materiais e respectivas propriedades utilizados no modelamento dos pisos e tetos. 30
Tabela 10 - Taxa de calor liberado por pessoa e área por posto de trabalho. 31
Tabela 11 - Cidades escolhidas para estudo e respectivas zonas climáticas. 34
Tabela 12. Consumo anual e participação no consumo por parte do sistema de climatização 41
Tabela 13. Redução percentual no consumo anual total utilizando parâmetros sugeridos pela ASHRAE 90.1 (ASHRAE 90.1, 2007). 44
Tabela 14. Comparações para análise de sensibilidade (valores da cidade do Rio de Janeiro). 49

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS

LISTA DE TABELAS

1. INTRODUÇÃO 1

1.1. Revisão bibliográfica 2

2. CLASSIFICAÇÃO DE CIDADES EM ZONAS CLIMÁTICAS 5

2.1. Classificação segundo a norma ASHRAE 90.1 5

2.2. Classificação segundo a norma ABNT 15220 9

3. SISTEMAS ECONOMIZADORES 13

3.1. Sistemas Economizadores segundo ASHRAE 90.1 16

4. CARGAS TÉRMICAS 20

5. DESCRIÇÃO DO MODELO 21

5.1. Sistema de climatização 21

5.2. Geometria da edificação 22

5.3. Características da envoltória 26

5.4. Parâmetros das fontes de calor 30

5.4.1. Perfis de distribuição das fontes de calor 31

6. SIMULAÇÕES 39

7. RESULTADOS 40

7.1. Consumo sem utilização do economizador 40

7.2. Consumo com economizador utilizando valores sugeridos pela ASHRAE 90.1 44

7.3. Análise de sensibilidade 48

8. VERIFICAÇÃO DO FUNCIONAMENTO DO ECONOMIZADOR 52

9. CONCLUSÃO 55
10. ANEXO A 56
11. ANEXO B 59
12. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS 63

1. INTRODUÇÃO

O aumento na demanda por energia elétrica vem se tornando um dos problemas de infraestrutura de maior destaque nos últimos tempos, Tal aumento pode ser justificado pelo crescimento econômico alcançado, Em 2010, o PIB brasileiro teve crescimento de 7,5% (IBGE, 2011), oque reflete intensificação nas atividades dos vários setores da economia.

Pesquisas (INSTITUTO NACIONAL DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA, 1997) revelam que cerca de 20% do consumo de eletricidade em edificações comerciais é fruto da utilização de sistemas de climatização.

Observando a importante participação da climatização de ambientes nos gastos em energia somados com o atual crescimento econômico brasileiro, fica justificada a busca por maneiras que visam o aumento da eficiência de tais sistemas .

Os sistemas chamados de economizadores são uma das respostas a este problema. Trata-se de sistemas acoplados aos sistemas convencionais de climatização, que visam diminuir a refrigeração mecânica e, portanto, aumentar a eficiência do sistema como um todo.

Em uma esfera mais ampla, outras respostas à preocupação com gastos de energia foram a criação e a atualização de normas relativas aos componentes de uma edificação bem como ao seu gerenciamento.

Neste trabalho, estratégias para o controle dos sistemas economizadores serão avaliadas em paralelo com as prescrições das normas encontradas na atualidade. As análises serão feitas com o auxílio do software *EnergyPlus*, onde serão realizadas simulações do sistema de condicionamento de ar em uma edificação comercial típica, um escritório.

1.1. Revisão bibliográfica

Com a finalidade de conhecer mais sobre o assunto e coletar idéias sobre como realizar o estudo, um levantamento bibliográfico foi feito, buscando teses ou artigos científicos relacionados ao tema.

Em artigo publicado pelo Elsevier Journal (SEEM, J. E.; HOUSE, J. M., 2009) encontra-se o desenvolvimento de duas novas estratégias de controle utilizadas em sistemas economizadores e a comparação destas com duas outras estratégias tradicionais em diversas simulações.

Uma das novas estratégias baseia-se no controle da vazão de ar externo fornecida à serpentina do resfriador e no controle por realimentação da vazão de água na serpentina. Com o modelo da serpentina estima-se a carga sobre a a mesma quando 100% de ar externo é insuflado e quando a quantidade mínima de vazão de ar é insuflada. Obtendo os dois extremos pode-se controlar a vazão de ar entrando no sistema a fim de minimizar a carga térmica. O controle é feito de modo binário, oscilando a vazão de ar entre 100% de ar externo e a quantidade mínima. Se o sistema opera com vazão máxima de ar externo, mas o modelo diz que a carga na serpentina seria menor se utilizasse a vazão mínima de ar externo, o sistema opera as válvulas de controle de vazão para obter a vazão mínima. A troca só é feita se a nova estratégia se mostrar mais eficiente que a vigente durante um período de 5 minutos, caso contrário, a vazão é mantida.

A outra nova estratégia combina o modelo da serpentina com uma rotina de otimização para a vazão de ar externo. A rotina determina a fração ótima para minimizar a carga térmica sobre a serpentina, fazendo com que o controle não seja mais binário como na primeira nova estratégia.

Para obter a estimativa da carga sobre a serpentina, o modelo requer os seguintes dados de entrada: temperatura e umidade relativa na entrada da serpentina, temperatura na saída da serpentina, fração de ar que não é refrigerado (*by pass*) e pressão total da mistura de ar.

O controle da temperatura do ar se dá pela variação do fluxo de água gelada na serpentina (realizado com realimentação do sinal de temperatura do ambiente) enquanto a vazão de ar externo é controlada segundo a estimativa da carga na serpentina.

As outras duas estratégias, tradicionais e já utilizadas, baseiam-se na comparação das condições do ar externo com as do ar de retorno, sem utilizar um modelo da serpentina para estimar a carga sobre a mesma. A primeira, chamada de "diferencial de temperatura de bulbo seco" compara a temperatura de bulbo seco do ar externo com a de ar de retorno. Se a temperatura de bulbo seco do ar externo for maior que a do ar de retorno, a vazão de ar externo a ser insuflada para o ambiente condicionado é limitada ao valor mínimo. Caso contrário, a vazão é fixada ao valor máximo, de 100%.

A outra estratégia tradicional utilizada nas simulações foi a chamada "diferencial de entalpia", na qual a entalpia do ar externo é comparada com a entalpia do ar de retorno. Sendo a entalpia do ar externo maior que do ar de retorno, a vazão de ar externo é limitada a seu valor mínimo. Caso contrário, a vazão é modificada para seu valor máximo.

O estudo utiliza uma carta psicrométrica para explicar como as estratégias são utilizadas e algumas exceções nas escolhas das estratégias quando o sistema está em pontos específicos da carta.

As simulações foram feitas ao longo de um ano completo em 15 diferentes cidades dos Estados Unidos da América. A escolha dessas 15 cidades foi motivada pela classificação feita pela norma ASHRAE 90.1 (ASHRAE 90.1, 2007), a qual classifica as cidades em termos de temperatura e humidade.

Os resultados são mostrados em um diagrama comparando as 4 estratégias em termos de carga térmica para as 15 cidades levando em consideração os efeitos dos sensores utilizados para a estimativa dos dados de referência. São consideradas 3 situações: controle ideal (sem erros de sensor), sensor com boa manutenção e sensores com manutenção precária.

As seguintes conclusões foram tiradas dos resultados pelo autor:

- As menores cargas anuais foram obtidas com a utilização da estratégia de controle que utiliza rotina de otimização em conjunto com o modelo de serpentina.
- Independentemente da umidade do local, quanto mais quente for o clima, maior é a carga térmica.
- Para uma mesma classificação de temperatura, quanto mais úmido for o local maior é a carga térmica.
- Quanto maiores os erros dos sensores, maiores são as cargas térmicas no sistema de condicionamento de ar (para todas as estratégias).
- Geralmente, quanto mais quente for o clima, maior é a sensibilidade das cargas aos erros dos sensores.
- Entre as quatro estratégias estudadas, a chamada “diferencial de temperatura de bulbo seco” é a menos sensível a erros de sensores.
- Apesar dos erros vindos dos sensores, economia de energia pode ser apreciada em todas as estratégias utilizadas em praticamente todas as zonas climáticas. As exceções são os climas muito quentes e úmidos e os climas quentes e úmidos.
- Das quatro estratégias consideradas, aquela que resultou em menor carga térmica para sensores com manutenção precária foi a chamada “diferencial de temperatura de bulbo seco” . No entanto, em climas úmidos com temperaturas muito quentes, quentes, mornas e mistas tal estratégia apresenta cargas térmicas de 7,3 a 18,5% maiores que a estratégia de diferencial de entalpia quando sensores com boa manutenção são utilizados.

Observando os resultados relativos a sensores ideais também é possível concluir que em climas secos não há diferença relevante entre as duas estratégias tradicionais, gerando cargas anuais praticamente idênticas para todas as faixas de temperatura. Diferenças entre as duas estratégias podem ser percebidas em climas úmidos a partir de uma certa temperatura. A partir de climas com temperatura mista a estratégia de diferencial de temperatura causa cargas anuais maiores quando comparada com a estratégia de diferencial de entalpia. Cargas cerca de 14% maiores são esperadas em climas úmidos e quentes.

2. CLASSIFICAÇÃO DE CIDADES EM ZONAS CLIMÁTICAS

Observando as normas americana ASHRAE 90.1 (ASHRAE 90.1, 2007) e brasileira ABNT 15220 (ABNT NBR 15220, 2003), responsáveis por definir recomendações no âmbito de guiar as edificações para o caminho de consumo energético mais eficiente no que diz respeito à climatização. Em ambas as normas, nota-se uma preocupação em distinguir localidades segundo suas características climáticas. Isso se deve ao fato de que tais condições influenciam diretamente nas cargas térmicas e, portanto, na maneira em como a edificação deve ser projetada a fim de garantir menor esforço da parte do sistema de climatização para manter o conforto térmico.

A maneira como as normas classificam as cidades quanto às condições climáticas é descrita a seguir.

2.1. Classificação segundo a norma ASHRAE 90.1

A ASHRAE (Sociedade Americana dos Engenheiros de Aquecimento, Refrigeração e Ar Condicionado) é uma sociedade internacional para pessoas e organizações interessadas nos assuntos relacionados a HVAC (*heating, ventilating anda ir conditioning*) estimulando a troca de informações, desenvolvimento de pesquisas, publicação de padrões entre outras atividades que visam a utilização mais eficiente e sustentável da energia consumida por tais sistemas (ASHRAE, 2011).

A norma ASHRAE 90.1 (ASHRAE 90.1, 2007), em particular, estabelece requisitos mínimos para que as práticas e tecnologias envolvidas num design arquitetônico sejam energeticamente eficientes. Seu escopo abrange a envoltória da edificação, sistemas de iluminação, sistemas HVAC e outros sistemas que utilizam energia. Ela se aplica a todos os tipos de prédios exceto prédios mais baixos, com

menos de 3 andares habitáveis. Desde 1999, data de sua primeira publicação, vem sendo continuamente corrigida e atualizada.

Dada a grande diversidade climática presente nos EUA, a norma lista parâmetros e ações dependentes da localização da edificação. Para tanto, uma classificação do território do país foi feita agrupando cidades com mesmas características climáticas, ou seja, com semelhantes médias de temperatura e humidade do ar. O mapa dos EUA com a divisão em zonas climáticas pode ser visto na Figura 1.

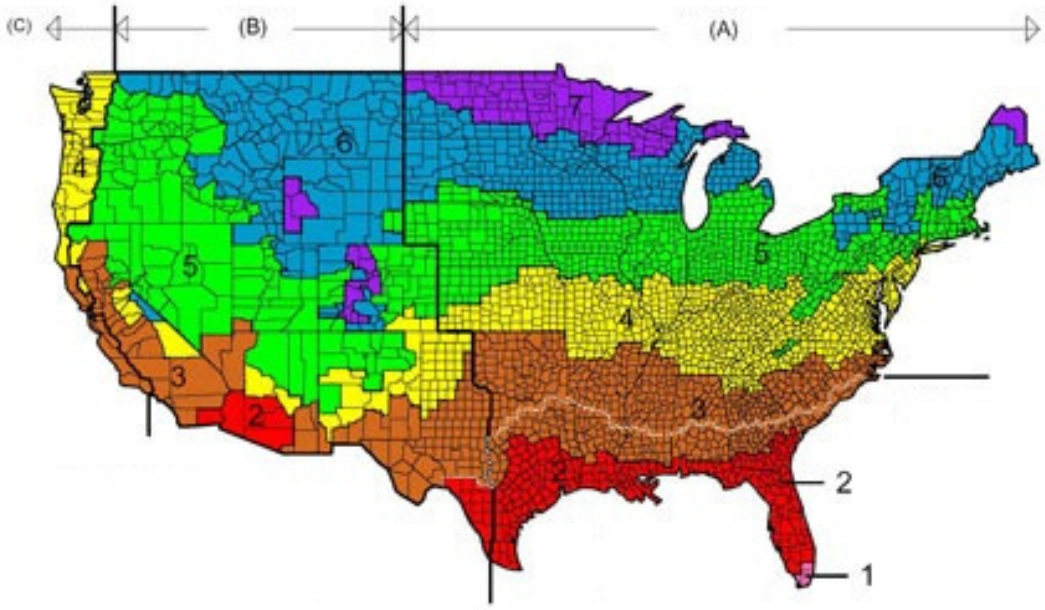


Figura 1. Mapa dos Estados Unidos (excluindo o estado do Alasca) dividido nas zonas climáticas segundo a norma ASHRAE 90.1 (ASHRAE 90.1, 2007)

No mapa podem ser vistas sete das oito zonas climáticas classificando as cidades quanto à média de temperaturas. Numeradas de 1 a 8, as cidades ficam gradualmente mais frias conforme o número da zona aumenta. Também podem ser vistas as três zonas adicionais que caracterizam as localidades quanto à umidade do ar: zonas A, B e C. A zona A abrange localidades úmidas, onde o sistema de climatização pode precisar retirar água do ar externo para que este não diminua a qualidade do ar climatizado. Abrangendo cidades classificadas como secas, a zona B abrange cidades onde o controle de umidade não é um problema, enquanto que a zona C agrupa

localidades com umidade chamada “marinha”, descritas assim por sofrerem grande influência das águas geladas do Oceano Pacífico.

Valores especificando faixas de umidade relativa ou absoluta usadas na classificação das zonas de umidade não são divulgadas pela norma. No entanto, parâmetros de referência são definidos no caso de cidades fora dos EUA serem classificadas.

Para definir a zona relativa à umidade, uma cidade deve obedecer a alguns critérios para cada uma delas. Começando pela zona C (marinha), para pertencer a ela, a cidade deve ter:

- Temperatura média do mês mais frio entre -2,8℃ e 18,3℃;
- Temperatura média do mês mais quente menor que 22,2℃;
- Pelo menos 4 meses com temperatura média acima dos 10℃;
- Temporada de seca no verão;
- O mês com o maior nível de precipitação durante a temporada fria deve ter um nível de precipitação no mínimo três vezes maior que o nível do mês que tem o menor índice de precipitação. A temporada fria dura de outubro a março no hemisfério norte e de abril a setembro no hemisfério sul;

Para pertencer à zona de umidade B (seca), a cidade em questão deve ter o índice P (precipitação anual em polegadas) obedecendo a relação que envolve TF (temperatura média anual em graus Fahrenheit):

$$P < 0{,}44 \cdot (TF - 19{,}5) \qquad (1)$$

Caso a cidade não esteja classificada na zona C e nem na B, ela está automaticamente classificada na zona A (úmida).

Para definir a zona de temperatura, a norma fornece uma tabela levando em consideração 2 variações do chamado *degree-day*. O *degree-day* é a diferença entre a temperatura média externa ao longo de 24 horas e uma temperatura base onde são definidos 2 parâmetros:

- CDD50 (*cooling degree-day* base 50˚F ou 10℃): Para qualquer dia, quando a temperatura média for maior que a temperatura base de 50˚F, haverá um número de *degree-days* igual à diferença de temperatura entre a temperatura média e a temperatura de 50˚F. A soma de todos os *degree-days* relativos a 50F ao longo do ano, resulta no CDD50 anual;
- HDD65 (*heating degree-day* base 65˚F ou 18,3℃): Para qualquer dia, quando a temperatura média for menor que a temperatura base de 65˚F, o número de *degree-days* será igual à diferença entre a temperatura média e a temperatura de 65˚F; A soma de todos os *degree-days* relativos a 65˚F ao longo do ano, resulta no HDD65 anual;

Com os parâmetros CDD50 e HDD65 estimados, a zona de temperatura é determinada com base na classificação vista na Tabela 1.

Tabela 1 - Classificação das zonas climáticas com base nos critérios da norma ASHRAE 90.1 (ASHRAE 90.1, 2007).

Zona	Critério
1	$9000 < CDD50°F$
2	$6300 < CDD50°F \leq 9000$
3A e 3B	$4500 < CDD50°F \leq 6300$
3C	$CDD50°F \leq 4500$ *e* $HDD65°F \leq 3600$
4A e 4B	$CDD50°F \leq 4500$ *e* $3600 < HDD65°F \leq 5400$
4C	$3600 < HDD65°F \leq 5400$
5A, 5B e 5C	$5400 < HDD65°F \leq 7200$
6A e 6B	$7200 < HDD65°F \leq 9000$
7	$9000 < HDD65°F \leq 12600$
8	$12600 < HDD65°F$

A norma fornece uma tabela classificando algumas cidades brasileiras segundo a zona climática. As cidades e suas respectivas classificações podem ser vistas na Tabela 2.

Tabela 2 - Cidades brasileiras classificadas segundo o zoneamento climático da norma ASHRAE 90.1(ASHRAE 90.1, 2007) .

Cidade	Zona
Belém (PA)	1
Brasília (DF)	2
Fortaleza (CE)	1
Porto Alegre (RS)	2
Recife (PE)	1
Rio de Janeiro (RJ)	1
Salvador (BA)	1
São Paulo (SP)	2

2.2. Classificação segundo a norma ABNT 15220

A norma ABNT NBR 15220 (ABNT NBR 15220, 2003) tem por objetivo apresentar recomendações quanto ao desempenho de habitações na fase de projeto. Ela propõe a divisão do território brasileiro em 8 zonas climáticas, para as quais foi formulado um conjunto de recomendações tecno-construtivas visando a otimização do desempenho térmico da edificação analisada. A divisão final feita pela norma pode ser vista na Figura 2, onde a legenda mostra a porcentagem de participação de cada zona no território.

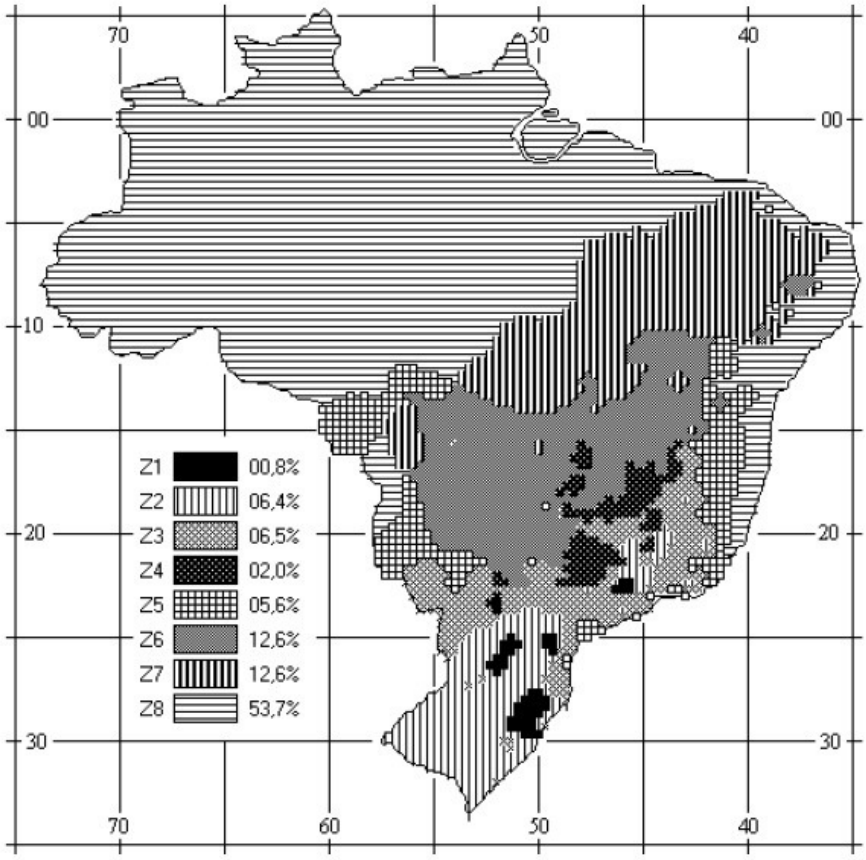


Figura 2. Divisão do território brasileiro em zonas bioclimáticas segundo a norma ABNT NBR 15220 (ABNT NBR 15220, 2003).

A metodologia utilizada para a classificação das cidades foi baseada na divisão do mapa em um determinado número de células, caracterizadas segundo os seguintes dados:

- Médias mensais das temperaturas máximas;
- Médias mensais das temperaturas mínimas;
- Médias mensais das umidades relativas do ar;

Como tais dados não estavam disponíveis para todas as localidades, os parâmetros de algumas células foram determinados por interpolação com os valores das células vizinhas.

A classificação das zonas bioclimáticas foi feita com base em uma divisão da carta psicrométrica em regiões com específicas estratégias de climatização, como pode ser visto na Figura 3. Através dos dados de temperatura e umidade do ar anteriormente determinados, pôde-se estudar em quais regiões da carta psicrométrica o clima da cidade está mais presente. A partir daí, com base nas zonas em que o clima da cidade está presente, a norma determina critérios para a classificação da cidade em cada uma das zonas bioclimáticas.

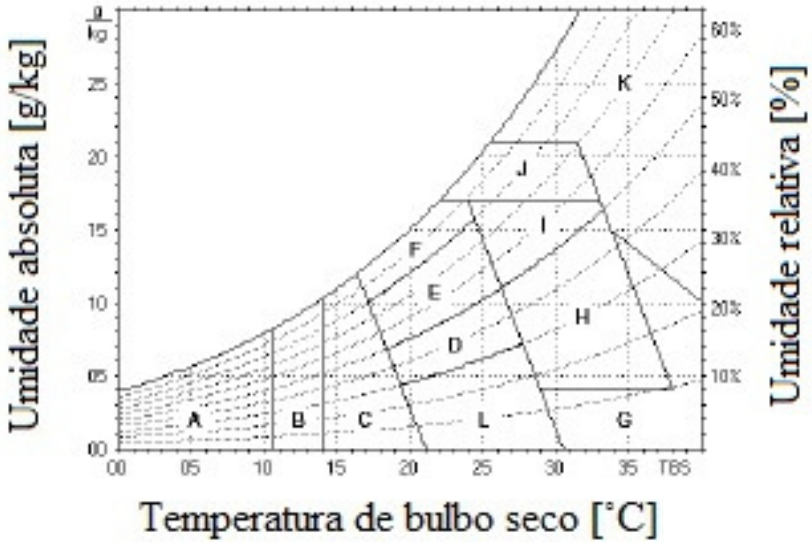


Figura 3: Divisão da carta psicrométrica segundo a norma ABNT NBR 15220 (ABNT NBR 15220, 2003).

A Tabela 3 mostra os critérios para caracterizar a que zona a cidade pertence, baseando-se nas regiões da carta psicrométrica. As células marcadas com “sim” significam que a cidade deve pertencer obrigatoriamente à região em questão. Já as células marcadas com “não” impõe que a cidade não pode participar da região em questão. As células não assinaladas mostram que a região da carta psicrométrica pode estar no código da zona, mas sua presença não é obrigatória. A norma (ABNT NBR 15220, 2003) fornece uma tabela de 330 cidades classificadas segundo suas zonas bioclimáticas.

Tabela 3 - Critérios para classificação das zonas bioclimáticas segundo a divisão de regiões feita na carta psicrométrica.

Classificação							Zona
A	B	C	D	H	I	J	
Sim					Não	Não	1
Sim							2
	Sim		Não	Não			3
	Sim						4
		Sim	Não	Não			5
		Sim					6
				Sim			7
			Não				8

3. SISTEMAS ECONOMIZADORES

Um sistema economizador pode ser modelado de maneira simples como um conjunto de *dampers* que permitem a mistura de ar externo (de renovação) com ar de recirculação quando aquele detém características favoráveis a sua utilização para insuflação. Por exemplo, quando o ar externo é frio o suficiente para ser diretamente direcionado para a zona a ser climatizada, o sistema controla os *dampers* de maneira a aumentar sua vazão para o recinto. Em situações onde as condições climáticas externas não são favoráveis, o sistema de *dampers* é mantido numa posição que garanta a vazão mínima recomendada para reciclar o ar interno, garantindo a qualidade do ar dentro do ambiente climatizado. Um esquema do funcionamento de um ciclo economizador pode ser visto na Figura 4.

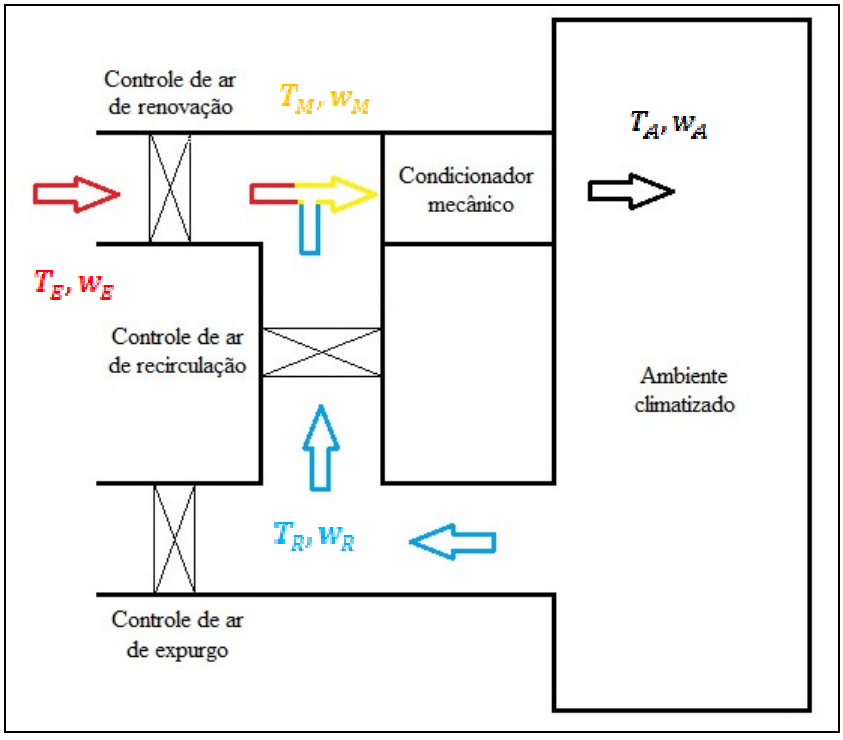


Figura 4. Esquema de um sistema de climatização com economizador.

Na Figura 4 os retângulos marcados com um “X” representam os *dampers*, os quais controlam a vazão de ar onde estão localizados e:

T_E: temperatura de bulbo seco do ar externo;

T_R: temperatura de bulbo seco do ar de retorno;

T_M: temperatura de bulbo seco do ar resultante da mistura entre ar de retorno e ar externo;

T_A: temperatura de bulbo seco do ar no ambiente climatizado;

w_E: umidade relativa do ar externo;

w_R: umidade relativa do ar de retorno;

w_M: umidade relativa do ar resultante da mistura entre ar de retorno e ar externo;

w_A: umidade relativa do ar no ambiente climatizado;

A refrigeração do ar depende diretamente de sua temperatura e umidade. O calor trocado no sistema é usualmente dividido em calor sensível (calor sensível representa o calor trocado com o ar se este estivesse idealmente seco) e o calor relacionado com a mudança de estado da água contida no ar. Se ar úmido é resfriado, parte da água contida nele na forma de vapor mudará de estado, aumentando a energia necessária para o resfriamento.

Entre as estratégias de controle atualmente estudadas e utilizadas estão aquelas que levam em consideração a temperatura de bulbo seco externa e entalpia do ar externo. A princípio, estratégias de controle utilizando temperatura de bulbo seco não levam em consideração o calor relacionado com a mudança de estado da água, visto

que não introduzem qualquer medida de umidade, ao contrário das estratégias que utilizam entalpia da mistura de ar úmido para controle, a qual é dependente da quantidade de água que está no ar.

Observando a Figura 5 pode-se compreender melhor o que ocorre quando um economizador é utilizado. As esferas representam os estados do ar: na saída da serpentina (cor preta), na entrada da serpentina (cor amarela), na saída do ambiente climatizado (cor azul) e no ambiente externo (cor vermelha). Tanto em um sistema de climatização comum quanto em um sistema utilizando economizador, a vazão de ar externo (vermelho) é misturada com a vazão de ar de retorno (azul). A vazão resultante da mistura (amarelo) troca então calor com a serpentina sendo insuflada para o ambiente a ser climatizado (preto).

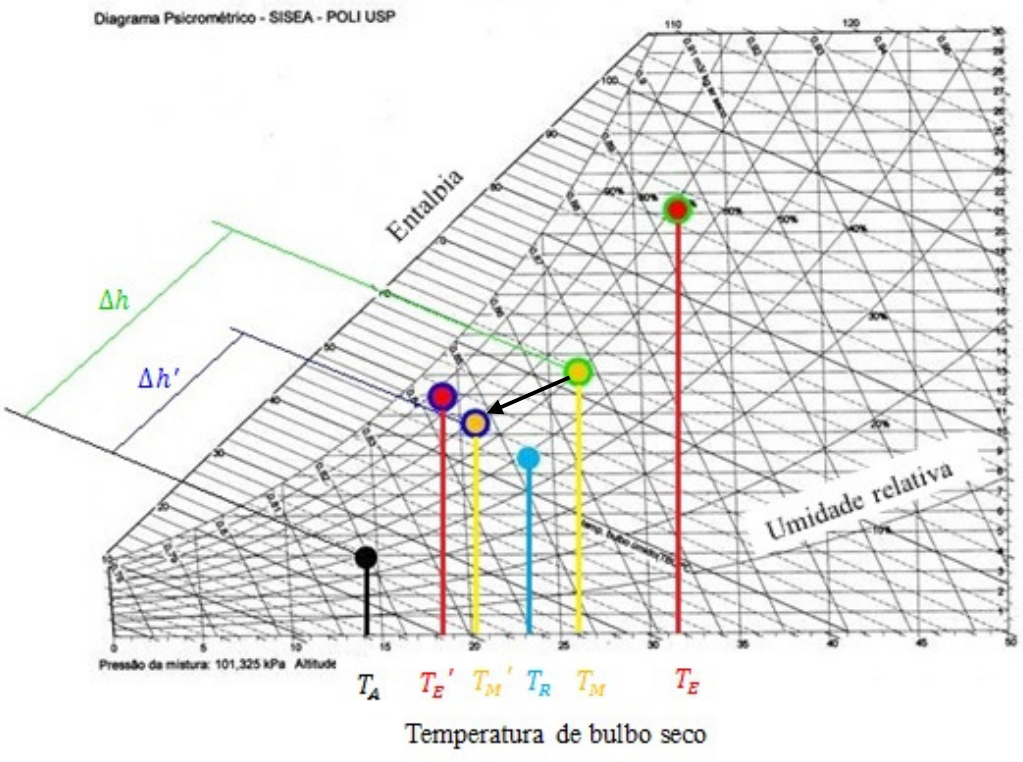


Figura 5. Carta psicrométrica com estados do sistema de climatização.

O economizador atua no controle da vazão de ar externo a fim de diminuir a carga térmica sobre o sistema de climatização, a qual está diretamente relacionada com a diferença de entalpia entre o ar entrando na serpentina e o ar saindo da mesma. Na carta psicrométrica da Figura 5 duas situações são representadas. Contornadas em verde, as esferas representam condições onde o economizador controlaria a vazão do ar externo a fim de mantê-la em seu valor mínimo. No entanto, quando as condições do ar externo apresentam temperatura e umidade relativa baixas o suficiente para diminuir a entalpia do ar, a vazão de ar externo é aumentada.

Na carta da Figura 5, as esferas contornadas em azul simbolizam a situação onde as condições de ar externo são capazes de diminuir a variação de entalpia no sistema de climatização. Embora a umidade não seja menor que na situação anterior, a temperatura é baixa o suficiente para diminuir a entalpia da mistura. No canto esquerdo superior as variações de entalpia na serpentina são ilustradas, mostrando que em certas circunstâncias, a carga térmica sobre a serpentina pode ser diminuída aumentando-se a vazão de ar externo.

3.1. Sistemas Economizadores segundo ASHRAE 90.1

Em seu capítulo sobre aquecimento, ventilação e climatização, a norma americana ASHRAE 90.1 (ASHRAE 90.1, 2007) descreve como os sistemas economizadores devem ser utilizados e apresenta parâmetros para maior eficiência.

As especificações começam por delimitar quando os economizadores são requisitados em função de sua classificação nas zonas climáticas. Tal classificação pode ser vista na Tabela 4. É interessante notar que em cidades mais quentes e úmidas, situadas em zonas climáticas como 1A, 2A e 3A, a norma não requer a utilização de sistemas economizadores.

Tabela 4 - Capacidade térmica mínima para a qual economizadores são requisitados.

Zonas	Capacidade térmica mínima para utilização
1A, 1B, 2A, 3A, 4A	Economizador não requisitado
2B, 5A, 6A, 7, 8	39,6 kW
3B, 3C, 4B, 4C, 5B, 5C, 6B	19,0 kW

A norma também explica técnicas de controle dos sistemas economizadores, detalhando em quais zonas climáticas determinadas técnicas devem ser usadas ou devem ser evitadas, como pode ser visto na Tabela 5. As técnicas de controle citadas na norma são as seguintes:

- Temperatura de bulbo seco fixa: Fluxo de ar externo é fixado a um valor mínimo se sua temperatura é superior à temperatura de bulbo seco limite estabelecida;
- Diferencial de temperatura de bulbo seco: Fluxo de ar externo é fixado a um valor mínimo se sua temperatura de bulbo seco é superior à temperatura de bulbo seco do ar de retorno;
- Entalpia fixa: Fluxo de ar externo é fixado a um valor mínimo se sua entalpia é superior à entalpia limite estabelecida;
- Diferencial de entalpia: Fluxo de ar externo é fixado a um valor mínimo se sua entalpia é superior à entalpia do ar de retorno;
- Ponto de orvalho e temperatura de bulbo seco fixos: Se o ponto de orvalho ou a temperatura de bulbo seco do ar externo forem maiores que seus respectivos limites superiores, o fluxo de ar externo é fixado a um valor mínimo;
- Diferencial de temperatura de bulbo seco e entalpia: Utiliza tanto a estratégia "Diferencial de temperatura de bulbo seco" como a "Diferencial de entalpia";
- Entalpia eletrônica: Simulação estima o limite de umidade absoluta do ar externo baseando-se na sua temperatura de bulbo seco e em curvas quadráticas/cúbicas. Se a umidade absoluta real do ar externo for maior que este limite, o fluxo de ar externo é limitado a um valor mínimo;

Tabela 5 - Técnicas de controle dos sistemas economizadores recomendados e proibidos para cada zona climática segundo a norma ASHRAE 90.1 (ASHRAE 90.1, 2007).

Zonas	Técnica de controle permitida	Técnica de controle proibida
1B, 2B, 3B, 3C, 4B, 4C, 5B, 5C,6B, 7, 8	Temperatura de bulbo seco fixa	Entalpia fixa
	Diferencial de temperatura de bulbo seco	
	Entalpia eletrônica	
	Diferencial de entalpia	
	Ponto de orvalho e temperatura de bulbo seco fixos	
1A, 2A, 3A, 4A	Temperatura de bulbo seco fixa	Diferencial de temperatura de bulbo seco
	Entalpia fixa	
	Entalpia eletrônica	
	Diferencial de entalpia	
	Ponto de orvalho e temperatura de bulbo seco fixos	
Todas as restantes	Temperatura de bulbo seco fixa	-
	Entalpia fixa	
	Entalpia eletrônica	
	Diferencial de entalpia	
	Diferencial de temperatura de bulbo seco	
	Ponto de orvalho e temperatura de bulbo seco fixos	

Cada estratégia de controle dos economizadores também é especificada quanto aos limites superiores dos parâmetros utilizados. Basicamente, a norma especifica um limite, acima do qual o sistema economizador deve fixar a vazão de ar externo entrando no ambiente climatizado em seu valor mínimo (o suficiente para renovar o ar interno). Os valores podem ser vistos na Tabela 6.

Tabela 6 - Limites para a utilização de cada estratégia de controle dos sistemas economizadores segundo a norma ASHRAE 90.1 (ASHRAE 90.1, 2007).

Técnica de controle	Zona climática	Economizador desligado quando
Temperatura de bulbo seco fixa	1B, 2B, 3B, 3C, 4B, 4C, 5B, 5C, 6B, 7, 8	$T_{ae} > 23{,}9°C$
	5A, 6A, 7A	$T_{ae} > 21{,}1°C$
	Restantes	$T_{ea} > 18{,}3°C$
Diferencial de temperatura de bulbo seco	1B, 2B, 3B, 3C, 4B, 4C, 5A, 5B, 5C, 6A, 6B, 7, 8	$T_{ae} > T_{ar}$
Entalpia fixa	todas	$h_{ea} > 65{,}6\ kJ/kg$
Diferencial de entalpia	todas	$h_{ae} > h_{ar}$
Ponto de orvalho e temperatura de bulbo seco fixos	todas	$DP_{ea} > 12{,}8°C\ ou\ T_{ea} > 23{,}9°C$
Entalpia eletrônica	todas	$(T_{ea}, RH_{ae}) > A$

A Tabela 6 segue a seguinte nomenclatura:

T_{ae}: Temperatura externa do ar, °C;

T_{ar}: Temperatura do ar de retorno, °C;

h_{ae}: Entalpia do ar externo, J/kg;

h_{ar}: Entalpia do ar de retorno, J/kg;

DP_{ae}: Ponto de orvalho do ar externo, °C;

RH_{ae}: Umidade relativa do ar externo, %;

Na estratégia "Entalpia eletrônica", "A" corresponde a uma curva na carta psicrométrica que passa por um ponto a aproximadamente 23,9 °C e 40% de umidade relativa e é aproximadamente paralela às linhas de temperatura de bulbo seco em

baixos valores de umidade e também é aproximadamente paralela às linhas de entalpia em níveis elevados de umidade.

4. CARGAS TÉRMICAS

O trabalho realizado pelo sistema de climatização para remover ou adicionar calor ao sistema será diretamente influenciado pelos outros tipos de troca térmica que ocorrem naturalmente com o ambiente.

Essas trocas estão associadas a aspectos construtivos da edificação (geometria, orientação, materiais construtivos), de fontes de geração de calor internas (pessoas, equipamentos etc.) bem como de fatores relacionados às condições ambientais externas (temperatura externa, direção e intensidade dos ventos, intensidade luminosa solar etc.). Tais fatores relacionados às trocas térmicas são usualmente divididos em 4 categorias, chamadas de “cargas”:

- Transmissão, onde a transferência de calor se dá devido à diferença de temperatura entre o ambiente externo e interno e ocorre por meio dos componentes do edifício;
- Solar, onde a energia vinda do Sol é absorvida por componentes opacos ou atravessada por componentes transparentes;
- Infiltração, dada pelas características do ar externo infiltrado no recinto;
- Geração interna, causada pela liberação de calor por fontes como: luzes, pessoas, equipamentos etc.;

Sendo assim, a menos que o sistema de climatização atue de forma a manter um nível de temperatura desejado, as condições do ar interno serão ditadas por tais fatores.

5. DESCRIÇÃO DO MODELO

A caracterização da edificação será feita visando representar um prédio comercial típico, contendo os componentes mais presentes em sistemas de climatização de uma edificação como tal. O prédio escolhido é um prédio de 20 andares equipado com um sistema de refrigeração chamado “central de água gelada”.

Dado que a energia elétrica gasta pelo sistema de climatização dependerá da quantidade de calor fornecida ou retirada do ambiente, fatores influenciando a geração ou perda de calor na edificação devem ser determinados (fatores além do sistema de climatização). Para tanto, a geometria, composição (materiais) da edificação, bem como a descrição de objetos geradores de calor presentes no ambiente (computadores, pessoas etc.) e fora dele (temperatura externa, radiação solar etc.) devem ser mensurados.

5.1. Sistema de climatização

O sistema de climatização chamado de “central de água gelada” consiste na distribuição de “subestações” de condicionamento de ar (*fan coils*) entre os andares (um por andar) que compartilham um mesmo fluído de refrigeração. Este fluído é condicionado por um resfriador e por uma torre de resfriamento. A torre de resfriamento pulveriza o fluido em meio a um fluxo de ar ambiente, dissipando calor para o mesmo. O fluido, a uma temperatura agora menor, é resfriado novamente por um resfriador a fim de atingir a temperatura necessária para a troca de calor com o ambiente a ser condicionado nas “subestações”. Um esquema do modelo pode ser visto na Figura 6, onde as linhas na cor azul representam os tubos por onde fluido resfriado passa e as linhas vermelhas representam os tubos por onde fluido aquecido escoa. A diferença entre a tonalidade das cores serve para representar a diferença de temperatura nos tubos: cores em tons mais escuros representam temperaturas mais elevadas.

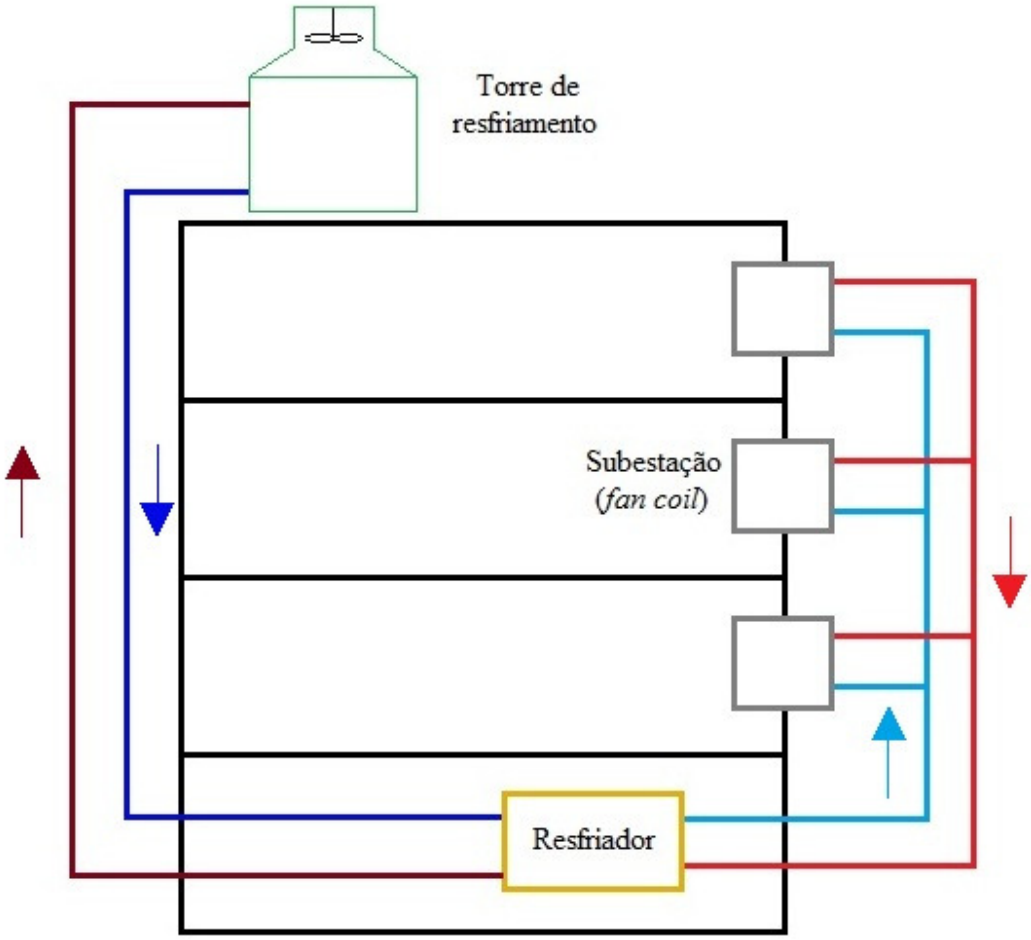


Figura 6. Modelo do sistema central de água gelada.

5.2. Geometria da edificação

Como dito anteriormente, o tipo de edificações escolhido é o comercial, mais precisamente prédios formados por escritórios. O estudo utiliza um modelo de prédio de escritórios de 20 andares retangular com largura de $30\ m$, comprimento de $40\ m$ e altura do andar de $2{,}7\ m$.

A fim de considerar a região onde transitam os elevadores, uma região quadrada de lado $7\ m$ foi incluída no interior de cada andar. A planta de um dos andares da edificação pode ser vista no desenho da Figura 77 feito com o auxílio do software *Google Sketchup*.

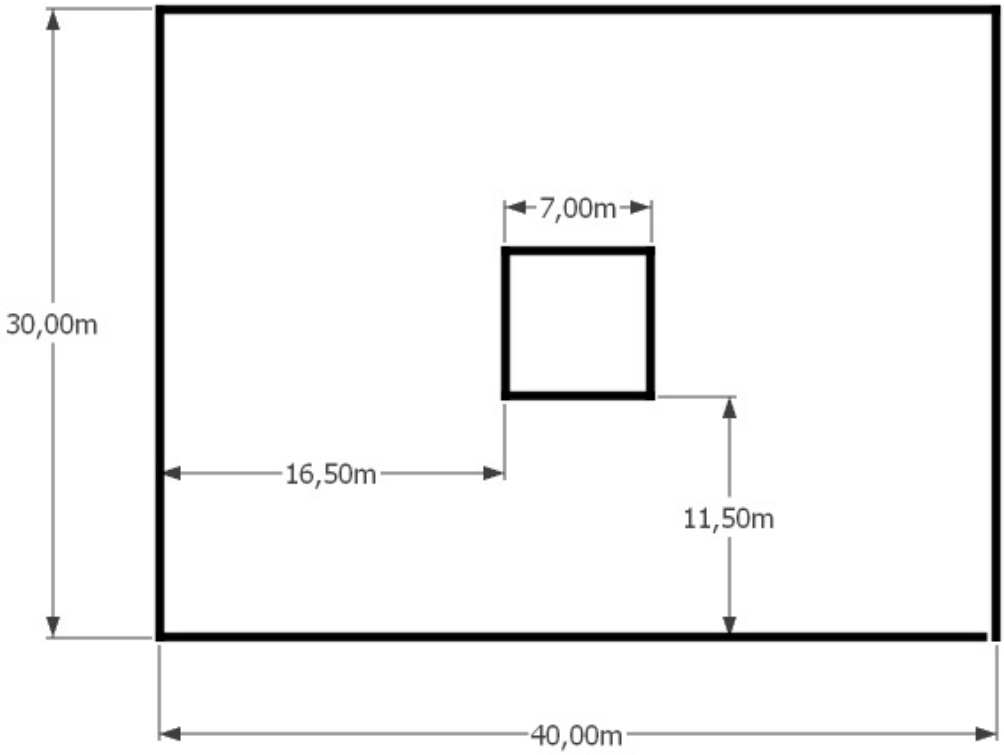


Figura 7. Planta de um dos pavimentos do prédio.

O aplicativo possibilita a utilização de um *plug-in* chamado *OpenStudio*, o qual faz a conexão entre o modelo da edificação feito no *Sketchup* e o modelo de estudo para climatização no *EnergyPlus*. Basta criar a edificação dentro de regiões reconhecidas como zonas climáticas. As partes da edificação criadas dentro de tais zonas são automaticamente reconhecidas pelo *EnergyPlus*, que a partir dos dados do modelo 3D caracteriza o prédio geometricamente.

Vale lembrar que a geometria do prédio poderia ser diretamente caracterizada no *EnergyPlus*, requisitando dados como as coordenadas de cada ponto determinando as superfícies das paredes, tetos e pisos, o que seria trabalhoso. Sendo assim, a utilização do *plug-in* facilita esta etapa do estudo.

Outras especificações como parâmetros dos materiais utilizados na edificação, ou dados relativos às cargas térmicas (perfis de ocupação, energias liberadas por equipamentos ou pessoas etc.) podem ser determinados sem maiores problemas no *EnergyPlus*.

Outro ponto a ser determinado na geometria do prédio é a presença de janelas nas faces de cada pavimento. A norma ASHRAE 90.1 (ASHRAE 90.1, 2007) determina o percentual máximo na área de cada superfície de parede vertical constituído por janelas como sendo de 40%. Sendo assim, janelas de $1{,}5\ m$ de altura foram posicionadas em cada face da edificação com comprimento calculado de maneira a resultar numa área envidraçada igual a 40% da área respectiva a cada parede. Utilizar a maior área possível para as janelas pode ser entendido como uma maneira de maximizar a carga térmica relativa à incidência solar. Quanto maior a área transparente, maior é o aquecimento do ambiente pelos raios solares e, portanto, maior é a carga térmica sobre o sistema de climatização, tendendo à pior situação no consumo de energia pelo sistema de climatização.

A Figura **8**8, com o auxílio de vistas laterais e isométrica, mostra um dos pavimentos do prédio comercial já com as janelas modeladas. Na mesma figura a seta na cor verde representa o Norte geográfico.

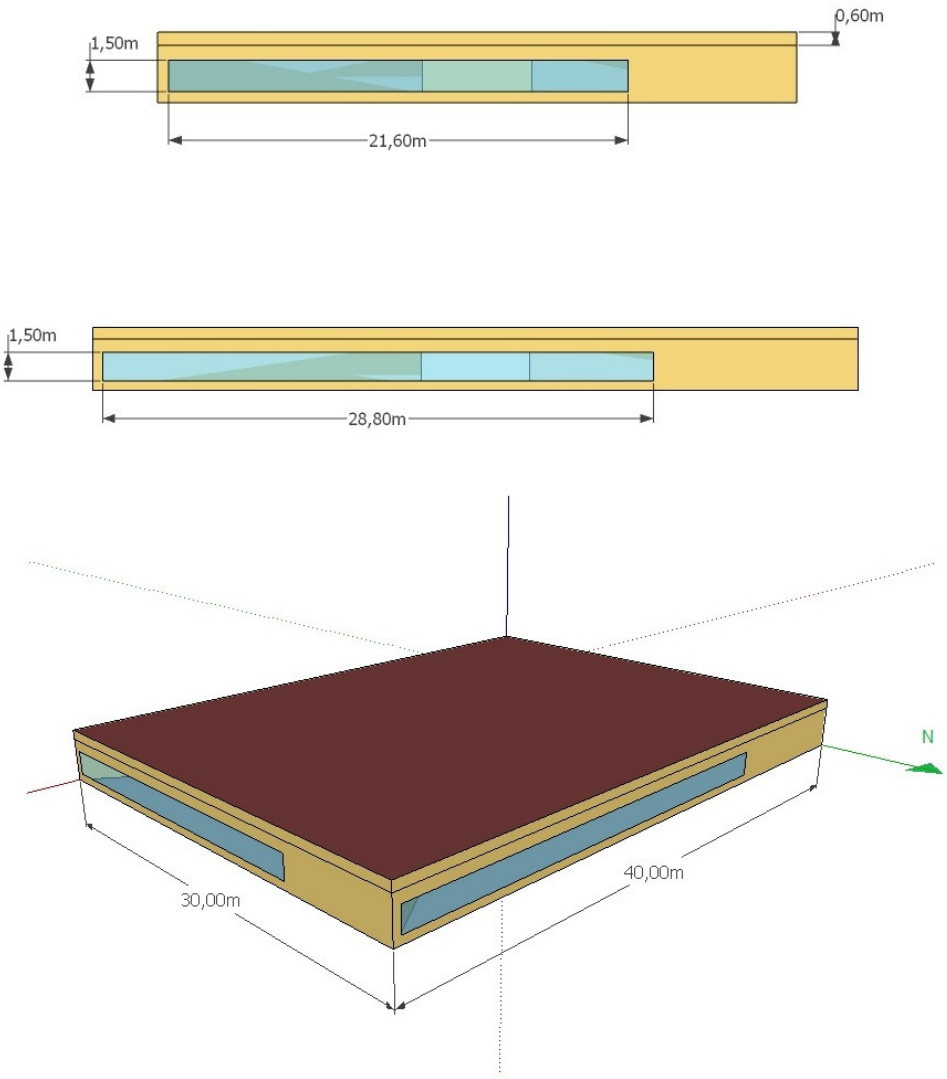


Figura 8. Vistas do modelo 3D de um dos pavimentos do prédio.

Na primeira vista da Figura 8 pode ser vista a dimensão de 0,6 m descrevendo a altura da região chamada *plenum*. Situada entre o piso superior e o teto do andar, tal região é utilizada para permitir o retorno do ar do ambiente climatizado.

5.3. Características da envoltória

O passo seguinte é a determinação das propriedades da envoltória do prédio que determinam como a troca de calor ou absorção de calor se dá nos elementos que o constituem. Calor trocado através das paredes, radiação solar pelos vidros, entre outros fatores.

Em termos gerais, quando a energia irradiada pelo sol se depara com uma superfície qualquer, é dividida em 3 partes: uma parte é refletida para o meio externo, outra é absorvida pelo material e o restante é transmitida diretamente para o interior do ambiente.

No caso de superfícies opacas, parte da energia absorvida é armazenada em forma de energia interna no material enquanto a outra parte é transportada para o meio interno (convecção, condução ou radiação). Não há transferência direta através do material, como no caso de superfícies transparentes. Essa divisão da energia irradiada é descrita algebricamente através de três coeficientes de propriedades óticas: transmissividade (τ), refletividade (ρ) e absortividade (α). Cada um simboliza a porcentagem de energia transformada em energia transmitida, refletida e absorvida, respectivamente.

Sendo assim o calor por radiação solar chega ao interior do ambiente através da transmissão por superfícies transparentes bem como por radiação, condução e convecção através de qualquer tipo de material, sendo ele opaco ou transparente. A condução, convecção e radiação também podem ser geradas apenas pela diferença de temperatura entre ambientes.

A quantidade de calor trocada depende basicamente das propriedades óticas do material e de propriedades como a condutividade térmica, a densidade do material (inércia térmica), calor específico e espessura.

Coeficientes de referência que quantificam tais trocas de calor são estabelecidos pela norma americana ASHRAE 90.1 (ASHRAE 90.1, 2007). Esta norma disponibiliza tais propriedades a fim de constituir uma edificação de referência no que se diz respeito à eficiência energética. Em breves palavras, se uma edificação tem rendimento inferior a uma edificação modelada com base na norma, tal edificação é tida como uma edificação que usa a energia de maneira pouco eficiente.

Para as paredes, pisos e teto, a norma apresenta uma tabela com valores do coeficiente de transferência térmica global (U) que cada elemento constituinte da edificação deve respeitar. São dados valores máximos para diversas construções com base no tipo de materiais usados e com base na zona climática na qual a edificação está situada. No caso estudado, é suposto que a estrutura da edificação é caracterizada por materiais metálicos (aço) e está localizada nas zonas climáticas 1 e 2, como será determinado mais adiante.

A Tabela 7, mostra os coeficientes de transferência térmica globais máximos para cada tipo de elemento em ambas as zonas climáticas estudadas.

Tabela 7 - Coeficientes de transferência térmica globais máximos para cada tipo de elemento para as zonas climáticas 1 e 2.

Elemento	U máx. de referência (W/m^2K) Zona 01	U máx. de referência (W/m^2K) Zona 02
Tetos	0,37	0,37
Paredes	0,64	0,64
Pisos	1,99	0,29
Vidros	6,82	3,98

Tal coeficiente serve como meio de quantificar as trocas de calor entre dois meios de temperaturas diferentes, quando o sistema é composto por camadas de diferentes materiais. Sendo inserido em uma relação semelhante à lei de resfriamento de Newton:

$$Q = U \cdot A \cdot \Delta T \qquad (2)$$

Onde:

A: área de troca de calor, m^2;

ΔT: diferença de temperatura entre os meios, ℃;

U: coeficiente global de transferência de calor, (W/m^2K);

Vale lembrar que U é definido como:

$$U = \frac{1}{A \cdot R_{tot}} \qquad (3)$$

O termo R_{tot} é a resistência térmica total resultante dos efeitos de condução ou convecção através das camadas de material de construção. No caso estudado, será considerada somente a transferência de calor por condução, e a resistência térmica total acaba por ser estimada pela seguinte equação:

$$R_{tot} = \sum_i^n \frac{L_i}{k_i \cdot A_i} \qquad (4)$$

Onde:

L_i: largura da camada i de um mesmo material, m;

k_i: condutividade térmica do material, (W/K);

A_i: área de troca de calor, m^2;

Sabendo que um coeficiente U menor que o valor máximo permitido implicaria num ambiente mais eficiente com relação a trocas de calor com o ambiente externo (menos troca de calor com o ambiente externo), as espessuras de alguns materiais foram modificadas a fim de garantir coeficientes U máximos e, portanto, caracterizando uma edificação no limite de sua ineficiência em manter a temperatura do ambiente interno.

Sendo assim, as espessuras de lã de rocha (material isolante térmico), constituindo as paredes, e as espessuras de isopor, utilizadas nos tetos e pisos, foram calculadas a fim de se obterem os valores necessários de coeficientes.

Os materiais utilizados para as paredes e suas propriedades podem ser vistos na Tabela 8. Já os materiais utilizados na confecção dos pisos e tetos são mostrados na Tabela 9, bem como as características relevantes à simulação.

Tabela 8 - Materiais e respectivas propriedades utilizados no modelamento das paredes.

Camada	Material	Calor específico $(J/kg\,°C)$	Condutividade térmica $(W/m\,°C)$	Densidade (kg/m^3)
1 externa	argamassa	754	0,65	1600
2	bloco de concreto	1005	0,91	1700
3	lã de rocha	754	0,03	190
4 interna	gesso	910	0,35	1200

Tabela 9 - Materiais e respectivas propriedades utilizados no modelamento dos pisos e tetos.

Camada	Material	Calor específico $(J/kg\,°C)$	Condutividade térmica $(W/m\,°C)$	Densidade (kg/m^3)
1 externa	Concreto	1005	1,75	2400
2	Isopor	1000	0,04	30
3	Contrapiso	1005	1,28	2000

5.4. Parâmetros das fontes de calor

Por definição, carga térmica é o calor total a ser removido ou fornecido ao ambiente de maneira a garantir que as condições desejadas de temperatura sejam atingidas. Portanto, para que as simulações retratem o sistema o mais próximo da realidade, todos os possíveis agentes trocadores de calor com o ar interno devem ser identificados e seus efeitos sobre o sistema devem traduzidos em valores físicos.

As fontes internas de calor incluídas no modelo foram as provenientes de: pessoas, iluminação, equipamentos em geral (computadores, monitores etc.) e elevadores.

A influência das pessoas na geração de calor é quantificada com base na norma brasileira NBR16401 (ABNT NBR 16401, 2008), que descreve taxas típicas de calor liberado por pessoas em diversos níveis de atividade (pessoa sentada, caminhando, durante trabalho pesado etc.). Juntamente com a especificação do número de pessoas por metro quadrado na construção, também especificado na norma brasileira, pode-se estipular o valor máximo de energia gerada pelas pessoas no recinto. Os valores são inseridos no programa e o mesmo calcula automaticamente o total de energia com base na área da edificação.

O valor de energia gerada por pessoa escolhido é referente a pessoas sentadas realizando atividades de trabalho leve, tais como as desempenhadas em escritórios, hotéis ou apartamentos. A densidade de pessoas escolhida é a mesma determinada para a densidade de carga de equipamentos de escritório. Nessa parte, a norma cita a

área disponível por posto de trabalho para diversos tipos de carga. Assumindo que uma pessoa seja igual a um posto de trabalho, determina-se a densidade de pessoas no escritório. O valor escolhido é referente a um tipo de carga considerado como médio a alto. Os valores comentados podem ser vistos na Tabela 10.

Tabela 10 - Taxa de calor liberado por pessoa e área por posto de trabalho.

Taxa de calor liberado por pessoa (W)	Área por posto de trabalho (m^2)
115	9,3

O calor gerado pela iluminação do escritório foi retirado da norma ASHRAE 90.1., a qual determina densidades de taxas de calor gerado para diversos tipos de edificação. Para um escritório fechado, a densidade (passada para unidades do SI) é de aproximadamente $12\ W/m^2$. Entrando com este dado, o programa estima a energia total liberada pelos equipamentos do escritório.

A influência dos equipamentos do escritório é também quantificada pela razão entre a taxa de calor gerada e a área do ambiente. Como já mencionado, a norma NBR estima tais taxas para diversos níveis de carga. O escolhido para o modelo foi o considerado como médio ou alto, o que equivale a uma densidade de $16{,}2\ W/m^2$, englobando computador, monitor, impressora e fax. Esta mesma densidade é usada para estimar a energia dissipada pelos elevadores no poço do andar.

5.4.1. Perfis de distribuição das fontes de calor

As fontes internas de calor consideradas não geram calor com a mesma taxa ao longo do dia inteiro em todos os dias da semana. Pessoas param para o almoço, não trabalham nos fins de semana, parte das luzes são apagadas durante à noite e assim por diante. Na intenção de aproximar o modelo da situação real de um escritório, a

norma americana ASHRAE 90.1 (ASHRAE 90.1, 2007) disponibiliza perfis de funcionamento dos equipamentos, elevadores e perfis de ocupação de pessoas, quantificando tais fontes de calor em termos de frações das energias totais geradas por cada tipo de fonte. Os perfis são descritos para dias de semana bem como para os sábados e domingos. Todos os perfis podem ser examinados no ANEXO A.

O perfil para dias úteis que descreve a ocupação de pessoas em termos percentuais (relativo ao valor máximo de pessoas), estimado anteriormente pela densidade de pessoas, é visto em forma de diagrama de barras na Figura 9. Vale lembrar que a utilização dos equipamentos de escritório segue o mesmo perfil que o utilizado para as pessoas.

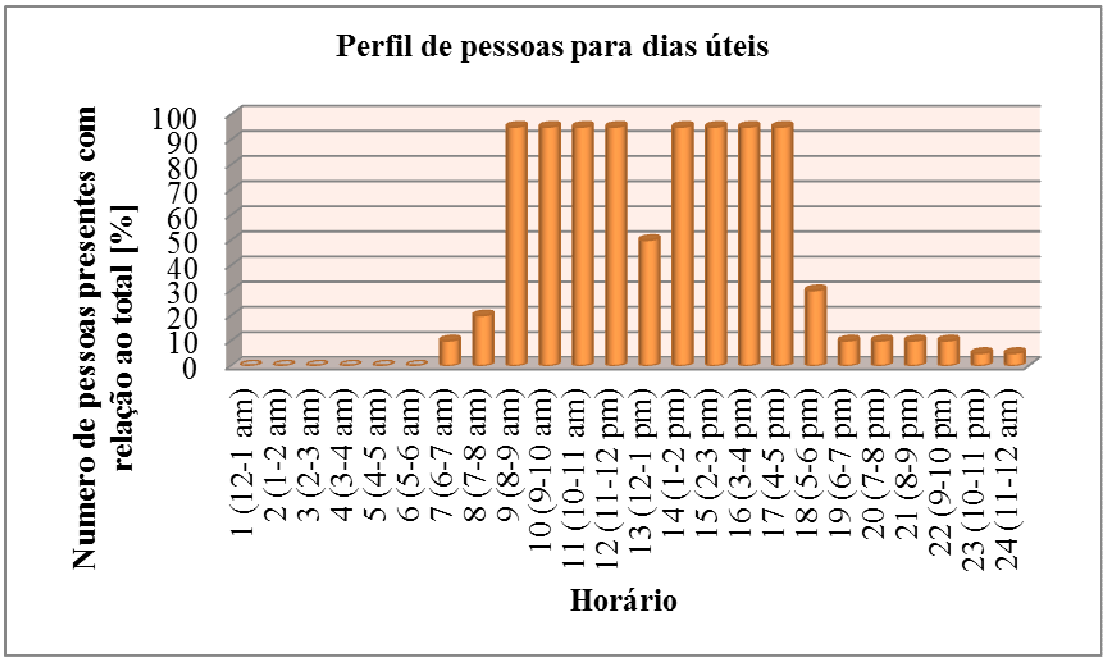


Figura 9. Perfil de ocupação de pessoas para dias úteis.

A utilização das luzes ao longo de um dia útil em termos percentuais (energia relativa ao máximo valor de energia dissipada possível) pode ser vista na Figura 10.

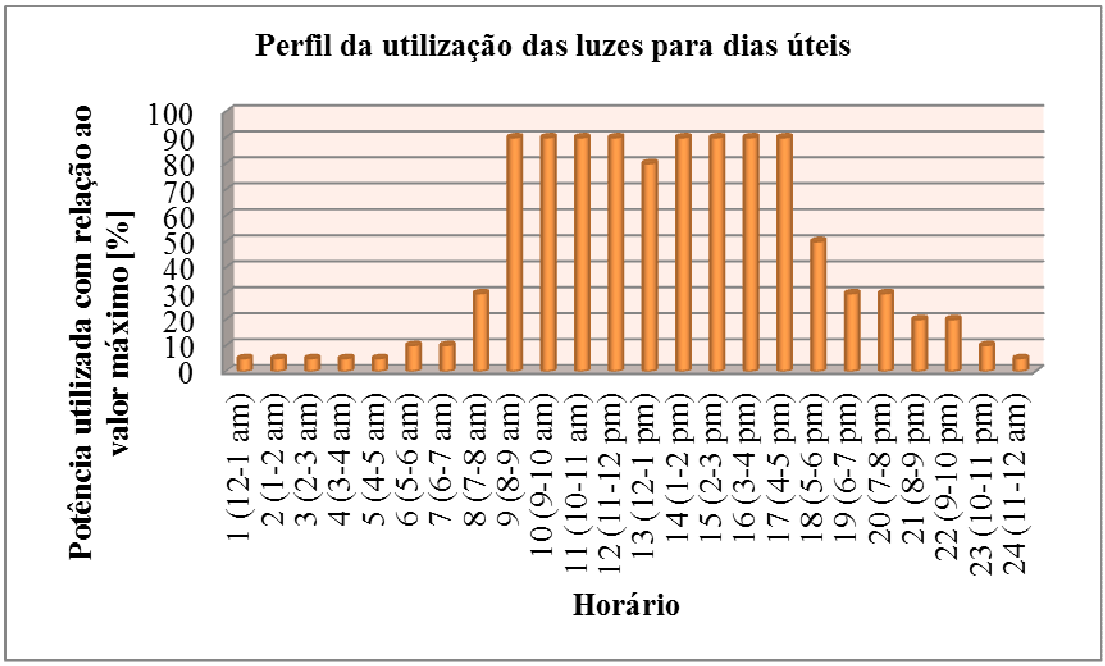


Figura 10. Perfil da utilização de iluminação para dias úteis.

O funcionamento dos elevadores durante dias úteis obedece o perfil descrito na Figura 11.

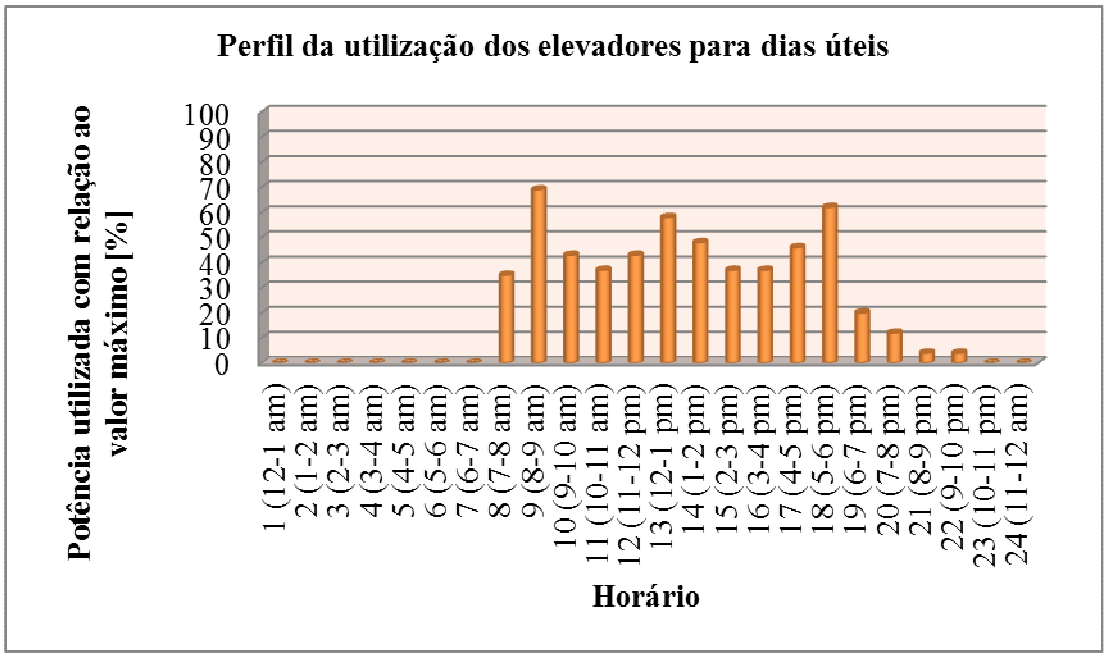


Figura 11. Perfil da utilização de elevadores para dias úteis.

5.6. Cidades a serem analisadas

A escolha das cidades a serem analisadas foi feita com base nas classificações de ambas as normas: ABNT 15220 (ABNT NBR 15220, 2003) e ASHRAE 90.1 (ASHRAE 90.1, 2007). A idéia foi escolher cidades que estão classificadas numa mesma zona pela norma norte-americana, mas que, numa primeira hipótese, apresentam características climáticas diferentes, resultando numa classificação muito abrangente.

Assim sendo, as cidades escolhidas, bem como as respectivas classificações quanto a ambas as normas aqui consideradas, podem ser vistas na Tabela 11.

Tabela 11 - Cidades escolhidas para estudo e respectivas zonas climáticas.

Cidade	Zona Climática (ABNT 15220)	Zona Climática (ASHRAE 90.1)
Belém (PA)	8	1
Rio de Janeiro (RJ)	8	1
Brasília (DF)	4	2
São Paulo (SP)	3	2
Porto Alegre (RS)	3	2

A princípio somente as quatro primeiras cidades seriam estudadas, mas Porto Alegre foi considerada para a confirmação de um resultado obtido, o qual será explicado mais adiante.

Pode-se notar que as duas cidades classificadas pela ASHRAE 90.1 (ASHRAE 90.1, 2007) como pertencentes à zona climática 1 também são incluídas na mesma zona pela norma brasileira ABNT-15220 (ABNT NBR 15220, 2003) . No entanto, das outras três cidades, classificadas na zona 2 pela norma norte-americana, Brasília

não é considerada na mesma zona que São Paulo e Porto Alegre pela norma brasileira.

A distinção da norma brasileira quanto à cidade de Brasília quando comparada com as outras duas cidades é melhor entendida observando a distribuição de temperatura e umidade relativa das cidades na Figura 12. A figura mostra as médias de temperatura e umidade relativa de cada mês ao longo do ano para as três cidades classificadas como pertencentes à zona 2 segundo a norma americana. Tais dados foram obtidos utilizando o aplicativo *Climate Consultant* que, assim como o software *EnergyPlus*, foi desenvolvido pelo Departamento de Energia dos Estados Unidos da América com a função de auxiliar os projetistas e pesquisadores do setor de construção. O aplicativo organiza os dados climáticos utilizados como entrada no *EnergyPlus*, possibilitando a criação de gráficos de parâmetros como: temperatura de bulbo seco, umidade relativa, velocidade do vento entre outros. Observando os gráficos da Figura 12 e Figura 13, pode-se ainda reforçar a hipótese de abrangência excessiva por parte da norma norte-americana.

Pode-se notar semelhança entre Porto Alegre e São Paulo: ambas apresentam queda brusca na média de temperatura mínima no inverno, chegando à valores abaixo de 18°C. Brasília, no entanto, não apresenta quedas tão baixas: apenas um mês apresenta temperatura média próxima dos 18 °C, não ultrapassando esse valor.

As diferenças mais evidentes aparecem quando se comparam as distribuições de umidade relativa das cidades ao longo do ano. Brasília apresenta invernos secos (com umidade relativa inferior a 60% em alguns meses), Porto Alegre apresenta invernos mais úmidos (umidade relativa acima dos 80%) e São Paulo mostra uma distribuição de umidade relativa quase inalterada: mantém-se entre 75% e 80%, caindo um pouco no mês de agosto.

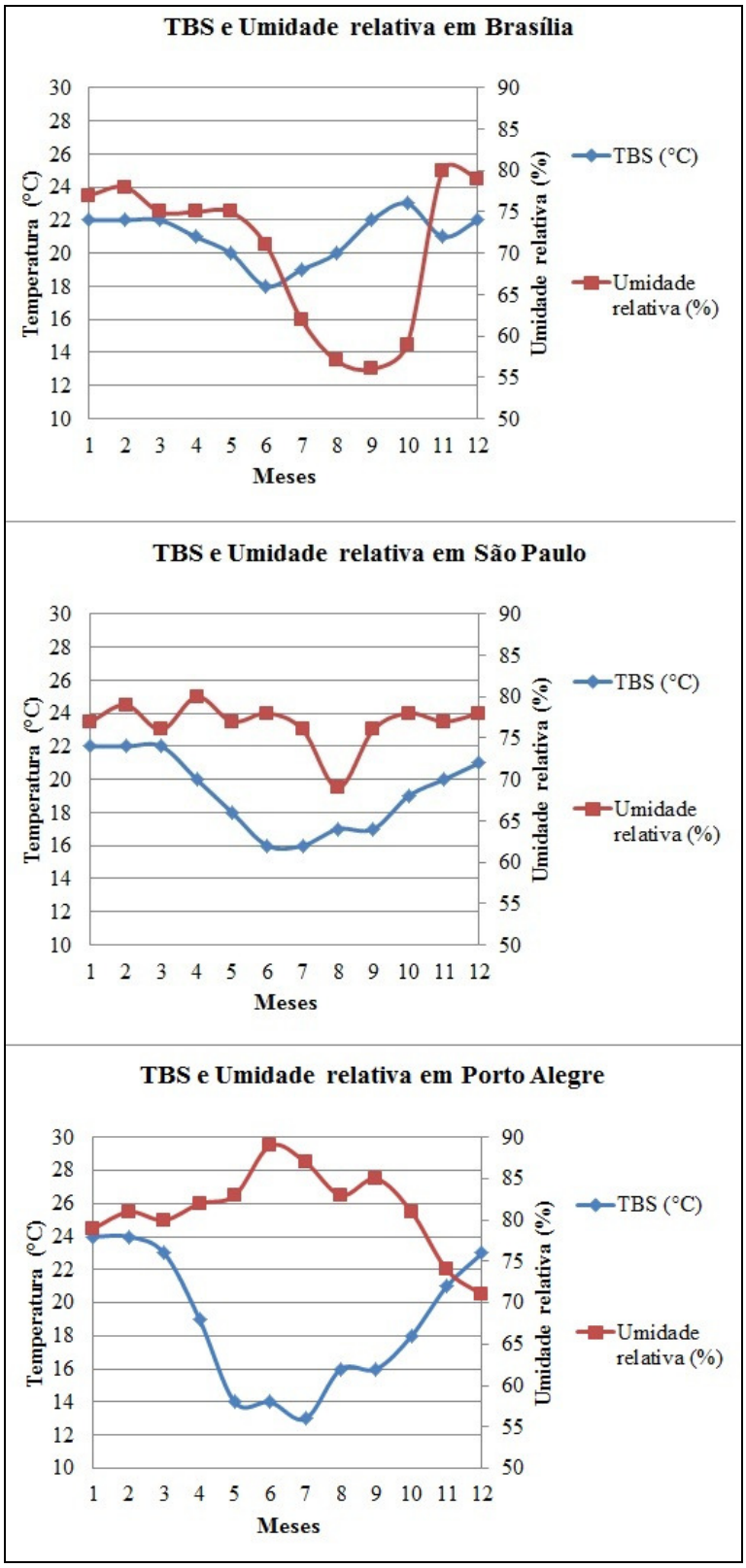


Figura 12. Dados climáticos das cidades de Brasília, São Paulo e Porto Alegre.

Observando agora as cidades pertencentes à zona 2, segundo a norma norte-americana, notam-se diferenças tanto na distribuição de umidade relativa quanto na de temperatura de bulbo seco. A cidade de Belém mostra temperaturas médias sempre ao redor de 26 °C e valores de umidade relativa acima dos 80%, com valores próximos dos 90% nos meses de verão e outono. A cidade do Rio de Janeiro, no entanto, apresenta quedas de temperatura no inverno (inferiores a 22 °C) e distribuição de umidade relativa entre 70% e 80%.

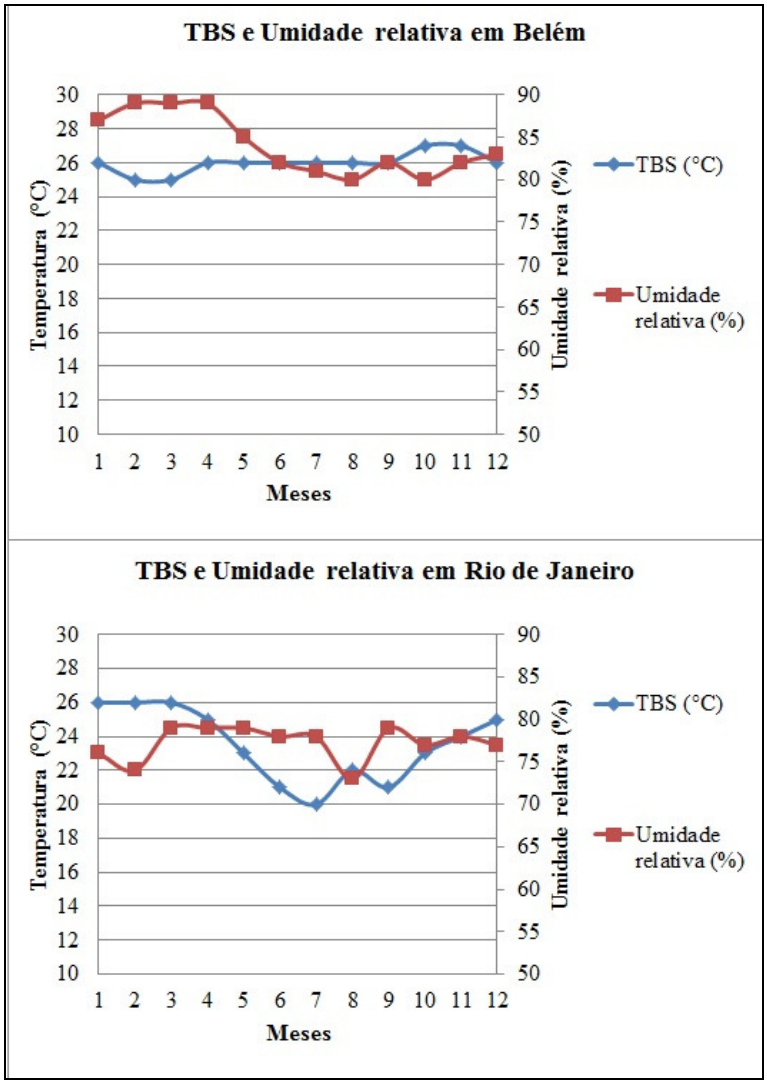


Figura 13. Dados climáticos das cidades de Belém e Rio de Janeiro.

Outros dados que reforçam a hipótese de excesso na abrangência da classificação da norma norte-americana são os relativos à classificação do território

brasileiro em zonas climáticas feita pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, 2011). Como pode ser visto na Figura 14, cidades da mesma zona segundo a ASHRAE 90.1 (ASHRAE 90.1, 2007), em alguns casos pertencem à diferentes regiões climáticas segundo o IBGE. No mapa da Figura 14 os pontos na cor rosa representam as cidades pertencentes à zona 1 e os pontos na cor azul, cidades pertencentes à zona 2.

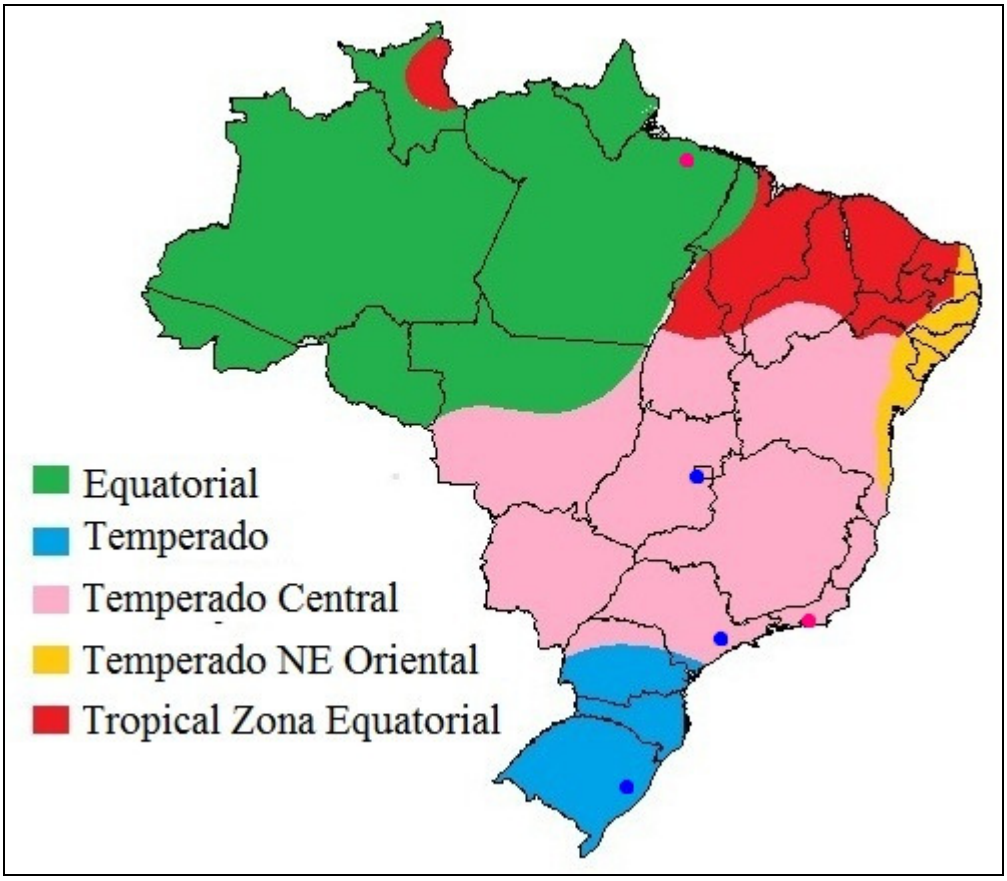


Figura 14. Divisão climática do território brasileiro segundo IBGE (IBGE, 2011).

6. SIMULAÇÕES

Em resumo do que foi descrito nos capítulos anteriores, relativos ao modelo, as simulações foram realizadas nas 5 cidades selecionadas (Tabela 11), utilizando 2 estratégias de controle para o sistema economizador: utilizando entalpia e temperatura de bulbo seco como parâmetros de controle. Os valores de referência para os parâmetros são aqueles prescritos pela norma ASHRAE 90.1 (ASHRAE 90.1, 2007) descritos na Tabela 6.

A fim de realizar uma análise de sensibilidade, outras simulações foram realizadas variando-se os valores de tais parâmetros. No caso da entalpia outros dois valores, um 20% maior e outro 20% menor que o valor sugerido pela 90.1 (ASHRAE 90.1, 2007), foram utilizados nas simulações. Para o sistema de controle utilizando temperatura de bulbo seco, os valores de 22 °C e 25 °C foram utilizados como variações do valor sugerido pela norma.

A análise de sensibilidade foi feita para todas as cidades com exceção da cidade de Porto Alegre, utilizada apenas para reforço dos resultados. Um fluxograma mostrando os parâmetros de controle utilizados pode ser visto na **Erro! Fonte de referência não encontrada.**.

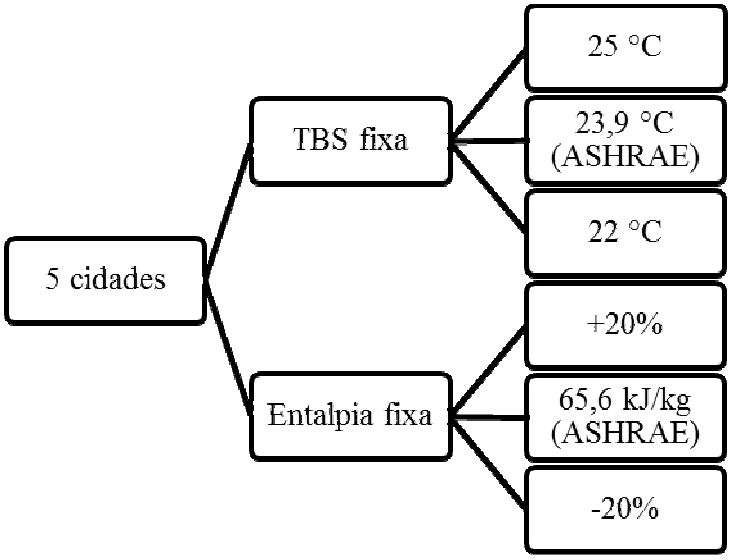


Figura 15. Parâmetros de controle dos economizadores utilizados nas simulações (a análise de sensibilidade não foi feita para a cidade de Porto Alegre).

7. RESULTADOS

7.1. Consumo sem utilização do economizador

Primeiramente foram obtidos os consumos das simulações feitas sem a utilização do economizador no sistema de climatização, com a finalidade de obter-se valores de referência. Os resultados mostram concordância com a classificação feita pela norma norte-americana (ASHRAE 90.1, 2007). As cidades pertencentes à zona 1, mais quente, apresentam maior participação no consumo anual de energia por parte do sistema de climatização (entre 50% e 60%), enquanto que as cidades pertencentes à zona 2, menos quente, mostram participação no consumo de energia menor por parte do sistema de climatização (por volta de 40%). Os valores são listados na Tabela 12.

Tabela 12. Consumo anual e participação no consumo por parte do sistema de climatização.

Cidade	Consumo total (MWh)	Consumo AC (%)
São Paulo	3049,1	41,7
Brasília	3351,4	39,1
Porto Alegre	3096,7	42,6
Rio de Janeiro	3736,3	52,4
Belém	4299	58,7

Na Figura 16 (cidade da zona 1) e Figura 17 (cidades da zona 2) o consumo anual das cidades é dividido entre os elementos consumidores de energia elétrica na edificação. A diferença nas porcentagens deve-se ao aumento no consumo dos elementos constituintes do sistema de climatização, uma vez que os outros dois elementos (iluminação e equipamentos) apresentam valores constantes para todas as simulações, independente da localização da edificação.

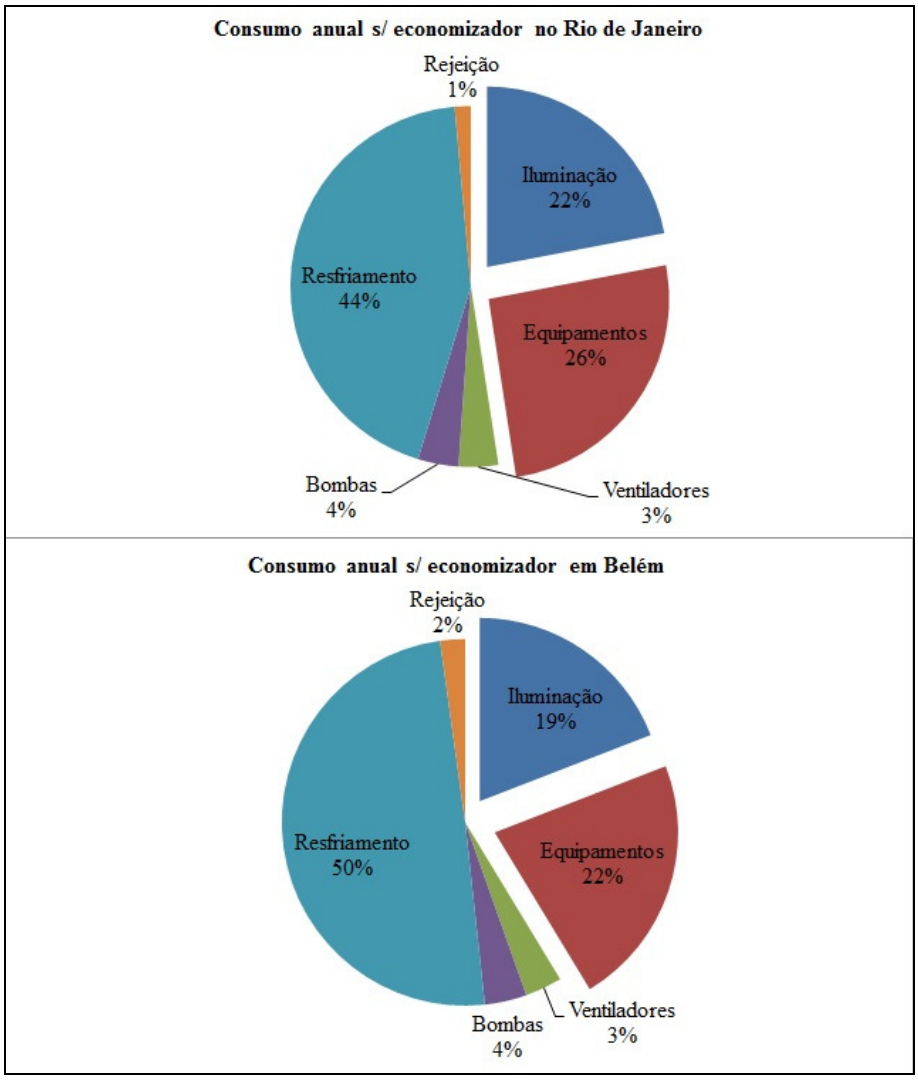


Figura 16. Divisão do consumo nas cidades classificadas na zona 1 segundo a ASHRAE (ASHRAE 90.1, 2007).

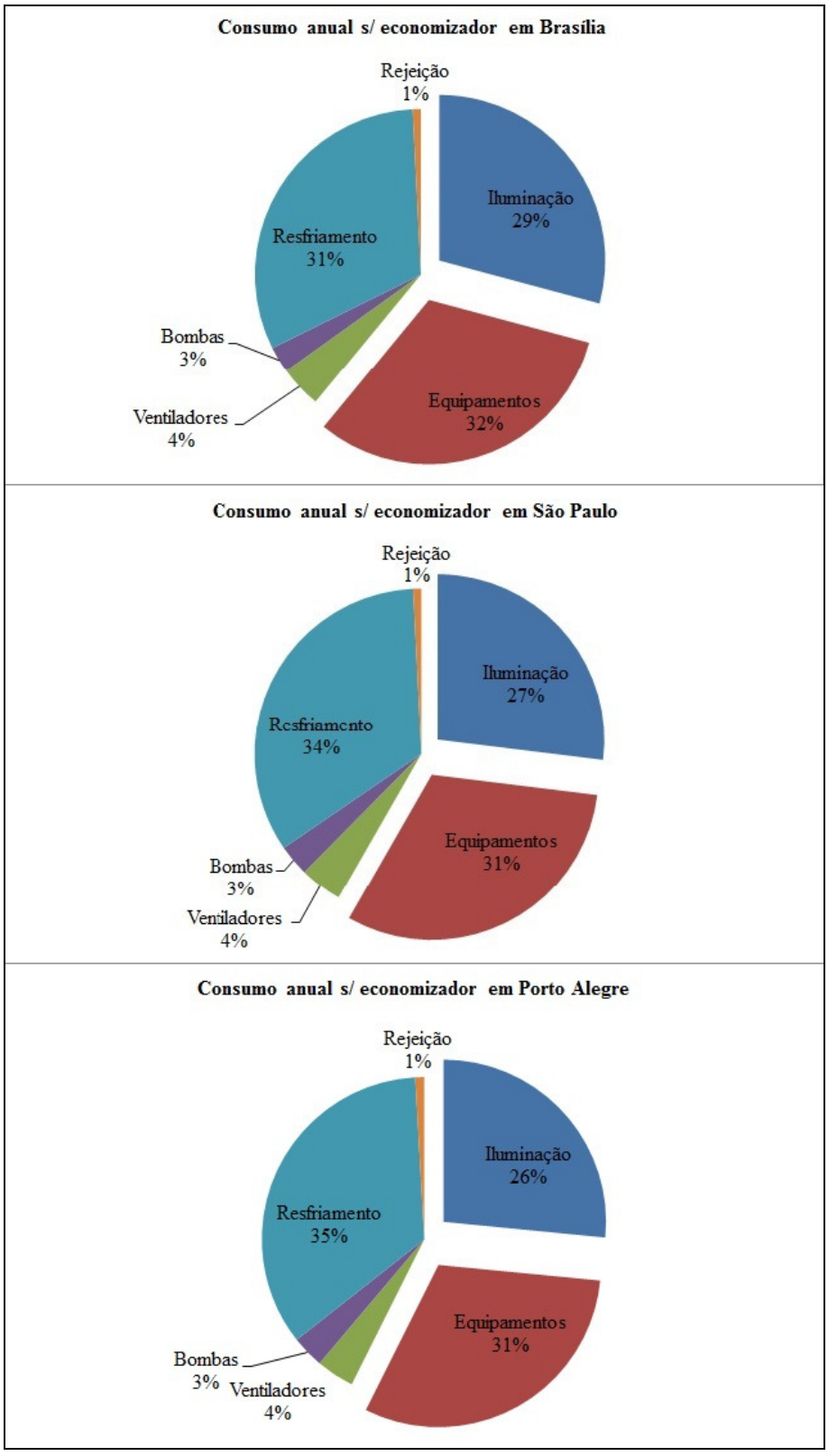


Figura 17. Divisão do consumo nas cidades classificadas na zona 2 segundo a ASHRAE (ASHRAE 90.1, 2007).

7.2. Consumo com economizador utilizando valores sugeridos pela ASHRAE 90.1

Para uma primeira análise, os resultados buscados foram os de consumo total da edificação ao longo de um ano utilizando o economizador controlado com base nos valores sugeridos pela norma norte-americana (ASHRAE 90.1, 2007): $23{,}9\ °C$ para o controle utilizando temperatura de bulbo seco e $65{,}6\ kJ/kg$ para o controle utilizando entalpia.

Observando a Tabela 13, que mostra as variações percentuais no consumo anual da edificação com base no modelo utilizando sistema de climatização sem economizador, percebem-se variações muito pequenas, menores que 1%. Na maioria dos casos existe aumento no consumo (sinal positivo) enquanto que reduções (sinal negativo) só são percebidas nas cidades de Porto Alegre e São Paulo.

Tabela 13. Redução percentual no consumo anual total utilizando parâmetros sugeridos pela ASHRAE 90.1 (ASHRAE 90.1, 2007).

Cidade	Redução percentual no consumo anual total	
	TBS fixa (%)	Entalpia fixa (%)
São Paulo	-0,17	-0,57
Brasília	0,15	0,14
Porto Alegre	-0,06	-0,09
Rio de Janeiro	0,9	0,88
Belém	0,04	0

As variações praticamente desprezíveis obtidas quando analisando o consumo total da edificação no período de um ano sugerem, a princípio, que a utilização dos economizadores não é eficaz para as cidades consideradas. No entanto, presume-se que o sistema economizador apresenta maior eficácia nos meses de inverno, onde a temperatura tende a ser menor que nos outros períodos do ano. Assim sendo fez-se necessária uma análise mais detalhada do consumo a fim de verificar se havia diminuição considerável no consumo nos meses de inverno e aumento nos meses de verão. A sobreposição dos efeitos poderia estar levando aos resultados obtidos quando observando o consumo total anual.

A Figura 18 mostra o consumo de energia, agora apenas do sistema de climatização, em todos os meses do ano para as cidades classificadas na zona 1 segundo a norma norte-americana (ASHRAE 90.1, 2007) comparando o consumos sem economizador com os consumos utilizando as duas estratégias de controle (com parâmetros sugeridos pela norma norte-americana (ASHRAE 90.1, 2007).

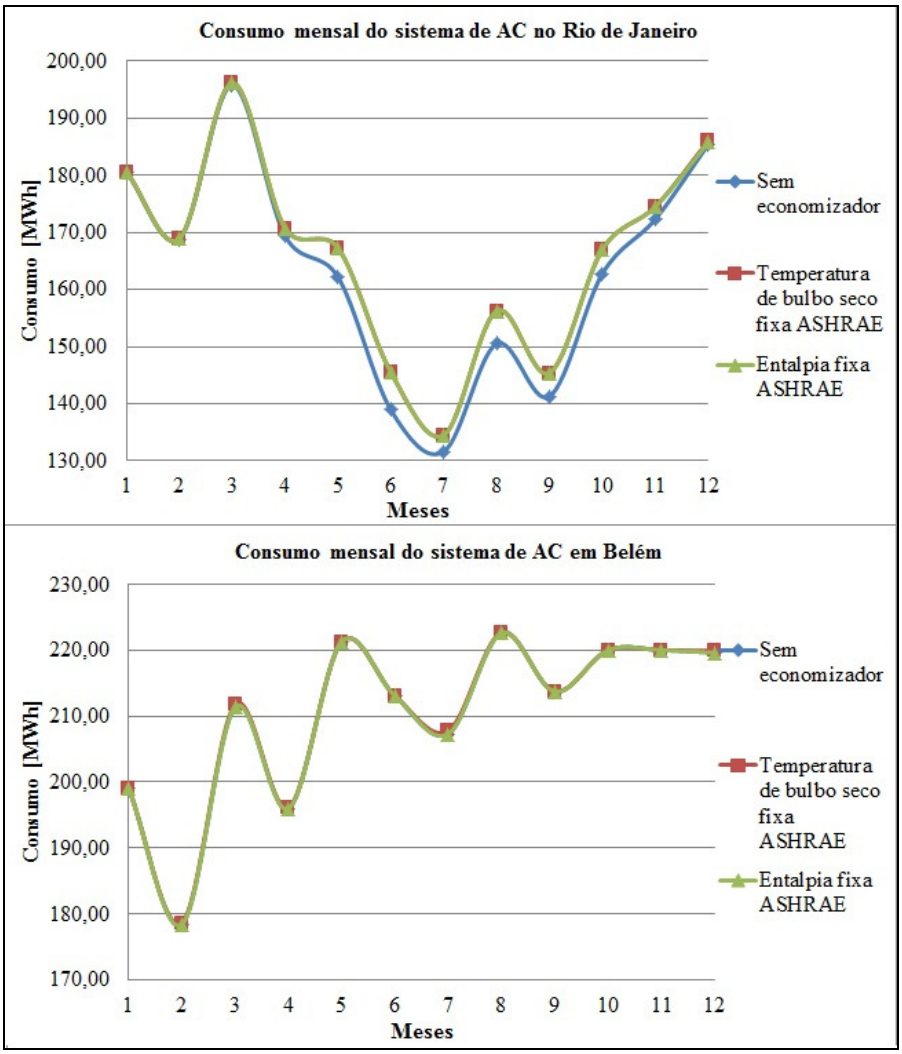


Figura 18. Consumo do sistema de climatização com e sem economizador ao longo do ano nas cidades da zona 1.

Os gráficos revelam que não há variação sensível no consumo em nenhum mês para a cidade de Belém (aumento de 0,2% no mês de julho utilizando temperatura de bulbo seco para o controle). No caso da cidade do Rio de Janeiro, existe aumento no consumo entre os meses de abril e novembro para ambas as estratégias de controle (aumento máximo de 4,7% no mês de junho em ambas as estratégias de controle).

No caso das cidades pertencentes à zona climática 2, ocorre o fenômeno esperado, como pode ser visto na Figura 19. Todas as cidades apresentam redução no consumo nos meses de inverno, o qual é balanceado pelo aumento no consumo nos meses de verão.

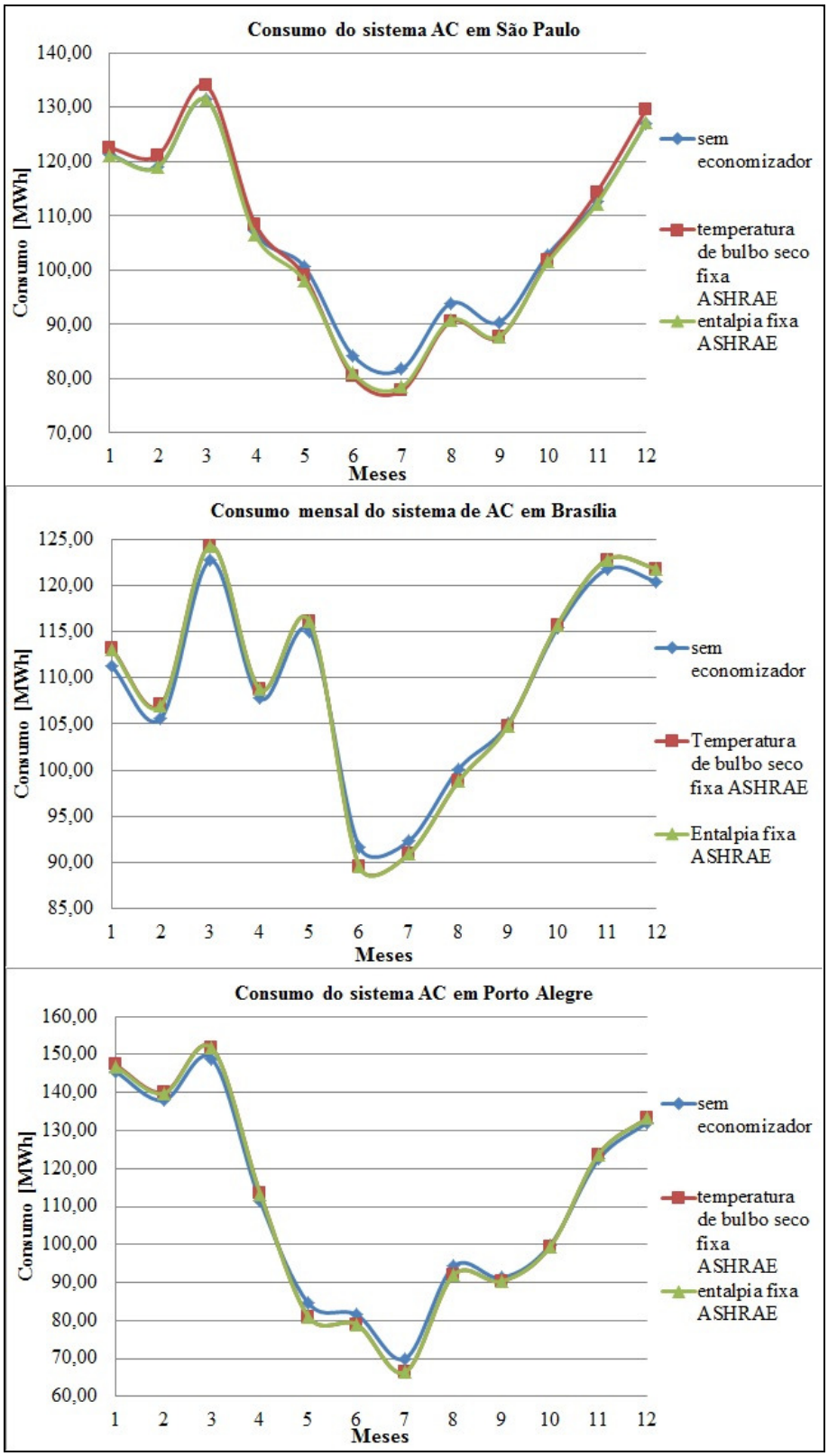


Figura 19. Consumo do sistema de climatização com e sem economizador ao longo do ano nas cidades da zona 2.

As cidades de São Paulo, Brasília e Porto Alegre apresentaram redução máxima nos meses de inverno de 4%, 2,3% e 5% respectivamente. Nos meses de verão, houve aumento no consumo das cidades com máximos percentuais entre 1% e 2%. O aumento foi percebido com aproximadamente os mesmos valores em ambas as estratégias, havendo diferença apenas no caso da cidade de São Paulo.

Em São Paulo houve diferença no aumento do consumo nos meses de verão quando comparando as duas estratégias: a utilização da estratégia de temperatura de bulbo seco resultou em aumento de consumo maior que o aumento utilizando a estratégia de entalpia. Em alguns meses, como o de dezembro, o aumento utilizando temperatura de bulbo seco alcançou o valor de 1,9% enquanto que o aumento utilizando entalpia para o controle foi de 0,1%.

Tal diferença no caso da cidade de São Paulo evidencia a diferença entre as duas estratégias de controle. Utilizando a temperatura de bulbo seco como parâmetro de controle não se obtém informação sobre a quantidade de água no ar. Por outro lado, quando se mede a entalpia do ar, automaticamente se está levando em consideração a entalpia da água contida no ar na forma de vapor.

Observando novamente a Figura 5, pode-se incorrer que as cidades aqui consideradas apresentam a maioria dos estados do ar externo em posições da carta psicrométrica que não resultam em redução na variação de entalpia através do sistema de climatização.

A cidade de São Paulo, por exemplo, apresenta umidade relativa elevada, o que pode levar a entalpias do ar externo elevadas mesmo que a temperatura de bulbo seco seja baixa.

7.3. Análise de sensibilidade

A variação dos valores utilizados para os parâmetros de controle dos economizadores revelou variações muito pequenas para a maioria dos casos aqui estudados quando analisando o consumo anual total da edificação, menores que 1%

quando comparadas com as simulações utilizando os valores sugeridos pela norma ASHRAE 90.1 (ASHRAE 90.1, 2007). As diferenças mais pronunciadas foram observadas na cidade do Rio de Janeiro.

Os resultados não mostram uma tendência comum à todas as cidades. No entanto, comparando os resultados obtidos utilizando as variações dos parâmetros com os resultados obtidos utilizando os parâmetros sugeridos pela norma norte-americana (ASHRAE 90.1, 2007), observa-se diminuição no consumo para grande parte das cidades quando ambos os valores são reduzidos (entalpia 20% menor que a sugerida e temperatura de bulbo seco de 22 °C).

Tal afirmação pode ser melhor compreendida observando os valores de consumo e variações percentuais na Tabela 14, onde os valores são aqueles obtidos nas simulações feitas para a cidade do Rio de Janeiro. Os valores positivos indicam aumento e os negativos, redução.

Tabela 14. Comparações para análise de sensibilidade (valores da cidade do Rio de Janeiro).

Estratégia	Consumo anual total [MWh]	Variação relativa ao sistema sem economizador [%]	Variação relativa ao valor sugerido (ASHRAE 90.1, 2007) [%]
Sem economizador	3736,25	-	-
TBS ASHRAE	3769,77	+0,90	-
TBS 25 °C	3807,27	+1,90	+0,99
TBS 22 °C	3744,89	+0,23	-0,66
h ASHRAE	3769,29	+0,88	-
h ASHRAE+20%	3769,77	+0,90	+0,01
h ASHRAE-20%	3738,57	+0,06	-0,81

. As variações percentuais são geradas pela comparação entre os resultados das simulações utilizando variações dos parâmetros sugeridos por (ASHRAE 90.1, 2007) e os valores de consumo dos modelos referência: simulações utilizando valores de controle sugeridos pela ASHRAE (ASHRAE 90.1, 2007) e os valores de consumo para as simulações sem economizador.

Observando os resultados ao longo dos meses, como nos gráficos da Figura 20 (cidade do Rio de Janeiro) percebe-se novamente baixa sensibilidade dos resultados às variações dos parâmetros de controle. No entanto, para a grande maioria das simulações, ao utilizar-se valores para os parâmetros inferiores àqueles sugeridos pela norma (ASHRAE 90.1, 2007), obtiveram-se consumos inferiores àqueles resultantes das simulações utilizando os parâmetros sugeridos.

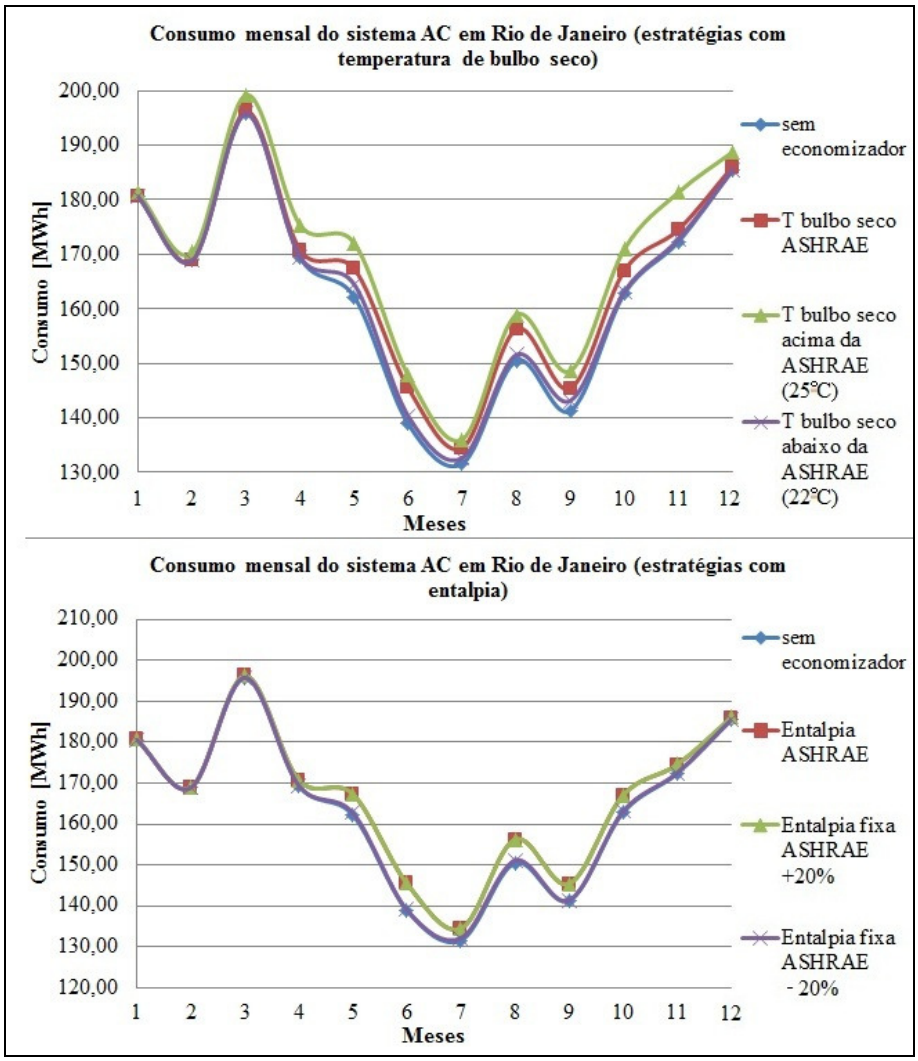


Figura 20. Sensibilidade do consumo às variações dos parâmetros de controle na cidade do Rio de Janeiro (ao longo do ano).

Os gráficos mostrando os consumos mensais resultantes das variações dos parâmetros de controle para simulações das outras cidades podem ser vistos no ANEXO B.

8. VERIFICAÇÃO DO FUNCIONAMENTO DO ECONOMIZADOR

Como as simulações não possibilitaram a confirmação da hipótese de que os economizadores poderiam ser utilizados em pelo menos algumas das cidades brasileiras consideradas, foi feita uma busca por possíveis erros de simulação. Uma delas foi a verificação do funcionamento dos economizadores.

O aplicativo *EnergyPlus* possibilita o monitoramento dos equipamentos utilizados no sistema de climatização. Um dos parâmetros monitorados pelo aplicativo é a condição para operação do economizador dada em valores entre 0 (economizador não é utilizado) e 1 (condições são favoráveis à utilização do economizador).

Na Figura 21 estão representados os gráficos do parâmetro descrito anteriormente para as duas estratégias de controle (entalpia e temperatura de bulbo seco) para um mesmo dia no mês de janeiro na cidade de Porto Alegre. Também estão representados os comportamentos dos parâmetros ao longo do dia e os valores utilizados nos parâmetros de controle sugeridos pela norma norte-americana (ASHRAE 90.1, 2007).

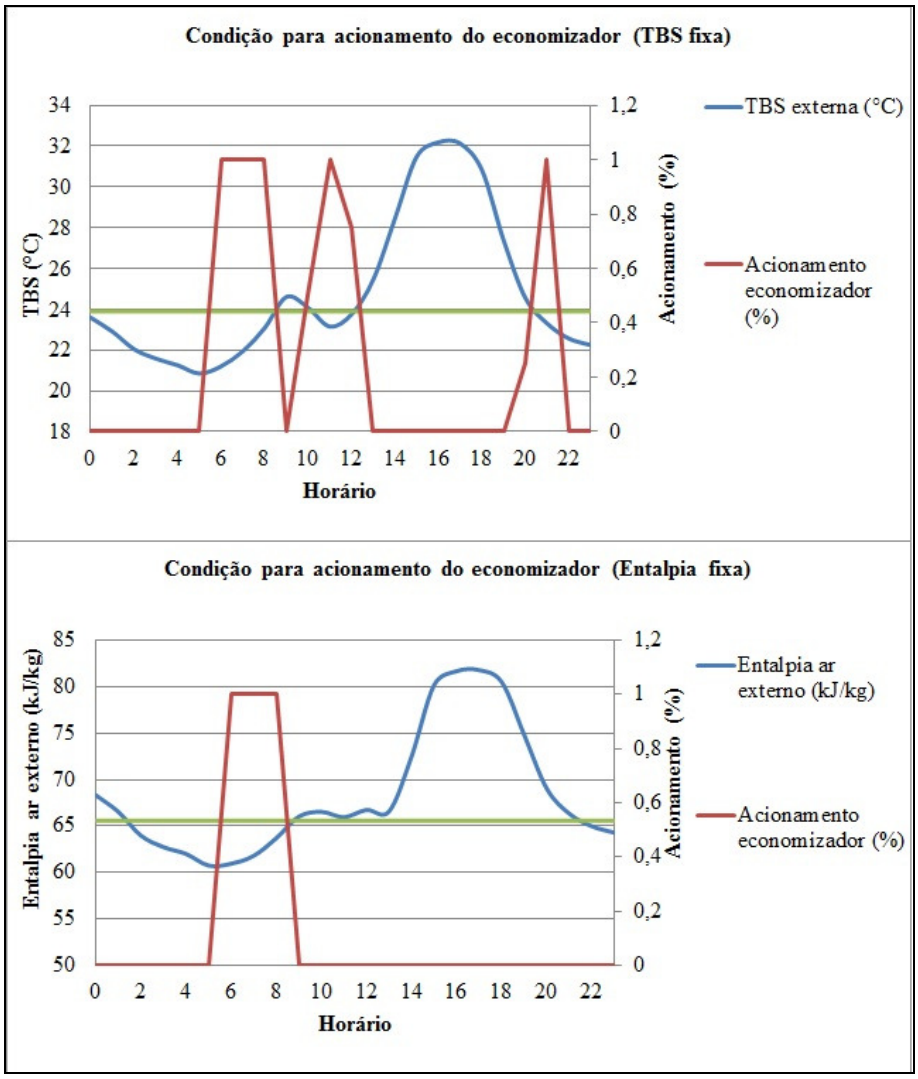


Figura 21. Monitoramento do economizador (possibilidade de utilização).

A Figura 21 apresenta dois gráficos representando a simulação de um dia de janeiro na cidade de Porto Alegre: o primeiro utilizando temperatura de bulbo seco para o controle do economizador e o segundo utilizando entalpia para o contorle do economizador. Em verde estão os valores utilizados nos parâmetros de controle segundo a norma norte-americana (ASHRAE 90.1, 2007), em azul estão os parâmetros medidos para o controle e em vermelho está representada a possibilidade de utilização do economizador, como explicado anteriormente.

Pode-se observar que ambas as simulações estão trabalhando corretamente o controle dos economizadores, visto que à medida que o parâmetro de controle está abaixo do limite estipulado, há possibilidade de utilização do economizador.

Outra observação pode ser feita comparando os dois gráficos da Figura 21. Percebe-se a diferença entre as duas estratégias: entre 9h e 13h há possibilidade de utilização do economizador segundo a estratégia que utiliza temperatura de bulbo seco como referência, enquanto que no caso em que se utiliza entalpia para o controle não há. Embora a temperatura seja baixa o suficiente, a contribuição da umidade eleva a entalpia, o que impossibilita o aumento de vazão de ar externo quando da utilização de entalpia para o controle.

Deve ser ressaltado que os gráficos mostram apenas a possibilidade de utilização do economizador, dado que o sistema de climatização funciona apenas entre as 9h e 18h. Assim sendo, mesmo que a condição de tempo seja favorável à utilização do economizador, o sistema como um todo não está em operação, não surtindo efeitos no consumo de energia.

9. CONCLUSÃO

Os resultados mostraram que a utilização de economizadores controlados pelas estratégias consideradas não resultaria em diminuição significativa no consumo de energia elétrica de um edifício comercial, quando observando o consumo anual total da edificação. Também se pode notar que há diferença no consumo de energia por parte do sistema de climatização ao longo do ano, dado que nos meses de inverno as temperaturas tendem a ser menores, aumentando as chances de utilização de economizadores. No entanto, não se pôde notar diminuição relevante mesmo observando os consumos mensais (diminuição mensal de no máximo 5%).

A análise de sensibilidade revelou pouca influência da variação dos parâmetros de controle sobre o consumo. Em grande parte das simulações, os modelos utilizando diminuição do valor de referência resultaram em diminuição no consumo, quando comparados com os modelos utilizando parâmetros sugeridos pela ASHRAE (ASHRAE 90.1, 2007). Os modelos utilizando valores maiores que os recomendados revelaram o oposto: aumento no consumo.

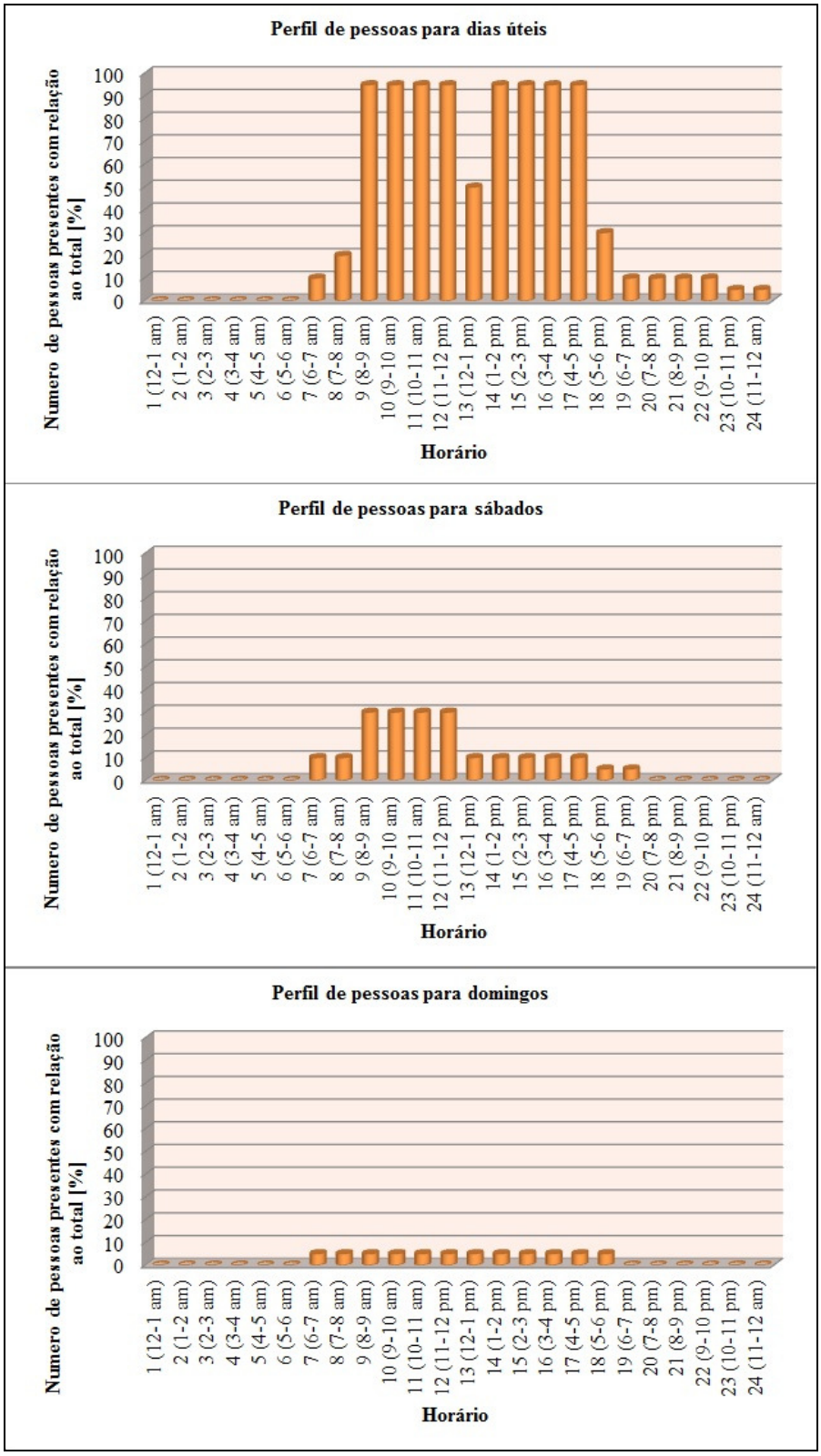
Com isso pode-se inferir que a norma norte-americana (ASHRAE 90.1, 2007) apresenta coerência entre a classificação climática das cidades e às sugestões de utilização dos economizadores, considerando as cidades aqui estudadas.

Os estudos aqui realizados focaram na análise de cinco cidades e na utilização de duas estratégias de controle para o economizador. Dado que a norma norte-americana (ASHRAE 90.1, 2007) classifica ainda outras três cidades, e lista outras 5 estratégias de controle para economizador, seria interessante seguir estudando as outras cidades bem como as outras estratégias de controle.

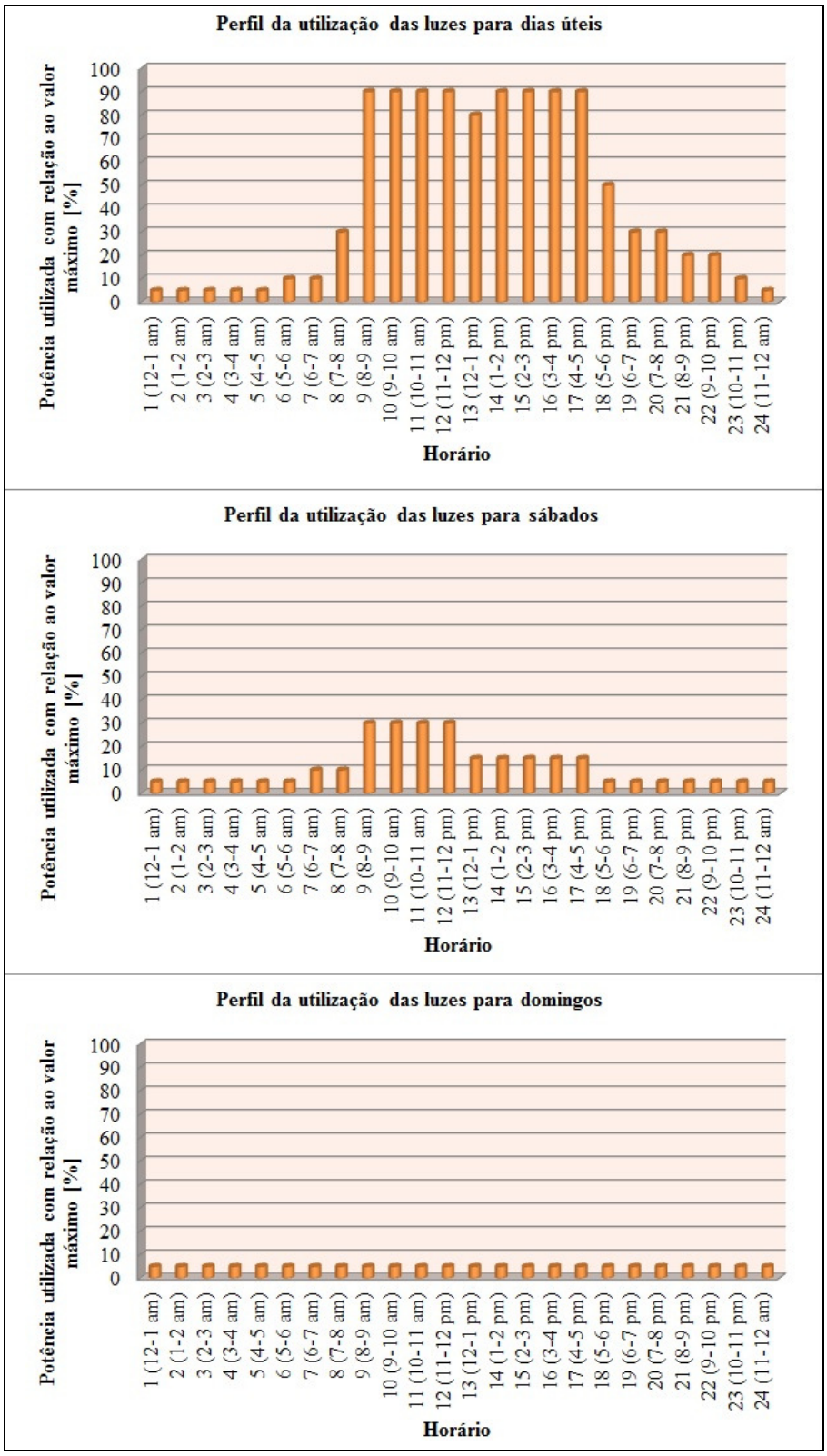
Talvez as outras cidades aqui não estudadas apresentem características climáticas suficientes para a utilização das estratégias aqui analisadas. Outra possibilidade seria a de as outras estratégias não consideradas nas simulações poderem mostrar-se eficientes para as cidades aqui estudadas.

10. ANEXO A

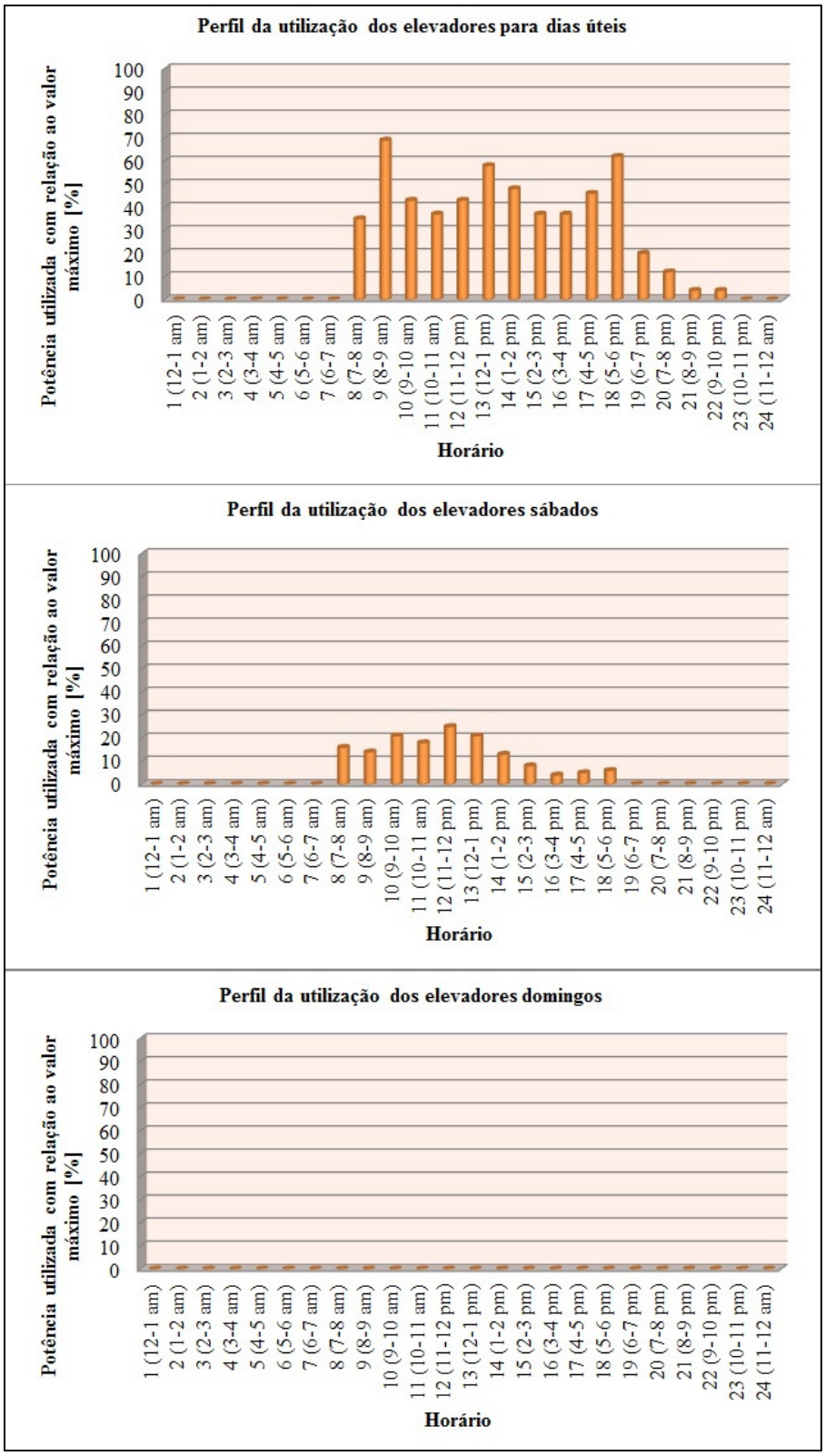
Perfis de ocupação de pessoas para todos os dias da semana:



Perfis de utilização da iluminação para todos os dias da semana:

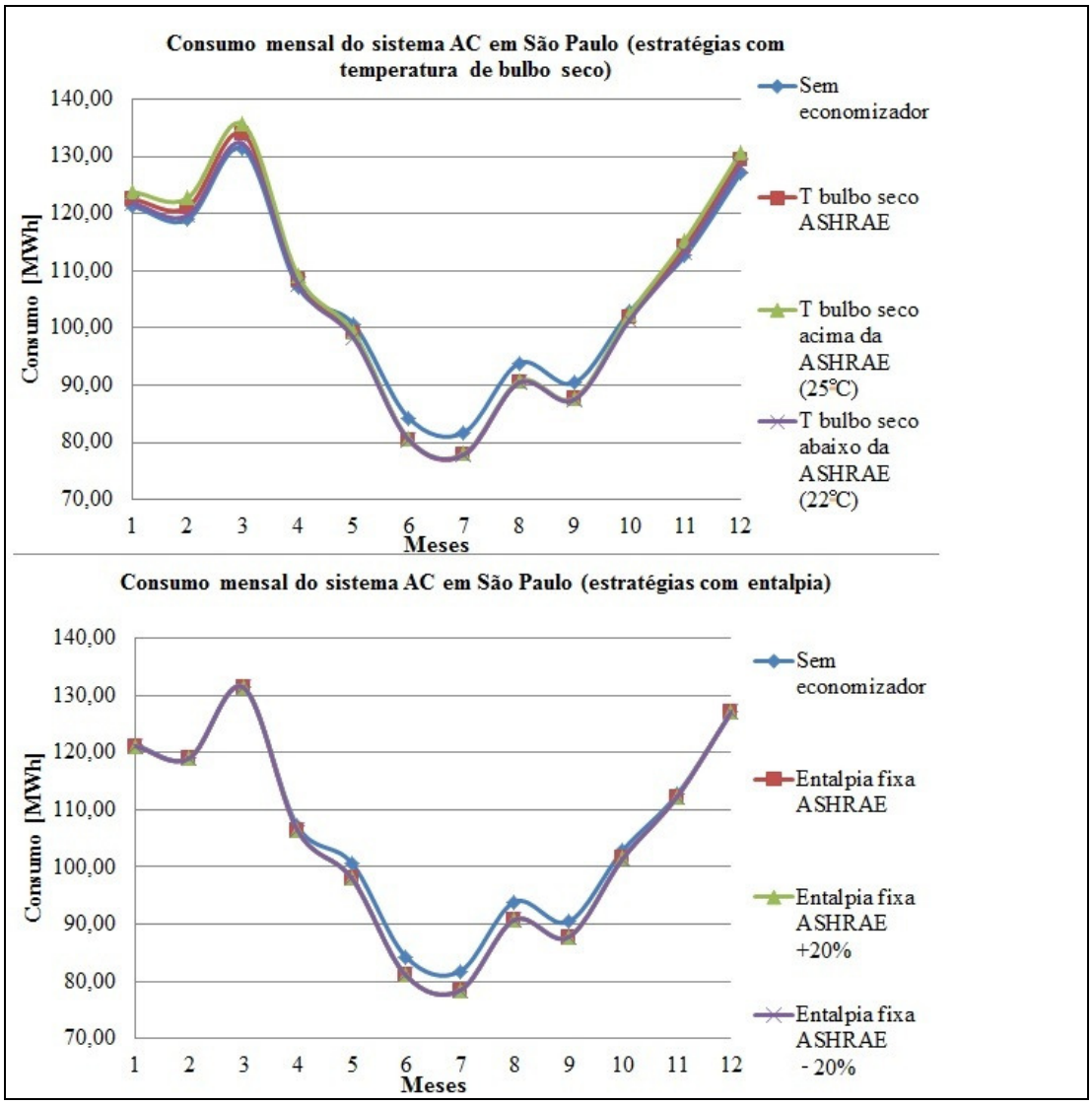


Perfis de utilização dos elevadores para todos os dias da semana:

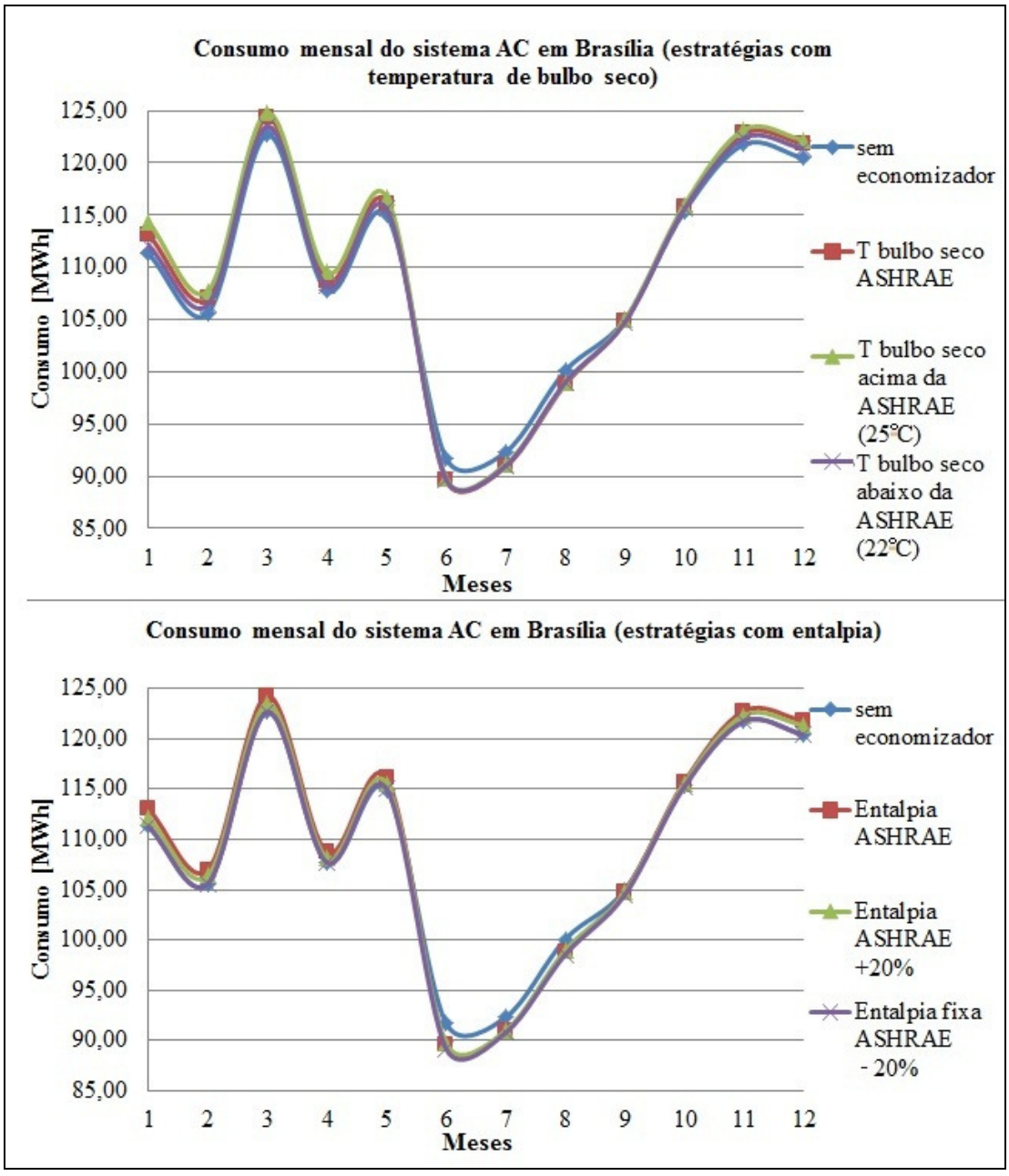


11. ANEXO B

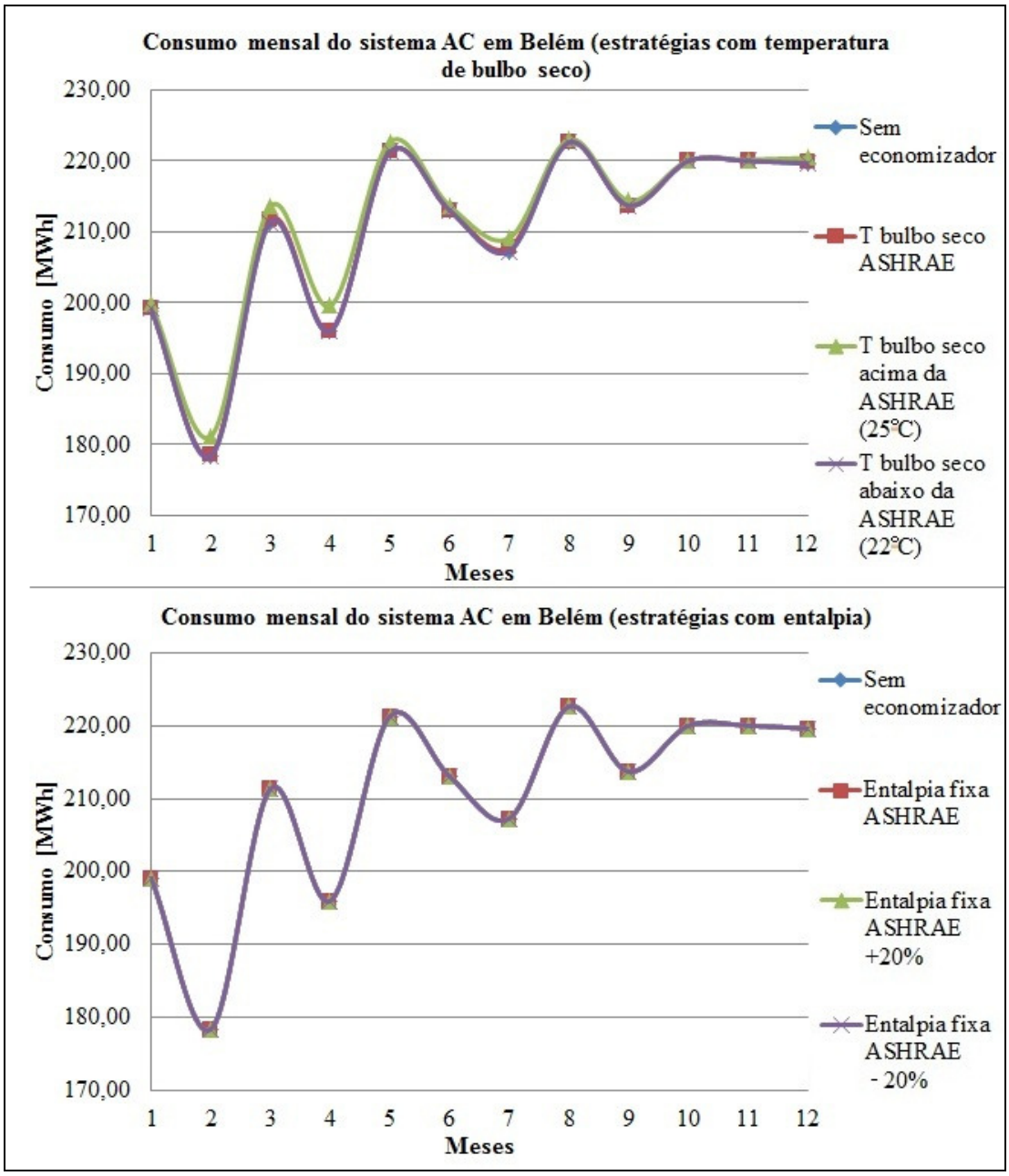
Análise de sensibilidade para a cidade de São Paulo:



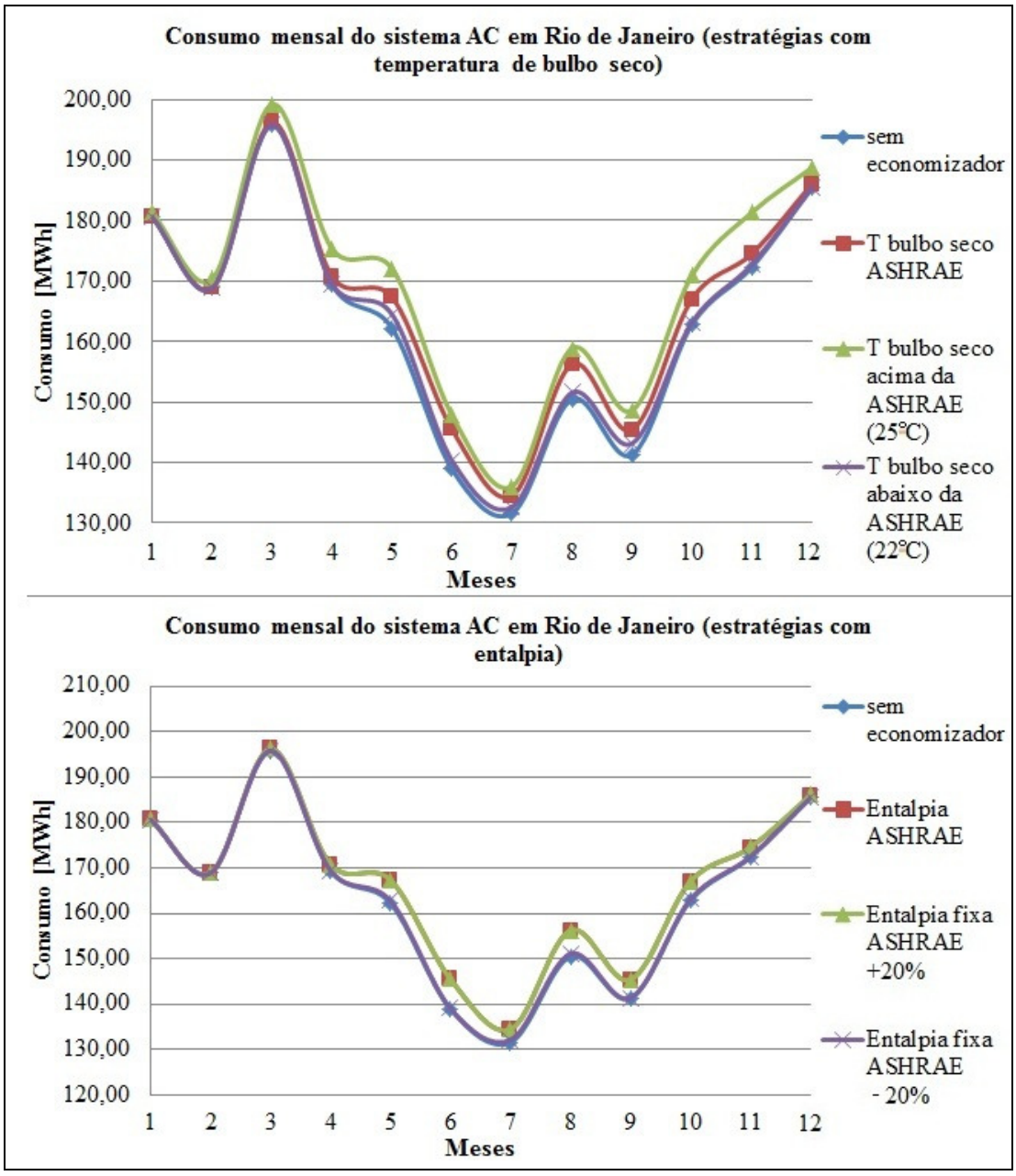
Análise de sensibilidade para a cidade de Brasília:



Análise de sensibilidade para a cidade de Belém:



Análise de sensibilidade para a cidade de Rio de Janeiro:



12. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 15220: Desempenho térmico de edificações. Parte 3: Zoneamento Bioclimático Brasileiro e Diretrizes Construtivas para Habitações Unifamiliares de Interesse Social. Rio de Janeiro, 2003, 28p.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 16401: Instalações de ar-condicionado - Sistemas centrais e unitários. Parte 1: Projetos das instalações. Rio de Janeiro, 2008, 60p.

Air conditioning Heating Refrigeration Newa. Disponível em: <httpwww.achrnews.comarticleskeeping-cool-with-outdoor-air-airside-economizers>. Acesso em: 30 ago. 2011.

AMERICAN SOCIETY OF HEATING, REFRIGERATING AND AIR-CONDITIONING ENGINEERS – ASHRAE. Disponível em: < http://www.ashrae.org/ >. Acesso em: 03 dez. 2011.

AMERICAN SOCIETY OF HEATING, REFRIGERATING AND AIR-CONDITIONING ENGINEERS – ASHRAE. ASHRAE 90.1: Energy Standard for Buildings Except Low-Rise Residential Buildings. Atlanta, 2007, 190p.

Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE). Disponível em: <http://www.ibge.gov.br/home/presidencia/noticias/noticia_visualiza.php?id_noticia=1830&id_pagina=1>. Acesso em: 08 dez. 2011.

INSTITUTO NACIONAL DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA. **O novo mercado de serviços de eficiência energética no Brasil**. Rio de Janeiro: INEE, 1997, 49p.

SEEM, J. E.; HOUSE, J. M. Development and evaluation of optimization-based air economizer strategies. **Elsevier Journal**, 2009, 15p.

STOECKER, W. F. **Refrigeração e ar condicionado**. São Paulo: McGraw-Hill, 1985. 481p.

WYLEN, G. J. V. **Fundamentos da termodinâmica clássica**. 4. ed. São Paulo: Edgard Blücher, 1995. 589 p.