USP

FACULDADE DE ARQUITETURA E URBANISMO
UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

Gisele Saveriano De Benedetto

Avaliação da aplicação do modo misto na redução da carga térmica em edifícios de escritórios nas cidades de São Paulo e Rio de Janeiro

Dissertação de mestrado

Orientador: Prof. Dr. Marcelo de Andrade Roméro

São Paulo

2007

GISELE SAVERIANO DE BENEDETTO

**Avaliação da aplicação do modo misto na redução da carga
térmica em edifícios de escritórios nas cidades de São Paulo e Rio
de Janeiro**

Dissertação apresentada à Faculdade de
Arquitetura e Urbanismo da Universidade de
São Paulo, para obtenção do título de Mestre
em Arquitetura e Urbanismo na área de
concentração Tecnologia da Arquitetura.

ORIENTADOR: PROF. DR. MARCELO DE ANDRADE ROMÉRO

São Paulo, 2007

AUTORIZO A REPRODUÇÃO E DIVULGAÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTE TRABALHO, POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO, PARA FINS DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE.

ASSINATURA:

E-MAIL: giseledb@hotmail.com

De Benedetto, Gisele Saveriano

D286a Avaliação da aplicação do modo misto na redução da carga térmica em edifícios de escritórios nas cidades de São Paulo e Rio de Janeiro / Gisele Saveriano De Benedetto. São Paulo, 2007. 203 p. : il.

Dissertação (Mestrado – Área de Concentração: Tecnologia da Arquitetura) – FAUUSP.

Orientador: Marcelo de Andrade Roméro

1. Conforto térmico. 2. Edifícios de escritórios. 3. Simulação.

I. Título.

CDU 697

Dedico este trabalho às pessoas mais importantes da minha vida, os grandes responsáveis pela minha formação: meus pais, Maria Inez e José, minha irmã, Monique, e especialmente ao meu marido, Eduardo, que me apoiou e incentivou durante as fases mais difíceis desse percurso.

Agradecimentos

Agradeço o apoio recebido do Núcleo de Informações em Saúde Ambiental da Universidade de São Paulo (NISAM), na pessoa do professor Dr. Arlindo Philippi Jr, no período de março a dezembro de 2004.

Ao professor Dr. Marcelo de Andrade Roméro, orientador desta dissertação de mestrado, pela confiança depositada em mim, pelo apoio e incentivo desde a graduação até a conclusão desta pesquisa.

Ao professor Dr. Alberto Hernandez Neto pela disponibilidade e dedicação no curso do EnergyPlus em janeiro de 2006.

Ao laboratório de Micrometeorologia e MASTER do IAG/USP pelo fornecimento de dados fundamentais para o desenvolvimento do banco de clima da cidade de São Paulo.

À professora Dra. Maria Akutsu pela rica participação na banca de qualificação e grande interesse demonstrado pela pesquisa.

Às amigas e professoras Dra. Joana Gonçalves, Dra. Denise Duarte e Dra. Márcia Alucci pelas discussões sobre o tema, determinantes em algumas etapas da pesquisa.

Aos amigos: Alessandra Prata, Andréa Bazarian, Cecília Mattos Mueller, Daniela Laudares, Mônica Marcondes, Rafael Brandão e Rita Bueno Buoro pelas discussões sobre o tema e apoio moral, mesmo a distância.

Aos professores e amigos do LABAUT, pelo agradável convívio, discussões pertinentes sobre arquitetura e conforto resultando em rica troca de experiência e grande incentivo durante toda pesquisa.

Ao meu querido marido pela paciência e companheirismo, estando sempre ao meu lado durante a elaboração deste trabalho.

Às amigas Silvana, Lucia e Viviane pela grande colaboração, sempre.

À amiga Ana Paula Giuffrida Silva pela criação da capa.

Aos amigos da Cia. de Petróleo Ipiranga pelo apoio e incentivo.

A todos que de alguma maneira colaboraram com discussões, sugestões e incentivos para o desenvolvimento desta pesquisa.

Resumo

Diante das atuais questões ambientais, o uso eficiente da energia é uma premissa em todos os setores de atividades. Sabe-se que as edificações são grandes consumidores de energia e boa parcela desse consumo se dá em sistemas de condicionamento artificial. São três os principais fatores que atuam no balanço térmico e influenciam esse consumo: arquitetura, ocupação e clima. A arquitetura atua como intermediária nesse balanço térmico, podendo ajudar ou prejudicar as condições internas.

Este trabalho estuda o desempenho térmico e energético dos edifícios de escritórios em São Paulo e Rio de Janeiro, cidades que apresentam condições extremas de calor durante o verão e até em outras estações do ano. O tipo de ocupação e a atividade realizada em edifícios de escritórios nos dias de hoje criam, por si sós, cargas térmicas elevadas que dificultam ainda mais a obtenção de conforto. Este trabalho parte do pressuposto de que existem soluções arquitetônicas de edifícios de escritórios na cidade de São Paulo capazes de garantir conforto térmico aos usuários durante parte do período de ocupação sem uso de condicionamento artificial, porém acreditar que é possível obter conforto apenas com sistemas passivos durante o ano todo nos atuais edifícios de escritórios das cidades de São Paulo e Rio de Janeiro é ilusão.

Diante desse desafio, o sistema de modo misto de condicionamento ambiental une as vantagens do sistema ativo às do passivo, operando com sistemas naturais sempre que possível, reduzindo o consumo de energia e acionando o sistema ativo em situações fora das condições de conforto. Utilizar o sistema de modo misto não significa abrir as janelas de qualquer edifício no inverno. O edifício deve estar preparado para o sistema desde as etapas de projeto. Com base nesse pensamento, a pesquisa analisa o desempenho térmico e energético de três tipologias arquitetônicas operando com o sistema de modo misto em São Paulo e investiga o desempenho das mesmas tipologias sob as condições climáticas da cidade do Rio de Janeiro.

As avaliações de desempenho térmico e energético das tipologias são feitas por meio de análises e comparações de resultados de simulações computacionais com o programa TAS (9.0.7 maio, 2005).

Palavras-chave: arquitetura, modo misto, conforto térmico, desempenho térmico e energético, eficiência energética, simulação computacional.

Abstract

Considering current environmental issues, all sectors of activities are premised on the efficient use of energy. It's known that constructions are great energy consumers and part of this consumption is given by artificial conditioning systems. There're three main factors in thermal balance that influences this consumption: architecture, occupation and climate. The architecture acts as intermediate in this thermal balance, being able to help or harm internal conditions.

This research treats office building thermal and energy performance in São Paulo and Rio de Janeiro, cities with high temperatures not only during the summer but also in other seasons. Nowadays, offices occupation and activity are themselves great heat producers, what makes thermal comfort even more difficult to achieve. This project considers that there are office building design solutions able to produce thermal environmental conditions acceptable to a majority of occupants, without air-conditioning system, during part of the working period, in São Paulo. However, believing the possibility of achieving comfort conditions in actual office buildings, only with passive cooling strategies, during all year, in the cities of São Paulo and Rio de Janeiro, is an illusion.

Facing this challenge, mixed mode system combines the best of air-conditioning and natural ventilation, operating with natural strategies whenever it's possible, reducing energy consumption and using the air-conditioning system only when thermal environmental conditions are not acceptable. Mixed mode operation does not mean to open any building windows during the winter. The building must have been designed for the mixed mode system since its first projects. This research is based on this thought and thermal analysis and energy performance of three architectural design buildings operating with mixed mode system in São Paulo and investigates the performance of these building types under climate conditions of Rio de Janeiro city. The thermal and energy performance evaluations of the building types are based on the analysis and comparison of computer simulations results, with the software TAS (9.0.7 May, 2005).

Key-words: architecture, mixed mode, thermal comfort, thermal and energy performance, energy efficiency, computer simulation.

Lista de figuras

Figura 1 – Edifício Commerzbank HQ, Frankfurt, Alemanha.....	4
Figura 2 – Edifício Swiss Re, Londres, Inglaterra	4
Figura 3 – Wainwright Building, Saint Louis, Estados Unidos	17
Figura 4 – Planta baixa em “U” do Wainwright Building, Saint Louis, Estados Unidos.....	17
Figura 5 – Larkin Administration Building, 1906	18
Figura 6 – Milam Building, San Antonio, Texas.....	19
Figura 7 – Planta baixa do Milam Building (1929) e distribuição do ar-condicionado	19
Figura 8 – Commonwealth Building, Portland, EUA	21
Figura 9 – Edifício sede das Nações Unidas, Nova Iorque, EUA	22
Figura 10 – Edifício Lever House, Nova Iorque, EUA	23
Figura 11 – Átrio do edifício Gateway Two, Basingstoke, Inglaterra	25
Figura 12 – Building Research Establishment’s Office (BRE), Watford, Inglaterra	28
Figura 13 – Sistema de ventilação natural no Building Research Establishment’s Office (BRE), Watford, Inglaterra	29
Figura 14 – Localização geográfica das pesquisas realizadas para a formulação do modelo adaptativo	73
Figura 15 – Os três componentes de adaptação às condições climáticas internas: termorregulação, comportamento e expectativa.....	74
Figura 16 – Comparação entre o modelo adaptativo e o PMV, aplicados em edifícios naturalmente ventilados	75
Figura 17 – Modelo geométrico definido por Dilonardo (2001).....	87
Figura 18 – Planta baixa, M1 e M2	88
Figura 19 – Corte e fachada esquemáticos, M1 (WWR=100%)	88

Figura 20 – Fachada esquemática, M2 (WWR=50%)	89
Figura 21 – Corte esquemático das fachadas norte e sul, M2, com elementos de proteção solar externos (<i>brise soleil</i>).....	89
Figura 22 – Corte esquemático das fachadas leste e oeste, M2, com elementos de proteção solar externos (<i>brise soleil</i>).....	90
Figura 23 – Detalhe esquemático do piso elevado/laje/forro, M1 e M2	90
Figura 24 – Imagem tridimensional no programa de simulação TAS, M1	92
Figura 25 – Imagem tridimensional no programa de simulação TAS, M2	92
Figura 26 – Variação de carga térmica de acordo com termostato do sistema de ar-condicionado, M1, SP e RJ	106
Figura 27 – Balanço horário de janeiro, zona norte com 10% de insatisfeitos, simulação 7	114
Figura 28 – Balanço horário de setembro, zona norte com 10% de insatisfeitos, simulação 7	115
Figura 29 – Balanço horário de maio, zona norte com 10% de insatisfeitos, simulação 8	120
Figura 30 – Balanço horário de janeiro, zona norte com 10% de insatisfeitos, simulação 11	130
Figura 31 – Balanço horário de setembro, zona norte com 10% de insatisfeitos, simulação 11	131
Figura 32 – Balanço horário de maio, zona norte com 10% de insatisfeitos, simulação 12	135
Figura 33 – Planta baixa, M3	138
Figura 34 – Corte esquemático da fachada, M3 (WWR=50%).....	138
Figura 35 – Corte esquemático do pavimento tipo, M3	139
Figura 36 – Elevação esquemática do pavimento tipo, M3.....	139
Figura 37 – Opções de fachada com WWR=50% e sistema de ventilação, M3	139
Figura 38 – Corte esquemático das fachadas norte e sul, M3, com elementos de proteção solar externos (<i>brise soleil</i>).....	140

Figura 39 – Corte esquemático das fachadas leste e oeste, M3, com elementos de proteção solar externos (<i>brise soleil</i>)	140
Figura 40 – Detalhe esquemático do piso elevado/laje/forro, M3	141
Figura 41 – Imagem tridimensional no programa de simulação TAS, M3.....	142
Figura 42 – Imagem tridimensional no programa de simulação TAS, M3.....	142
Figura 43 – Balanço horário de janeiro, zona noroeste com 10% de insatisfeitos, simulação 15.....	153
Figura 44 – Balanço horário de setembro, zona noroeste com 10% de insatisfeitos, simulação 15.....	154
Figura 45 – Simulação 15: balanço horário do mês de agosto, zona SE, M3, SP	158
Figura 46 – Balanço horário de janeiro, zona noroeste com 10% de insatisfeitos, simulação 16.....	162
Figura 47 – Balanço horário de setembro, zona noroeste com 10% de insatisfeitos, simulação 16.....	162

Lista de gráficos

Gráfico 1 – Composição setorial do consumo de eletricidade, em 2004	15
Gráfico 2 – Radiação global ao longo do ano de referência, RJ	43
Gráfico 3 – Radiação difusa ao longo do ano de referência, RJ	44
Gráfico 4 – TBS ao longo do ano de referência, RJ	44
Gráfico 5 – UR ao longo do ano de referência, RJ.....	44
Gráfico 6 – TBS ao longo do mês crítico de verão (fevereiro/2003), RJ	46
Gráfico 7 – UR ao longo do mês crítico de verão (fevereiro/2003), RJ.....	46
Gráfico 8 – TBS ao longo do dia de projeto de verão (9/2/2003), RJ.....	47
Gráfico 9 – UR ao longo do dia de projeto de verão (9/2/2003), RJ	47
Gráfico 10 – TBS ao longo do mês crítico de inverno (julho/2004), RJ	48
Gráfico 11 – UR ao longo do mês crítico de inverno (julho/2004), RJ.....	48
Gráfico 12 – TBS ao longo do dia crítico de inverno (19/7/2004), RJ	49
Gráfico 13 – UR ao longo do dia crítico de inverno (19/7/2004), RJ.....	49
Gráfico 14 – TBS máximas e mínimas diárias, de 04/07/1996 a 02/02/2006, SP	51
Gráfico 15 – Radiação global ao longo de ano de referência, SP.....	52
Gráfico 16 – Radiação difusa ao longo de ano de referência, SP.....	53
Gráfico 17 – TBS ao longo de ano de referência, SP	54
Gráfico 18 – UR ao longo de ano de referência, SP	54
Gráfico 19 – TBS ao longo do mês crítico de verão (fevereiro/2003), SP	56
Gráfico 20 – UR ao longo do mês crítico de verão (fevereiro/2003), SP.....	56
Gráfico 21 – TBS ao longo do dia crítico de verão (11/2/2003), SP	57
Gráfico 22 – UR ao longo do dia crítico de verão (11/2/2003), SP	57
Gráfico 23 – TBS ao longo do mês crítico de inverno (julho/2004), SP	58

Gráfico 24 – UR ao longo do mês crítico de inverno (julho/2004), SP	58
Gráfico 25 – TBS ao longo do dia crítico de inverno (22/7/2004), SP	59
Gráfico 26 – UR ao longo do dia crítico de inverno (22/7/2004), SP	59
Gráfico 27 – TBS ao longo do mês crítico de verão (fevereiro/2003), SP e RJ	60
Gráfico 28 – UR ao longo do mês crítico de verão (fevereiro/2003), SP e RJ	61
Gráfico 29 – TBS ao longo do dia crítico de verão, RJ e SP	61
Gráfico 30 – UR ao longo do dia crítico de verão, RJ e SP	62
Gráfico 31 – TBS ao longo do mês crítico de inverno (julho/2004), RJ e SP...	63
Gráfico 32 – UR ao longo do mês crítico de inverno (julho/004), RJ e SP	63
Gráfico 33 – TBS ao longo do dia crítico de inverno, RJ e SP	64
Gráfico 34 – UR ao longo do dia crítico de inverno, RJ e SP	64
Gráfico 35 – Variação da Tc ao longo do ano, segundo o modelo adaptativo, SP	79
Gráfico 36 – TBS ao longo do ano de referência de projeto x Tc segundo o modelo adaptativo – RJ.....	80
Gráfico 37 – TBS ao longo do ano de referência de projeto x TC segundo o modelo adaptativo – SP	81
Gráfico 38 – Simulação 1: cargas térmicas (sensível + latente) mensais por zona, M1, SP.....	97
Gráfico 39 – Simulação 1: ganhos e perdas térmicas, dia crítico de verão, M1, SP, zona norte.....	98
Gráfico 40 – Simulação 1: ganhos e perdas térmicas, dia crítico de verão, M1, SP, zona sul	99
Gráfico 41 – Simulação 1: ganhos e perdas térmicas, dia crítico de verão, M1, SP, zona leste.....	99
Gráfico 42 – Simulação 1: ganhos e perdas térmicas, dia crítico de verão, M1, SP, zona oeste.....	100
Gráfico 43 – Simulação 2: cargas térmicas (sensível + latente) mensais por zona, M1, RJ	101

Gráfico 44 – Simulação 2: ganhos e perdas térmicas, dia crítico de verão, M1, RJ, zona norte.....	102
Gráfico 45 – Simulação 3: cargas térmicas (sensível + latente) mensais por zona, M1, SP	103
Gráfico 46 – Simulação 3: ganhos e perdas térmicas, dia crítico de verão, M1, SP, zona norte	104
Gráfico 47 – Simulação 4: cargas térmicas (sensível + latente) mensais por zona, M1, RJ.....	104
Gráfico 48 – Simulação 4: ganhos e perdas térmicas, dia crítico de verão, M1, RJ	105
Gráfico 49 – Cargas térmicas totais/anuais do pavimento tipo, resultantes das simulações 1 a 4	106
Gráfico 50 – Simulação 5: desempenho térmico, fachada selada sem ar-condicionado, dia crítico de verão e inverno, M1, SP.....	108
Gráfico 51 – Simulação 6: desempenho térmico, fachada selada sem ar-condicionado, dia crítico de verão e inverno, M1, RJ	108
Gráfico 52 – Simulação 7: TBS interna com ventilação natural 24h, dia crítico de verão e inverno, M1+abertura, SP	110
Gráfico 53 – Simulação 8: TBS interna com ventilação natural 24h, dia crítico de verão e inverno, M1+abertura, RJ	110
Gráfico 54 – Simulação 7: configuração do sistema de modo misto ao longo do ano, M1+abertura, SP	116
Gráfico 55 – Simulação 7: carga térmica para M1 com sistema totalmente ativo e M1+abertura com modo misto, SP.....	116
Gráfico 56 – Simulação 8: configuração do sistema de modo misto ao longo do ano, M1+abertura, RJ	120
Gráfico 57 – Simulação 8: carga térmica do ar-condicionado para M1 com sistema totalmente ativo e M1+abertura com modo misto, RJ.....	121
Gráfico 58 – Simulação 9: cargas térmicas (sensível + latente) mensais por zona, M2, SP	124
Gráfico 59 – Simulação 9: ganhos e perdas térmicas, dia crítico de verão, M2, SP.....	125

Gráfico 60 – Simulação 10: cargas térmicas (sensível + latente) mensais por zona, M2, RJ	126
Gráfico 61 – Simulação 10: ganhos e perdas térmicas, dia crítico de verão, M2, RJ.....	127
Gráfico 62 – Simulação 11: configuração do sistema de modo misto ao longo do ano, M2+abertura, SP	131
Gráfico 63 – Simulação 11: carga térmica do ar-condicionado para M2 com sistema totalmente ativo e M2+abertura com modo misto, SP.....	132
Gráfico 64 – Simulação 12: configuração do sistema de modo misto ao longo do ano, M2+abertura, RJ	135
Gráfico 65 – Simulação 12: carga térmica do ar-condicionado para M2 com sistema totalmente ativo e M2+abertura com modo misto, RJ	136
Gráfico 66 – Simulação 13: cargas térmicas (sensível + latente) mensais por zona, M3, SP	147
Gráfico 67 – Simulação 13: ganhos e perdas térmicas, dia crítico de verão, M3, SP	148
Gráfico 68 – Simulação 14: cargas térmicas (sensível + latente) mensais por zona, M3, RJ	149
Gráfico 69 – Simulação 14: ganhos e perdas térmicas, dia crítico de verão, M3, RJ.....	150
Gráfico 70 – Simulação 15: configuração do sistema de modo misto ao longo do ano, M3+abertura, SP	155
Gráfico 71 – Simulação 15: carga térmica do ar-condicionado para M3 com sistema totalmente ativo e M3+abertura com modo misto, SP.....	155
Gráfico 72 – Simulação 15, 80% satisfeitos: configuração do sistema de modo misto ao longo do ano, M3+abertura, SP	156
Gráfico 73 – Simulação 15, 80% satisfeitos: carga térmica do ar-condicionado para M3 com sistema totalmente ativo e M3+abertura com modo misto, SP.	157
Gráfico 74 – Simulação 15: parâmetros de temperatura e umidade, internas e externas, nos dias 21 a 24 de agosto, M3, SP	158
Gráfico 75 – Simulação 16: configuração do sistema de modo misto ao longo do ano, M3+abertura, RJ	163

Gráfico 76 – Simulação 16: carga térmica AC para M3 com sistema totalmente ativo e M3+abertura com modo misto, RJ **163**

Gráfico 77 – Simulação 16, 80% satisfeitos: configuração do sistema de modo misto ao longo do ano, M3+abertura, RJ..... **164**

Gráfico 78 – Simulação 16, 80% satisfeitos: carga térmica do ar-condicionado para M3 com sistema totalmente ativo e M3+abertura com modo misto, RJ. **165**

Lista de tabelas

Tabela 1 – Arquivos climáticos das cidades de São Paulo e Rio de Janeiro.....	37
Tabela 2 – Frequência de ocorrência de direção e velocidade do vento ao longo do ano de referência, RJ	45
Tabela 3 – Frequência de ocorrência de direção e velocidade de vento ao longo do ano de referência, SP	55
Tabela 4 – Médias das temperaturas máximas e mínimas mensais, SP e RJ (°C)	60
Tabela 5 – TBS máximo e mínimo dia de referência de projeto de verão, RJ e SP	62
Tabela 6 – Valores máximos e mínimos do dia de referência de projeto, de inverno, RJ e SP	65
Tabela 7 – Parâmetros físicos aceitáveis em edifícios de escritórios, no inverno e verão, para atividades leves.....	70
Tabela 8 – Limites de variação de temperatura aceitáveis	72
Tabela 9 – Faixas de Tc para segundo o modelo adaptativo, SP e RJ	79
Tabela 10 – Dados de entrada sobre os pavimentos do modelo simulado.....	91
Tabela 11 – Parâmetros fixos de simulação – escritórios e <i>core</i> central	93
Tabela 12 – Descrição das simulações 1 a 4, M1	96
Tabela 13 – Simulação 1: carga térmica total anual, M1, SP, AC (24°C 50%)	97
Tabela 14 – Simulação 2: carga térmica total anual, M1, RJ, AC (24°C 50%)	101
Tabela 15 – Simulação 3: carga térmica total anual, M1, SP, AC (26°C 65%)	103
Tabela 16 – Simulação 4: carga térmica total anual, M1, RJ, AC (26°C 65%)	105
Tabela 17 – Descrição das simulações 5 a 8, M1	107

Tabela 18 – Porcentagem de horas em conforto na zona norte, simulação 7, 20% de insatisfeitos	112
Tabela 19 – Porcentagem de horas em conforto na zona norte, simulação 7, 10% de insatisfeitos	112
Tabela 20 – Porcentagem de horas em conforto na zona sul, simulação 7, 20% de insatisfeitos	113
Tabela 21 – Porcentagem de horas em conforto na zona sul, simulação 7, 10% de insatisfeitos	113
Tabela 22 – Porcentagem de horas em conforto na zona leste, simulação 7, 20% de insatisfeitos	113
Tabela 23 – Porcentagem de horas em conforto na zona leste, simulação 7, 10% de insatisfeitos	113
Tabela 24 – Porcentagem de horas em conforto na zona oeste, simulação 7, 20% de insatisfeitos	114
Tabela 25 – Porcentagem de horas em conforto na zona oeste, simulação 7, 10% de insatisfeitos	114
Tabela 26 – Simulação 7: carga térmica total anual, M1, SP, modo misto .	117
Tabela 27 – Porcentagem de horas em conforto na zona norte, simulação 8, 20% de insatisfeitos	118
Tabela 28 – Porcentagem de horas em conforto na zona norte, simulação 8, 10% de insatisfeitos	118
Tabela 29 – Porcentagem de horas em conforto na zona sul, simulação 8, 20% de insatisfeitos	118
Tabela 30 – Porcentagem de horas em conforto na zona sul, simulação 8, 10% de insatisfeitos	118
Tabela 31 – Porcentagem de horas em conforto na zona leste, simulação 8, 20% de insatisfeitos	119
Tabela 32 – Porcentagem de horas em conforto na zona leste, simulação 8, 10% de insatisfeitos	119
Tabela 33 – Porcentagem de horas em conforto na zona oeste, simulação 8, 20% de insatisfeitos	119

Tabela 34 – Porcentagem de horas em conforto na zona oeste, simulação 8, 10% de insatisfeitos	119
Tabela 35 – Simulação 8: carga térmica total anual, M1, RJ, modo misto ..	121
Tabela 36 – Descrição das simulações da segunda etapa, numeradas de 9 a 12	122
Tabela 37 – Simulação 9: carga térmica total anual, M2, SP, AC (26°C 65%)	124
Tabela 38 – Simulação 10: carga térmica total anual, M2, RJ, AC (26°C 65%)	126
Tabela 39 – Porcentagem de horas em conforto na zona norte, simulação 11, 20% de insatisfeitos	128
Tabela 40 – Porcentagem de horas em conforto na zona norte, simulação 11, 10% de insatisfeitos	128
Tabela 41 – Porcentagem de horas em conforto na zona sul, simulação 11, 20% de insatisfeitos	128
Tabela 42 – Porcentagem de horas em conforto na zona sul, simulação 11, 10% de insatisfeitos	128
Tabela 43 – Porcentagem de horas em conforto na zona leste, simulação 11, 20% de insatisfeitos	129
Tabela 44 – Porcentagem de horas em conforto na zona leste, simulação 11, 10% de insatisfeitos	129
Tabela 45 – Porcentagem de horas em conforto na zona oeste, simulação 11, 20% de insatisfeitos	129
Tabela 46 – Porcentagem de horas em conforto na zona oeste, simulação 11, 10% de insatisfeitos	129
Tabela 47 – Simulação 11: carga térmica total anual, M2, SP, modo misto	132
Tabela 48 – Porcentagem de horas em conforto na zona norte, simulação 12, 20% de insatisfeitos	133
Tabela 49 – Porcentagem de horas em conforto na zona norte, simulação 12, 10% de insatisfeitos	133

Tabela 50 – Porcentagem de horas em conforto na zona sul, simulação 12, 20% de insatisfeitos	133
Tabela 51 – Porcentagem de horas em conforto na zona sul, simulação 12, 10% de insatisfeitos	133
Tabela 52 – Porcentagem de horas em conforto na zona leste, simulação 12, 20% de insatisfeitos	134
Tabela 53 – Porcentagem de horas em conforto na zona leste, simulação 12, 10% de insatisfeitos	134
Tabela 54 – Porcentagem de horas em conforto na zona oeste, simulação 12, 20% de insatisfeitos	134
Tabela 55 – Porcentagem de horas em conforto na zona oeste, simulação 12, 10% de insatisfeitos	134
Tabela 56 – Simulação 12: carga térmica total anual, M2, RJ, modo misto	136
Tabela 57 – Dados de entrada sobre os pavimentos do modelo simulado ...	141
Tabela 58 – Parâmetros fixos de simulação – escritórios e <i>hall</i>	143
Tabela 59 – Descrição das simulações da terceira etapa, numeradas de 13 a 16	146
Tabela 60 – Simulação 13: carga térmica total anual, M3, SP, AC (26°C 65%)	147
Tabela 61 – Simulação 14: carga térmica total anual, M3, RJ, AC (26°C 65%)	149
Tabela 62 – Porcentagem de horas em conforto na zona noroeste, simulação 15, 20% de insatisfeitos	151
Tabela 63 – Porcentagem de horas em conforto na zona noroeste, simulação 15, 10% de insatisfeitos	151
Tabela 64 – Porcentagem de horas em conforto na zona nordeste, simulação 15, 20% de insatisfeitos	151
Tabela 65 – Porcentagem de horas em conforto na zona nordeste, simulação 15, 10% de insatisfeitos	151
Tabela 66 – Porcentagem de horas em conforto na zona sudoeste, simulação 15, 20% de insatisfeitos	152

Tabela 67 – Porcentagem de horas em conforto na zona sudoeste, simulação 15, 10% de insatisfeitos	152
Tabela 68 – Porcentagem de horas em conforto na zona sudeste, simulação 15, 20% de insatisfeitos	152
Tabela 69 – Porcentagem de horas em conforto na zona sudeste, simulação 15, 10% de insatisfeitos	152
Tabela 70 – Porcentagem de horas em conforto na zona NO, 10% de insatisfeitos, com abertura para ventilação natural 24h equivalente a 8,55% da fachada, SP.....	154
Tabela 71 – Simulação 15: carga térmica total anual, M3, SP, modo misto, 90% satisfeitos.....	155
Tabela 72 – Simulação 15: carga térmica total anual, M3, SP, modo misto, 80% satisfeitos	157
Tabela 73 – Simulação 15: parâmetros de temperatura e umidade nos dias 20 a 24 de agosto, M3, SP.....	159
Tabela 74 – Porcentagem de horas em conforto na zona noroeste, simulação 16, 20% de insatisfeitos	160
Tabela 75 – Porcentagem de horas em conforto na zona noroeste, simulação 16, considerando 10% de pessoas insatisfeitas	160
Tabela 76 – Porcentagem de horas em conforto na zona nordeste, simulação 16, 20% de insatisfeitos	160
Tabela 77 – Porcentagem de horas em conforto na zona nordeste, simulação 16, 10% de insatisfeitos	160
Tabela 78 – Porcentagem de horas em conforto na zona sudoeste, simulação 16, 20% de insatisfeitos	161
Tabela 79 – Porcentagem de horas em conforto na zona sudoeste, simulação 16, 10% de insatisfeitos	161
Tabela 80 – Porcentagem de horas em conforto na zona sudeste, simulação 16, 20% de insatisfeitos	161
Tabela 81 – Porcentagem de horas em conforto na zona sudeste, simulação 16, 20% de insatisfeitos	161

Tabela 82 – Simulação 16: carga térmica total anual, M3, RJ, modo misto, 90% satisfeitos **164**

Tabela 83 – Simulação 16: carga térmica total anual, M3, RJ, modo misto, 80% satisfeitos **165**

Tabela 84 – Carga térmica total anual resultante das simulações de AC e MM **169**

Abreviaturas e siglas

ABRAVA – Associação Brasileira de Refrigeração, Ar-Condicionado, Ventilação e Aquecimento

AC – sistema de ar-condicionado

BREEAM – Building Research Establishment Environmental Assessment Method

CASBEE – Comprehensive Assessment System for Building Environmental Efficiency

CTA – Centro Técnico Aeroespacial

DOE – United States Department of Energy

EoF – Energy Efficient Office of the Future

GBTool — Green Building Challenge

HOE – La Haute Qualité Environnementale

IAC – Instituto de Agronomia de Campinas

IAE – Instituto de Aeronáutica e Espaço

IAG – Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas

IBF – Instituto Brasileiro do Frio

IBUTG – Índice de Bulbo Úmido Termômetro de Globo

IEA – International Energy Agency

INMET – Instituto Nacional de Meteorologia

IWEC – International Weather for Energy Calculations

LABAUT – Laboratório de Conforto Ambiental e Eficiência Energética do Departamento de Tecnologia da Faculdade de Arquitetura e Urbanismo da Universidade de São Paulo

LabEEE – Laboratório de Eficiência Energética em Edificações, Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina

LEED – Leadership in Energy and Environmental Design

MM – sistema de modo misto

NABERS – National Australian Building Environmental Rating Scheme

Str – fator solar

SWERA – Solar and Wind Energy Resource Assessment

TBS – temperatura de bulbo seco do ar

TBU – temperatura de bulbo úmido

Tc – temperatura de conforto

To – temperatura operativa

TMY – Test Meteorological Year

TRY – Test Reference Year (Ano Climático de Referência)

U – coeficiente global de transmissão térmica

UR – umidade relativa do ar

USP – Universidade de São Paulo

WYEC – Weather Years for Energy Calculations

Sumário

Agradecimentos	V
Resumo	VII
Abstract	VIII
Lista de figuras	IX
Lista de gráficos	XII
Lista de tabelas	XVII
Abreviaturas e siglas	XXIII
Sumário.....	XXV
Introdução	1
Justificativa e colocação do problema.....	1
Objeto de estudo	6
Objetivo da dissertação	6
Metodologia	7
Ferramenta: TAS (9.0.7 maio, 2005)	10
1 Edifícios de escritórios e sistemas de condicionamento ambiental	13
1.1 Arquitetura dos edifícios de escritórios na cidade de São Paulo	13
1.2 Consumo de energia da edificação	14
1.3 Sistemas de condicionamento ambiental	16
1.4 Ar-condicionado	20
1.5 Sistemas passivos e modo misto	25
2 Análise de clima.....	31
2.1 Considerações gerais	31
2.2 Levantamento de dados – Alternativas analisadas para as cidades de São Paulo e Rio de Janeiro.....	33
2.3 Definição dos arquivos de clima para simulações no Rio de Janeiro	40
2.4 Arquivo de Clima LABAUT.....	41

2.4.1	Ano climático de referência.....	43
2.4.2	Mês crítico de verão	46
2.4.3	Dia de referência de projeto de verão	47
2.4.4	Mês crítico de inverno.....	48
2.4.5	Dia de referência de projeto de inverno.....	49
2.5	Definição dos arquivos de clima para simulações – São Paulo	50
2.5.1	Coleta de dados	50
2.5.2	Análise dos dados	50
2.5.3	Análise do período.....	51
2.5.4	Ano climático de referência.....	52
2.5.5	Mês crítico de verão	56
2.5.6	Dia de referência de projeto de verão	57
2.5.7	Mês crítico de inverno.....	58
2.5.8	Dia de referência de projeto de inverno.....	59
2.6	Análise comparativa dos dados climáticos	60
2.6.1	Ano de referência de projeto: São Paulo e Rio de Janeiro	60
2.6.2	Mês crítico de verão: São Paulo e Rio de Janeiro.....	60
2.6.3	Dia de referência de projeto de verão: São Paulo e Rio de Janeiro	61
2.6.4	Mês crítico de inverno: São Paulo e Rio de Janeiro	62
2.6.5	Dia de referência de projeto de inverno: São Paulo e Rio de Janeiro	64
3	Parâmetros de conforto.....	67
3.1	Normas técnicas nacionais e internacionais	68
3.1.1	Ambientes condicionados artificialmente.....	68
3.1.2	Ambientes condicionados naturalmente.....	70
3.2	Modelo adaptativo	72

3.3	Parâmetros de conforto para o modo misto	76
3.3.1	Períodos de condicionamento natural	76
3.3.2	Períodos de condicionamento artificial	82
3.3.3	Configuração do modo misto	82
4	Simulações nos modelos	85
4.1	Modelo geométrico M1 e M2	86
4.2	Parâmetros físicos de simulação das etapas 1 e 2	90
4.3	Primeira etapa de simulações (M1)	96
4.3.1	Configuração das simulações 1 a 4	96
4.3.2	Simulação 1: M1 – SP – AC (24°C, 50%)	97
4.3.3	Simulação 2: M1 – RJ – AC (24°C, 50%)	100
4.3.4	Simulação 3: M1 – SP – AC (26°C 65%)	102
4.3.5	Simulação 4: M1 – RJ – AC (26°C, 65%)	104
4.3.6	Análises comparativas entre as simulações 1 a 4	106
4.3.7	Configuração das simulações 5 a 8	107
4.3.8	Simulações 5 e 6: M1 – SP/RJ – vidros fixos sem AC	107
4.3.9	Simulações 7 e 8: M1 – SP/RJ – ventilação natural	109
4.3.10	Análises comparativas entre as simulações 5 a 8	111
4.3.11	Simulação 7: M1 – SP – ventilação, arquivo de clima anual	112
4.3.12	Possibilidade de utilização do modo misto, M1 – SP	115
4.3.13	Simulação 8: M1 – RJ – ventilação, arquivo de clima anual	117
4.3.14	Possibilidade de utilização do modo misto, M1 – RJ	119
4.4	Segunda etapa de simulações (M2)	122
4.4.1	Configuração das simulações 9 a 12	122
4.4.2	Simulação 9: M2 – SP – AC (26°C 65%)	123
4.4.3	Simulação 10: M2 – RJ – AC (26°C 65%)	125

4.4.4	Simulação 11: M2 – SP – ventilação natural.....	127
4.4.5	Possibilidade de utilização do modo misto, M2 – SP.....	129
4.4.6	Simulação 12: M2 – RJ – ventilação natural	132
4.4.7	Possibilidade de utilização do modo misto, M2 - RJ	134
4.5	Modelo geométrico M3	137
4.6	Parâmetros físicos de simulação da etapa 3.....	141
4.7	Terceira etapa de simulações (M3)	146
4.7.1	Simulação 13: M3 – SP – AC (26°C 65%)	146
4.7.2	Simulação 14: M3 – RJ – AC (26°C 65%)	148
4.7.3	Simulação 15: M3 – SP – ventilação natural.....	150
4.7.4	Possibilidade de utilização do modo misto, M3 - SP	152
4.7.5	Simulação 16: M3 – RJ – ventilação natural	159
4.7.6	Possibilidade de utilização do modo misto, M3 - RJ	161
CONSIDERAÇÕES FINAIS.....		167
	Modelo 1	167
	Modelo 2	167
	Modelo 3.....	168
	Modo misto	168
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....		171

Introdução

Justificativa e colocação do problema

Questões relacionadas ao meio ambiente estão constantemente em pauta em todos os meios de comunicação, informando e alertando sobre ações ou problemas relacionados à escassez da água, desmatamento, aquecimento global, crise energética etc. Trata-se de questões de interesse público e já são discutidas não só nos gabinetes do governo e em organizações não-governamentais (ONGs), mas também em instituições educacionais, nas grandes corporações e nas ruas. O rastro deixado pelo desenvolvimento é visível e suas consequências já estão sendo contabilizadas. O que pode ser feito é planejar e agir com consciência para mudar o curso da história do meio ambiente.

Energia é um dos itens importantes do grande tema que envolve impactos ambientais e econômicos em todas as suas etapas: geração, transmissão, distribuição e consumo. Ao analisarmos os processos de produção de energia atuais, veremos que o uso prolongado de combustíveis fósseis, como petróleo, carvão mineral e gás natural, está comprometido pelo fato de esses combustíveis não serem inesgotáveis e, além disso, de permanecerem na atmosfera depois de queimados, causando sérios distúrbios. As energias alternativas, produzidas a partir de recursos renováveis (biomassa, eólica, solar etc.), são claramente a solução para essa questão energética, porém, para serem concretizadas, dependem de uma política de incentivo e de uma regulamentação bem definida.

Esse quadro exerce influência direta na arquitetura. Todo edifício construído depende de uma quantidade de energia para “funcionar”. Essa energia é utilizada para iluminação artificial, elevadores, sistemas de segurança, automação, climatização etc. Algumas escolhas e definições são feitas na concepção do projeto: ao se escolherem os tamanhos das aberturas, define-se a iluminação natural disponível e, conseqüentemente, a dependência de iluminação artificial durante o dia. Quando se escolhem a implantação, o formato e as dimensões do pavimento, o sistema de aberturas, os materiais construtivos etc., define-se também a necessidade de sistemas de condicionamento ambiental artificial.

Assim, muitos edifícios são concebidos admitindo-se que serão dependentes de energia para atingir um nível satisfatório de conforto e, nesses casos, a falta de energia os torna “inabitáveis”. Pode-se citar como exemplo um hotel de

categoria econômica situado na cidade de São Paulo, totalmente dependente do sistema de ar-condicionado, não só para atingir níveis aceitáveis de conforto, mas também para renovação do ar. As janelas dos apartamentos e corredores são fixas e a renovação e o resfriamento do ar se dão por ventilação mecânica ou pelo sistema de ar-condicionado. Um estudo detalhado do consumo de energia elétrica desagregado por usos finais foi realizado e ficou constatado que, em 2002, o sistema de ar-condicionado foi responsável por 70% do consumo de energia elétrica do mês de agosto (BENEDETTO; BUORO; MIURA, 2003). Trata-se de alto índice de participação no consumo energético do edifício, considerando-se que o mês de agosto de 2002, em São Paulo, foi um mês típico de inverno, com temperaturas mais baixas.

Na cidade do Rio de Janeiro, alguns edifícios de escritórios situados no centro da cidade têm seus sistemas de ar-condicionado ligados no domingo para que estejam em condições de conforto na segunda-feira pela manhã, devido à grande quantidade de calor acumulado no fim de semana¹.

Este trabalho estuda e compara o clima e a arquitetura de São Paulo e Rio de Janeiro, duas importantes cidades brasileiras com estreitas relações econômicas, físicas e culturais, que resultam em forte influência mútua, e cujas soluções arquitetônicas são muito similares, apesar das diferentes condições climáticas de cada uma.

A arquitetura de edifícios de escritórios nessas duas metrópoles vem caminhando para a solução da fachada selada, com área envidraçada cada vez maior. Esse tipo de solução em climas como São Paulo e Rio de Janeiro, somado às altas cargas internas características dos escritórios atuais, praticamente não oferece condições de conforto aos usuários sem sistema de ar-condicionado. Diante desse tipo de solução, uma alternativa para a conservação de energia seria o isolamento máximo do edifício a favor da eficiência energética do equipamento de ar-condicionado, sem a possibilidade de desligá-lo.

A preocupação em estudar edifícios de escritórios vem não só do seu já tradicional alto consumo de energia, mas também por se tratar de ambientes de longa permanência, onde os seus ocupantes devem estar submetidos a condições ambientais adequadas para o bom desenvolvimento de suas

¹ Informação verbal fornecida por Wilson Teixeira, *building performance engineering*, durante o treinamento Eficiência Energética para o Setor Comercial, realizado em setembro de 2006, Rio de Janeiro. USAID/Brasil – Programa de Capacitação para o Desenvolvimento de Projetos de Eficiência Energética e Energia Renovável.

atividades. Acredita-se que manter um edifício condicionado artificialmente é uma maneira de garantir a satisfação dos usuários quanto ao conforto térmico, porém uma ampla pesquisa de análise comportamental e uma avaliação física do conforto ambiental feita em um importante edifício de escritórios em São Paulo (ROMÉRO et al., 2004) constataram que, em média, apenas 50% dos usuários está em equilíbrio térmico com o ambiente condicionado, ou seja, em conforto. Do restante, para 6% a 13%, o ambiente está quente; e para 36% a 41%, está frio.

Grande parcela desse desconforto é devida à proximidade do usuário da saída de insuflamento de ar, onde a temperatura do ar é sensivelmente mais baixa que no restante do ambiente. Dentre os entrevistados, de 6% a 17%, dependendo da empresa onde foram aplicados os questionários, acreditam que trabalhar em um ambiente condicionado artificialmente é pouco satisfatório e de 37% a 54% gostariam de abrir a janela. A vontade de abrir a janela pode ser tanto por desconforto térmico, como uma solução para balancear a temperatura interna, ou uma busca por maior renovação do ar com tomadas de ar exterior.

Em alguns lugares, como na Alemanha, por exemplo, trabalhadores vêm buscando melhores condições, e a garantia de acesso à ventilação e à iluminação naturais nos ambientes de trabalho passou a ser uma exigência, devido à forte preocupação com a qualidade do ar. Por essas razões, muitos edifícios de escritórios vêm sendo construídos com a solução de fachada dupla ventilada, permitindo o controle das aberturas em alguns períodos do ano, configurando o sistema de modo misto (MARCONDES, 2004). A influência positiva de tais fatores no aumento da produtividade, assim como no bem-estar psicológico dos trabalhadores, vem sendo alvo de estudo em todo o mundo.

O modo misto é um sistema que tem sido amplamente estudado e aplicado em edifícios na Europa como ação de redução de consumo de energia, melhora das condições de conforto dos usuários e qualidade do ar, reduzindo emissões e evitando o aquecimento global. Como exemplo podem-se citar o edifício do banco Commerzbank HQ, construído em 1997 em Frankfurt, na Alemanha, e o edifício 30St Mary Axé, onde se encontra a sede da Swiss Re, em Londres, Inglaterra.

Figura 1 – Edifício Commerzbank HQ, Frankfurt, Alemanha

Disponível em: <<http://www.aviewoncities.com/frankfurt/commerzbanktower.htm>>.
Acesso em: maio 2006.

Figura 2 – Edifício Swiss Re, Londres, Inglaterra

Fonte: Fotos de Ana Paula Giuffrida Silva.

Segundo o conceito de unir o sistema ativo ao passivo, é possível afirmar que o modo misto já é aplicado há muito tempo, quando se trata de um edifício com sistema de ar-condicionado e caixilhos móveis, ou seja, com a possibilidade de abrir as janelas e obter ventilação natural. Porém o modo misto é mais complexo que isso, pois requer um controle específico de seus sistemas.

Assim como os edifícios totalmente dependentes do ar-condicionado são projetados de maneira a otimizar o funcionamento dos equipamentos, o edifício condicionado em modo misto deve aproveitar as tecnologias passivas, de

maneira a viabilizar situações de conforto o máximo possível. Essa técnica vem sendo muito aplicada no Reino Unido e, segundo estudos atuais (WILLIS; FORDHAM; BORDASS, 1994 apud ARNOLD, 1996, p. 687), esses edifícios são geralmente bem-sucedidos e bem vistos por seus usuários. Essa técnica faz uso da habilidade do ser humano de aceitar e se sentir confortável sob uma variação de temperatura ao longo de um mesmo dia. Em princípio, o ambiente começa o dia em condições próximas do limite aceitável de frio e termina em condições próximas do limite aceitável de calor (ARNOLD, 1996). Portanto, os parâmetros de conforto adotados para esse tipo de edifício devem permitir maior variação de temperatura e umidade do ar, diferentemente do que acontece com os sistemas ativos, onde a temperatura e a umidade são fixas durante todo o tempo.

A grande inovação do sistema de condicionamento ambiental de modo misto é utilizá-lo com consciência, objetivando a redução do consumo de energia e a melhora do conforto dos usuários. Quem projeta edifícios com esse tipo de sistema defende a idéia de que a ventilação natural colabora com o aumento da produtividade; além disso, existe o aspecto positivo de que o usuário pode ter certo controle sobre as condições internas de seu ambiente de trabalho. Muitas vezes, porém, esse tipo de edifício é totalmente controlado por um sistema de automação, onde as janelas são abertas e fechadas automaticamente.

De acordo com análises térmicas feitas por Marcondes (2004), os escritórios em São Paulo poderiam ser naturalmente ventilados por até 50% do ano com uma fachada simples, e até 63% com uma fachada dupla ventilada. A fachada em um edifício de escritórios é um componente decisivo no desempenho térmico da edificação, por estar diretamente exposta à radiação solar. Portanto, trabalhar uma fachada eficiente é fundamental para o bom desempenho da edificação. Porém, atualmente, os ganhos solares não são os únicos responsáveis pela alta carga interna nos escritórios. Os ganhos internos de calor por ocupação e equipamentos tomaram proporções que dificultam ainda mais o alcance das condições de conforto.

Porém, diante da necessidade urgente de reduzir o consumo de energia e evitar o aquecimento global, é inadmissível que soluções arquitetônicas sejam tomadas com descomprometimento, literalmente fechando-se as janelas e deixando que o ar-condicionado resolva o problema.

Este trabalho identifica estratégias de projeto que maximizem o desempenho do sistema de modo misto em edifícios de escritórios em São Paulo e Rio de Janeiro, avaliando seu desempenho térmico e energético e conseqüentemente seus ganhos ambientais.

Objeto de estudo

O objeto de estudo do presente trabalho é o desempenho térmico e energético de diferentes soluções arquitetônicas de edifícios de escritórios inseridos no clima das cidades de São Paulo e Rio de Janeiro, operando com o sistema de modo misto de condicionamento ambiental.

Objetivo da dissertação

O objetivo principal desta pesquisa é avaliar o desempenho térmico e energético do pavimento tipo de um edifício de escritórios, do ponto de vista da maximização do seu potencial passivo e da utilização do modo misto, visando à redução da carga térmica interna.

Objetivos secundários:

- ⊗ montar um banco climático para a cidade de São Paulo, com base em parâmetros medidos de 2003 a 2005;
- ⊗ determinar os parâmetros de conforto mais apropriados ao objetivo principal desta pesquisa;
- ⊗ avaliar a utilização de dois modelos matemáticos, programas computacionais, para avaliação de desempenho térmico da edificação, visando a sua aplicabilidade.

O estudo detalhado de sistemas de automação que possam controlar a operação do sistema de ar-condicionado e aberturas para ventilação natural de acordo com o clima externo e uma análise econômica e financeira da aplicação do sistema de modo misto não fazem parte do objetivo desta pesquisa, porém poderão ser posteriormente realizados caso se conclua que o sistema de modo misto seja uma alternativa para a redução de consumo de energia em edifícios de escritórios em São Paulo e Rio de Janeiro.

Metodologia

Após um levantamento de dados sobre o meio ambiente e a questão energética, a arquitetura de edifícios de escritórios, os sistemas de condicionamento ambiental ativos e passivos e outros assuntos relacionados a esta pesquisa, uma série de pontos foi definida, como:

- ✧ Objeto e seus parâmetros de avaliação.

O desempenho térmico e energético dos pavimentos para esse tipo de edifício foi avaliado de acordo com as condições internas de temperatura e umidade, conforto dos usuários e carga térmica.

⚙ Modelos e suas composições físicas.

Foram feitas análises de desempenho térmico e energético de três modelos de pavimento para esse tipo de edifícios de escritórios, representando diferentes tipologias, variando-se planta, fachada e materiais construtivos, configurando assim as três etapas de simulações.

⚙ Sistema de avaliação dos modelos físicos.

O desempenho térmico e energético dos modelos físicos foram avaliados para o clima das cidades de São Paulo e Rio de Janeiro por meio de simulações computacionais. Para isso definiram-se a ferramenta, ou seja, o programa de simulação computacional, e os arquivos climáticos que seriam utilizados para as duas cidades. Para a definição da ferramenta, dois programas computacionais foram investigados: EnergyPlus e TAS, sendo o TAS mais adequado para esta pesquisa. Com relação ao arquivo de clima, foi feito um levantamento dos bancos climáticos disponíveis sobre as duas cidades e concluiu-se que o banco para o clima de São Paulo teria de ser montado.

⚙ Sistema de tratamento de dados climáticos.

Para a montagem do banco de clima de São Paulo, após a coleta de parâmetros climáticos medidos, os sistemas de tratamento de dados dos bancos existentes foram analisados e um deles foi adotado como modelo para a montagem do novo banco. Assim o banco de clima de São Paulo foi montado e comparado com os existentes e com o do Rio de Janeiro.

⚙ Desenvolvimento dos modelos e definição dos parâmetros de simulação.

Definido o TAS como ferramenta, os bancos de clima das duas cidades e as tipologias de edifícios de escritórios, os modelos foram “construídos” e os parâmetros de simulação foram configurados no TAS, de maneira a obter resultados que permitissem uma análise do sistema de modo misto.

Após a definição dos parâmetros de simulação, verificou-se a necessidade de simular os modelos com arquivos de clima que representassem o dia crítico de inverno, e não apenas o ano típico, e o dia crítico de verão, já que, para o clima das duas cidades, o sistema passivo é mais facilmente aplicado nos meses mais frios. Assim, a etapa de sistemas de tratamento de dados climáticos foi retomada.

⚙ Realização das simulações.

As simulações foram realizadas em três etapas:

Na primeira etapa, avaliou-se o desempenho térmico e energético de um modelo de edifício de escritórios representativo para a atual arquitetura implantada nas duas cidades nas últimas décadas. Analisou-se o desempenho

pela comparação da somatória da carga térmica interna anual com a possibilidade de obter condições de conforto dos usuários sem a utilização de sistema de ar-condicionado.

Na segunda etapa, o modelo anterior foi adaptado com foco na maximização da utilização de sistemas passivos de condicionamento ambiental e novamente se avaliou o desempenho térmico e energético no clima das duas cidades. Essa segunda etapa teve o objetivo de simular o impacto de uma possível alteração de fachada em edifícios construídos seguindo o modelo representativo avaliado na primeira etapa.

Já na terceira etapa, analisou-se o desempenho de um novo modelo arquitetônico em termos de planta, materiais, massa e aberturas, definido especificamente para o sistema de modo misto, comparando-se os resultados não só das duas cidades, mas principalmente com os das etapas anteriores, fornecendo dados suficientes para conclusões a respeito das vantagens e limitações do uso do sistema de condicionamento em modo misto nas cidades de São Paulo e Rio de Janeiro.

Os modelos foram submetidos a uma série de simulações, configuradas da seguinte maneira (todas considerando carga de ocupação):

- ✧ simulação com banco de clima anual operando com sistema de ar-condicionado durante todo o período de ocupação. Resultado: gráfico e valor anual de carga térmica;
- ✧ simulação com banco de clima de dia crítico de verão operando com sistema de ar-condicionado durante todo o período de ocupação. Resultado: gráfico de balanço térmico;
- ✧ simulação com banco de clima de dia crítico de verão e de inverno sem sistema de ar-condicionado. Resultado: gráficos de temperatura do ar interno;
- ✧ simulação com banco de clima anual operando com ventilação natural 24 horas. Os parâmetros resultantes de temperatura e umidade foram submetidos a uma planilha que aplica os parâmetros de conforto adotados (modelo adaptativo) resultando em um balanço horário e tabelas de porcentagem de períodos em que os usuários estão em condições de conforto.

Após a definição dos períodos de conforto com ventilação natural, esses horários foram confrontados com a carga térmica resultante da simulação com sistema de ar-condicionado e um valor de carga térmica para o sistema de modo misto foi estimado.

Primeiramente foi utilizada uma configuração do programa TAS de simulação de modo misto, que controla as aberturas das janelas de acordo com a temperatura interna do ambiente e gera resultados de carga térmica automaticamente. Porém, após uma análise crítica dos primeiros resultados, o processo foi revisto e a etapa de definição de parâmetros de simulação foi retomada, definindo-se, então, o processo apresentado anteriormente.

- ✧ Análise comparativa de resultados e conclusões.

Os resultados obtidos nas simulações descritas no item anterior foram comparados e os desempenhos térmicos e energéticos foram avaliados comparando-se o total de carga térmica de ar-condicionado requisitado por cada um deles e o período em que os usuários se encontram em conforto.

Ferramenta: TAS (9.0.7 maio, 2005)

A ferramenta utilizada nesta pesquisa para as simulações de desempenho térmico e energético dos modelos de edifícios de escritórios foi o programa computacional TAS², *Thermal Analysis Simulation*. Trata-se de um conjunto de programas que simulam o desempenho térmico de edifícios e seus sistemas e é constituído de três módulos:

- ✧ TAS Building Designer;
- ✧ TAS Systems;
- ✧ TAS Ambiens.

Uma versão demonstrativa do TAS pode ser obtida na página eletrônica da EDSL³. A versão utilizada nesta pesquisa foi a 9.0.7, de maio de 2005, a mais atual quando do desenvolvimento das simulações.

O módulo principal é o TAS Building Designer, o módulo do edifício, capaz de simular ventilação natural integrada com ventilação forçada. O TAS Systems simula sistemas e controles de ar-condicionado, acoplados ao módulo do edifício, simula também o fluxo de ar automatizado, dimensiona o sistema e

² O *software* TAS foi validado pela International Energy Agency (IEA) por meio da comparação positiva com os dados monitorados contidos no seguinte relatório da IEA: *Energy Conservation in Buildings & Community Systems, Annex 21, Subtask C – Empirical Validation of Thermal Building Simulation Programs Using Test Room Data*.

³ A Environmental Design Solutions Limited (EDSL) foi formada em 1989 para comercializar e desenvolver o programa computacional TAS, UK. Disponível em: <<http://212.23.11.237/default.htm>>. Acesso em: dez. 2006.

calcula a demanda total de energia. O TAS Ambiens faz estudos da variação de microclima nas zonas térmicas, utilizando um sistema CFD 2d.

O TAS oferece uma combinação de simulações: termodinâmica da estrutura do edifício, cálculos de ventilação natural, controles avançados de aberturas e a habilidade de simular sistemas complexos de modo misto.

O programa de simulação TAS tem sido importante ferramenta de estudos sobre desempenho ambiental de edifícios, em instituições de ensino e pesquisa na Europa, tais como a Architectural Association Graduate School, o Martin Centre da Universidade de Cambridge e outras. Da mesma forma, o TAS tem sido utilizado para avaliações de desempenho térmico de alguns dos principais projetos de arquitetura aclamados como “sustentáveis” desde o início da década de 1990, tais como a sede do Commerzbank em Frankfurt e o edifício 30St Mary Axe (Swiss Re) em Londres, dentre outros (MARCONDES, 2004).

O TAS é um programa com boa interface gráfica e de fácil utilização. Os dados de entrada do edifício são desenhos gráficos, tridimensionais, onde o usuário modela diretamente no TAS ou importa de outro programa gráfico. Os resultados são gerados já em tabelas e gráficos. Dessa forma, o usuário consegue visualizar facilmente seu modelo e os gráficos resultantes da simulação, sendo um processo mais dinâmico e seguro, no sentido de fácil identificação de possíveis erros na entrada de dados.

Segundo o dicionário Aurélio, simulação é “experiência ou ensaio realizado com o auxílio de modelos, especialmente de modelos computacionais, relativos a processos ou objetos concretos que não podem ser submetidos à experimentação direta” e modelo é uma “representação da realidade”.

Uma simulação de desempenho energético é um modelo computacional dos processos energéticos de uma edificação que são necessários para manter um ambiente confortável para os ocupantes (ou conteúdo) dessa edificação e tem como objetivos gerais:

- ✧ conhecer o comportamento da edificação quando exposta às quatro estações do ano, no local em que será construída;
- ✧ auxiliar na definição dos materiais construtivos, tanto da envoltória, como da estrutura, e conseqüentemente na inércia da edificação, em função do comportamento apresentado no item anterior;
- ✧ auxiliar no dimensionamento e posicionamento das aberturas para obter uma ventilação natural adequada;
- ✧ dimensionar a carga térmica de seus ambientes, auxiliando na definição da estratégia e do sistema de condicionamento ambiental;

- ✿ fornecer dados importantes para a interpretação do conforto dos usuários;
- ✿ auxiliar na avaliação do custo operacional dos sistemas escolhidos (consumo e demanda de energia) da edificação ao longo dos anos.

De maneira geral, o grande desafio de um projeto de arquitetura comprometido com as questões ambientais e energéticas é encontrar o equilíbrio entre conforto, custo e impacto ambiental. A simulação de desempenho térmico e energético tem o papel de testar as diferentes possibilidades de projeto, sendo comparadas até que se encontre o ponto ideal.

A simulação permite conhecer o comportamento de uma edificação antes de ser construída ou reformada, de maneira que várias alternativas sejam investigadas e comparadas, conduzindo o projeto à otimização de processos a fim de reduzir o consumo de energia. Simular é muito mais barato e rápido do que a experimentação (cada edificação é diferente).

1 EDIFÍCIOS DE ESCRITÓRIOS E SISTEMAS DE CONDICIONAMENTO AMBIENTAL

Este capítulo trata dos edifícios de escritórios ao longo do tempo, como eram projetados antes do advento do ar-condicionado, sua evolução e a dos sistemas de condicionamento artificial.

Os projetos, desde o final do século XIX, já revelavam grande preocupação em relação à iluminação natural, para que atingisse todo o pavimento, e contemplavam vãos centrais, que contribuíam para a melhor distribuição de luz e, conseqüentemente, para a ventilação natural. Porém a ventilação não era a principal preocupação da época, visto que as cargas internas de ocupação e equipamentos não eram intensas como hoje. Os pavimentos eram divididos em salas normalmente ocupadas por uma ou duas pessoas, com quase nenhum equipamento elétrico. Assim, o conforto térmico em ambientes de trabalho não era difícil de obter.

As características construtivas da época, o tipo de ocupação e a configuração de aberturas contribuíam para garantir condições internas de conforto térmico. Com o tempo, esse cenário foi sendo alterado: surgiu a fachada de vidro, os pavimentos não eram mais divididos em salas individuais, a configuração da planta com seus vãos centrais e sistemas de aberturas foi sendo alterada, caminhando em direção à planta profunda e livre; o uso de equipamentos elétricos como lâmpadas, computadores e impressoras ficou mais intenso. Foi com esse conjunto que alterações, cada uma a seu tempo, que surgiu a necessidade e a posterior dependência do ar-condicionado.

Dessa forma se deu a mudança do sistema ativo de condicionamento ambiental e dos projetos de arquitetura dos edifícios de escritórios.

1.1 Arquitetura dos edifícios de escritórios na cidade de São Paulo

A arquitetura e o perfil de consumo de energia dos edifícios de escritórios evoluíram consideravelmente nos últimos 50 anos na cidade de São Paulo. Os pavimentos que eram divididos em salas de aproximadamente 10m² para cada pessoa hoje praticamente não têm divisão interna e a densidade de ocupação aumentou sensivelmente. O espaço de cada um é definido basicamente por sua estação de trabalho, com uma média de 3 a 4m², mais área de circulação.

Com relação aos equipamentos utilizados, na década de 1980 todo o escritório utilizava equipamentos como copiadoras, calculadoras e telex, hoje conta-se com um computador para cada funcionário, mais impressoras, fax, copiadoras, etc. Esse volume de equipamentos contribuiu diretamente para o aumento tanto do consumo de energia, como da carga térmica.

A edificação em si sofreu diversas mudanças como: materiais das envoltivas externas, divisórias internas, forma, índice de compactidade, relação de vidros nas fachadas – *Window Wall Ratio* (WWR), pé-direito, aberturas de caixilhos, possibilidade de ventilação natural e ventilação cruzada, piso elevado e outras. As fachadas aumentaram seus percentuais de vidro e perderam as proteções solares.

Diante dessas modificações dos edifícios de escritórios, com a elevação da quantidade de carga térmica gerada internamente pela ocupação dos ambientes e uma arquitetura cada vez mais voltada às tecnologias ativas, a situação se agravou ainda mais com as questões climáticas, como o fenômeno das ilhas de calor, não só no município de São Paulo, mas em todos os grandes centros urbanos, dificultando as trocas térmicas entre o exterior e o interior dos edifícios, uma vez que essa diferença de temperatura é significativamente menor.

Dessa forma, a importância da arquitetura e da utilização das tecnologias passivas tornou-se ainda maior, dado que não se podem alterar os atuais padrões de uso e ocupação nem as condições climáticas. É nesse contexto que a arquitetura voltada à utilização do modo misto e a conseqüente redução do consumo de energia assumem grande importância.

1.2 Consumo de energia da edificação

Segundo dados consolidados do Balanço Energético Nacional (BEN)⁴, ano de referência de 2004, 44% da energia elétrica consumida no país se dá em edificações residenciais, comerciais e públicas, sendo o setor comercial responsável por 14% do total. Os edifícios de escritório estão nos setores comercial e público e, somando-se os respectivos consumos, alcançam praticamente 22% do consumo de eletricidade do Brasil.

⁴ Disponível na página eletrônica do Ministério de Minas e Energia (MME).

Nesses 22%, estão diversos tipos de edificação com características específicas, porém, dentre os que abrigam escritórios, o perfil de consumo de energia elétrica é bastante semelhante no que se refere aos seus usos finais.

Gráfico 1 – Composição setorial do consumo de eletricidade, em 2004

Fonte: BEN 2004.

Entende-se por uso final o serviço energético, a utilização que se faz da energia. Pode-se fazer uma análise energética de uma única edificação, de um grupo delas, ou até de um setor todo da economia de uma cidade ou país, a partir do consumo de energia dos usos finais. Em nível nacional, uma análise detalhada de usos finais que traga informações de como e com que fim a energia é consumida é uma ferramenta útil no planejamento da matriz energética, em que se define quanta energia será gerada, onde e de que maneira. O mesmo acontece com uma edificação, a partir do momento que se conhece o comportamento do consumo de energia, pode-se partir para uma análise econômica e financeira de projetos energéticos, ou seja, trata-se de uma ferramenta importante no processo de decisão de investimentos.

Uma análise energética a partir de usos finais começa com a identificação de cada um deles e de suas respectivas participações no consumo total do conjunto analisado. Os usos finais em um edifício de escritório são atualmente identificados como: iluminação artificial, condicionamento ambiental, equipamentos de escritório e informática, elevadores e outros, como bombas de recalque, equipamentos eletromecânicos etc. Dentre eles, os equipamentos estão diretamente relacionados com a atividade realizada e os elevadores estão

relacionados com o número de pavimentos, de usuários e o tipo de fluxo do edifício. Já a iluminação e o condicionamento de ar estão relacionados com a arquitetura, seu sistema de aberturas e seu desempenho térmico. Assim, pode-se concluir que a arquitetura exerce forte influência no consumo de energia de uma edificação.

1.3 Sistemas de condicionamento ambiental

De acordo com Arnold (1999/1), na década de 1890, a maior preocupação ao se projetar um edifício era garantir iluminação natural em todo o seu pavimento. Já eram providos de energia elétrica e iluminação artificial, mas seu custo era significativo, o que trazia a preocupação em se construírem plantas estreitas, de maneira que a luz natural pudesse atingir desde o perímetro até o interior do pavimento. Com esse tipo de planta, as janelas abertas garantiam uma ventilação cruzada suficiente para o conforto térmico. Afinal, a preocupação não era a ventilação, mas a iluminação.

Os sistemas ativos de condicionamento ambiental, junto com os sistemas de iluminação artificial, permitiram que os arquitetos se desprendessem das necessidades de luz natural e da implantação adequada para ventilação natural, assim como da correta disposição dos ambientes para a distribuição do ar.

A maior parte dos edifícios de escritório na Europa, e posteriormente em várias cidades dos Estados Unidos, até o fim do século XIX, seguia o estilo clássico com as seguintes características:

- ⊗ proporção clássica das fachadas;
- ⊗ planta estreita;
- ⊗ vão central, ou planta em “U” permitindo a iluminação natural.

Como exemplo, pode-se citar o Wainwright Building, Saint Louis, projetado por Louis Sullivan em 1891.

Figura 3 – Wainwright Building, Saint Louis, Estados Unidos
Disponível em: <<http://www.bluffton.edu/~sullivanm/wainwright/wainwright.html>>.
Acesso em: maio 2006.

Figura 4 – Planta baixa em “U” do Wainwright Building, Saint Louis, Estados Unidos
Disponível em: <<http://www.bluffton.edu/~sullivanm/wainwright/wainwright.html>>.
Acesso em: maio 2006.

Inicialmente a altura total dos edifícios era limitada, mas depois foi atingindo marcas cada vez maiores, tendo em torno de 120m no início do século XX.

A ventilação mecânica foi instalada em muitos edifícios largos e altos para suprir a preocupação em adequá-los às necessidades de ar fresco. O edifício Larkin Administration Building, projetado por Frank Lloyd Wright e construído em 1906, foi o primeiro a apresentar fachada selada e ventilação mecânica. O

projeto apresentava janelas de peitoril incomum de 1,5m, pé-direito de 4m e cobertura do átrio central em vidro, para iluminação natural.

Entre as exigências do cliente, não aparecia resfriamento, porém o arquiteto Frank Lloyd Right já previa em seu projeto dutos de distribuição de ar, com serpentinas de água a 10°C, que os resfriariam. O Larkin Administration Building foi o primeiro edifício com resfriamento dos Estados Unidos, porém, apesar das evidências, o fato passou despercebido. Em 1906, o termo “ar-condicionado” era praticamente desconhecido e só passaria a ser utilizado em 1920 (ARNOLD, 1999/1).

Na década de 1920, hotéis, teatros e lojas de departamento já apresentavam sistemas de ar-condicionado instalados, mas não os edifícios de escritórios.

Em 1929, a revista especializada *Heating, Piping and Air Conditioning* (HPAC) trazia o edifício Milam Building como o primeiro a ser totalmente provido por um sistema de ar-condicionado nos Estados Unidos. O ar era resfriado através de um tanque que puxava a água de um rio das proximidades. Esse se enchia durante a noite, resfriando o ar dos dutos, e então era colocado à disposição dos usuários, que podiam optar por utilizá-lo, abrir as janelas, ou ambos. Pode-se dizer que já se tratava de um edifício condicionado em modo misto.

Figura 5 – Larkin Administration Building, 1906

Disponível em: <<http://freenet.buffalo.edu/bah/h/larkin/admin/index.html>>. Acesso em: maio 2006.

Figura 6 – Milam Building, San Antonio, Texas

Disponível em: <<http://www.emporis.com/en/il/im/?id=171341>>. Acesso em: maio 2006.

Figura 7 – Planta baixa do Milam Building (1929) e distribuição do ar-condicionado
Fonte: Arnold (1999/2).

1.4 Ar-condicionado

Não se sabe ao certo quando surgiu o sistema de ar-condicionado, mas foi em torno de 1930 que apareceram os primeiros edifícios de escritórios totalmente condicionados artificialmente e, após a Depressão, as vendas de equipamentos de ar-condicionado duplicaram em um ano.

As principais empresas do ramo, General Electric, Frigidaire, Carrier, York, Westinghouse etc., fabricavam aparelhos de ar-condicionado que eram do tamanho de uma sala, e a maioria deles era instalada em escritórios.

Porém, diante da dificuldade de destinar uma sala inteira para o equipamento, em 1932 foi patenteado o *fan coil* por Reuben Trane⁵. A tecnologia de grandes sistemas centrais de ar-condicionado praticamente não mudou. A nova tecnologia era conhecida e divulgada, mas raramente instalada, devido ao grande espaço destinado aos dutos verticais em troca do condicionamento artificial (ARNOLD, 1999/1).

Já no fim da Segunda Guerra Mundial, um arquiteto italiano pouco conhecido, Pietro Belluschi, foi indicado para projetar um edifício de escritórios, a matriz do The Equitable Savings and Loan Association, hoje conhecido por Commonwealth Building. O arquiteto aplicou algumas inovações significativas:

- ✧ janelas fixas de vidro duplo verde, onde a camada externa era vidro de alta absorvência de radiação solar (40% de redução da transmissão solar);
- ✧ o ar-condicionado foi projetado para compensar o ganho de calor pelas grandes janelas de vidro, não sendo necessário o uso de cortinas nem de elementos sombreadores;
- ✧ o edifício foi o um dos primeiros a ser totalmente aquecido e resfriado através de água de poços por bomba de calor;
- ✧ o edifício foi o protótipo do edifício moderno totalmente dependente do ar-condicionado.

⁵ Anon. Reuben Trane ASHRAE Hall of Fame Nomination (ARNOLD, 1999/1).

Figura 8 – Commonwealth Building, Portland, EUA

Disponível em: <<http://www.glasssteelandstone.com/BuildingDetail/466.php>>. Acesso em: maio 2006.

Depois disso, o edifício das Nações Unidas, em Nova Iorque, foi o primeiro edifício internacional importante a ser construído após a Segunda Guerra Mundial.

Le Corbusier, um dos arquitetos da equipe de projeto do edifício, defendeu a opção de fachada de pedra, porém a equipe envolvida decidiu pela cortina de vidro, a fim de maximizar a entrada de luz natural. Solução não comum na época para arranha-céus. Foram avaliadas quatro opções de composição de vidros. Le Corbusier defendeu o uso de *brise-soleil*, porém esse artifício foi descartado devido aos perigos que seriam causados pela acumulação de neve e gelo no inverno.

Pelas medições de temperatura, o vidro escuro foi o escolhido, porém sem o *brise soleil*. O que parecia ser um avanço tecnológico, na prática, não o foi, pois não se confiou em manter apenas o vidro escuro, sendo instaladas persianas internas em todo o edifício, além de 4 mil unidades de ar-condicionado de indução de alta velocidade, em seus peitoris (ARNOLD, 1999/1). Quando os sistemas de condicionamento se tornaram disponíveis e acessíveis, o edifício foi todo condicionado por sistema *self-air*, com seus correspondentes dutos.

Figura 9 – Edifício sede das Nações Unidas, Nova Iorque, EUA

Fonte: Foto da autora.

Diante disso, em 1920, a Carrier encontrou a solução em insuflamento de ar em alta velocidade (NEWHOUSE, 1989, p. 128 apud ARNOLD, 1991/1). A idéia foi patenteada em 1937 e em 1940 foi feita a primeira instalação do sistema.

A aplicação desse tipo de método terminal da unidade a ar e água do ar-condicionado foi outro avanço importante.

O aparelho de ar-condicionado de indução de alta velocidade tinha três vantagens principais sobre os novos sistemas *self-air* naquele tempo:

- ⊗ a maior parte dos ganhos e perdas de calor do edifício era através da janela, e a posição inferior do peitoril das unidades de ar-condicionado minimizava esse efeito no ambiente;
- ⊗ a energia térmica de aquecimento e refrigeração era transportada em torno do edifício pela água, um meio muito mais eficiente do que os sistemas anteriores que usavam o ar;

- ✿ menos espaço era necessário para os dutos verticais, pois estes operavam a alta velocidade e transportavam somente o volume de ar suficiente para suprir as necessidades mínimas de renovação de ar do ambiente.

Nos 30 anos seguintes, essa combinação de vidro opaco, persianas internas e unidades de indução a alta velocidade no perímetro do pavimento foi muito repetida em inúmeros edifícios. Porém, apesar de nenhuma razão aparente, diferentemente do edifício projetado por Belluschi, não se tratava de vidro fixo, mas sim de janelas.

Em 1952, o projeto da Lever House adotou princípios semelhantes, porém apresentou:

- ✿ cortina de vidro nas quatro fachadas;
- ✿ janelas seladas;
- ✿ sistema automático de limpeza das janelas;
- ✿ dependência total do ar-condicionado.

O edifício Lever House fica na Park Avenue, em Nova Iorque, foi projetado por Skidmore, Owings & Merrill.

Figura 10 – Edifício Lever House, Nova Iorque, EUA

Disponível em: <<http://www.galinsky.com/buildings/lever/index.htm>>. Acesso em: de 2006.

Esse conceito de edifício selado, transparente e aparentemente com condições internas de conforto térmico garantidas estava pronto para ser exportado. Edifícios de escritórios foram construídos em Londres, seguindo o padrão da Lever House. Porém, como na época não se usava ar-condicionado nos edifícios em Londres, esses foram construídos pensando-se em manter as janelas

abertas, o que não funcionou. Dessa forma ficou claro que o uso do ar-condicionado era imprescindível nesse tipo de edifício e vários deles foram construídos em diversas localidades. Porém, mesmo com o ar-condicionado, não se obtinha conforto no ambiente de trabalho (ARNOLD, 1999/1).

Assim, nos anos 1960, edifícios de escritórios com ar-condicionado começaram a ser construídos em Londres, desencadeando uma sequência de cópias do edifício Lever House.

Aos poucos foram se identificando os problemas do sistema das unidades de indução de alta velocidade:

- ✧ muito espaço necessário para alocar as unidades terminais e dutos nas fachadas;
- ✧ ruído inconveniente gerado nas saídas de ar;
- ✧ risco de ruído por escape nas conexões, juntas;
- ✧ alto consumo de energia.

Em torno de 1965, um novo conceito de ar-condicionado foi introduzido, a fim de proporcionar conforto desde as áreas próximas da janela até o centro do edifício, o *core*⁶. Esse sistema também utilizava dutos de alta velocidade, o sistema de volume de ar variável (VAV), mas com ajuste de temperatura do ar a ser insuflado.

Em 1983, foi construído o Edifício Gateway Two, em Basingstoke, na Inglaterra, com as seguintes características:

- ✧ ventilação natural;
- ✧ clima temperado;
- ✧ proteção em relação à radiação;
- ✧ átrio central para iluminação natural e ventilação;
- ✧ ausência de forros para aproveitamento da massa da estrutura.

O desempenho foi monitorado e os resultados foram fixados como modelo para o clima inglês, onde os edifícios não precisariam de sistema de ar-condicionado.

De maneira geral, o uso do ar-condicionado em edifícios de escritórios gerou dois efeitos importantes:

⁶ Entende-se por *core* a parte do edifício que reúne a circulação vertical (escadas e elevadores), sanitários e copa.

- ✿ não dependência de sistemas passivos para manter o conforto;
- ✿ oportunidade de introdução de novos materiais e técnicas de construção no entendimento de que o ar-condicionado garantiria o conforto térmico.

Figura 11 – Átrio do edifício Gateway Two, Basingstoke, Inglaterra
Fonte: Arnold (1999/1).

1.5 Sistemas passivos e modo misto

Modo misto é um sistema de condicionamento ambiental que une as vantagens do uso do ar-condicionado às da ventilação natural.

Apesar da onda de edifícios selados dependentes de ar-condicionado, alguns edifícios foram construídos com o princípio da combinação da ventilação natural e ar-condicionado, o modo misto (ARNOLD, 1997/4), como o edifício Colônia, em Colônia, Alemanha, o edifício SAS em Estocolmo, Suécia, e os edifícios da matriz da europeia Dow perto de Zürich, Suíça, com as seguintes características:

- ✿ paredes de alto desempenho e janelas não-fixas;
- ✿ não recirculação de ar;
- ✿ resfriamento passivo;
- ✿ controle local dos usuários;
- ✿ sombreamento;
- ✿ vidros transparentes.

De acordo com especialistas⁷, no contexto europeu, o funcionamento do edifício em modo misto, com aberturas móveis, torna-se economicamente viável quando for possível utilizar a ventilação natural a partir de 30% do período de ocupação. Trata-se apenas de um valor de referência, já que ainda não se conhece o valor equivalente no contexto brasileiro. O escopo desta pesquisa é conhecer a porcentagem de tempo de utilização da ventilação natural em edifícios de escritórios de alguns casos, porém sem a análise econômica.

Segundo Pogson (2005), edifícios com ventilação natural consomem menos da metade de energia de um edifício condicionado artificialmente, melhora o desempenho do usuário e ainda reduz o risco da síndrome do edifício doente.

Cada vez mais será esperado, e em alguns países já é exigido por regulamentação energética, que os edifícios diminuam seu consumo de energia em prol da eficiência energética, reduzindo emissões e o conseqüente aquecimento global.

Edifícios comerciais e de escritórios com ventilação natural ganham pontos no sistema de avaliação ambiental do Building Research Establishment Environmental Assessment Method (BREEAM). Trata-se de um indicador de sustentabilidade de edifícios desenvolvido na Inglaterra, baseado em um sistema de pontuação que avalia o edifício em três estágios: projeto, gerenciamento e operação, e revisão pós-construção. Segundo a pontuação proposta pelo BREEAM, o item energia possui o maior peso (40 pontos em relação a um máximo de 188, ou seja, 21,3%).

Os indicadores de sustentabilidade de edifícios são usados para analisar o ciclo de vida do edifício, considerando desde a origem dos materiais utilizados na sua construção até o destino de resíduos durante sua operação. São elaborados de maneira a possibilitar a comparação de fenômenos ambientais complexos. Podem ser desde uma variável, até uma função que envolve mais de uma variável. Eles são criados para orientar o mercado, direcionando-o a níveis superiores de desempenho ambiental. Ou seja, funcionam como selos de qualidade.

Além do BREEAM, vários outros indicadores de sustentabilidade apontam direta ou indiretamente o uso eficiente da energia como item de peso na avaliação final do edifício. Entre eles estão:

⁷ Informação verbal fornecida em entrevista realizada com o especialista Klaus Bode, *environmental engineer* da empresa inglesa BDSP Partnership, 2004 (apud MARCONDES, 2004).

- ✧ CASBEE (Comprehensive Assessment System for Building Environmental Efficiency), Japão;
- ✧ GBTool (Green Building Challenge), Canadá;
- ✧ HQE (La Haute Qualité Environnementale), França;
- ✧ LEED (Leadership in Energy and Environmental Design), EUA;
- ✧ NABERS (National Australian Building Environmental Rating Scheme), Austrália.

Os indicadores mencionados são apenas alguns dos existentes e em desenvolvimento, o que comprova a crescente preocupação com as questões ambientais e o peso da eficiência energética.

Os indicadores de sustentabilidade funcionam como parâmetro para uma avaliação ambiental do edifício e de como ele se relaciona com a cidade e o meio ambiente. Porém, além deles, existem ainda as regulamentações energéticas. O novo *Energy Performance of Buildings Directive* da União Européia prevê uma redução de 22% de consumo de energia em edifícios até 2010.

A ventilação natural se dá por aberturas estratégicas que direcionam o caminho do vento de maneira a substituir o ar quente interno pelo ar fresco que vem de fora. O posicionamento das aberturas e a maneira de operá-las podem variar, configurando a ventilação cruzada, unilateral ou noturna.

A ventilação cruzada ocorre basicamente por janelas abertas em duas faces opostas da edificação, devido à diferença de pressão. A circulação de ar dentro do edifício pode alcançar uma distância de até cinco vezes o pé-direito. Essa estratégia limita a profundidade do piso e não permite um controle rígido da ventilação no inverno. Esse sistema pode ser induzido pelo sistema de ventiladores de fachada Passivent (Passivent Aircool Façade Ventilators), composto de venezianas externas fixas, dutos com ventiladores que estimulam a passagem de ar, e venezianas de aletas reguláveis internas.

A ventilação unilateral se dá através de janelas abertas em apenas um lado do ambiente. Mais limitado que a ventilação cruzada, a ventilação unilateral só alcança uma profundidade de no máximo duas vezes e meia o pé-direito do ambiente. Também não permite o controle fino da ventilação no inverno.

Já a ventilação natural durante a noite, a ventilação noturna, enquanto o edifício está vazio, resfria sua estrutura. Nesse período, o ar externo atinge uma temperatura mais baixa e, ao entrar em contato com a estrutura do edifício, rouba calor dele, fazendo-o esfriar. Ao longo do dia seguinte, a massa do edifício começa com temperatura mais baixa e vai absorvendo o calor no

decorrer do dia. Um edifício com massa térmica suficiente pode reduzir em 2°C a 3°C a temperatura máxima interna (POGSON, 2005).

Além de explorar a ventilação natural, e assim evitar os ganhos solares, os grandes vilões em ganhos de calor, é possível empregar elementos de sombreamento externo, estratégia passiva fundamental que garante a alta qualidade de luz natural e limita o ganho de calor.

O edifício de escritórios da Building Research Establishment (BRE), em Garston, Watford, Inglaterra, foi construído seguindo as especificações do Energy Efficient Office of the Future (EoF), com o objetivo de reduzir o consumo de energia e as emissões de CO₂, para isso exploraram-se várias estratégias passivas.

Nesse edifício foi utilizada uma combinação de ventilação cruzada e efeito chaminé, Passive Stack Ventilation (PSV), não foi instalado sistema de ar-condicionado e se aproveita a massa térmica para amenizar os ganhos de calor, além de se tirar o máximo aproveitamento da iluminação natural.

Figura 12 – Building Research Establishment's Office (BRE), Watford, Inglaterra
Disponível em: <<http://projects.bre.co.uk/envbuild/index.html#ventilate>>. Acesso em: maio 2006.

A fachada sul apresenta cinco chaminés que, aquecidas pelo sol, sugam o ar quente interno, que é substituído pelo externo. Mas esse é apenas um dos sistemas: em dias mais quentes, exaustores no topo das chaminés puxam o ar com mais velocidade. Além disso, as lajes de concreto são constituídas de sulcos, por onde o ar, ao atravessá-las, perde calor para o concreto. Outra alternativa para o edifício é fazer circular água gelada pelos vãos da laje: essa água vem de uma profundidade de 70m, com uma temperatura constante de 10°C.

O edifício conta ainda com ventilação noturna: o ar circula pelos mesmos vãos da laje e resfria o edifício para o dia seguinte. O edifício encontra-se em uso desde maio de 1997.

Figura 13 – Sistema de ventilação natural no Building Research Establishment's Office (BRE), Watford, Inglaterra

Disponível em: <<http://projects.bre.co.uk/envbuild/index.html#ventilate>>. Acesso em: maio 2006.

2 ANÁLISE DE CLIMA

Figura 14 – Mapa de localização das cidades de São Paulo e Rio de Janeiro
Fonte: Google Earth.

2.1 Considerações gerais

O desempenho térmico e energético de uma edificação é sua relação com as condições climáticas externas durante o ano, ou seja, como as variáveis climáticas externas influenciam as condições internas durante as quatro estações do ano.

Dentre as variáveis climáticas, as que mais interferem no desempenho térmico de uma edificação são:

- ⊗ amplitude térmica e de umidade relativa, diária e anual;
- ⊗ radiação solar;

- ✧ nebulosidade;
- ✧ regime de ventos (velocidade e direção);
- ✧ índice pluviométrico.

Adequar um edifício ao clima tem o objetivo de garantir condições de conforto aos usuários, minimizando condições extremas de frio, calor e vento. Mesmo não sendo possível atingir completamente tais condições apenas com sistemas passivos de condicionamento ambiental, a arquitetura tem o poder de minimizar muito a utilização de sistemas ativos.

Uma avaliação de desempenho térmico e energético de uma edificação verifica as condições internas de temperatura, umidade, carga térmica, fluxo de ar etc. resultantes da interação com o clima externo. Aliando-se tais resultados a um índice de conforto adequado, verifica-se se as condições são satisfatórias aos seus usuários durante o período de ocupação, em situações diversas de frio e calor. No caso de uma edificação existente, essa avaliação pode ser feita por medições de fatores climáticos externos e internos, pesquisa de satisfação dos usuários, avaliação de consumo de energia etc.

Porém, quando se trata de um projeto de edificação, tal avaliação pode ser feita por simulação computacional de desempenho térmico e energético. Uma simulação nada mais é que um ensaio da resposta de um modelo de edificação submetido a certas condições internas e externas.

Para que o programa computacional gere resultados precisos e confiáveis, é fundamental que a base de dados utilizada por ele seja detalhada e confiável. Portanto, em uma simulação de desempenho térmico, os dados de entrada são tão importantes quanto os resultados. Entre eles, além das condições internas do edifício, como: ocupação, atividade realizada, potência instalada de equipamentos, propriedade dos materiais, regime de aberturas etc., as condições externas são fundamentais, ou seja, o arquivo climático. Este deve ser formado de registros horários de um ano completo, composto de dados de temperatura, umidade, radiação e vento. Um ano completo com as quatro estações representadas é formado por 8.760 horas, resultando em um grande número de dados para cada um dos parâmetros medidos.

Estações automáticas que registram tais dados estão freqüentemente localizadas em áreas afastadas dos centros urbanos, como aeroportos. Esse afastamento implica certa imprecisão por não considerar a influência da cidade no seu microclima e, conseqüentemente, no desempenho térmico da edificação. Além disso, deve-se levar em conta falhas nos equipamentos e interrupções nas medições, gerando lacunas sem registros nos arquivos.

Assim, os dados de clima são fundamentais no processo de avaliação de desempenho térmico e energético da edificação, e sua definição deve ser feita com critérios bem definidos. Porém não só o arquivo climático é de suma importância para obter resultados coerentes e confiáveis, como também a forma como é utilizado. Para esta pesquisa, foi feito um levantamento de dados climáticos das cidades de São Paulo e Rio de Janeiro, com o intuito de identificar o banco de clima mais apropriado para as análises de desempenho térmico e energético de edifícios de escritórios, testando possibilidades de minimizar o uso de sistemas ativos de condicionamento ambiental nas duas cidades.

2.2 Levantamento de dados – Alternativas analisadas para as cidades de São Paulo e Rio de Janeiro

Sabe-se que dados climáticos do Brasil são muito escassos e de baixa qualidade devido ao reduzido número de estações automáticas que forneçam dados horários dos principais parâmetros necessários na compilação de um arquivo climático, conforme apresentado no item anterior.

No período entre 1991 a 1998, foi desenvolvido o Projeto de Tratamento de Dados Climáticos no Núcleo de Pesquisa em Construção da Universidade Federal de Santa Catarina, com a finalidade de suprir a carência de dados climáticos adequadamente tratados para estudos de desempenho térmico e consumo de energia. Nessa pesquisa foram tratados dados climáticos de 14 cidades brasileiras:

- ✧ Belém (1961–1970);
- ✧ Brasília (1961–1970);
- ✧ Curitiba (1961–1970);
- ✧ Florianópolis (1961–1970);
- ✧ Fortaleza (1961–1970);
- ✧ Maceió (1961–1970);
- ✧ Natal (1951–1970);
- ✧ Porto Alegre (1951–1970);
- ✧ Recife (1951–1970);
- ✧ Rio de Janeiro (1961–1970);
- ✧ Salvador (1961–1970);
- ✧ São Luís (1961–1970);

- ✿ São Paulo (1951–1970);
- ✿ Vitória (1961–1970).

Tais arquivos climáticos foram compilados a partir da obtenção de dados meteorológicos da Abrava/IBF, em parceria com o CTA/IAE. Os parâmetros tratados foram registrados em aeroportos e envolviam:

- ✿ nebulosidade;
- ✿ regime de ventos;
- ✿ ponto de orvalho;
- ✿ pressão ao nível do mar;
- ✿ temperatura de bulbo seco;
- ✿ temperatura de bulbo úmido;
- ✿ precipitação;
- ✿ umidade relativa.

Infelizmente, não dispunham de registros de radiação solar, fundamental para cálculos de carga térmica.

Arquivos TRY e BIN

Esses dados foram tratados gerando dois tipos de arquivos climáticos: arquivos TRY e BIN. Os arquivos climáticos com extensão TRY são arquivos texto, utilizados pelo programa Analysis Bio, para avaliação das condições de conforto térmico de ambientes internos segundo uma carta psicrométrica.

Os arquivos climáticos de extensão BIN foram originados dos arquivos TRY e tiveram radiação solar calculada a partir da nebulosidade horária. São arquivos gravados em código binário, não sendo possível visualizar seus dados em um editor de texto comum; seus dados são em unidades inglesas, com temperaturas em Fahrenheit e velocidade do vento em nós. São utilizados para simulação do desempenho térmico de edificações no programa DOE – 2.1E.

Em 2005, a partir de arquivos climáticos já existentes obtidos da Infraero na década de 1990, foi realizada uma revisão e correção de dados, preparando-os para novas compilações. Os arquivos TRY e BIN foram comparados e corrigidos. Ainda devido à falta de dados horários medidos de radiação solar, estes foram novamente estimados após nova avaliação do melhor método. Com isso, a

página eletrônica do LabEEE⁸ disponibiliza arquivos de formato CSV, EPW e BIN, e seus respectivos arquivos auxiliares.

O arquivo climático TRY, *Test Reference Year*, traduzido como Ano Climático de Referência, é formado a partir de uma metodologia baseada na eliminação de anos cujos dados contêm temperaturas médias mensais extremas (altas ou baixas) até que se obtenha apenas um ano de dados médios. É um ano sem extremos de temperatura. O TRY é então uma série de dados climáticos tratados segundo uma metodologia e representa uma situação referencial do clima do local em questão.

Arquivos TMY

O TMY2 (*Test Meteorological Year*, versão 2) contém a compilação de meses sem extremos de temperatura provenientes de diferentes anos, gerando arquivo climático que nunca existiu, mas que apresenta temperaturas sem extremos para cada mês. O TMY2 e TMY contêm dados de radiação solar global horizontal e direta normal que não existem no formato TRY.

IWEC

O International Weather for Energy Calculations (IWEC) foi gerado com base no formato TMY2 para depois ser convertido em outro formato, como o EPW.

WYEC

O Weather Years for Energy Calculations surgiu em 1980 como continuidade do TRY, porém com dados de radiação solar medidos, ou calculados, para 51 localidades norte-americanas.

CSV

O arquivo Comma Separated Values (valores/dados separados por vírgula) é composto de dados obtidos de arquivos TRY, porém com dados horários de radiação solar, calculados a partir da nebulosidade horária. Os CSV podem ser utilizados para visualização ou manipulação dos dados, pois são compatíveis com planilhas eletrônicas. Neles, são encontrados todos os dados utilizados nos arquivos BIN e EPW.

EPW

EPW é o formato dos arquivos de clima do Energy Plus, baseado no formato TMY2. A página eletrônica do DOE⁹ disponibiliza arquivos no formato EPW de

⁸ <http://www.labeee.ufsc.br/downloads/downloadacim.html>.

mais de 1.100 localidades do mundo, sendo 295 nos Estados Unidos, 55 no Canadá e 24 no Brasil. A base de dados para os arquivos brasileiros foram SWERA¹⁰ e WYEK.

Meteonorm

Obteve-se acesso também a arquivos de clima provenientes do programa computacional Meteonorm (REMUND, 1998), que utiliza um modelo para a geração de seqüências horárias de temperatura baseado na hipótese de que a amplitude da temperatura durante o dia é aproximadamente proporcional à amplitude diária de radiação solar global. Do pôr-do-sol ao amanhecer, o perfil de temperatura é obtido por interpolação. O modelo do programa Meteonorm não faz uso de dados climáticos importantes, como as médias das temperaturas máximas e das temperaturas mínimas para dada localidade (PANCHER, 2005).

Tabela 1 – Arquivos climáticos das cidades de São Paulo e Rio de Janeiro

Arquivo Localização Disponibilidade	Fonte de dados Base	Parâmetros no arquivo
<p>TRY (revisado e atualizado em 2005)</p> <p>Rio de Janeiro</p> <p>Aeroporto Antonio Carlos Jobim, Galeão – Ilha do Governador</p> <p>Página eletrônica LabEEE¹¹</p>	<p>Parâmetros registrados de 1961 a 1970, exceto dados de radiação, que foram estimados</p> <p><i>(test reference year 1963)</i></p> <p>Base horária</p>	<p>temp. bulbo seco temp. bulbo úmido temp. ponto orvalho pressão atmosférica umidade umidade relativa (%) densidade do ar entalpia velocidade vento direção vento cobertura de nuvens radiação horizontal extrat. radiação global horizontal radiação direta radiação direta normal radiação difusa horizontal</p>
<p>TRY (revisado e atualizado em 2005)</p> <p>São Paulo</p> <p>Aeroporto de Congonhas</p> <p>Página eletrônica LabEEE</p>	<p>Parâmetros registrados de 1961 a 1970, exceto dados de radiação, que foram estimados</p> <p><i>(test reference year 1963)</i></p> <p>Base horária</p>	<p>temp. bulbo seco temp. bulbo úmido temp. ponto orvalho pressão atmosférica umidade umidade relativa (%) densidade do ar entalpia velocidade vento direção vento cobertura de nuvens radiação horizontal extrat. radiação global horizontal radiação direta radiação direta normal radiação difusa horizontal</p>

(continua)

¹¹ <http://www.labeee.ufsc.br/downloads/downloadacim.html>

(continuação)

Arquivo Localização Disponibilidade	Fonte de dados Base	Parâmetros no arquivo
EPW (TRY) Rio de Janeiro Aeroporto Antonio Carlos Jobim, Galeão – Ilha do Governador Página eletrônica LabEEE	Baseado no arquivo TRY acima Base horária	Idem TRY
EPW (TRY) São Paulo Aeroporto de Congonhas Página eletrônica LabEEE	Baseado no arquivo TRY acima Base horária	Idem TRY
TMY <i>(test meteorological year)</i> Rio de Janeiro Aeroporto Santos Dumont Página eletrônica LabEEE/ SWERA	Jan. 1974 Fev. 1982 Mar. 1981 Abr. 1980 Maio 1973 Jun. 1996 Jul. 1976 Ago. 1985 Set. 1973 Out. 1985 Nov. 1976 Dez. 1996 Base horária	radiação horizontal extrat. radiação normal dir. extr. radiação global horizontal radiação direta normal radiação difusa horizontal iluminância global horizontal iluminância normal direta iluminância horiz. difusa iluminância zenital cobertura de céu total cobertura opaca de céu temp. bulbo seco temp. ponto orvalho pressão atmosférica umidade relativa (%) velocidade vento direção vento visibilidade

(continua)

(continuação)

Arquivo Localização Disponibilidade	Fonte de dados Base	Parâmetros no arquivo
TMY <i>(test meteorological year)</i> São Paulo Aeroporto de Congonhas Página eletrônica LabEEE/ SWERA	Jan. 1978 Fev. 1996 Mar. 1975 Abr. 1991 Maio 1997 Jun. 1987 Jul. 1989 Ago. 1974 Set. 1986 Out. 1977 Nov. 1980 Dez. 1981 Base horária	radiação horizontal extrat. radiação normal dir. extr. radiação global horizontal radiação direta normal radiação difusa horizontal iluminância global horiz. iluminância normal direta iluminância horiz. difusa iluminância zenital cobertura de céu total cobertura opaca de céu temp. bulbo seco temp. ponto orvalho pressão atmosférica umidade relativa (%) velocidade vento direção vento visibilidade
EPW (TMY) Rio de Janeiro Aeroporto Santos Dumont Página eletrônica DOE SWERA	Baseado no TMY acima Base horária	radiação global horizontal média radiação difusa horizontal média temperatura do ar umidade relativa (%) velocidade vento direção do vento
EPW (TMY) São Paulo Aeroporto de Congonhas Página eletrônica DOE ¹² SWERA	Baseado no TMY acima Base horária	radiação global horizontal média radiação difusa horizontal média temperatura do ar umidade relativa (%) velocidade vento direção do vento

(continua)

¹² http://www.eere.energy.gov/buildings/energyplus/cfm/weather_data3.cfm/region=3_south_america_wmo_region_3/country=BRA/cname=Brazil

(conclusão)

Arquivo Localização Disponibilidade	Fonte de dados Base	Parâmetros no arquivo
Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) Rio de Janeiro Praça Mauá, Centro	Meteonorm V5.0/ Normais Climatológicas Médias mensais	radiação global radiação difusa temperatura do ar umidade relativa velocidade vento direção do vento
Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) São Paulo	Meteonorm V5.0/ Normais Climatológicas Médias mensais	radiação global radiação difusa temperatura do ar umidade relativa velocidade vento direção do vento

2.3 Definição dos arquivos de clima para simulações no Rio de Janeiro

A cidade do Rio de Janeiro se localiza na costa sudeste do Brasil e, apesar de estar em latitude muito próxima à da cidade de São Paulo, apresenta clima diferenciado, com temperaturas mais altas. Isso se dá, também, pela altitude. O Rio de Janeiro está praticamente no nível do mar, enquanto São Paulo está a 803m.

Rio de Janeiro¹³: latitude: 22°54' S; longitude: 43°15' O; altitude: 52m.

Após a coleta de arquivos de clima disponíveis para o Rio de Janeiro, foi feita uma avaliação, levando-se em conta:

- ✿ localização da estação de medição;
- ✿ órgão responsável pelas medições;
- ✿ parâmetros medidos;
- ✿ base horária;
- ✿ data dos registros e período;

¹³ Fonte: banco de clima LABAUT.

✧ método de montagem do arquivo.

A definição do arquivo climático tem o objetivo de atender a esta pesquisa, que estuda as possibilidades de uso do sistema modo misto de condicionamento ambiental em edifícios de escritórios, comparando-se os climas das cidades de São Paulo e Rio de Janeiro.

A escolha final foi feita pelo arquivo climático mais atual montado pelo LABAUT, principalmente pela data dos registros e pelo método de montagem do arquivo. Além disso, trata-se de um arquivo de base horária, feito exclusivamente para alimentar programas computacionais de simulação de desempenho térmico e energético.

Com essa decisão, o arquivo climático para a cidade de São Paulo deverá ser compatível com o do Rio de Janeiro, em termos de metodologia e período de medição.

2.4 Arquivo de Clima LABAUT

Além dos arquivos climáticos listados na Tabela 1, foi elaborado um banco climático para a cidade do Rio de Janeiro, em 2004, por uma equipe de pesquisadores do LABAUT. Esse banco de clima foi formado para a utilização em uma consultoria em ecoeficiência para o novo Centro de Pesquisa Tecnológica da Petrobrás (Cenpes II), localizado na baía de Guanabara. Diante da falta arquivos climáticos com dados atuais, a equipe de consultoria optou por montar um novo arquivo de clima baseado no banco de dados do Aeroporto Antonio Carlos Jobim, Galeão, de 2000 a 2004¹⁴, localizado na Ilha do Governador. Apenas os dados de radiação foram calculados¹⁵, baseados nas normais climatológicas do INMET, pela ausência dessas medições na base do aeroporto.

A base de dados horários, assim como o rigor metodológico na montagem do banco climático, teve o objetivo de alimentar os programas computacionais de simulação do projeto com as condições mais próximas possível do contexto local, servindo de embasamento de dados mais realistas que os usualmente utilizados.

¹⁴ Dados gentilmente cedidos pelo Laboratório MASTER/IAG-USP.

¹⁵ "Para o cálculo dos dados de radiação solar foi utilizado o modelo de interpolação tridimensional de distância inversa de Shepard (ZELENKA et al., 1992), considerando-se ainda o desconto de distância Norte-Sul proposto por Wald e Lefèvre (2001)" (LABAUT, 2004).

O banco de clima (LABAUT, 2004) foi montado segundo os passos descritos a seguir.

a) Escolha da base de dados, conforme os critérios:

- ✧ proximidade e semelhança de condições ambientais com o local do projeto;
- ✧ consistência da base de dados;
- ✧ período medido, o mais recente possível.

b) Verificação do atendimento das bases disponíveis aos critérios estabelecidos no item anterior e escolha da base a ser utilizada.

c) Análise da base adotada, ano a ano, mês a mês, fazendo-se a verificação de ocorrência de possíveis anos atípicos (passagem do El Niño, La Niña), a intensidade e a regularidade das atipicidades ao longo do ano e o período de recorrência desses fenômenos, decidindo pelo descarte ou não de eventuais anos atípicos.

d) Depois de escolhidos os anos a ser utilizados, foram construídos dois bancos de dados: um anual e outro para o mês mais quente, extraído-se daí o dia típico.

A finalidade do **ano climático de referência** é alimentar as simulações de bases anuais. Calculam-se as médias horárias dos parâmetros TBS – temperatura de bulbo seco, TBU – temperatura de bulbo úmido, radiação solar, efetivamente registrados, cada um deles para as 8.760 horas (dados horários para uma série histórica de cinco anos), e calcula-se a Uabs – umidade absoluta. Para os dados de vento, velocidade e direção (para a qual não se estabelecem médias), a verificação é feita hora a hora, selecionando-se dentre os dados efetivamente registrados os valores coincidentes e/ou os mais próximos referentes ao quadrante predominante. Sendo assim, a velocidade média para cada hora é calculada para as direções selecionadas.

O **mês crítico de verão** é identificado na série histórica, identifica-se o mês mais quente, sendo eleito o mês real dos últimos cinco anos para as cargas térmicas de pico dos edifícios que utilizam o sistema ativo. O mês mais quente foi identificado como sendo fevereiro de 2003.

Dentro desse mês é feita a identificação dos períodos de maior estabilidade atmosférica e é extraído o **dia de referência de verão** para as simulações que têm por finalidade avaliar o desempenho dos recintos com diferentes materiais e componentes construtivos. O dia de referência foi 9/2/2003.

Períodos de temperaturas mais baixas serão os mais propícios para a utilização mais intensa de sistemas passivos, em detrimento dos ativos, no caso das duas

idades, tanto para o Rio de Janeiro como para São Paulo. Dessa forma, a avaliação de desempenho térmico e energético no **mês crítico de inverno** será também importante para o entendimento do comportamento do edifício.

Da mesma maneira que foi selecionado o mês real mais quente do período, o mês com as temperaturas mais baixas também foi destacado, para a aplicação nesta pesquisa. Para a cidade do Rio de Janeiro, esse mês foi o de julho de 2004 e o **dia de referência de inverno** foi 19/7/2004.

2.4.1 Ano climático de referência

Os parâmetros apresentados no ano de referência do Rio de Janeiro são: radiação global e difusa, temperatura de bulbo seco, umidade relativa, velocidade e direção do vento.

Gráfico 2 – Radiação global ao longo do ano de referência, RJ

Gráfico 3 – Radiação difusa ao longo do ano de referência, RJ

Gráfico 4 – TBS ao longo do ano de referência, RJ

Gráfico 5 – UR ao longo do ano de referência, RJ

Tabela 2 – Frequência de ocorrência de direção e velocidade do vento ao longo do ano de referência, RJ

Ventos				
	de (°)	até (°)	velocidade (m/s)	direção (%)
N	337,5	22,5	1,3	5,7
NE	22,5	67,5	1,9	9,4
L	67,5	112,5	2,3	16,7
SE	112,5	157,5	3,2	33,2
S	157,5	202,5	2,8	14,2
SO	202,5	247,5	2,6	7,5
O	247,5	292,5	2,5	6,8
NO	292,5	337,5	2,0	6,6

Fonte: Banco de clima para o Rio de Janeiro, LABAUT.

Figura 15 – Frequência de ocorrência de direção e velocidade do vento ao longo do ano de referência, RJ. Banco de clima atual: médias 2001 a 2005.

2.4.2 Mês crítico de verão

O mês mais quente dos anos de 2000 a 2004 foi identificado como sendo fevereiro de 2003.

Gráfico 6 – TBS ao longo do mês crítico de verão (fevereiro/2003), RJ

Gráfico 7 – UR ao longo do mês crítico de verão (fevereiro/2003), RJ

2.4.3 Dia de referência de projeto de verão

O dia de referência de projeto de verão foi adotado como sendo 9 de fevereiro de 2003.

Gráfico 8 – TBS ao longo do dia de projeto de verão (9/2/2003), RJ

Gráfico 9 – UR ao longo do dia de projeto de verão (9/2/2003), RJ

2.4.4 Mês crítico de inverno

O mês mais frio dos anos de 2000 a 2004 foi identificado como sendo julho de 2004.

Gráfico 10 – TBS ao longo do mês crítico de inverno (julho/2004), RJ

Gráfico 11 – UR ao longo do mês crítico de inverno (julho/2004), RJ

2.4.5 Dia de referência de projeto de inverno

O dia de referência de projeto de inverno foi identificado como sendo 19 de julho de 2004.

Gráfico 12 – TBS ao longo do dia crítico de inverno (19/7/2004), RJ

Gráfico 13 – UR ao longo do dia crítico de inverno (19/7/2004), RJ

2.5 Definição dos arquivos de clima para simulações – São Paulo

São Paulo: latitude: 23°62' S; longitude: 46°65' O; altitude: 803m

Diferentemente da cidade do Rio de Janeiro, não foi encontrado arquivo de clima com dados atuais disponíveis para a cidade de São Paulo. Dessa forma, foi necessário construir um novo arquivo climático para que fosse coerente a comparação de simulações de desempenho térmico das duas cidades.

A participação como pesquisadora em consultorias, pesquisas e discussões do grupo de pesquisa do LABAUT foi fundamental para entender não só a importância do banco de clima, como também as dificuldades em se elaborar um. Assim, a pesquisadora trouxe a experiência necessária que lhe permitiu tomar a decisão de montar um banco de clima para a cidade de São Paulo.

2.5.1 Coleta de dados

Com a decisão de montar um banco de clima seguindo o método do LABAUT descrito anteriormente, novamente o Laboratório MASTER do IAG/USP foi consultado e, assim, foram obtidos dados horários¹⁶ de temperatura de bulbo seco, temperatura de ponto de orvalho, velocidade e direção de vento e pressão atmosférica, dos anos de 2000 a 2005.

Dados de cobertura de nuvens foram obtidos no SYNOP, também por meio do Laboratório MASTER.

Os dados de radiação difusa e global referentes ao mesmo período foram gentilmente cedidos pela Plataforma Micrometeorológica do IAG, localizada na Cidade Universitária (46,733W 23,559S).

2.5.2 Análise dos dados

Após a análise do período, os arquivos obtidos foram analisados segundo a quantidade de dados, ou seja, quantidade de lacunas. Essas lacunas são comuns e podem ser devido a diversos motivos, desde falta de leitura e registro do dado até período de manutenção do equipamento.

Infelizmente os arquivos que continham dados de temperatura de bulbo seco, temperatura de ponto de orvalho, velocidade e direção de vento e pressão

¹⁶ Dados sinóticos de aeroportos da América do Sul/METAR.

atmosférica dos anos 2000, 2001 e 2002 apresentavam muitas lacunas. O ano 2000 apresentava apenas 8,4% de dados, o ano 2001 apenas 38% e 2002, 58%. Já os anos 2003, 2004 e 2005 se apresentavam mais completos: com 95,48%, 98,24% e 95,39% de informação, respectivamente.

Os dados de radiação difusa e global dos anos de 2003 a 2005 apresentavam, respectivamente: 66,55%; 60,73%; 69,05%; 67,9%; 68,6% e 65% de informação.

Assim, a base de dados para a construção do arquivo de clima foi de três anos: 2003, 2004 e 2005. Apesar de não ser uma base de cinco anos, como a do LABAUT para o arquivo do Rio de Janeiro, decidiu-se por trabalhar com uma base mais atual.

2.5.3 Análise do período

Foram obtidos também dados de temperaturas máximas e mínimas diárias, fornecidas pelo Instituto de Agronomia de Campinas (IAC), da estação meteorológica do Mirante de Santana, São Paulo, do período de 4/7/1996 a 2/2/2006. Tais dados, apesar de serem apenas máximas e mínimas diárias, foram utilizados para análise do período, a fim de avaliar o perfil dos anos 2003, 2004 ou 2005, inseridos num período maior, de 10 anos.

Com esses dados, foi gerado o Gráfico 14, com as máximas e mínimas diárias dos últimos dez anos:

Gráfico 14 – TBS máximas e mínimas diárias, de 04/07/1996 a 02/02/2006, SP
Fonte: IAC.

Como mostra o Gráfico 14, pode-se dizer que o período de 2003 a 2005 não demonstrou comportamento atípico em relação aos últimos dez anos para que se descartasse a base de dados obtida.

Dessa forma, os dados dos últimos três anos (2003, 2004 e 2005) foram tabulados e o arquivo climático foi construído, seguindo a mesma metodologia do LABAUT, descrita anteriormente.

2.5.4 Ano climático de referência

O arquivo climático construído consta dos seguintes parâmetros, exibidos nos Gráficos 15 a 18.

Os dados de radiação global e difusa foram obtidos a partir da média dos dados horários de 2003, 2004 e 2005.

Gráfico 15 – Radiação global ao longo de ano de referência, SP

Gráfico 16 – Radiação difusa ao longo de ano de referência, SP

Os dados de temperatura de bulbo seco foram obtidos a partir da média dos dados horários de 2003, 2004 e 2005.

A umidade relativa foi obtida pela relação entre temperatura de ponto de orvalho e temperatura de bulbo seco, conforme a seguinte equação:

$$UR = e/es \cdot 100,$$

onde:

$$e = 6.112 \cdot \exp((17.67 \cdot t_d)/(t_d + 243.5))$$

$$es = 6.112 \cdot \exp((17.67 \cdot t)/(t + 243.5))$$

t_d = temperatura de ponto de orvalho (°C)

t = temperatura de bulbo seco (°C)

Gráfico 17 – TBS ao longo de ano de referência, SP

Gráfico 18 – UR ao longo de ano de referência, SP

A direção do vento é sempre aquela a partir da qual sopra ao vento. Assim, um vento soprando do leste em direção ao oeste é descrito como vento leste. Medido no sentido horário a partir do norte verdadeiro, um vento leste é especificado como a 90° , um vento sul como a 180° , um vento oeste como 270° e um vento norte como a 360° . Um vento especificado como a 0° significa, segundo alguns autores, condições calmas.

A Tabela 3 mostra a frequência de ocorrência da média da direção e velocidade do vento em São Paulo nos anos 2003 a 2005 obtidos do laboratório METAR. A direção foi obtida pela média das direções de mesmo quadrante, ou das mais próximas entre si, a uma distância máxima de 90° . A média das velocidades relativas a tais direções gerou os dados horários de velocidade do vento do

banco de clima. Os mesmos valores podem ser mais bem observados na rosa dos ventos apresentada na Figura 16.

Tabela 3 – Frequência de ocorrência de direção e velocidade de vento ao longo do ano de referência, SP

Ventos				
	de (°)	até (°)	velocidade (m/s)	direção (%)
N	337,5	22,5	2,27	17
NE	22,5	67,5	2,17	12
L	67,5	112,5	2,81	11
SE	112,5	157,5	3,27	23
S	157,5	202,5	4,07	29
SO	202,5	247,5	3,72	2
O	247,5	292,5	3,56	1
NO	292,5	337,5	3,46	5

Figura 16 – Frequência de ocorrência de direção e velocidade do vento ao longo do ano de referência, SP. Banco de clima atual: médias 2003 a 2005.

2.5.5 Mês crítico de verão

Da mesma maneira que no Rio de Janeiro, o mês mais quente do período analisado para São Paulo foi fevereiro de 2003.

Gráfico 19 – TBS ao longo do mês crítico de verão (fevereiro/2003), SP

Gráfico 20 – UR ao longo do mês crítico de verão (fevereiro/2003), SP

2.5.6 Dia de referência de projeto de verão

O dia de referência de projeto de verão será utilizado para simulações específicas que tratem de situações extremas, como análise do comportamento da curva de carga térmica e de seus dos componentes. Dentro do mês de fevereiro de 2003 e do período de maior estabilidade atmosférica, o dia 11 foi identificado como o dia de referência de projeto de verão.

Gráfico 21 – TBS ao longo do dia crítico de verão (11/2/2003), SP

Gráfico 22 – UR ao longo do dia crítico de verão (11/2/2003), SP

2.5.7 Mês crítico de inverno

O mês mais frio dos anos de 2003 a 2005 foi identificado como sendo julho de 2004.

Gráfico 23 – TBS ao longo do mês crítico de inverno (julho/2004), SP

Gráfico 24 – UR ao longo do mês crítico de inverno (julho/2004), SP

2.5.8 Dia de referência de projeto de inverno

O dia de referência de projeto de inverno foi adotado como sendo 22 de julho de 2004.

Gráfico 25 – TBS ao longo do dia crítico de inverno (22/7/2004), SP

Gráfico 26 – UR ao longo do dia crítico de inverno (22/7/2004), SP

2.6 Análise comparativa dos dados climáticos

2.6.1 Ano de referência de projeto: São Paulo e Rio de Janeiro

Comparando-se os anos de referência de projeto das duas cidades, tem-se que as temperaturas médias mensais do Rio de Janeiro são, em média, 4°C mais elevadas que em São Paulo, tanto nas máximas como nas mínimas, como se pode observar na Tabela 4.

Tabela 4 – Médias das temperaturas máximas e mínimas mensais, SP e RJ (°C)

		JAN	FEV	MAR	ABR	MAIO	JUN	JUL	AGO	SET	OUT	NOV	DEZ
Média das Máximas	SP	25,4	27,5	26,1	25,8	22,7	22,9	20,9	21,8	22,9	23,5	24,3	24,9
	RJ	30,1	31,3	30,6	29,7	26,5	26,6	25,2	25,7	26,1	27,2	28,6	29,6
Média das Mínimas	SP	20,5	20,1	19,8	19,2	16,3	15,5	13,9	14,3	15,8	17,2	18,1	19,0
	RJ	23,9	24,2	23,5	22,8	19,9	18,8	17,8	18,5	19,2	21,0	22,4	23,7

2.6.2 Mês crítico de verão: São Paulo e Rio de Janeiro

Comparando-se o mês crítico de verão, que coincidentemente é fevereiro de 2003 para as duas cidades, tem-se que a temperatura do ar é predominantemente mais elevada no Rio de Janeiro.

Gráfico 27 – TBS ao longo do mês crítico de verão (fevereiro/2003), SP e RJ

A umidade relativa na cidade do Rio de Janeiro é visivelmente mais elevada, como mostra o Gráfico 28, comparando o mês crítico de verão nas duas cidades.

Gráfico 28 – UR ao longo do mês crítico de verão (fevereiro/2003), SP e RJ

2.6.3 Dia de referência de projeto de verão: São Paulo e Rio de Janeiro

Os Gráficos 29 e 30 mostram temperaturas e umidades mais elevadas para o Rio de Janeiro, porém em menor proporção. Já a umidade relativa máxima no RJ chega a ser 15% mais elevada. Vale destacar que a comparação entre umidades relativas neste trabalho tem como objetivo comparar sensações térmicas, mais que comparar a quantidade absoluta de vapor de água no ar.

Gráfico 29 – TBS ao longo do dia crítico de verão, RJ e SP

Gráfico 30 – UR ao longo do dia crítico de verão, RJ e SP

Tabela 5 – TBS máximo e mínimo dia de referência de projeto de verão, RJ e SP

	TBS SP (°C)	TBS RJ (°C)	UR SP (%)	UR RJ (%)
	11/2/2003	9/2/2003	11/2/2003	9/2/2003
Máx.	35,0	36	86,20	100,0
Mín.	23,0	25	73,90	75,7

2.6.4 Mês crítico de inverno: São Paulo e Rio de Janeiro

Comparando-se o mês crítico de inverno, que também coincidentemente é julho de 2004 para as duas cidades, tem-se que a temperatura do ar é predominantemente mais elevada no Rio de Janeiro.

Gráfico 31 – TBS ao longo do mês crítico de inverno (julho/2004), RJ e SP

A umidade relativa na cidade do Rio de Janeiro apresenta valores mais baixos no inverno em relação ao verão, não sendo muito diferente de São Paulo, como mostra o Gráfico 32, do mês crítico de inverno nas duas cidades.

Gráfico 32 – UR ao longo do mês crítico de inverno (julho/004), RJ e SP

2.6.5 Dia de referência de projeto de inverno: São Paulo e Rio de Janeiro

Os Gráficos 33 e 34 mostram, também para o inverno, temperaturas mais elevadas para o Rio de Janeiro; já a umidade relativa máxima no RJ praticamente se iguala à de São Paulo. Vale destacar que a comparação entre umidades relativas neste trabalho tem como objetivo comparar sensações térmicas, mais que comparar a quantidade absoluta de vapor de água no ar.

Gráfico 33 – TBS ao longo do dia crítico de inverno, RJ e SP

Gráfico 34 – UR ao longo do dia crítico de inverno, RJ e SP

Tabela 6 – Valores máximos e mínimos do dia de referência de projeto, de inverno, RJ e SP

	TBS SP (°C) 22/7/2004	TBS RJ (°C) 19/7/2004	UR SP (%) 22/7/2004	UR RJ (%) 19/7/2004
Máx.	14,0	21,0	93,55	93,74
Mín.	9,0	15,0	71,83	64,26

Este trabalho confirmou que o clima é mais quente e mais úmido na cidade do Rio de Janeiro em comparação à cidade de São Paulo, em seus valores médios e absolutos. As temperaturas médias mensais no Rio de Janeiro são aproximadamente 4°C mais elevadas que em São Paulo. A umidade relativa do ar no Rio de Janeiro também é mais elevada, e com maior amplitude.

3 PARÂMETROS DE CONFORTO

Pode-se dizer que o usuário está “em conforto”, de maneira geral, quando os parâmetros de conforto ambiental estão em condições satisfatórias. Dentre esses parâmetros estão condições térmicas, de iluminação, acústica, qualidade do ar e ergonomia. Para um ambiente de escritório, é importante que todos esses fatores listados estejam em níveis aceitáveis para que o usuário seja apto a realizar suas tarefas com êxito.

As condições externas, clima e contexto urbano, em que o edifício está submetido, exercem forte influência nas condições internas de conforto, como nível de ruído, disponibilidade de luz natural, condições térmicas, nível de poluição etc. No caso dos grandes centros urbanos, como as cidades de São Paulo e Rio de Janeiro, edifícios de escritório se encontram em situações variadas, desde em bairros afastados, onde o ruído externo é tolerável, com níveis regulares de poluição do ar e sem fortes influências de microclima urbano, até nas grandes avenidas, onde cada um desses itens merece atenção especial de tratamento.

Muitos estudos consideram a correlação entre o ambiente construído e os inúmeros e complexos microclimas urbanos em São Paulo. Fortes influências de temperatura e poluição do ar podem ser observadas em diversas localidades, variando-se seu efeito nas edificações e em seus ocupantes (DUARTE, 2004).

Duas grandes avenidas de São Paulo que concentram muitos edifícios de escritórios são: a Avenida Paulista e Avenida Engenheiro Luís Carlos Berrini. Edifícios localizados em ambas as avenidas estão expostos a altos índices de ruído externo, poluição do ar e influência de microclima urbano, por apresentarem alto tráfego de veículos, altas taxas de ocupação com pouca área verde permeável. O mesmo acontecerá em inúmeras outras avenidas, inclusive na cidade do Rio de Janeiro, onde os edifícios de escritórios estão mais concentrados no centro da cidade, como a Avenida Rio Branco e a Avenida das Américas, na Barra da Tijuca. Esse conjunto de fatores reforça a necessidade de estudos específicos para cada edifício, levando-se em conta cada um desses fatores.

O sistema de modo misto é uma integração entre os sistemas naturais e artificiais de condicionamento ambiental, em que o sistema artificial só é acionado quando as condições climáticas externas ou outros fatores impedem a obtenção de conforto nos ambientes internos por meios naturais.

A avaliação da aplicação desse sistema em edifícios de escritórios em São Paulo e Rio de Janeiro é feita baseada no percentual de tempo, dentro de um ano, em que será possível obter conforto sem acionar o sistema artificial de condicionamento e na avaliação das cargas térmicas. Para isso é necessário que se definam os parâmetros de conforto que determinem a utilização do sistema natural ou artificial e as condições de operação de cada um. Com o objetivo de avaliar o desempenho térmico e energético da edificação sob esse sistema, as questões de acústica, poluição do ar e microclima urbano não serão consideradas como fatores limitantes.

Esta pesquisa avaliou as possibilidades de utilização do sistema de modo misto em edifícios de escritórios sob duas condições climáticas diferentes e suas análises foram baseadas em tipologias arquitetônicas predefinidas. Suas conclusões poderão nortear decisões iniciais de projeto, que direcionarão a arquitetura para determinado sistema de condicionamento ambiental. Portanto, para uma análise precisa de determinado edifício, serão necessários estudos específicos que considerem todas essas influências.

3.1 Normas técnicas nacionais e internacionais

3.1.1 Ambientes condicionados artificialmente

Para ambientes condicionados artificialmente, existem normas nacionais e internacionais que indicam valores-limite dos parâmetros de temperatura, umidade e velocidade do ar, que devem ser utilizados nos equipamentos de condicionamento ambiental, para que a maioria de seus ocupantes esteja em conforto.

No Brasil, utilizam-se:

- ✧ NBR 6401 – Instalações Centrais de Ar-Condicionado para Conforto: Parâmetros Básicos de Projeto (1980);
- ✧ Orientação Técnica da Agência Nacional de Vigilância Sanitária, em ambientes climatizados artificialmente de uso público e coletivo, Anvisa (2003) – Orientação Técnica sobre Padrões Referenciais de Qualidade do Ar Interior.

Segundo as normas nacionais, as faixas recomendadas de temperatura e umidade para verão são (LABAUT, 2004):

- ✧ $TBS = 23\text{--}26^{\circ}\text{C}$ e $UR = 40\text{--}65\%$;
- ✧ $TBS_{MAX} = 26,5\text{--}27^{\circ}\text{C}$ e $UR_{MAX} = 65\%$;

✧ $TBS_{MAX} = 28^{\circ}C$ e $UR = 70\%$ (para áreas de acesso).

E, para velocidade do ar:

✧ $V_{AR.1,5m} = 0,025-0,25$ m/s.

Internacionalmente, as referências mais utilizadas são:

- ✧ ISO 7730 (1994) – Moderate Thermal Environments: Determination of the PMV and PPD Indices and Specification of the Conditions for Thermal Comfort;
- ✧ ASHRAE 55-2004 (1995) – *Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy* (revisão da Standard 55-1992, em acordo com ISO Standards 7726 e 7730).

De acordo com a norma ISO 7730, “conforto térmico é definido como a condição mental que expressa satisfação com as condições térmicas do ambiente”¹⁷. A norma internacional apresenta uma metodologia de cálculo para determinação da porcentagem de pessoas insatisfeitas (PPD)¹⁸ em relação ao conforto térmico em dado ambiente e recomenda PPD entre 10% e 15%. Trata-se de um cálculo de previsão de sensação térmica e envolve variáveis relativas ao ambiente (temperatura e umidade relativa do ar, temperatura média radiante e velocidade do ar) e ao usuário (vestimenta e atividade). Foi originalmente baseada em estudos na América do Norte e Europa e está de acordo com estudos recentes do Japão. Indica a possível necessidade de adaptação e estudos específicos para aplicação em outras etnias e localidades, deixando aberta a possibilidade de serem adotados índices mais elevados.

A Norma se aplica a ambientes com temperatura de bulbo seco entre 10°C e 30°C e recomenda que a umidade relativa do ar permaneça entre 30% e 70%, em função de desconforto causado pela pele seca ou úmida, irritação dos olhos, eletricidade estática e doenças respiratórias. Indica também velocidade do ar no ambiente menor que 1m/s, o que pode inviabilizar sua aplicação em ambientes condicionados naturalmente, dependendo das condições climáticas locais.

¹⁷ Tradução da autora.

¹⁸ PPD (*predicted percentage of dissatisfied*), porcentagem prevista de insatisfeitos originada do PMV (*predicted mean vote*), voto médio previsto de um grupo de pessoas na escala de sensação térmica de sete pontos.

Tabela 7 – Parâmetros físicos aceitáveis em edifícios de escritórios, no inverno e verão, para atividades leves

Temperatura operativa	Mínima	Máxima
Inverno	20 °C	24 °C
Verão	23 °C	26 °C
Umidade relativa do ar	Mínima	Máxima
Inverno	30%	70%
Verão	30%	70%

Fonte: ISO 7730.

A ASHRAE 55-2004 segue padrão semelhante à ISO, estabelecendo uma zona de conforto para verão e inverno, porém permitindo PPD até 20%. Também tem como objetivo especificar a combinação de fatores pessoais (atividade e vestimenta) e ambientais (temperatura, radiação, umidade e velocidade do ar) que proporcionarão condições térmicas aceitáveis à maioria dos ocupantes. Em seu prefácio, anuncia a inclusão da metodologia de cálculo de PMV/PPD e do modelo adaptativo, ASHRAE Final Report RP-884 (DEAR, 1997), e ainda indica a possibilidade de o projetista, com os proprietários e/ou incorporadores, definir o nível de conforto térmico e sua apropriada faixa de variação. O modelo adaptativo relaciona temperaturas internas de projeto ou faixas aceitáveis de temperatura, segundo parâmetros climatológicos externos, o que indica maior variação dos índices de conforto em relação aos padrões usuais, especialmente para ambientes condicionados naturalmente.

3.1.2 Ambientes condicionados naturalmente

Não há, no Brasil, nenhuma norma nacional que determine o nível de conforto térmico do usuário em ambientes não-condicionados ou com períodos de condicionamento natural, porém alguns limites são indicados como referência na NR17 e a NR15.

A NR17 estabelece que as condições ambientais de trabalho devam estar adequadas às características psicofisiológicas dos trabalhadores e à natureza do trabalho a ser executado. Nos locais de trabalho onde são realizadas atividades que exijam solicitação intelectual e atenção constante, tais como: salas de controle, laboratórios, escritórios, salas de desenvolvimento ou análise de projetos, dentre outros, são recomendadas as seguintes condições de conforto (LABAUT, 2004):

- ✧ índice de temperatura efetiva entre 20°C e 23°C;
- ✧ umidade relativa do ar não inferior a 40%;
- ✧ velocidade do ar não superior a 0,75m/s.

A NR15 (Atividades e Operações Insalubres) é voltada para a avaliação de estresse térmico e classifica ambientes insalubres a partir de um índice denominado Índice de Bulbo Úmido Termômetro de Globo – IBUTG, calculado por equação que envolve as variáveis temperatura de bulbo úmido e temperatura de globo. Essa equação determina uma proporção entre horas trabalhadas e horas de descanso.

Edifícios condicionados naturalmente, assim como os sistemas de modo misto, fazem uso da habilidade do ser humano de se adaptar, aceitar e se sentir confortável sob uma variação de temperatura ao longo de um mesmo dia, diferente do que acontece em um ambiente climatizado, onde a temperatura e a umidade são fixas durante todo o período de ocupação, independentemente das condições externas. Diante dessa capacidade de adaptação, admite-se que as condições internas de um ambiente condicionado naturalmente comecem o dia em condições próximas do limite aceitável de frio e terminem em condições próximas do limite aceitável de calor (ARNOLD, 1996). Portanto, os parâmetros de conforto que se aplicam a esse tipo de edifício, ao contrário dos sistemas ativos, onde a temperatura e umidade são fixas durante todo o tempo, oscilam dentro de um intervalo de valores, entre os limites de frio e de calor.

A ASHRAE 55-2004 apresenta opção de metodologia de determinação de condições térmicas aceitáveis em espaços condicionados naturalmente, o modelo adaptativo. Esse item refere-se a ambientes onde o usuário tem controle da abertura de janelas para determinação de seu conforto térmico. Experiências práticas indicam que a resposta de usuários de ambientes com essas características depende em parte das condições externas e diferem das respostas a ambientes com sistema central de ar-condicionado, basicamente devido à diferença de experiência térmica, mudança na vestimenta, disponibilidade de controle e alteração nas expectativas dos ocupantes. Esse modelo considera ausência de sistema de condicionamento ativo, atividade física dos usuários próxima do sedentário e a possibilidade de adaptação de vestimenta para as condições de clima interno e externo.

Tabela 8 – Limites de variação de temperatura aceitáveis

Período	0,25h	0,5h	1h	2h	4h
Máxima variação de temperatura efetiva permitida	1,1°C	1,7°C	2,2°C	2,8°C	3,3°C

Fonte: ASHRAE 55-2004.

3.2 Modelo adaptativo

O modelo adaptativo foi resultado da pesquisa “ASHRAE RP-884 – *Developing an Adaptive Model of Thermal Comfort and Preference*” (DEAR, 1997), que teve a intenção de refinar o conceito e o entendimento dos mecanismos de adaptação, desenvolver um modelo empírico do processo de adaptação e propor um padrão de temperaturas variáveis que complemente a atual ASHRAE 55 (1992).

Figura 17 – Comparação entre o modelo adaptativo e a ASHRAE Standard 55

Disponível em: <http://aws.mq.edu.au/rp-884/ASHRAE_rp884_hypothesis.html>.
Acesso em: nov. 2006.

O principal objetivo da pesquisa realizada no projeto da RP-884 foi propor um padrão de variação de temperatura baseado na capacidade de adaptação do ser humano. Entre 1995 e 1997, aproximadamente 21 mil conjuntos de dados foram coletados provenientes de 160 edifícios distribuídos pela maioria dos

grupos de pesquisa de conforto térmico ativos do mundo. Os dados foram coletados por meio de questionários aplicados aos usuários dos edifícios e, paralelamente, foram realizadas medições do clima externo, além da verificação de fatores como vestimenta e atividade dos entrevistados. Esses dados foram trabalhados e analisados quanto à reação do organismo humano diante das condições internas e depois relacionadas à arquitetura e às condições climáticas externas. A informação mais importante observada no ato da entrevista foi o fato de o edifício ter sistema de ar-condicionado ou ventilação natural, pois foi daí que surgiu a conclusão mais importante: dois padrões de determinação de condições de conforto, sendo um para ambientes condicionados artificialmente e outro para ambientes onde os usuários podem controlar as janelas e ter outras oportunidades de adaptação.

Figura 14 – Localização geográfica das pesquisas realizadas para a formulação do modelo adaptativo

Fonte: ASHRAE RP-884.

A pesquisa RP-884 leva à conclusão de que o modelo PMV é uma boa alternativa para os ambientes com uso exclusivo de sistemas de condicionamento artificial em que os usuários não têm condições de interferir no ambiente ou na própria condição. Porém a aplicação do mesmo modelo PMV em ambientes ventilados naturalmente leva a erros significativos, pois ignora a predisposição do usuário a aceitar certa variação térmica nesse tipo de ambiente. Em ambientes passivos, recomenda-se a aplicação do modelo adaptativo que prevê as condições internas ideais diante das características climáticas externas.

O organismo humano é capaz de se adaptar às condições climáticas adversas, mantendo o equilíbrio pela termorregulação. Porém, além desse mecanismo fisiológico, o usuário dispõe de outros recursos que contribuem para o conforto térmico, o comportamento (vestimenta, janelas, ventiladores), a atitude psicológica e a expectativa. Assim, o modelo adaptativo considera fatores como tempo, forma e função da edificação, relação entre clima interno e externo, expectativas dos usuários, além do meio físico, para prever a satisfação dos usuários (DEAR, 1998).

Figura 15 – Os três componentes de adaptação às condições climáticas internas: termorregulação, comportamento e expectativa

Fonte: ASHRAE RP-884.

De acordo com Fanger (2002), usuários de ambientes condicionados naturalmente têm maior disposição para aceitar temperaturas mais altas do que o proposto pelo PMV. Isso se dá, pois a taxa metabólica estimada no cálculo do PMV é muito alta, e o usuário habituado a temperaturas mais altas tem menor expectativa que o usuário habituado ao ar-condicionado.

Figura 16 – Comparação entre o modelo adaptativo e o PMV, aplicados em edifícios naturalmente ventilados
Fonte: ASHRAE RP-884.

Para ambientes condicionados artificialmente, o RP-884 propõe que as condições para um ambiente termicamente aceitável deverão ser baseadas em uma das três técnicas descritas a seguir, listadas em ordem decrescente de preferência:

- ✧ método PMV analítico – conforme a ISO 7730 (1994), deve ser aplicado quando os dados de vestimenta e taxas metabólicas forem conhecidos;
- ✧ PMV adaptativo – quando os dados de vestimenta e taxa metabólica forem desconhecidos, aplicar o modelo PMV adaptativo, estimativa da temperatura interna de conforto, baseada nas condições externas, representadas por temperaturas efetivas médias para as principais estações do ano;
- ✧ método prescritivo – quando não estiverem disponíveis informações dos usuários nem do clima, quando as zonas de conforto de verão e inverno para aceitação de 90% ou 80% forem selecionadas das cartas psicrométricas da RP-884.

Já para os ambientes condicionados naturalmente, o modelo é uma função linear baseada no clima externo, com variação de mais ou menos 3,5°C para 80% de usuários satisfeitos e mais ou menos 2,5°C para 90%.

temperatura de conforto = $18,9 + 0,255 \times \text{temperatura efetiva externa}$

3.3 Parâmetros de conforto para o modo misto

Para avaliação dos períodos de conforto térmico com o modo misto, será necessário aplicar dois índices de conforto: um para o período de condicionamento passivo e outro para os períodos de uso de ar-condicionado.

3.3.1 Períodos de condicionamento natural

Para avaliação de conforto dos ambientes nos períodos de condicionamento natural será adotado o modelo adaptativo proposto por Dear (1997), que parte da temperatura efetiva média externa para estabelecer a temperatura interna de conforto térmico.

Esse mesmo modelo foi aplicado em consultoria realizada por um grupo de pesquisadores do LABAUT, do qual participei, e consta no relatório técnico Cenpes-II-Arquitetura e Ecoeficiência: Clima, Insolação e Índices de Conforto (LABAUT, 2004).

O modelo adaptativo propõe a utilização de uma temperatura de conforto (T_c) calculada como função da temperatura efetiva externa, que, por sua vez, é calculada para cada hora do ano com base em arquivo de clima de 8.760 horas.

A temperatura operativa (T_o) do ambiente, calculada por composição de temperatura média radiante (TRM), temperatura de bulbo seco (TBS) e umidade relativa (UR).

A T_o é comparada com a T_c proposta, com margem de $\pm 2,5^\circ\text{C}$ para que 90% dos usuários estejam em conforto.

De acordo com LABAUT (2004), para o clima do Rio de Janeiro:

Segundo a ASRHAE 55 (1995), a Temperatura Efetiva (ET^*)¹⁹ é a temperatura operativa de um ambiente a 50% de umidade relativa do ar, que causaria as mesmas trocas de calor sensível e latente que as experimentadas pelo usuário no ambiente em estudo.

ET^* é calculada pela equação abaixo (ASHRAE, 1997 *apud* SZOKOLAY, 2001):

$$ET^* = t_o + w \cdot I_m \cdot LR \cdot (p_a - 0,5 \cdot p_{s_{ET^*}})$$

onde:

¹⁹ A sigla ET^* (*Effective temperature*) foi adotada para manter a nomenclatura original, uma vez que os textos nacionais que se referem à temperatura efetiva utilizam métodos diferentes de cálculo.

t_o é a temperatura operativa;

w é a umidade da pele;

I_m é a permeabilidade da roupa à umidade;

LR é a relação de Lewis;

p_a é a pressão de vapor;

$p_{s_{ET^*}}$ é a pressão de saturação na temperatura efetiva.

A temperatura operativa é a temperatura uniforme de um ambiente hipotético com uma envoltória negra imaginária no qual um ocupante apresentaria a troca térmica radiante e convectiva que ele apresenta no ambiente não uniforme real. Numericamente, é a média entre a temperatura de bulbo seco do ar (TBS) e a temperatura média radiante (trm), ponderada pelos respectivos coeficientes de troca térmica (h_c e h_r). Desse modo, a equação é:

$$t_o = h_r \cdot trm + h_c \cdot TBS / (h_r + h_c)$$

onde:

h_r é o coeficiente de trocas radiativas;

h_c é o coeficiente de trocas convectivas;

trm é a temperatura radiante média;

TBS é a temperatura de bulbo seco.

Usualmente, para o cálculo de ET^* , assume-se que a temperatura efetiva é dada por retas na carta psicrométrica, passando pelo ponto onde a umidade relativa 50% para aquela temperatura. A inclinação dessas retas é igual a $0,023 \cdot (ET^* - 14)$, caso $ET^* < 30$, e $0,028 \cdot (ET^* - 14)$ para $ET^* > 30$ (SZOKOLAY, 2001).

Deste modo, tendo-se a temperatura operativa e a umidade absoluta de um ponto, é possível, através de cálculo iterativo, encontrar a temperatura efetiva para aquela condição.

Para ilustrar o significado desse índice, a Tabela 2 indica algumas relações entre ET^* e pares de t_o e UR:

Tabela 2 – Valores de temperatura operativa e umidade relativa equivalentes a algumas temperaturas efetivas

$ET^* (^{\circ}C)$	$t_o (^{\circ}C)$	UR (%)
25	23	100
25	25	50
25	27	9
30	27	95
30	30	50
30	35	6

A temperatura de conforto (t_c) é dada pela equação:

$$t_c = 18,9 + 0,255 \cdot ET^* \text{ externa}$$

Dentro de uma faixa de tolerância de $\pm 2,5^\circ\text{C}$ dessa temperatura, 90% dos ocupantes ou mais estariam satisfeitos com as condições térmicas do ambiente. Admitindo-se uma tolerância de $\pm 3,5^\circ\text{C}$, obter-se-ia um índice de satisfação de 80%.

São então calculadas as temperaturas efetivas externas para cada hora do banco de dados climáticos anual, assumindo-se que $t_o = \text{TBS}$. A temperatura efetiva usada no cálculo de t_c é a temperatura média de todas as horas dos últimos 30 dias.

Em relação ao índice de IBUTG, observa-se que, como a temperatura de bulbo úmido no Rio de Janeiro dificilmente excede os 25°C , somente a partir de temperaturas de globo da ordem de 41°C seria necessária a interrupção das atividades de trabalho. Deste modo, este índice só deve ser considerado em ambientes condicionados naturalmente onde haja geração intensa de calor.

Para a determinação do índice de conforto para períodos condicionados naturalmente, foram calculadas as temperaturas de conforto ao longo do ano, conforme mostrado na Figura 1, já indicando os limites para 90% e 80% de satisfeitos.

Figura 1 – Variação de T_c ao longo do ano (cada linha vertical representa aproximadamente um mês)

Montou-se, então, uma planilha que compara a temperatura efetiva interna com os limites de conforto para cada uma das 8.760 horas do ano, que é utilizada na avaliação de desempenho dos ambientes durante o período de condicionamento natural dos ambientes.

Da mesma maneira, o índice proposto pelo modelo adaptativo foi desenvolvido para o clima da cidade de São Paulo, como mostra o Gráfico 35.

Gráfico 35 – Variação da T_c ao longo do ano, segundo o modelo adaptativo, SP

Tabela 9 – Faixas de T_c para segundo o modelo adaptativo, SP e RJ

	INVERNO		VERÃO	
	SP	RJ	SP	RJ
LIMITE SUPERIOR PARA 80% DE SATISFEITOS	26,7	27,8	28,5	29,9
LIMITE SUPERIOR PARA 90% DE SATISFEITOS	25,7	26,8	27,5	28,9
TEMPERATURA DE CONFORTO	23,2	24,3	25	26,4
LIMITE INFERIOR PARA 90% DE SATISFEITOS	20,7	21,8	22,5	23,9
LIMITE INFERIOR PARA 80% DE SATISFEITOS	19,7	20,8	21,5	22,9

Como pode ser observado no Gráfico 35 e Tabela 9, as temperaturas de conforto calculadas de acordo com o modelo adaptativo para São Paulo indicam 25°C como temperatura máxima de conforto no verão e 23,2°C como mínima no inverno. Considerando 90% de satisfeitos, a faixa fica entre 22,5°C e 27,5°C para o verão e 20,7°C e 25,7°C no inverno.

Já no Rio de Janeiro, as temperaturas de conforto propostas são de 24,3°C e 26,4°C, no inverno e verão, respectivamente. Para 90% de satisfeitos, essa

faixa fica entre 23,9 °C e 28,9 °C para o verão e 21,8°C e 26,8°C para o inverno.

Comparando-se o índice das duas cidades, observa-se uma diferença de aproximadamente 1°C.

Aplicando-se a temperatura de conforto proposta pelo modelo adaptativo no arquivo de clima (ano de referência de projeto) de cada cidade, tem-se:

Os Gráficos 36 e 37 mostram a TBS externa ao longo do ano de referência de projeto e a Tc proposta pelo modelo adaptativo aplicada ao ambiente interno, com ventilação natural. Essas condições externas, ao serem transferidas a um ambiente interno, sofrerão alterações que poderão aproximá-las ou afastá-las ainda mais da linha de Tc. A atividade em um ambiente de escritório já implica altas cargas de ocupação e equipamentos, o que reforça a importância do papel da edificação nas condições internas resultantes.

Gráfico 36 – TBS ao longo do ano de referência de projeto x Tc segundo o modelo adaptativo – RJ

Gráfico 37 – TBS ao longo do ano de referência de projeto x TC segundo o modelo adaptativo – SP

Para o clima de São Paulo, observa-se a maior parte de TBS abaixo da Tc proposta, porém seus picos (acima da linha de Tc) acontecem durante o período de ocupação. Para maximizar o período de conforto será importante que a edificação amenize os efeitos das altas temperaturas durante o verão e armazene certa quantidade de calor durante o inverno. A ventilação poderá exercer bem o papel de retirar o calor durante o verão e no inverno; a combinação de uma reduzida taxa de ventilação e massa térmica poderá ser uma boa alternativa para manter o ambiente a uma temperatura mais próxima da linha de Tc.

Já para o Rio de Janeiro, os valores de TBS estão bem divididos pela linha de Tc, deixando grande parte acima no verão e outra parte abaixo no inverno. Porém, mesmo no inverno, com os picos acima da faixa de conforto e dentro do período de ocupação e as cargas internas de ocupação, o uso de condicionamento artificial é inevitável, principalmente no período da tarde. A edificação também exercerá importante papel na redução da carga térmica interna, evitando a entrada do calor por sombreamento e permitindo a ventilação natural nas horas em que a temperatura externa for mais baixa que a interna. O uso de inércia nas paredes e estrutura, ao contrário de materiais isolantes, pode ajudar no balanço térmico.

3.3.2 Períodos de condicionamento artificial

Para os períodos de condicionamento artificial, serão adotados valores temperatura e umidade do ar de acordo com o proposto no relatório técnico CENPES-II-Arquitetura e Eco-eficiência: Clima, Insolação e Índices de Conforto (LABAUT, 2004). Os valores indicados como parâmetros de conforto são $TBS=26^{\circ}C$, $UR=65\%$ e $v_{AR}=0,1m/s$, pois além de atender a norma internacional ISO 7730 (1994) configurando uma situação com porcentagem de pessoas insatisfeitas inferior a 10%, atende às exigências da Norma Brasileira NBR 6401 (1980) e da Agência Nacional de Vigilância Sanitária (ANVISA, 2003).

3.3.3 Configuração do modo misto

Definidos os parâmetros de conforto para os períodos de condicionamento passivo e ativo, configurou-se o funcionamento do modo misto nesta pesquisa.

Os ambientes permanecem operando com as janelas abertas até que mais de 10%²⁰ dos usuários identifiquem uma situação de desconforto, de acordo com o modelo adaptativo apresentado anteriormente. Ao se configurar essa situação, as janelas se fecham e o sistema de ar-condicionado é acionado. Este permanecerá com os valores fixos de $TBS=26^{\circ}C$ e $UR=65\%$ até que as condições externas indiquem possibilidade de conforto com o sistema passivo novamente.

Na prática, o sistema de modo misto funcionaria pela automação capaz de medir as condições externas, prever as condições internas e indicar quando o ambiente pode funcionar com ventilação natural, desligando então o sistema ativo e comunicando aos usuários que podem abrir as janelas.

No caso de ausência de automação, o usuário fecharia as janelas quando se sentisse em desconforto e acionaria manualmente o sistema ativo. Porém teria que prever o momento favorável de reabri-las. Dependendo do clima e da edificação, essa variação de utilização do sistema ativo ou passivo poderá acontecer em períodos de um mesmo dia, ou em estações do ano alternadas.

Esta pesquisa procurou fornecer informações com relação à possibilidade de aplicação do modo misto em edifícios de escritórios no clima de São Paulo e Rio de Janeiro, como pré-análise de como seria a melhor maneira de operá-lo.

²⁰ Atendendo à ISO 7730.

O funcionamento do sistema de automação não foi explorado nesta pesquisa, porém é um assunto que poderá ser estudado posteriormente, verificando-se o impacto de sua instalação e manutenção não só em relação a um possível *retrofit*²¹ de um edifício de escritórios existente, com também em uma nova construção.

²¹ Neste trabalho, *retrofit* refere-se a uma readequação tecnológica de uma edificação. Não se trata apenas de uma reforma com mudança de *layout* e revestimentos, mas uma mudança em prol de melhor utilização da edificação, para maior eficiência energética, com atualização em seus sistemas e equipamentos, como iluminação, condicionamento ambiental, elevadores etc.

4 SIMULAÇÕES NOS MODELOS

Sabe-se que um edifício projetado para operar apenas com o sistema ativo poderá ter certas características que diferem de um edifício projetado para operar com o sistema passivo. Um edifício que utiliza apenas o ar-condicionado, por exemplo, poderá ser totalmente vedado, construído com materiais isolantes, com dimensões profundas de planta baixa etc. Já um edifício projetado em clima quente para a ventilação natural terá dimensões estreitas de planta baixa, aberturas nas fachadas que permitam uma ventilação cruzada, sombreamento externo que reduza a incidência solar e massa térmica exposta que possibilite trocas térmicas entre a estrutura e os ambientes, e inúmeras outras características dependendo do clima da região. Já um edifício projetado para o sistema de condicionamento de modo misto, que utiliza tanto o sistema passivo como o sistema ativo, deverá ser projetado seguindo qual dos dois padrões?

No caso do clima quente das duas cidades estudadas, pode-se começar aplicando-se ações que favorecem os dois sistemas: redução de ganhos de calor solar, com a redução e o sombreamento da área envidraçada da fachada. Depois disso, como o objetivo principal é diminuir o tempo de uso de ar-condicionado, deve-se potencializar os sistemas passivos ao máximo para verificar o tempo realmente necessário de utilização de sistemas ativos.

Em algumas situações, o sistema ativo poderá ser totalmente eliminado, em outras, porém, o ano poderá ser dividido em períodos longos de utilização dos dois sistemas. Nesse caso, além dos sistemas passivos, o equipamento de ar-condicionado a ser utilizado também deverá ser estudado detalhadamente para que o edifício opere o mais próximo possível do seu “ponto ótimo”. Sabe-se que algumas ações em prol da eficiência do ar-condicionado podem prejudicar o sistema passivo e vice-versa, assim, o “ponto ótimo” de operação de um edifício é o ponto em que seja possível a obtenção de conforto com sistemas passivos por algum período do ano, mas que, nos períodos de utilização do ar-condicionado, esse também opere com eficiência.

O “ponto ótimo” de um edifício depende do clima em que será inserido e do tipo de ocupação que ele terá. A utilização do sistema de condicionamento em modo misto em edifícios de escritórios, considerando-se sua utilização desde as etapas de projeto e definindo-se previamente os parâmetros de conforto de seus usuários, ainda não é uma prática no Brasil. Para o caso das cidades de São Paulo e Rio de Janeiro, esta pesquisa inicia a discussão sobre o tema e colhe resultados que permitirão mais reflexão sobre o assunto. O “ponto ótimo”

propriamente dito só será conhecido de fato após uma análise do sistema de ar-condicionado e uma análise econômica e financeira.

A adoção dos parâmetros de conforto propostos pelo modelo adaptativo, a alteração das configurações de temperatura e umidade dos sistemas de ar-condicionado e o fato de o usuário passar a ter certo controle dos sistemas e aberturas do ambiente em que trabalha são certamente uma mudança radical não só de rotina, mas principalmente cultural. A idéia de que o sistema de ar-condicionado é capaz de prover conforto independentemente do clima externo e a prática de configurar o sistema com temperaturas cada vez mais baixas são um retrato de uma cultura bastante enraizada e aparentemente difícil de ser quebrada. Porém grande porcentagem dos usuários que trabalham nesse tipo de edifício sente frio e sofre com a grande variação de temperatura entre o ambiente interno e externo, apresentando rotineiramente problemas de saúde. Essa situação é facilmente confirmada quando os usuários fecham as saídas de insuflamento de ar, abrem as janelas mesmo com o ar-condicionado ligado e vestem casacos. Pensando dessa forma, diante de boa parcela dos usuários não satisfeitos com a atual maneira de utilização do ar-condicionado, a barreira para o modo misto pode não ser tão intransponível quanto possa parecer inicialmente.

4.1 Modelo geométrico M1 e M2

Os modelos geométricos 1 e 2 (M1 e M2) utilizados nas duas primeiras etapas de simulações desta dissertação foram os mesmos definidos por Dilonardo (2001) e novamente utilizados por Pirró (2005).

O modelo geométrico (dimensões de planta baixa, pé-direito, distribuição dos ambientes, presença de piso elevado e forro rebaixado) foi definido baseado na análise dos resultados de quatro pesquisas realizadas em edifícios de escritórios no setor comercial na cidade de São Paulo com o objetivo comum de diagnosticar a relação entre o projeto de arquitetura e os respectivos consumos de energia elétrica. Os resultados das quatro pesquisas comprovam a estreita relação entre essas duas variáveis e a importância do clima local na concepção do projeto arquitetônico.

Assim, o modelo proposto representa o padrão atual de construção de edifícios de escritórios na cidade de São Paulo e segue os seguintes conceitos:

- ✧ forma paralelepipedica com quatro zonas periféricas de igual área;
- ✧ existência de uma zona central (*core*);
- ✧ área do pavimento em planta: 1225 m² (35 m x 35 m);

✱ altura do pé-direito (piso interno acabado ao forro): 2,70 m.

Figura 17 – Modelo geométrico definido por Dilonardo (2001)

O que diferencia o modelo 1 do modelo 2 é apenas a fachada. A fachada do modelo 1 foi configurada com $WWR^{22}=100\%$, sem elementos de proteção solar, enquanto o modelo 2 tem $WWR=50\%$, com proteção externa total nas quatro fachadas. Reduzindo-se o WWR de 100% para 50% e adicionando-se elementos de proteção solar nas áreas envidraçadas, os ganhos solares são consideravelmente reduzidos (a incidência de radiação direta na área envidraçada é eliminada), melhorando o desempenho térmico da fachada e contribuindo para a redução da carga térmica do ar-condicionado.

Esse conjunto de ações visa maximizar o potencial passivo do modelo 1 com a reforma de fachada e avaliar o potencial de redução da carga térmica interna dos edifícios de escritórios que vêm sendo construídos atualmente.

Tanto a primeira como a segunda etapa de simulações desta pesquisa teve o objetivo de avaliar o desempenho térmico de edifícios de escritórios que seguem o padrão atual de construção na cidade de São Paulo do ponto de vista do sistema de modo misto de condicionamento ambiental. Em outras palavras, pretende-se testar o modelo de edifício de escritórios encontrado na cidade, operando em modo misto de condicionamento, verificando-se a possibilidade de adaptação dos edifícios existentes ao modo misto.

²² Neste trabalho, *Window Wall Ratio* (WWR) é a porcentagem de vidro (área transparente) na fachada, correspondente ao pé-direito interno do ambiente, excluindo-se a área de fachada que abrange a estrutura (laje e viga).

No programa TAS, as zonas térmicas norte, sul, leste e oeste foram divididas com *constructions lines* (CL), interpretadas pelo programa como limites de zonas térmicas, porém não como barreiras físicas. As quatro zonas são completamente interligadas.

Com base nas descrições apresentadas anteriormente, os modelos geométricos adotados na primeira e segunda etapa da pesquisa foram configurados no programa TAS de acordo com as imagens a seguir:

Figura 18 – Planta baixa, M1 e M2

Figura 19 – Corte e fachada esquemáticos, M1 (WWR=100%)

Figura 20 – Fachada esquemática, M2 (WWR=50%)

Figura 21 – Corte esquemático das fachadas norte e sul, M2, com elementos de proteção solar externos (*brise soleil*)

Figura 22 – Corte esquemático das fachadas leste e oeste, M2, com elementos de proteção solar externos (*brise soleil*)

Figura 23 – Detalhe esquemático do piso elevado/laje/forro, M1 e M2

4.2 Parâmetros físicos de simulação das etapas 1 e 2

Latitude

As latitudes adotadas para as cidades de São Paulo e Rio de Janeiro foram as mesmas consideradas nos respectivos arquivos de clima:

- ☼ SP: 23°62' S;
- ☼ RJ: 22°54' S.

Orientação

A orientação do modelo adotada foi com as faces voltadas a Norte/Sul/Leste/Oeste.

⊗ Ângulo do norte geográfico em relação ao *grid*: 0.

Pavimentos

Para efeito de simulação de um andar tipo intermediário, foram modelados quatro pavimentos, sendo um térreo apoiado no solo, o primeiro pavimento, um intermediário, do qual se extraíram os resultados, e pavimento superior, todos com as mesmas características internas. Assim, os pavimentos e as respectivas alturas foram definidos da seguinte maneira:

Tabela 10 – Dados de entrada sobre os pavimentos do modelo simulado

	TÉRREO	PRIMEIRO PAVIMENTO	PAVIMENTO INTERMEDIÁRIO	PAVIMENTO SUPERIOR
EM CONTATO COM O SOLO	sim	não	não	Não
NÍVEL DO PISO	0	3,10m	6,20m	9,30m
ALTURA PISO A PISO	3,10m	3,10m	3,10m	3,10m

Fachadas

Foram simulados dois tipos de fachada, um com WWR de 100% e outro com WWR de 50%. As dimensões das áreas transparentes consideradas para cada modelo estão descritas a seguir:

⊗ M1: WWR=100% sem sombreamento externo. Área envidraçada: largura = 6,90m; altura = 2,60m; peitoril = 0,05m.

Figura 24 – Imagem tridimensional no programa de simulação TAS, M1

- ✱ M2: WWR=50% com sombreamento externo total nas quatro fachadas. Área envidraçada: largura = 6,90m; altura = 1,35m; peitoril = 1,00m. Os elementos de sombreamento externo foram dimensionados para sombrear a área envidraçada durante todo o período de ocupação. Eles não aparecem no modelo geométrico do TAS, porém são atribuídos a cada janela na segunda etapa da simulação, no módulo TAS Building Simulator.

Figura 25 – Imagem tridimensional no programa de simulação TAS, M2

Zonas térmicas

Foram definidas cinco zonas térmicas no modelo: Norte, Sul, Leste e Oeste, referentes aos ambientes de escritórios, e o *core*, ambiente central de circulação onde se localizam os elevadores, escadas, sanitários etc. Todos os ambientes de escritórios apresentam as mesmas características, diferenciadas apenas pela orientação.

Materiais

Tabela 11 – Parâmetros fixos de simulação – escritórios e *core* central

Ambiente	Elemento	Material
Zonas: Norte, Sul, Leste e Oeste	Janela	Janelas com esquadria de alumínio (5% da área) e vidro verde 6 mm. $U_{VIDRO}=5,73W/m^2.°C$ $Str_{VIDRO}=0,64$
	Parede externa (peitoril-opaco) $U_{HOR}=0,89W/m^2.°C$	Painel de concreto celular (640kg/m ³ e 0,16W/m ² °C) 10cm + granito 1,5cm.
	Piso (P)	Piso elevado metálico com carpete, 10cm sobre a laje.
	Laje de concreto (L)	Laje de concreto de 15cm (2000kg/m ³).
	Forro (F) $U_{VERT/P+L+F}=0,85W/m^2.°C$	Forro modular acústico 1,5cm, 20cm abaixo da laje.
Zona: <i>core</i> central (área: 49m ²)	Parede interna $U_{HOR}=0,43W/m^2.°C$	Parede sistema <i>dry wall</i> : painel de gesso 1,25cm + lâ de vidro + painel de gesso 1,25cm. Espessura total de 10cm.
	Piso	Laje de concreto (2000kg/m ³) de 15cm, câmara de ar de 10cm, piso elevado metálico com carpete.
	Forro	Forro modular acústico 1,5cm, câmara de ar de 20cm abaixo da laje de concreto (2000kg/m ³) de 15cm.

Carga térmica de equipamentos

- ✧ iluminação artificial: 12 W/m²;
- ✧ equipamentos: 27,5W/m². Foi considerado um computador por pessoa + 10% referentes a impressoras, copiadoras etc. (200W + 20W). 1 pessoa/8m² = 220W/8m² = 27,5W/m².

Carga térmica de ocupação

- ✧ ambientes de escritório²³: 1 pessoa/8m²: 140W/8m² = 17,5W/m², sendo: calor sensível: 65W/8 m² = 8,12W/m² e calor latente: 75W/8m² = 9,37W/m²;
- ✧ core central²⁴: 0,3 pessoa/m²: 36W/m², sendo: calor sensível: 18,9W/8m² e calor latente: 17,1W/8m².

Período de ocupação

Foi considerado período de ocupação das 8h às 18h.

Configuração do termostato do ar-condicionado

As simulações de condicionamento ativo com os modelos M1 e M2 foram configuradas no TAS de duas maneiras:

- ✧ TBS=24°C e UR=50% – refletindo a prática atual em grande parte dos edifícios de escritórios (apenas para M1);
- ✧ TBS=26°C e UR=65% – parâmetro de conforto para sistema ativo definido no capítulo 3, para esta pesquisa.

Configuração de aberturas para ventilação natural

As simulações de ventilação natural foram configuradas pela porcentagem de abertura das áreas envidraçadas e submetidas a um *schedule*, ou seja, um calendário que determina o horário de abertura e fechamento das áreas envidraçadas. As simulações com ventilação natural das etapas 1 e 2 foram configuradas com ventilação 24 horas.

Para dimensionamento das aberturas, imaginou-se uma área de 30cm de altura por toda a extensão da fachada. Esses 30cm representam uma proporção de

²³ Escritório: atividade moderada: 140W (65W c. sensível + 75W c. latente) (FROTA, 2001).

²⁴ Em pé, em repouso: 120W (63W c. sensível + 57W c. latente) (FROTA, 2001).

11,1% da fachada dos modelos 1 e 2 que, na prática, podem ser executados de várias maneiras: por uma bandeira maxim-ar no próprio vidro, uma grelha tipo veneziana de 60cm de altura com abertura de 50% ou ainda dividida em duas de 30cm, sendo uma posicionada rente ao piso e a outra rente ao forro, colaborando também para uma ventilação de efeito chaminé, na ausência de vento externo. Diferentes maneiras de posicionamento das aberturas podem representar certo controle na maneira pela qual o vento atinge o ambiente e o usuário. Assim, essa definição passa a ser uma questão de projeto e estudo da distribuição do ar dentro do ambiente, onde o mobiliário e as divisórias também exercem influência no resultado. Essa proporção de abertura representa 3,6% da área do piso de cada zona.

O programa TAS calcula o número de trocas de volume de ar por hora automaticamente, de acordo com os parâmetros horários de vento do arquivo de clima, e reflete o efeito dessa ventilação nos resultados. Com vento a 3m/s, essa proporção de abertura permitiria até 7,1 trocas de ar por hora, por zona. Para um estudo mais abrangente, como o caso desta pesquisa, esse dimensionamento proposto foi aplicado nas simulações dos modelos 1 e 2 apenas como uma abertura de 11,1% da fachada. No modelo 1, com WWR=100%, essa proporção representa 11,1% da área envidraçada, e no modelo 2, WWR=50%, essa proporção representa 22,2% das janelas.

4.3 Primeira etapa de simulações (M1)

4.3.1 Configuração das simulações 1 a 4

A primeira etapa trata da avaliação do desempenho térmico e energético do modelo 1 de edifício de escritórios, representativo para a atual arquitetura implantada na cidade de São Paulo.

As simulações de 1 a 4 foram feitas apenas com o sistema de ar-condicionado durante todo o período de ocupação dos ambientes de escritórios, considerando a realidade da maioria dos edifícios existentes, com vidros fixos e sem sombreamento, porém com diferentes configurações de termostato: TBS: 24°C e UR:50% e TBS: 26°C e UR:65% com o objetivo de:

- ✧ analisar o impacto da configuração do termostato do ar-condicionado na carga térmica;
- ✧ comparar a carga térmica resultante do modelo 1 submetido ao clima das duas cidades: São Paulo e Rio de Janeiro.

Assim, as simulações foram configuradas de acordo com a Tabela 12:

Tabela 12 – Descrição das simulações 1 a 4, M1

Modelo M1: WWR=100%, vidros fixos, sem sombreamento externo, com ocupação			
Simulação	Sistema de condicionamento:	Arquivo climático	Cidade
1	Ar-condicionado (8h às 18h) <ul style="list-style-type: none"> • TBS: 24°C • UR: 50% 	<ul style="list-style-type: none"> • Ano referência proj. • Dia referência verão 	São Paulo
2		<ul style="list-style-type: none"> • Ano referência proj. • Dia referência verão 	Rio de Janeiro
3	Ar-condicionado (8h às 18h) <ul style="list-style-type: none"> • TBS: 26°C • UR: 65% 	<ul style="list-style-type: none"> • Ano referência proj. • Dia referência verão 	São Paulo
4		<ul style="list-style-type: none"> • Ano referência proj. • Dia referência verão 	Rio de Janeiro

4.3.2 Simulação 1: M1 – SP – AC (24°C, 50%)

A simulação 1, caracterizada de acordo com as informações da Tabela 12, para o ano climático de referência da cidade de São Paulo, apresentou suas cargas térmicas internas (sensível e latente) distribuídas de acordo com o Gráfico 38²⁵, em relação aos meses e zonas norte, sul, leste e oeste.

Gráfico 38 – Simulação 1: cargas térmicas (sensível + latente) mensais por zona, M1, SP

Tabela 13 – Simulação 1: carga térmica total anual, M1, SP, AC (24°C 50%)

ZONA	CARGA TÉRMICA TOTAL ANUAL (kW)
NORTE	51.848
SUL	46.642
LESTE	50.243
OESTE	48.975
TOTAL	197.708

Nos modelos 1 e 2, as quatro zonas estão interligadas internamente, portanto a distribuição das cargas térmicas entre as zonas se mantém numa proporção muito próxima de 25% em cada zona, em todos os meses do ano. Os meses de verão apresentam cargas mais elevadas que os de inverno, caracterizando bem as duas estações extremas do ano. A carga térmica total anual é de 197.708kW.

²⁵ Os gráficos passíveis de comparação, como o caso das simulações 1 a 4, estão apresentados com a mesma escala de valores, facilitando a visualização das diferenças de resultados.

Para análise da distribuição de ganhos e perdas térmicas do modelo 1, na cidade de São Paulo, foi feito o Gráfico 39, que os apresenta hora a hora, durante o dia crítico de verão.

No caso de São Paulo, o dia crítico de verão é 11 de fevereiro de 2003, conforme descrito no capítulo 2. As quatro zonas apresentaram comportamento bastante semelhante, com variação apenas nas horas de concentração dos ganhos solares. Na zona leste os ganhos solares se concentram no período da manhã e na zona oeste, no período da tarde. A zona sul apresenta gráfico similar ao da zona norte, pois no verão também há incidência de sol direta na fachada sul.

Gráfico 39 – Simulação 1: ganhos e perdas térmicas, dia crítico de verão, M1, SP, zona norte

Gráfico 40 – Simulação 1: ganhos e perdas térmicas, dia crítico de verão, M1, SP, zona sul

Gráfico 41 – Simulação 1: ganhos e perdas térmicas, dia crítico de verão, M1, SP, zona leste

Gráfico 42 – Simulação 1: ganhos e perdas térmicas, dia crítico de verão, M1, SP, zona oeste

Os maiores ganhos térmicos se dão pela carga de ocupação constante das 8h às 18h (pessoas, iluminação artificial e equipamentos). Os ganhos solares também são bastante representativos, já que a fachada de vidro não conta com nenhum tipo de proteção solar. As trocas internas se dão entre as quatro zonas, que são totalmente interligadas.

O balanço térmico se configura com a retirada de carga sensível e latente pelo sistema de ar-condicionado.

4.3.3 Simulação 2: M1 – RJ – AC (24°C, 50%)

A simulação 2 foi configurada da mesma maneira que a anterior, porém para a cidade do Rio de Janeiro, e apresentou cargas térmicas internas (sensível e latente) distribuídas de acordo com o Gráfico 43, em relação aos meses e zonas norte, sul, leste e oeste.

Gráfico 43 – Simulação 2: cargas térmicas (sensível + latente) mensais por zona, M1, RJ

Tabela 14 – Simulação 2: carga térmica total anual, M1, RJ, AC (24°C 50%)

ZONA	CARGA TÉRMICA TOTAL ANUAL (kW)
NORTE	64.095
SUL	59.246
LESTE	61.080
OESTE	64.226
TOTAL	248.646

O modelo 1, inserido no clima do Rio de Janeiro, apresentou a mesma proporção de distribuição de carga térmica entre as zonas (norte, sul, leste e oeste) durante os 12 meses do ano, porém com valores absolutos mais elevados que os apresentados na primeira simulação, evidenciando a característica do clima mais quente no Rio de Janeiro. A carga térmica total anual é de 248.646kW, 26% mais elevada que em São Paulo.

A distribuição de ganhos e perdas térmicas da zona norte do modelo 1, no dia crítico de verão, na cidade do Rio de Janeiro (9 de fevereiro de 2003), com ar-condicionado funcionando com TBS: 24°C e UR:50%, se dá conforme o Gráfico 44.

Gráfico 44 – Simulação 2: ganhos e perdas térmicas, dia crítico de verão, M1, RJ, zona norte

Muito semelhante ao que acontece em São Paulo, nas mesmas condições, os maiores ganhos se dão pela ocupação (pessoas, iluminação artificial e equipamentos), seguidos dos ganhos solares. Para compensar os ganhos, a perda ocorre na retirada da carga pelo sistema de ar-condicionado.

Os gráficos para São Paulo e Rio de Janeiro (Gráficos 29 e 30), no dia crítico de verão, são muito parecidos em proporção e valores absolutos, pois a variação de temperatura e umidade do ar também se mostrou muito semelhante nesses dois dias.

4.3.4 Simulação 3: M1 – SP – AC (26°C 65%)

Essa simulação repete as condições da simulação 1, porém com parâmetros do sistema de ar-condicionado configurados para TBS: 26°C e UR: 65%, de acordo com as informações da Tabela 12.

Para o ano climático de referência da cidade de São Paulo, as cargas térmicas mensais internas (sensível e latente) se distribuem de acordo com o Gráfico 45, em relação às zonas norte, sul, leste e oeste.

Gráfico 45 – Simulação 3: cargas térmicas (sensível + latente) mensais por zona, M1, SP

Tabela 15 – Simulação 3: carga térmica total anual, M1, SP, AC (26°C 65%)

ZONA	CARGA TÉRMICA TOTAL ANUAL (kW)
NORTE	45.320
SUL	40.370
LESTE	43.812
OESTE	42.565
TOTAL	172.067

Aumentando-se os parâmetros de TBS e UR do sistema de ar-condicionado, de 24°C e 50% para 26°C e 65%, a proporção das cargas térmicas mensais se mantém entre as zonas, porém os valores absolutos caem em média 13%.

Comparando-se os gráficos de ganhos e perdas térmicas das simulações 1 e 3, a diferença se dá na perda de carga sensível pelo sistema de ar-condicionado, pois, para manter uma temperatura mais baixa, é necessário retirar mais carga.

Gráfico 46 – Simulação 3: ganhos e perdas térmicas, dia crítico de verão, M1, SP, zona norte

4.3.5 Simulação 4: M1 – RJ – AC (26°C, 65%)

A simulação 4 repete as condições da simulação 2, porém com parâmetros do sistema de ar-condicionado configurados para TBS: 26°C e UR: 65%, de acordo com as informações da Tabela 12.

Para o ano climático de referência da cidade do Rio de Janeiro, as cargas térmicas mensais internas (sensível e latente) se distribuíram de acordo com o Gráfico 47, em relação às zonas norte, sul, leste e oeste.

Gráfico 47 – Simulação 4: cargas térmicas (sensível + latente) mensais por zona, M1, RJ

Tabela 16 – Simulação 4: carga térmica total anual,
M1, RJ, AC (26°C 65%)

ZONA	CARGA TÉRMICA TOTAL ANUAL (kW)
NORTE	56.806
SUL	52.296
LESTE	53.831
OESTE	55.170
TOTAL	218.103

Da mesma maneira que na cidade de São Paulo, os valores absolutos das cargas térmicas mensais no Rio de Janeiro caem em média 13%, apenas alterando os parâmetros de TBS e UR de 24°C e 50% para 26°C e 65%. Com relação à distribuição entre zonas, a proporção também é mantida, como nos casos anteriores. Em relação a São Paulo, esse modelo apresenta um acréscimo de carga térmica de 27%.

Gráfico 48 – Simulação 4: ganhos e perdas térmicas, dia crítico de verão, M1, RJ

Da mesma maneira que acontece em São Paulo, no Rio de Janeiro, a diferença entre os gráficos de ganhos e perdas térmicas das simulações 2 e 4 também se dá na perda de carga sensível pelo sistema de ar-condicionado. Isso acontece, pois, para se manter a temperatura do ar interno a 24°C, é necessário retirar mais carga térmica do que é preciso para manter a temperatura a 26°C.

4.3.6 Análises comparativas entre as simulações 1 a 4

Gráfico 49 – Cargas térmicas totais/anuais do pavimento tipo, resultantes das

Figura 26 – Variação de carga térmica de acordo com termostato do sistema de ar-condicionado, M1, SP e RJ

O Gráfico 49 compara o total de carga térmica (sensível + latente) retirada pelo sistema de ar-condicionado, no pavimento tipo (somatória das cargas térmicas das zonas norte, sul, leste e oeste) durante um ano, de acordo com as configurações definidas para as quatro primeiras simulações, descritas anteriormente. Comparado-se as cargas térmicas, de acordo com a Figura 26, conclui-se que:

- ✧ tanto para os parâmetros de TBS=24°C e UR=50% como para TBS=26°C e UR=65%, o Rio de Janeiro apresenta carga térmica total anual entre 26% e 27% maior que São Paulo;
- ✧ alterando-se os parâmetros de TBS=24°C e UR=50% para TBS=26°C e UR=65%, São Paulo e Rio de Janeiro apresentam uma redução de carga térmica total anual de 13%.

4.3.7 Configuração das simulações 5 a 8

Com o objetivo de avaliar o efeito da ventilação natural no modelo M1, foi feita uma nova sequência de simulações, numeradas de 5 a 8, utilizando-se os arquivos de clima de mês crítico de verão, inverno e ano de referência de projeto das cidades de São Paulo e Rio de Janeiro, como mostra a Tabela 17.

Tabela 17 – Descrição das simulações 5 a 8, M1

Modelo M1: WWR=100%, sem sombreamento externo, com ocupação			
Simulação	Sistema de condicionamento:	Arquivo climático	Cidade
5	<ul style="list-style-type: none"> Sem ar-condicionado Vidros fixos 	<ul style="list-style-type: none"> Dia referência verão Dia referência inverno 	São Paulo
6		<ul style="list-style-type: none"> Dia referência verão Dia referência inverno 	Rio de Janeiro
7	<ul style="list-style-type: none"> Ventilação natural 24h Abertura de 11,1% nas fachadas Avaliação da possibilidade de modo misto 	<ul style="list-style-type: none"> Dia referência verão Dia referência inverno Ano referência proj. 	São Paulo
8		<ul style="list-style-type: none"> Dia referência verão Dia referência inverno Ano referência proj. 	Rio de Janeiro

4.3.8 Simulações 5 e 6: M1 – SP/RJ – vidros fixos sem AC

Para ilustrar a dependência do sistema de ar-condicionado, nos casos em que os edifícios são idealizados com fachadas de caixilhos fixos, as simulações 5 e 6 foram configuradas para os dias críticos de verão e inverno, nas cidades de São

Paulo e Rio de Janeiro, imaginando-se ausência do sistema de condicionamento artificial.

Gráfico 50 – Simulação 5: desempenho térmico, fachada selada sem ar-condicionado, dia crítico de verão e inverno, M1, SP

Gráfico 51 – Simulação 6: desempenho térmico, fachada selada sem ar-condicionado, dia crítico de verão e inverno, M1, RJ

Os Gráficos 50 e 51 apresentam as temperaturas de conforto para verão e inverno, propostas pelo modelo adaptativo para as cidades de São Paulo e Rio de Janeiro. Essas temperaturas servirão, neste caso, apenas como uma referência, já que, para avaliar condições de conforto para ambientes condicionados naturalmente, deve-se comparar a temperatura efetiva (TE) interna à T_c , e não a TBS. A TE é uma relação entre TBS, TRM e UR.

Observando os Gráficos 50 e 51, pode-se dizer que:

- ✧ as quatro zonas do pavimento típico avaliado apresentam desempenho térmico muito semelhante, sendo a diferença entre elas praticamente imperceptível;
- ✧ a temperatura interna permanece mais elevada que a externa em todas as situações apresentadas, e acima das T_c propostas para o sistema passivo, durante o período de ocupação (8 às 18h);
- ✧ em São Paulo, no dia de referência de projeto de verão, a temperatura interna chega ao pico de $58,5^{\circ}\text{C}$, às 15h, enquanto a TBS externa é 34°C , ou seja, **$24,5^{\circ}\text{C}$** mais alta que a externa;
- ✧ no dia de referência de projeto de inverno, ainda em São Paulo, enquanto a temperatura externa é de 14°C , às 12h, a temperatura interna é de $37,5^{\circ}\text{C}$, **$23,5^{\circ}\text{C}$** mais alta que a externa;
- ✧ no Rio de Janeiro, no dia de referência de projeto de verão, a temperatura interna chega ao pico de $61,8^{\circ}\text{C}$, às 12h, enquanto a TBS externa é 34°C , ou seja, **$27,8^{\circ}\text{C}$** mais alta que a externa;
- ✧ no dia de referência de projeto de inverno, ainda no Rio de Janeiro, enquanto a temperatura externa é de 17°C , às 14h, a temperatura interna é de $45,3^{\circ}\text{C}$, **$28,5^{\circ}\text{C}$** mais alta que a externa.

As situações apresentadas nos itens anteriores ilustram a total dependência do sistema de condicionamento artificial em edifícios de escritórios semelhantes ao modelo M1, com fachada selada, tanto no Rio de Janeiro como em São Paulo, durante o ano todo.

Mesmo em uma situação crítica de inverno, as temperaturas internas máximas atingidas em São Paulo e Rio de Janeiro, $37,5^{\circ}\text{C}$ e $45,3^{\circ}\text{C}$, respectivamente, caracterizam situações de dependência de ar-condicionado.

Vale lembrar que as simulações foram feitas sempre se considerando a carga de ocupação, pois o objetivo da pesquisa é avaliar o desempenho de edifícios de escritórios em funcionamento, ou seja, avaliar a capacidade do edifício de atender a necessidade do usuário.

4.3.9 Simulações 7 e 8: M1 – SP/RJ – ventilação natural

Ao contrário das simulações 5 e 6, as simulações 7 e 8 contam com a possibilidade de abrir janelas, para se avaliar o efeito da ventilação natural no modelo M1. Uma abertura de proporção de 11,1% da fachada foi aplicada na sua área envidraçada, permanecendo aberta por 24 horas, conforme parâmetros de simulação das etapas 1 e 2, descrito no início deste capítulo.

Gráfico 52 – Simulação 7: TBS interna com ventilação natural 24h, dia crítico de verão e inverno, M1+abertura, SP

Gráfico 53 – Simulação 8: TBS interna com ventilação natural 24h, dia crítico de verão e inverno, M1+abertura, RJ

Conforme explicado anteriormente, as T_c para verão e inverno para SP e RJ, apresentadas nos Gráficos 52 e 53 e propostas pelo modelo adaptativo, devem ser vistas apenas como uma referência, já que, para avaliar condições de conforto em ambientes condicionados naturalmente, deve-se comparar a temperatura efetiva interna à T_c , e não a TBS. A TE é uma relação entre TBS, TRM e UR.

4.3.10 Análises comparativas entre as simulações 5 a 8

Com base nos Gráficos 50 a 53, pode-se afirmar:

- ✧ a temperatura interna ainda permanece mais elevada que a externa durante o período de ocupação em todas as situações apresentadas, porém com uma diferença entre elas bastante reduzida em relação às simulações 5 e 6;
- ✧ em São Paulo, no dia de referência de projeto de verão, a temperatura interna chega ao pico de 39,1°C, às 17h, enquanto a TBS externa é 35°C, ou seja, **4,1°C** mais alta que a externa;
- ✧ no dia de referência de projeto de inverno, ainda em São Paulo, enquanto a temperatura externa é de 14°C, às 14h, a temperatura interna é de 17,4°C, **3,4°C** mais alta que a externa;
- ✧ no Rio de Janeiro, no dia de referência de projeto de verão, a temperatura interna chega ao pico de 42°C, às 13h, enquanto a TBS externa é 35°C, ou seja, **7°C** mais alta que a externa;
- ✧ no dia de referência de projeto de inverno, ainda no Rio de Janeiro, enquanto a temperatura externa é de 17°C, às 13h, a temperatura interna é de 23,9°C, **6,9°C** mais alta que a externa;
- ✧ abrindo-se 11,1% da fachada do modelo M1, 24h, a diferença entre a TBS externa e a TBS interna reduziu em 20°C em relação à fachada selada, tanto no dia de referência de verão como no de inverno, para as duas cidades, o que demonstra o forte papel que a ventilação natural exerce no balanço térmico da edificação;
- ✧ no caso das duas cidades, para o dia de referência de projeto de verão, as condições térmicas internas ainda exigem o uso de um sistema de condicionamento artificial, pois apresentam temperaturas internas muito acima da linha da Tc;
- ✧ para o dia de referência de projeto de inverno, em São Paulo, enquanto o modelo com fachada selada resultava em temperaturas mais elevadas que a Tc durante todo o período de ocupação, com a abertura de 11,1% da fachada, a TBS interna, nas quatro zonas, permanece das 8h às 18h abaixo da Tc, indicando a necessidade de redução da abertura para se obter condição de conforto;
- ✧ já para o Rio de Janeiro, o dia referência de inverno apresentaria temperaturas internas, nas quatro zonas, das 8h às 18h, bem próximas da Tc;

- o modelo M1, com ventilação natural, indica possibilidade de atingir condições de conforto, no inverno, para as duas cidades.

4.3.11 Simulação 7: M1 – SP – ventilação, arquivo de clima anual

Com o objetivo de avaliar a possibilidade de utilização do sistema de modo misto de condicionamento ambiental, as simulações 7 e 8 foram feitas também com o arquivo de clima anual.

Os resultados horários de temperatura média radiante, temperatura e umidade relativa do ar de cada zona foram utilizados no cálculo da temperatura efetiva interna e comparados com a temperatura de conforto, calculada segundo método proposto pelo modelo adaptativo, para o arquivo climático de São Paulo e Rio de Janeiro, apresentado no capítulo 3 deste trabalho.

O resultado dessa avaliação é uma análise mensal da porcentagem de tempo em que a zona avaliada se encontra na faixa de conforto ou em desconforto por frio ou calor, considerando-se 10% e 20% de pessoas insatisfeitas, porém esta pesquisa aceitará apenas 10%, como propõe a ISO 7730 (1994).

Os períodos que indicarem situação de desconforto por frio poderão ainda ser resolvidos com diminuição da abertura proposta, já os períodos que indicarem situação de desconforto por calor terão que ser submetidos ao sistema ativo, configurando-se assim, o sistema de modo misto.

Tabela 18 – Porcentagem de horas em conforto na zona norte, simulação 7, 20% de insatisfeitos

Ocupação			
Início	8	Fim	17
Mês	Frio	Conforto	Quente
Janeiro	0,0%	24,8%	75,2%
Fevereiro	0,0%	21,5%	78,5%
Março	0,0%	29,5%	70,5%
Abril	0,0%	29,5%	70,5%
Maio	0,0%	23,8%	76,2%
Junho	3,0%	69,6%	27,4%
Julho	3,3%	58,6%	38,1%
Agosto	8,6%	74,5%	16,8%
Setembro	5,0%	64,0%	31,0%
Outubro	1,7%	61,7%	36,5%
Novembro	0,9%	61,4%	37,7%
Dezembro	0,0%	46,7%	53,3%
Ano	2,6%	49,2%	48,2%

Tabela 19 – Porcentagem de horas em conforto na zona norte, simulação 7, 10% de insatisfeitos

Ocupação			
Início	8	Fim	17
Mês	Frio	Conforto	Quente
Janeiro	0,0%	14,3%	85,7%
Fevereiro	0,0%	13,5%	86,5%
Março	1,4%	17,3%	81,4%
Abril	1,4%	17,3%	81,4%
Maio	0,5%	17,1%	82,4%
Junho	5,7%	50,4%	43,9%
Julho	7,6%	32,4%	60,0%
Agosto	16,8%	50,0%	33,2%
Setembro	10,5%	46,0%	43,5%
Outubro	5,2%	37,0%	57,8%
Novembro	2,7%	36,8%	60,5%
Dezembro	0,0%	26,7%	73,3%
Ano	5,3%	31,7%	63,0%

Tabela 20 – Porcentagem de horas em conforto na zona sul, simulação 7, 20% de insatisfeitos

Ocupação			
Início	8	Fim	17
Mês	Frio	Conforto	Quente
Janeiro	0,0%	30,0%	70,0%
Fevereiro	0,0%	28,5%	71,5%
Março	0,9%	38,6%	60,5%
Abril	0,9%	38,6%	60,5%
Maio	0,5%	39,0%	60,5%
Junho	7,4%	82,2%	10,4%
Julho	7,1%	79,5%	13,3%
Agosto	22,3%	72,7%	5,0%
Setembro	11,0%	71,5%	17,5%
Outubro	3,0%	72,2%	24,8%
Novembro	2,7%	65,5%	31,8%
Dezembro	0,0%	61,9%	38,1%
Ano	5,9%	59,3%	34,8%

Tabela 21 – Porcentagem de horas em conforto na zona sul, simulação 7, 10% de insatisfeitos

Ocupação			
Início	8	Fim	17
Mês	Frio	Conforto	Quente
Janeiro	0,0%	17,0%	83,0%
Fevereiro	0,0%	15,5%	84,5%
Março	1,8%	29,1%	69,1%
Abril	1,8%	29,1%	69,1%
Maio	1,4%	24,8%	73,8%
Junho	11,3%	67,4%	21,3%
Julho	9,5%	57,1%	33,3%
Agosto	36,4%	47,7%	15,9%
Setembro	18,5%	53,5%	28,0%
Outubro	5,2%	52,6%	42,2%
Novembro	4,5%	49,1%	46,4%
Dezembro	1,4%	38,1%	60,5%
Ano	9,6%	41,6%	48,8%

Tabela 22 – Porcentagem de horas em conforto na zona leste, simulação 7, 20% de insatisfeitos

Ocupação			
Início	8	Fim	17
Mês	Frio	Conforto	Quente
Janeiro	0,0%	20,4%	79,6%
Fevereiro	0,0%	14,0%	86,0%
Março	0,0%	30,5%	69,5%
Abril	0,0%	30,5%	69,5%
Maio	0,0%	25,2%	74,8%
Junho	3,0%	84,8%	12,2%
Julho	2,9%	79,0%	18,1%
Agosto	15,9%	74,5%	9,5%
Setembro	6,5%	70,0%	23,5%
Outubro	1,7%	66,1%	32,2%
Novembro	0,9%	59,5%	39,5%
Dezembro	0,0%	51,9%	48,1%
Ano	3,7%	53,3%	43,0%

Tabela 23 – Porcentagem de horas em conforto na zona leste, simulação 7, 10% de insatisfeitos

Ocupação			
Início	8	Fim	17
Mês	Frio	Conforto	Quente
Janeiro	0,0%	12,6%	87,4%
Fevereiro	0,0%	7,0%	93,0%
Março	0,5%	22,3%	77,3%
Abril	0,5%	22,3%	77,3%
Maio	0,5%	16,7%	82,9%
Junho	5,2%	66,1%	28,7%
Julho	7,1%	53,8%	39,0%
Agosto	24,1%	50,9%	25,0%
Setembro	11,5%	56,5%	32,0%
Outubro	3,9%	48,3%	47,8%
Novembro	1,4%	40,9%	57,7%
Dezembro	0,0%	27,1%	72,9%
Ano	5,9%	37,4%	56,7%

Tabela 24 – Porcentagem de horas em conforto na zona oeste, simulação 7, 20% de insatisfeitos

Ocupação			
Início	8	Fim	17
Mês	Frio	Conforto	Quente
Janeiro	0,0%	21,7%	78,3%
Fevereiro	0,0%	24,0%	76,0%
Março	0,5%	33,6%	65,9%
Abril	0,5%	33,6%	65,9%
Maio	0,5%	28,6%	71,0%
Junho	6,1%	75,7%	18,3%
Julho	8,1%	63,8%	28,1%
Agosto	15,0%	74,1%	10,9%
Setembro	7,0%	67,5%	25,5%
Outubro	2,2%	60,4%	37,4%
Novembro	2,3%	55,5%	42,3%
Dezembro	0,0%	50,5%	49,5%
Ano	4,4%	51,4%	44,1%

Tabela 25 – Porcentagem de horas em conforto na zona oeste, simulação 7, 10% de insatisfeitos

Ocupação			
Início	8	Fim	17
Mês	Frio	Conforto	Quente
Janeiro	0,0%	13,0%	87,0%
Fevereiro	0,0%	14,0%	86,0%
Março	1,8%	20,5%	77,7%
Abril	1,8%	20,5%	77,7%
Maio	1,0%	19,0%	80,0%
Junho	9,6%	56,5%	33,9%
Julho	9,0%	46,7%	44,3%
Agosto	23,6%	55,0%	21,4%
Setembro	12,5%	51,0%	36,5%
Outubro	5,7%	40,4%	53,9%
Novembro	4,1%	38,2%	57,7%
Dezembro	0,5%	27,1%	72,4%
Ano	7,2%	35,3%	57,5%

A avaliação apresenta também um balanço horário anual com a situação de conforto ou desconforto ao longo de todas as horas do ano para as quatro zonas térmicas. O balanço horário indica situação de conforto (C), desconforto por calor (Q) ou desconforto por frio (F).

Balanço horário, simulação 7: ZONA NORTE																																		
		Dia																																
Mês	Hora	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	17	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31		
JANEIRO	1																																	
	2																																	
	3																																	
	4																																	
	5																																	
	6																																	
	7																																	
	8	C	C	C	C	C				C	Q	Q	C	C			C	Q	C	C	C			C	C	C	C	C			C	C	C	
	9	Q	Q	Q	Q	C	C		Q	Q	Q	Q	Q	Q			Q	Q	Q	Q	Q	Q		Q	C	Q	C	C			C	Q	C	
	10	Q	Q	Q	Q	Q	Q		Q	Q	Q	Q	Q	Q			Q	Q	Q	Q	Q	Q		Q	Q	Q	Q	Q	C	C	Q	Q	Q	
	11	Q	Q	Q	Q	Q	Q		Q	Q	Q	Q	Q	Q			Q	Q	Q	Q	Q	Q		Q	Q	Q	Q	Q	Q	Q	Q	Q	Q	
	12	Q	Q	Q	Q	Q	Q		Q	Q	Q	Q	Q	Q			Q	Q	Q	Q	Q	Q		Q	Q	Q	Q	Q	Q	C	Q	Q	Q	
	13	Q	Q	Q	Q	Q	Q		Q	Q	Q	Q	Q	Q			Q	Q	Q	Q	Q	Q		Q	Q	Q	Q	Q	Q	Q	Q	Q	Q	
	14	Q	Q	Q	Q	Q	Q		Q	Q	Q	Q	Q	Q			Q	Q	Q	Q	Q	Q		Q	Q	Q	Q	Q	Q	Q	Q	Q	Q	
	15	Q	Q	Q	Q	Q	Q		Q	Q	Q	Q	Q	Q			Q	Q	Q	Q	Q	Q		Q	Q	Q	Q	Q	Q	Q	Q	Q	Q	
	16	Q	Q	Q	Q	Q	Q		Q	Q	Q	Q	Q	Q			Q	Q	Q	Q	Q	Q		Q	Q	Q	Q	Q	C			Q	Q	
	17	Q	Q	Q	Q	Q	Q		Q	Q	Q	Q	Q	Q			Q	Q	Q	Q	Q	Q		Q	Q	Q	Q	Q	Q	C			Q	Q
	18																																	
	19																																	
	20																																	
	21																																	
	22																																	
	23																																	
	24																																	

Figura 27 – Balanço horário de janeiro, zona norte com 10% de insatisfeitos, simulação

Figura 28 – Balanço horário de setembro, zona norte com 10% de insatisfeitos, simulação 7

4.3.12 Possibilidade de utilização do modo misto, M1 – SP

Analisando-se o balanço horário e considerando-se apenas a situação com porcentagem de horas em conforto para até 10% de pessoas insatisfeitas, identificam-se dois períodos de comportamento distintos:

- ✧ os meses de dezembro a maio apresentam comportamento semelhante com período acima de 70% de calor e o restante em conforto, com períodos de frio no máximo 1,8% no mês. A pequena porcentagem de período de conforto está principalmente na primeira hora de ocupação, das 8h às 9h. O que implica dizer que, de maneira geral, durante seis meses do ano, o ar-condicionado poderia ser ligado apenas às 9h;
- ✧ nos demais meses, de junho a novembro, as quatro zonas ainda apresentam condições de desconforto por calor, variando de 15,9% a 60,5% do período de ocupação. Observando-se o balanço horário, todos os dias começam em situação de frio ou conforto, estendendo-se ao longo do dia, podendo completar o dia todo em conforto ou entrar em desconforto por calor, exigindo que se ligue o ar-condicionado. Porém, durante esses seis meses do ano, os períodos de frio variam de 1,4% a 24,1%. Levando em conta que os períodos de frio podem ser amenizados com o fechamento das aberturas, poderíamos considerar como período de conforto a soma dos períodos de frio e conforto, o que resultaria em uma variação de 37% a 51% de período de conforto.

Analisando-se os resultados apresentados anteriormente, a zona norte foi a que apresentou maior porcentagem de períodos quentes durante o ano de referência

de projeto, 63%, para 90% de usuários satisfeitos. Por ser a situação mais crítica, a zona norte será a base para avaliação do sistema de modo misto.

Assim, tomando como base o comportamento da zona norte, o modo misto atuaria da maneira apresentada no Gráfico 54.

Gráfico 54 – Simulação 7: configuração do sistema de modo misto ao longo do ano, M1+abertura, SP

Gráfico 55 – Simulação 7: carga térmica para M1 com sistema totalmente ativo e M1+abertura com modo misto, SP

O Gráfico 55 compara a carga térmica da zona norte resultante da simulação 3 (modelo M1 com sistema ativo durante todo o período de ocupação) e a carga térmica da zona norte resultante da simulação 7 com o modo misto. A carga térmica referente ao período ativo do sistema de modo misto foi calculada hora a hora, somando-se as cargas equivalentes às horas indicadas como desconforto por calor para pelo menos 10% dos usuários.

Tabela 26 – Simulação 7: carga térmica total anual, M1, SP, modo misto

ZONA	CARGA TÉRMICA TOTAL ANUAL (kW)
NORTE	32.569
SUL	23.116
LESTE	28.303
OESTE	28.673
TOTAL	112.661

Considerando-se uma abertura na fachada de 11,1%, o modelo M1 apresenta condições de exploração do sistema de modo misto, resultando em uma redução de carga térmica de ar-condicionado total, anual, no pior caso, zona norte, de 28%.

Viabilizando-se a ventilação natural no modelo 1, por uma intervenção nas fachadas, é possível obter condições de conforto para 90% dos usuários na cidade de São Paulo, evitando o uso de ar-condicionado nas primeiras horas de ocupação durante os meses de dezembro a maio e durante um período maior, de 40% a 56% durante os meses junho a novembro.

O uso do modo misto no modelo 1, em São Paulo, significa uma redução de carga térmica de 34,5% em comparação à utilização de ar-condicionado durante todo o período de ocupação, com termostato configurado para temperatura de 26°C e 65% de umidade relativa do ar.

4.3.13 Simulação 8: M1 – RJ – ventilação, arquivo de clima anual

Da mesma maneira que na simulação 7, a avaliação para o Rio de Janeiro, referente à simulação 8, resulta em uma análise mensal da porcentagem de tempo em que a zona avaliada se encontra na faixa de conforto ou em desconforto por frio ou calor, considerando-se 10% e 20% de pessoas insatisfeitas.

Tabela 27 – Porcentagem de horas em conforto na zona norte, simulação 8, 20% de insatisfeitos

Ocupação			
Início	8	Fim	17
Mês	Frio	Conforto	Quente
Janeiro	0,0%	0,9%	99,1%
Fevereiro	0,0%	2,0%	98,0%
Março	0,0%	5,5%	94,5%
Abril	0,0%	5,5%	94,5%
Maio	0,0%	9,5%	90,5%
Junho	0,0%	15,7%	84,3%
Julho	0,0%	13,3%	86,7%
Agosto	0,0%	17,3%	82,7%
Setembro	0,0%	15,5%	84,5%
Outubro	0,0%	10,0%	90,0%
Novembro	0,0%	7,3%	92,7%
Dezembro	0,0%	3,3%	96,7%
Ano	0,0%	9,3%	90,7%

Tabela 28 – Porcentagem de horas em conforto na zona norte, simulação 8, 10% de insatisfeitos

Ocupação			
Início	8	Fim	17
Mês	Frio	Conforto	Quente
Janeiro	0,0%	0,4%	99,6%
Fevereiro	0,0%	0,5%	99,5%
Março	0,0%	2,3%	97,7%
Abril	0,0%	2,3%	97,7%
Maio	0,0%	5,2%	94,8%
Junho	0,0%	10,4%	89,6%
Julho	0,0%	10,5%	89,5%
Agosto	0,0%	12,7%	87,3%
Setembro	0,0%	9,0%	91,0%
Outubro	0,0%	4,3%	95,7%
Novembro	0,0%	2,3%	97,7%
Dezembro	0,0%	1,0%	99,0%
Ano	0,0%	5,6%	94,4%

Tabela 29 – Porcentagem de horas em conforto na zona sul, simulação 8, 20% de insatisfeitos

Ocupação			
Início	8	Fim	17
Mês	Frio	Conforto	Quente
Janeiro	0,0%	0,9%	99,1%
Fevereiro	0,0%	2,0%	98,0%
Março	0,0%	5,5%	94,5%
Abril	0,0%	5,5%	94,5%
Maio	0,0%	9,0%	91,0%
Junho	0,0%	44,3%	55,7%
Julho	0,0%	23,8%	76,2%
Agosto	0,0%	42,3%	57,7%
Setembro	0,0%	22,5%	77,5%
Outubro	0,0%	11,3%	88,7%
Novembro	0,0%	11,4%	88,6%
Dezembro	0,0%	2,4%	97,6%
Ano	0,0%	16,9%	83,1%

Tabela 30 – Porcentagem de horas em conforto na zona sul, simulação 8, 10% de insatisfeitos

Ocupação			
Início	8	Fim	17
Mês	Frio	Conforto	Quente
Janeiro	0,0%	0,0%	100,0%
Fevereiro	0,0%	0,5%	99,5%
Março	0,0%	1,8%	98,2%
Abril	0,0%	1,8%	98,2%
Maio	0,0%	5,7%	94,3%
Junho	0,0%	24,8%	75,2%
Julho	0,0%	14,3%	85,7%
Agosto	0,5%	24,1%	75,5%
Setembro	0,0%	13,5%	86,5%
Outubro	0,0%	6,1%	93,9%
Novembro	0,0%	3,2%	96,8%
Dezembro	0,0%	1,0%	99,0%
Ano	0,0%	9,0%	90,9%

Tabela 31 – Porcentagem de horas em conforto na zona leste, simulação 8, 20% de insatisfeitos

Ocupação			
Início	8	Fim	17
Mês	Frio	Conforto	Quente
Janeiro	0,0%	1,3%	98,7%
Fevereiro	0,0%	1,5%	98,5%
Março	0,0%	2,7%	97,3%
Abril	0,0%	2,7%	97,3%
Maio	0,0%	6,2%	93,8%
Junho	0,0%	29,1%	70,9%
Julho	0,0%	18,6%	81,4%
Agosto	0,0%	29,1%	70,9%
Setembro	0,0%	22,0%	78,0%
Outubro	0,0%	10,9%	89,1%
Novembro	0,0%	8,6%	91,4%
Dezembro	0,0%	1,4%	98,6%
Ano	0,0%	12,2%	87,8%

Tabela 32 – Porcentagem de horas em conforto na zona leste, simulação 8, 10% de insatisfeitos

Ocupação			
Início	8	Fim	17
Mês	Frio	Conforto	Quente
Janeiro	0,0%	0,0%	100,0%
Fevereiro	0,0%	0,5%	99,5%
Março	0,0%	1,4%	98,6%
Abril	0,0%	1,4%	98,6%
Maio	0,0%	4,3%	95,7%
Junho	0,0%	13,0%	87,0%
Julho	0,0%	11,9%	88,1%
Agosto	0,0%	17,3%	82,7%
Setembro	0,0%	12,5%	87,5%
Outubro	0,0%	6,1%	93,9%
Novembro	0,0%	3,2%	96,8%
Dezembro	0,0%	1,0%	99,0%
Ano	0,0%	6,7%	93,3%

Tabela 33 – Porcentagem de horas em conforto na zona oeste, simulação 8, 20% de insatisfeitos

Ocupação			
Início	8	Fim	17
Mês	Frio	Conforto	Quente
Janeiro	0,0%	0,4%	99,6%
Fevereiro	0,0%	2,0%	98,0%
Março	0,0%	4,5%	95,5%
Abril	0,0%	4,5%	95,5%
Maio	0,0%	9,0%	91,0%
Junho	0,0%	23,0%	77,0%
Julho	0,0%	15,7%	84,3%
Agosto	0,0%	28,6%	71,4%
Setembro	0,0%	20,0%	80,0%
Outubro	0,0%	11,3%	88,7%
Novembro	0,0%	9,1%	90,9%
Dezembro	0,0%	2,9%	97,1%
Ano	0,0%	11,8%	88,2%

Tabela 34 – Porcentagem de horas em conforto na zona oeste, simulação 8, 10% de insatisfeitos

Ocupação			
Início	8	Fim	17
Mês	Frio	Conforto	Quente
Janeiro	0,0%	0,0%	100,0%
Fevereiro	0,0%	0,5%	99,5%
Março	0,0%	1,4%	98,6%
Abril	0,0%	1,4%	98,6%
Maio	0,0%	5,2%	94,8%
Junho	0,0%	13,5%	86,5%
Julho	0,0%	11,4%	88,6%
Agosto	0,9%	17,7%	81,4%
Setembro	0,0%	10,0%	90,0%
Outubro	0,0%	4,8%	95,2%
Novembro	0,0%	2,7%	97,3%
Dezembro	0,0%	1,0%	99,0%
Ano	0,1%	6,5%	93,4%

4.3.14 Possibilidade de utilização do modo misto, M1 – RJ

Analisando-se o balanço horário e considerando-se apenas a situação com porcentagem de horas em conforto para até 10% de pessoas insatisfeitas, é possível identificar um comportamento praticamente igual para o ano todo nas quatro zonas.

Figura 29 – Balanco horário de maio, zona norte com 10% de insatisfeitos, simulação 8

A situação predominante é a desconforto por calor durante todo o tempo, por no mínimo 75,2% do mês. Praticamente não há desconforto por frio. Os períodos de conforto se concentram na primeira hora de ocupação nos meses de maio a setembro.

Apesar de as quatro zonas apresentarem condições muito semelhantes, a zona norte foi a que apresentou maior porcentagem de períodos quentes durante o ano de referência de projeto, 94,4%. Sendo a situação mais crítica, a zona norte será a base para avaliação do sistema de modo misto, que atuaria da maneira apresentada no Gráfico 56.

Gráfico 56 – Simulação 8: configuração do sistema de modo misto ao longo do ano, M1+abertura, RJ

Gráfico 57 – Simulação 8: carga térmica do ar-condicionado para M1 com sistema totalmente ativo e M1+abertura com modo misto, RJ

O Gráfico 57 compara a carga térmica da zona norte resultante da simulação 4 (modelo M1 com sistema ativo durante todo o período de ocupação) e a carga térmica da zona norte resultante da simulação 8 com o modo misto. A carga térmica referente ao período ativo do sistema de modo misto foi calculada hora a hora, somando-se as cargas equivalentes às horas indicadas como desconforto por calor para pelo menos 10% dos usuários.

Tabela 35 – Simulação 8: carga térmica total anual, M1, RJ, modo misto

ZONA	CARGA TÉRMICA TOTAL ANUAL (kW)
NORTE	55.358
SUL	49.232
LESTE	51.631
OESTE	53.368
TOTAL	209.590

Considerando-se uma abertura na fachada de 11,1%, o modelo M1 apresenta condições mínimas de exploração do sistema de modo misto no Rio de Janeiro, resultando em uma redução de carga térmica de ar-condicionado total, anual, no pior caso, zona norte, de apenas 3%, o que não torna o sistema de modo misto atrativo para esse tipo de edificação.

4.4 Segunda etapa de simulações (M2)

Como segunda etapa, algumas situações simuladas na primeira etapa com o modelo M1 foram repetidas com o modelo M2. A diferença entre os modelos 1 e 2, conforme descrito anteriormente, é apenas a fachada. O modelo 2 tem fachada de WWR=50% com sombreamento total.

4.4.1 Configuração das simulações 9 a 12

As simulações da segunda etapa foram configuradas com as seguintes características:

Tabela 36 – Descrição das simulações da segunda etapa, numeradas de 9 a 12

Modelo M2 = WWR=50%, sombreamento externo, com ocupação			
Simulação	Sistema de condicionamento:	Arquivo climático	Cidade
9	Ar-condicionado (8h às 18h) <ul style="list-style-type: none"> TBS: 26°C UR: 65% 	<ul style="list-style-type: none"> Ano referência proj. Dia referência verão 	São Paulo
10		<ul style="list-style-type: none"> Ano referência proj. Dia referência verão 	Rio de Janeiro
11	<ul style="list-style-type: none"> Ventilação natural 24h Abertura de 11,1% nas fachadas 	<ul style="list-style-type: none"> Ano referência proj. 	São Paulo
12		<ul style="list-style-type: none"> Ano referência proj. 	Rio de Janeiro

As simulações 9 e 10 consideram o modelo de edifício M2 com fachada selada e sistema de ar-condicionado ligado durante todo o período de ocupação dos ambientes, refletindo ainda a prática da maioria dos edifícios existentes, porém agora se avaliando outro tipo de fachada, com área envidraçada reduzida e sombreamento externo, e termostato configurado para TBS=26°C e UR=65%.

As simulações 11 e 12 já consideram a possibilidade de abertura para ventilação natural, com abertura equivalente a 11,1% da fachada, como nas simulações 7 a 8.

O objetivo desse conjunto de simulações é analisar as seguintes questões:

- ✧ avaliar a contribuição da ventilação natural para atingir condições internas de conforto, no M2, para as cidades de São Paulo e Rio de Janeiro;
- ✧ estimar o efeito da alteração de fachada: de WWR=100% sem sombreamento para WWR=50% com sombreamento externo total nas quatro fachadas, na carga térmica anual total do ar-condicionado, com TBS=26°C e UR=65%, para São Paulo e Rio de Janeiro;
- ✧ avaliar o comportamento do edifício durante seu período de ocupação, diante da possibilidade de contar com a ventilação natural para obtenção de conforto.

4.4.2 Simulação 9: M2 – SP – AC (26°C 65%)

A simulação 9, caracterizada de acordo com as informações da Tabela 36, para o ano climático de referência da cidade de São Paulo, apresentou suas cargas térmicas internas (sensível e latente) distribuídas de acordo com o Gráfico 58, em relação aos meses e zonas norte, sul, leste e oeste²⁶.

²⁶ Os gráficos passíveis de comparação, como o caso das simulações 9 e 10, estão apresentados com a mesma escala de valores, para facilitar a visualização das diferenças de resultados.

Gráfico 58 – Simulação 9: cargas térmicas (sensível + latente) mensais por zona, M2, SP

Tabela 37 – Simulação 9: carga térmica total anual, M2, SP, AC (26°C 65%)

ZONA	CARGA TÉRMICA TOTAL ANUAL (kW)
NORTE	34.723
SUL	35.263
LESTE	34.804
OESTE	34.242
TOTAL	139.032

A distribuição das cargas térmicas entre as zonas, como no modelo M1, se mantém numa proporção muito próxima de 25% em cada zona, em todos os meses do ano. Os meses de verão apresentam cargas mais elevadas que os de inverno, caracterizando bem as duas estações extremas do ano. A carga térmica total anual é de 139.032kW, 19% menor que o modelo M1, nas mesmas condições.

Gráfico 59 – Simulação 9: ganhos e perdas térmicas, dia crítico de verão, M2, SP

Para análise da distribuição de ganhos e perdas térmicas do modelo 2 na cidade de São Paulo, o Gráfico 59 os apresenta hora a hora, durante o dia crítico de verão. No caso de São Paulo, o dia crítico de verão é 11 de fevereiro de 2003, conforme apresentado no capítulo 2. A zona norte foi escolhida para esta análise, depois de verificado o comportamento bastante semelhante entre as zonas (Gráfico 58).

Os maiores ganhos se dão pela ocupação (pessoas, iluminação artificial e equipamentos), constante das 8h às 18h. Os ganhos solares já são bem menos representativos, se comparado com o M1 (Gráfico 39), isso devido à redução da área envidraçada e à proteção solar externa. A maior perda se dá na retirada de carga pelo sistema de ar-condicionado.

4.4.3 Simulação 10: M2 – RJ – AC (26°C 65%)

A simulação 10, caracterizada de acordo com as informações da Tabela 36 para o ano climático de referência da cidade do Rio de Janeiro, apresentou suas cargas térmicas internas (sensível e latente) distribuídas de acordo com o Gráfico 60, em relação aos meses e zonas norte, sul, leste e oeste.

Gráfico 60 – Simulação 10: cargas térmicas (sensível + latente) mensais por zona, M2, RJ

Tabela 38 – Simulação 10: carga térmica total anual, M2, RJ, AC (26°C 65%)

ZONA	CARGA TÉRMICA TOTAL ANUAL (kW)
NORTE	49.913
SUL	47.496
LESTE	48.408
OESTE	48.870
TOTAL	194.687

Da mesma maneira que na cidade de São Paulo, as cargas térmicas no Rio de Janeiro se distribuem proporcionalmente entre as quatro zonas, com visível diferença entre verão e inverno e valores mais elevados que os apresentados na cidade de São Paulo. A carga térmica total anual é de 194.687kW, 11% menor que o modelo M1, nas mesmas condições e 29% maior que em São Paulo.

Gráfico 61 – Simulação 10: ganhos e perdas térmicas, dia crítico de verão, M2, RJ

Para análise da distribuição de ganhos e perdas térmicas do modelo M2 na cidade do Rio de Janeiro, o Gráfico 61 os apresenta hora a hora na zona norte, durante o dia crítico de verão, 9 de fevereiro de 2003.

Os maiores ganhos se dão pela ocupação (pessoas, iluminação artificial e equipamentos), constante das 8h às 18h, e os ganhos solares também se apresentam menos representativos que no M1 (Gráfico 48).

4.4.4 Simulação 11: M2 – SP – ventilação natural

Para avaliar a possibilidade de utilização do sistema de modo misto de condicionamento ambiental durante o ano, foi atribuída ao modelo M2 uma abertura de proporção de 11,1% da fachada para ventilação natural. A análise foi feita seguindo os mesmos conceitos das análises feitas nas simulações 7 e 8.

Tabela 39 – Porcentagem de horas em conforto na zona norte, simulação 11, 20% de insatisfeitos

Ocupação			
Início	8	Fim	17
Mês	Frio	Conforto	Quente
Janeiro	0,0%	57,8%	42,2%
Fevereiro	0,0%	57,5%	42,5%
Março	1,8%	70,9%	27,3%
Abril	1,8%	70,9%	27,3%
Maio	1,4%	65,7%	32,9%
Junho	14,3%	85,7%	0,0%
Julho	11,4%	88,6%	0,0%
Agosto	27,7%	72,3%	0,0%
Setembro	13,5%	81,0%	5,5%
Outubro	7,4%	86,1%	6,5%
Novembro	4,1%	85,9%	10,0%
Dezembro	2,9%	80,0%	17,1%
Ano	9,0%	75,2%	15,8%

Tabela 40 – Porcentagem de horas em conforto na zona norte, simulação 11, 10% de insatisfeitos

Ocupação			
Início	8	Fim	17
Mês	Frio	Conforto	Quente
Janeiro	0,4%	35,2%	64,3%
Fevereiro	2,0%	37,0%	61,0%
Março	3,2%	50,0%	46,8%
Abril	3,2%	50,0%	46,8%
Maio	2,9%	46,7%	50,5%
Junho	20,4%	74,8%	4,8%
Julho	15,7%	81,0%	3,3%
Agosto	36,4%	63,2%	0,5%
Setembro	20,0%	63,0%	17,0%
Outubro	9,6%	67,4%	23,0%
Novembro	9,5%	70,0%	20,5%
Dezembro	5,7%	61,0%	33,3%
Ano	12,9%	59,0%	28,0%

Tabela 41 – Porcentagem de horas em conforto na zona sul, simulação 11, 20% de insatisfeitos

Ocupação			
Início	8	Fim	17
Mês	Frio	Conforto	Quente
Janeiro	0,0%	57,0%	43,0%
Fevereiro	0,0%	62,0%	38,0%
Março	2,3%	61,4%	36,4%
Abril	2,3%	61,4%	36,4%
Maio	2,4%	69,5%	28,1%
Junho	11,7%	87,4%	0,9%
Julho	10,5%	88,6%	1,0%
Agosto	35,9%	64,1%	0,0%
Setembro	18,0%	74,0%	8,0%
Outubro	7,0%	83,0%	10,0%
Novembro	5,0%	82,7%	12,3%
Dezembro	3,3%	79,5%	17,1%
Ano	10,2%	72,9%	16,9%

Tabela 42 – Porcentagem de horas em conforto na zona sul, simulação 11, 10% de insatisfeitos

Ocupação			
Início	8	Fim	17
Mês	Frio	Conforto	Quente
Janeiro	0,0%	34,8%	65,2%
Fevereiro	1,5%	36,5%	62,0%
Março	3,6%	43,2%	53,2%
Abril	3,6%	43,2%	53,2%
Maio	4,3%	41,4%	54,3%
Junho	19,1%	73,0%	7,8%
Julho	12,9%	74,3%	12,9%
Agosto	47,3%	49,1%	3,6%
Setembro	29,0%	54,0%	17,0%
Outubro	10,9%	67,4%	21,7%
Novembro	11,8%	64,1%	24,1%
Dezembro	5,7%	64,8%	29,5%
Ano	15,0%	54,8%	30,2%

Tabela 43 – Porcentagem de horas em conforto na zona leste, simulação 11, 20% de insatisfeitos

Ocupação			
Início	8	Fim	17
Mês	Frio	Conforto	Quente
Janeiro	0,0%	61,3%	38,7%
Fevereiro	0,0%	61,5%	38,5%
Março	1,8%	65,5%	32,7%
Abril	1,8%	65,5%	32,7%
Maio	1,4%	69,0%	29,5%
Junho	13,0%	86,1%	0,9%
Julho	12,4%	87,6%	0,0%
Agosto	32,7%	67,3%	0,0%
Setembro	17,5%	76,0%	6,5%
Outubro	7,8%	83,5%	8,7%
Novembro	5,9%	84,5%	9,5%
Dezembro	3,8%	80,0%	16,2%
Ano	10,2%	73,9%	15,8%

Tabela 44 – Porcentagem de horas em conforto na zona leste, simulação 11, 10% de insatisfeitos

Ocupação			
Início	8	Fim	17
Mês	Frio	Conforto	Quente
Janeiro	0,4%	33,9%	65,7%
Fevereiro	1,5%	36,0%	62,5%
Março	4,1%	45,9%	50,0%
Abril	4,1%	45,9%	50,0%
Maio	4,3%	45,2%	50,5%
Junho	22,2%	73,9%	3,9%
Julho	20,5%	72,9%	6,7%
Agosto	47,3%	51,4%	1,4%
Setembro	26,0%	57,5%	16,5%
Outubro	12,2%	68,7%	19,1%
Novembro	10,0%	68,6%	21,4%
Dezembro	6,2%	64,8%	29,0%
Ano	15,7%	56,1%	28,2%

Tabela 45 – Porcentagem de horas em conforto na zona oeste, simulação 11, 20% de insatisfeitos

Ocupação			
Início	8	Fim	17
Mês	Frio	Conforto	Quente
Janeiro	0,0%	58,7%	41,3%
Fevereiro	0,0%	64,5%	35,5%
Março	2,3%	66,4%	31,4%
Abril	2,3%	66,4%	31,4%
Maio	1,4%	68,1%	30,5%
Junho	13,0%	86,5%	0,4%
Julho	9,5%	90,0%	0,5%
Agosto	29,1%	70,9%	0,0%
Setembro	14,5%	79,0%	6,5%
Outubro	7,8%	84,3%	7,8%
Novembro	4,5%	86,4%	9,1%
Dezembro	3,3%	81,4%	15,2%
Ano	9,0%	75,4%	15,6%

Tabela 46 – Porcentagem de horas em conforto na zona oeste, simulação 11, 10% de insatisfeitos

Ocupação			
Início	8	Fim	17
Mês	Frio	Conforto	Quente
Janeiro	0,4%	30,9%	68,7%
Fevereiro	2,0%	40,0%	58,0%
Março	4,1%	41,8%	54,1%
Abril	4,1%	41,8%	54,1%
Maio	3,3%	43,3%	53,3%
Junho	16,5%	77,4%	6,1%
Julho	14,3%	75,7%	10,0%
Agosto	39,5%	59,1%	1,4%
Setembro	22,0%	64,0%	14,0%
Outubro	9,6%	69,6%	20,9%
Novembro	9,5%	67,7%	22,7%
Dezembro	6,2%	63,3%	30,5%
Ano	13,1%	57,7%	29,2%

4.4.5 Possibilidade de utilização do modo misto, M2 – SP

Analisando-se o balanço horário e considerando-se apenas a situação com porcentagem de horas em conforto para até 10% de pessoas insatisfeitas, é possível identificar dois períodos de comportamentos distintos:

- o período de dezembro a maio apresenta desconforto por calor, nas quatro zonas, acima de 30% chegando a 68,7%. Apresenta horas de desconforto por frio nas primeiras horas de ocupação, chegando a 6,2% em dezembro. Durante esses seis meses o ar-condicionado poderia ser ligado apenas às 9h ou 10h, permanecendo desligado por mais algum período, em alguns dias;
- os meses de junho a novembro já apresentam períodos de desconforto por frio que avançam ao longo de alguns dias, variando de 9,5% a 47,3%. Esses períodos vêm seguidos de horas de conforto para entrar em desconforto por calor, apenas em algumas horas do dia, no período da tarde, restringindo-se a no máximo 23% do período de ocupação. Durante esse período, as aberturas podem ser controladas para que o desconforto por frio passe a ser período de conforto, resultando em uma média de período de conforto de 67%.

Balanço horário, simulação 11: ZONA NORTE																																	
		Dia																															
Mes	Hora	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	17	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	
JANEIRO	1																																
	2																																
	3																																
	4																																
	5																																
	6																																
	7																																
	8	C	C	C	C	C																											
	9	Q	C	C	C	C	C																										
	10	Q	Q	Q	Q	C	C																										
	11	Q	Q	Q	Q	Q	Q																										
	12	Q	Q	Q	Q	C	C																										
	13	Q	Q	Q	Q	Q	Q																										
	14	Q	Q	Q	Q	C	Q																										
	15	Q	Q	Q	Q	Q	Q																										
	16	Q	C	Q	Q	Q	Q																										
	17	Q	C	Q	Q	Q	Q																										
	18																																
	19																																
	20																																
	21																																
	22																																
	23																																
	24																																

Figura 30 – Balanço horário de janeiro, zona norte com 10% de insatisfeitos, simulação

Figura 31 – Balanco horário de setembro, zona norte com 10% de insatisfeitos, simulação 11

Analisando-se os resultados apresentados nas Tabelas 39 a 46, a zona sul foi a que apresentou maior porcentagem de períodos quentes durante o ano de referência de projeto, 30,2%, para 90% de usuários satisfeitos. Por ser a situação mais crítica, a zona sul será a base para avaliação do sistema de modo misto, que atuaria da maneira apresentada no Gráfico 62.

Gráfico 62 – Simulação 11: configuração do sistema de modo misto ao longo do ano, M2+abertura, SP

Gráfico 63 – Simulação 11: carga térmica do ar-condicionado para M2 com sistema totalmente ativo e M2+abertura com modo misto, SP

O Gráfico 63 compara a carga térmica da zona sul resultante da simulação 9 (modelo M2 com sistema ativo durante todo o período de ocupação) e a carga térmica da zona sul resultante da simulação 11 com o modo misto. A carga térmica referente ao período ativo do sistema de modo misto foi calculada hora a hora, somando-se as cargas equivalentes às horas indicadas como desconforto por calor para pelo menos 10% dos usuários.

Tabela 47 – Simulação 11: carga térmica total anual, M2, SP, modo misto

ZONA	CARGA TÉRMICA TOTAL ANUAL (kW)
NORTE	12.113
SUL	12.961
LESTE	12.062
OESTE	12.302
TOTAL	49.437

Considerando-se uma abertura na fachada de 11,1%, o modelo M2 em São Paulo apresenta ótimas condições de exploração do sistema de modo misto, resultando em uma redução de carga térmica de ar-condicionado total anual, no pior caso, zona sul, de 64%.

4.4.6 Simulação 12: M2 – RJ – ventilação natural

Assim como a simulação 11 para São Paulo, as mesmas configurações foram feitas para o Rio de Janeiro, na simulação 12, demonstrada a seguir.

Tabela 48 – Porcentagem de horas em conforto na zona norte, simulação 12, 20% de insatisfeitos

Ocupação			
Início	8	Fim	17
Mês	Frio	Conforto	Quente
Janeiro	0,0%	5,7%	94,3%
Fevereiro	0,0%	7,0%	93,0%
Março	0,0%	11,4%	88,6%
Abril	0,0%	11,4%	88,6%
Maio	0,0%	15,2%	84,8%
Junho	0,0%	46,5%	53,5%
Julho	0,0%	29,5%	70,5%
Agosto	0,0%	49,1%	50,9%
Setembro	0,0%	38,5%	61,5%
Outubro	0,0%	21,7%	78,3%
Novembro	0,0%	18,2%	81,8%
Dezembro	0,0%	7,6%	92,4%
Ano	0,0%	23,3%	76,7%

Tabela 49 – Porcentagem de horas em conforto na zona norte, simulação 12, 10% de insatisfeitos

Ocupação			
Início	8	Fim	17
Mês	Frio	Conforto	Quente
Janeiro	0,0%	3,0%	97,0%
Fevereiro	0,0%	3,5%	96,5%
Março	0,0%	7,7%	92,3%
Abril	0,0%	7,7%	92,3%
Maio	0,0%	10,0%	90,0%
Junho	0,4%	24,3%	75,2%
Julho	0,0%	17,6%	82,4%
Agosto	2,3%	28,6%	69,1%
Setembro	0,0%	26,0%	74,0%
Outubro	0,0%	14,8%	85,2%
Novembro	0,0%	10,5%	89,5%
Dezembro	0,0%	4,8%	95,2%
Ano	0,2%	13,8%	85,9%

Tabela 50 – Porcentagem de horas em conforto na zona sul, simulação 12, 20% de insatisfeitos

Ocupação			
Início	8	Fim	17
Mês	Frio	Conforto	Quente
Janeiro	0,0%	5,7%	94,3%
Fevereiro	0,0%	6,5%	93,5%
Março	0,0%	10,9%	89,1%
Abril	0,0%	10,9%	89,1%
Maio	0,0%	15,2%	84,8%
Junho	0,0%	80,9%	19,1%
Julho	0,0%	60,5%	39,5%
Agosto	0,9%	83,2%	15,9%
Setembro	0,0%	49,5%	50,5%
Outubro	0,0%	27,4%	72,6%
Novembro	0,0%	20,9%	79,1%
Dezembro	0,0%	11,0%	89,0%
Ano	0,1%	36,1%	63,9%

Tabela 51 – Porcentagem de horas em conforto na zona sul, simulação 12, 10% de insatisfeitos

Ocupação			
Início	8	Fim	17
Mês	Frio	Conforto	Quente
Janeiro	0,0%	1,7%	98,3%
Fevereiro	0,0%	3,5%	96,5%
Março	0,0%	7,7%	92,3%
Abril	0,0%	7,7%	92,3%
Maio	0,0%	10,0%	90,0%
Junho	3,0%	56,1%	40,9%
Julho	1,0%	30,5%	68,6%
Agosto	4,1%	55,9%	40,0%
Setembro	0,0%	31,0%	69,0%
Outubro	0,0%	14,8%	85,2%
Novembro	0,0%	12,7%	87,3%
Dezembro	0,0%	4,8%	95,2%
Ano	0,8%	22,1%	77,0%

Tabela 52 – Porcentagem de horas em conforto na zona leste, simulação 12, 20% de insatisfeitos

Ocupação			
Início	8	Fim	17
Mês	Frio	Conforto	Quente
Janeiro	0,0%	6,5%	93,5%
Fevereiro	0,0%	7,0%	93,0%
Março	0,0%	12,3%	87,7%
Abril	0,0%	12,3%	87,7%
Maio	0,0%	15,7%	84,3%
Junho	0,0%	74,3%	25,7%
Julho	0,0%	48,1%	51,9%
Agosto	0,5%	73,2%	26,4%
Setembro	0,0%	47,0%	53,0%
Outubro	0,0%	26,5%	73,5%
Novembro	0,0%	21,4%	78,6%
Dezembro	0,0%	12,4%	87,6%
Ano	0,0%	33,1%	66,8%

Tabela 53 – Porcentagem de horas em conforto na zona leste, simulação 12, 10% de insatisfeitos

Ocupação			
Início	8	Fim	17
Mês	Frio	Conforto	Quente
Janeiro	0,0%	1,7%	98,3%
Fevereiro	0,0%	4,5%	95,5%
Março	0,0%	8,6%	91,4%
Abril	0,0%	8,6%	91,4%
Maio	0,0%	10,5%	89,5%
Junho	0,9%	45,7%	53,5%
Julho	0,0%	23,3%	76,7%
Agosto	3,2%	41,4%	55,5%
Setembro	0,0%	29,5%	70,5%
Outubro	0,0%	16,5%	83,5%
Novembro	0,0%	12,7%	87,3%
Dezembro	0,0%	4,8%	95,2%
Ano	0,4%	18,8%	80,8%

Tabela 54 – Porcentagem de horas em conforto na zona oeste, simulação 12, 20% de insatisfeitos

Ocupação			
Início	8	Fim	17
Mês	Frio	Conforto	Quente
Janeiro	0,0%	5,2%	94,8%
Fevereiro	0,0%	6,0%	94,0%
Março	0,0%	10,9%	89,1%
Abril	0,0%	10,9%	89,1%
Maio	0,0%	12,4%	87,6%
Junho	0,0%	68,7%	31,3%
Julho	0,0%	41,9%	58,1%
Agosto	0,9%	63,2%	35,9%
Setembro	0,0%	42,5%	57,5%
Outubro	0,0%	21,3%	78,7%
Novembro	0,0%	17,3%	82,7%
Dezembro	0,0%	8,6%	91,4%
Ano	0,1%	28,3%	71,6%

Tabela 55 – Porcentagem de horas em conforto na zona oeste, simulação 12, 10% de insatisfeitos

Ocupação			
Início	8	Fim	17
Mês	Frio	Conforto	Quente
Janeiro	0,0%	1,7%	98,3%
Fevereiro	0,0%	3,5%	96,5%
Março	0,0%	7,7%	92,3%
Abril	0,0%	7,7%	92,3%
Maio	0,0%	9,5%	90,5%
Junho	2,2%	37,8%	60,0%
Julho	0,0%	24,3%	75,7%
Agosto	3,2%	38,2%	58,6%
Setembro	0,0%	26,0%	74,0%
Outubro	0,0%	12,6%	87,4%
Novembro	0,0%	10,5%	89,5%
Dezembro	0,0%	4,8%	95,2%
Ano	0,5%	16,7%	82,8%

4.4.7 Possibilidade de utilização do modo misto, M2 - RJ

Analisando-se o balanço horário e considerando-se apenas a situação com porcentagem de horas em conforto para até 10% de pessoas insatisfeitas, pode-se identificar um comportamento bastante semelhante durante todo o ano.

Figura 32 – Balanco horário de maio, zona norte com 10% de insatisfeitos, simulação 12

A predominância nas quatro zonas durante todo o ano é de períodos de desconforto por calor, variando de 40% em agosto a 98,3% em janeiro, ambos na zona sul, porém resultando em uma média anual de 81,6%. O restante do ano se restringe a período de conforto, já que desconforto por frio atinge o máximo de apenas 4,1% no mês de agosto e poderia ser facilmente adaptado à situação de conforto, controlando-se as janelas.

Analisando-se os resultados apresentados nas Tabelas 48 a 55, a zona norte foi a que apresentou maior porcentagem de períodos quentes durante o ano de referência de projeto, 85,9%, para até 10% de usuários insatisfeitos. Por ser a situação mais crítica, a zona norte será a base para avaliação do sistema de modo misto que atuaria da maneira apresentada no Gráfico 64.

Gráfico 64 – Simulação 12: configuração do sistema de modo misto ao longo do ano, M2+abertura, RJ

Gráfico 65 – Simulação 12: carga térmica do ar-condicionado para M2 com sistema totalmente ativo e M2+abertura com modo misto, RJ

O Gráfico 65 compara a carga térmica da zona norte resultante da simulação 10 (modelo M2 com sistema ativo durante todo o período de ocupação) e a carga térmica da zona norte resultante da simulação 12 com o modo misto. A carga térmica referente ao período ativo do sistema de modo misto foi calculada hora a hora, somando-se as cargas equivalentes às horas indicadas como desconforto por calor para pelo menos 10% dos usuários.

Tabela 56 – Simulação 12: carga térmica total anual, M2, RJ, modo misto

ZONA	CARGA TÉRMICA TOTAL ANUAL (kW)
NORTE	46.580
SUL	40.162
LESTE	42.572
OESTE	44.185
TOTAL	173.500

Considerando-se uma abertura na fachada de 11,1%, o modelo M2 apresenta condições mínimas de exploração do sistema de modo misto no Rio de Janeiro, resultando em uma redução de carga térmica de ar-condicionado total, anual, no pior caso, zona norte, de apenas 6,7%, o que não torna o sistema de modo misto atrativo para esse tipo de edificação.

4.5 Modelo geométrico M3

Para a terceira etapa de simulações, definiu-se um novo modelo geométrico (M3), que traz algumas alterações de conceito arquitetônico, direcionando o edifício para o sistema de modo misto, visando a uma maximização dos períodos de condicionamento passivo.

O modelo 3 tem área interna praticamente igual às do M1 e M2, propondo apenas outro tipo de planta. Cada zona apresenta aproximadamente 288m², com total de 1.154,4m². As zonas dos modelos M1 e M2 apresentam 294m², com total de 1.176m².

Entre as alterações do M3 com relação ao M1 e M2, estão:

- ✧ planta baixa menos profunda, com fachadas opostas mais próximas, permitindo ventilação cruzada;
- ✧ pé-direito mais alto (3,50m);
- ✧ ausência de forro, deixando a laje exposta, permitindo trocas térmicas com a estrutura;
- ✧ paredes externas mais espessas (17cm), com painéis de concreto mais pesados, densidade 1.800kg/m³.

No programa TAS, as zonas térmicas noroeste e nordeste, sudoeste e sudeste foram divididas com *constructions lines* (CL), interpretadas pelo programa como limites de zonas térmicas, porém não como barreiras físicas. As zonas são interligadas duas a duas.

Com base nas descrições apresentadas nos parágrafos anteriores, o modelo geométrico adotado na terceira etapa da pesquisa foi configurado no programa TAS de acordo com as Figuras 37 a 44.

Figura 33 – Planta baixa, M3

Figura 34 – Corte esquemático da fachada, M3 (WWR²⁷=50%)

²⁷ Neste trabalho, WWR (*window wall ratio*) é a porcentagem de vidro (área transparente) na fachada correspondente ao pé-direito interno do ambiente, excluindo-se a área de fachada que abrange a estrutura (laje e viga).

Figura 35 – Corte esquemático do pavimento tipo, M3

Figura 36 – Elevação esquemática do pavimento tipo, M3

Figura 37 – Opções de fachada com WWR=50% e sistema de ventilação, M3

Figura 38 – Corte esquemático das fachadas norte e sul, M3, com elementos de proteção solar externos (*brise soleil*)

Figura 39 – Corte esquemático das fachadas leste e oeste, M3, com elementos de proteção solar externos (*brise soleil*)

Figura 40 – Detalhe esquemático do piso elevado/laje/forro, M3

4.6 Parâmetros físicos de simulação da etapa 3

Os dados de latitude e orientação foram idênticos aos adotados nas simulações com os modelos M1 e M2.

Pavimentos

Assim como nas demais simulações, foram modelados quatro pavimentos, sendo um térreo apoiado no solo, o primeiro pavimento, um intermediário, do qual se extraíram os resultados, e pavimento superior, todos com as mesmas características internas. Porém o modelo M3 apresenta pé-direito mais alto que os modelos anteriores, portanto, os pavimentos e as respectivas alturas foram definidos da seguinte maneira:

Tabela 57 – Dados de entrada sobre os pavimentos do modelo simulado

	TÉRREO	PRIMEIRO PAVIMENTO	PAVIMENTO INTERMEDIÁRIO	PAVIMENTO SUPERIOR
EM CONTATO COM O SOLO	sim	não	não	não
NÍVEL DO PISO	0	3,80m	7,60m	11,40m
ALTURA PISO A PISO	3,80m	3,80m	3,80m	3,80m

Fachadas

As fachadas do modelo M3 apresentam WWR de 50%, com sombreamento externo total. As dimensões das áreas transparentes foram:

- ⊗ M3 – WWR=50% com sombreamento externo.

Área envidraçada: largura da fachada; altura = 1,85m; peitoril = 1,00m. Os elementos de sombreamento externo foram dimensionados para sombrear a área envidraçada durante todo o período de ocupação. Eles não aparecem no modelo geométrico do TAS, porém são atribuídos a cada janela na segunda etapa da simulação, no módulo TAS Building Simulator.

Figura 41 – Imagem tridimensional no programa de simulação TAS, M3

Figura 42 – Imagem tridimensional no programa de simulação TAS, M3

Zonas térmicas

Foram definidas cinco zonas térmicas no modelo: noroeste, nordeste, sudoeste e sudeste, referentes aos ambientes de escritórios, e o *hall*, ambiente central de circulação onde se localizam os elevadores. A área referente ao *core*, onde estão os sanitários, casa de máquinas etc., não foi configurada como zona térmica. Todos os ambientes de escritórios apresentam as mesmas características, diferenciadas apenas pela orientação. No modelo M3 cada zona térmica tem três fachadas, com três orientações diferentes, como pode ser observado na Figura 33.

Materiais

Tabela 58 – Parâmetros fixos de simulação – escritórios e *hall*

Ambiente	Elemento	Material
Zonas: noroeste, nordeste, sudoeste e sudeste	Janela	Janelas com esquadria de alumínio (5% da área) e vidro verde 6 mm. $U_{\text{VIDRO}}=5,73\text{W/m}^2.\text{°C}$ $\text{Str}_{\text{VIDRO}}=0,64$
	Parede externa (peitoril-opaco) $U_{\text{HOR}}=2,86\text{W/m}^2.\text{°C}$	Painel de concreto (1.800kg/m^3 e $0,87\text{W/m}^2.\text{°C}$) 15,0cm + granito 2,0cm
	Piso (P)	Laje de concreto (2.000kg/m^3 e $1,45\text{W/m}^2.\text{°C}$) de 15cm, câmara de ar de 10cm, piso elevado metálico com carpete
	Laje de concreto (L) $U_{\text{VERT/P+L}}=1,28\text{ W/m}^2.\text{°C}$	Laje de concreto de 15cm (2.000kg/m^3)
	Sem forro	—
Zona: <i>hall</i> (área: $94,3\text{m}^2$)	Parede interna $U_{\text{HOR}}=0,43\text{W/m}^2.\text{°C}$	Parede sistema <i>dry wall</i> : painel de gesso 1,25cm + lâ de vidro + painel de gesso 1,25cm Espessura total de 10cm
	Piso	Laje de concreto (2.000kg/m^3) de 15cm, câmara de ar de 10cm, piso elevado metálico com carpete
	Sem forro	—

Carga térmica de equipamentos

As informações de carga térmica de equipamentos e ocupação, assim como o período de ocupação, foram iguais às simulações anteriores, possibilitando uma análise de comparação do desempenho da arquitetura.

- ⊗ iluminação artificial: 12 W/m^2 ;
- ⊗ equipamentos: $27,5 \text{ W/m}^2$. Foi considerado um computador por pessoa + 10% referente a impressoras, copiadoras etc. ($200 \text{ W} + 20 \text{ W}$). $1 \text{ pessoa}/8 \text{ m}^2 = 220 \text{ W}/8 \text{ m}^2 = 27,5 \text{ W/m}^2$.

Carga térmica de ocupação

- ⊗ ambientes de escritório²⁸: $1 \text{ pessoa}/8 \text{ m}^2$: $140 \text{ W}/8 \text{ m}^2 = 17,5 \text{ W/m}^2$, sendo: calor sensível: $65 \text{ W}/8 \text{ m}^2 = 8,125 \text{ W/m}^2$ e calor latente: $75 \text{ W}/8 \text{ m}^2 = 9,375 \text{ W/m}^2$;
- ⊗ core central²⁹: $0,3 \text{ pessoa}/\text{m}^2$: $36 \text{ W}/\text{m}^2$, sendo: calor sensível: $18,9 \text{ W}/8 \text{ m}^2$ e calor latente: $17,1 \text{ W}/8 \text{ m}^2$.

Período de ocupação

Foi considerado período de ocupação das 8h às 18h.

Termostato para configuração do ar-condicionado

As simulações de condicionamento ativo com o modelo M3 foram configuradas no TAS da seguinte maneira:

- ⊗ TBS= 26°C e UR=65% – parâmetro de conforto para sistema ativo definido no capítulo 3, para esta pesquisa.

As simulações de condicionamento passivo foram configuradas pelas porcentagens de aberturas das áreas envidraçadas e submetidas a um *schedule*, ou seja, um calendário que determina o horário de abertura e fechamento delas. As simulações de 13 a 16 consideraram 17,1% de área da fachada aberta 24h.

²⁸ Escritório: atividade moderada: 140W (65W c. sensível + 75W c. latente) (FROTA, 2001).

Configuração de aberturas para ventilação natural

As simulações de ventilação natural foram configuradas pela porcentagem de abertura das áreas envidraçadas e submetidas a um *schedule*, ou seja, um calendário que determina o horário de abertura e fechamento delas. O *schedule* atribuído às simulações 15 e 16 foi de 24 horas, ou seja, janelas abertas para ventilação 24 horas por dia.

Da mesma maneira que nos modelos 1 e 2, imaginou-se uma área de 30cm de altura por toda a extensão da fachada para o dimensionamento das aberturas. Esses 30cm representam uma proporção de 8,6% da fachada, ou 17,1% da área envidraçada do modelo 3, e que, na prática, também podem ser executados de várias maneiras, conforme cortes e fachadas apresentadas do modelo 3 (Figuras 34 a 39). Essa proporção de abertura representa 5,1% da área do piso de cada zona.

²⁹ Em pé, em repouso: 120W (63W c. sensível + 57W c. latente) (FROTA, 2001).

4.7 Terceira etapa de simulações (M3)

As simulações com o modelo M3 seguem o mesmo conceito das simulações com os modelos M1 e M2, de acordo com a Tabela 59.

Tabela 59 – Descrição das simulações da terceira etapa, numeradas de 13 a 16

Modelo M3 = WWR=50%, sombreamento externo, com ocupação			
Simulação	Sistema de condicionamento:	Arquivo climático	Cidade
13	Ar-condicionado (8h às 18h) <ul style="list-style-type: none"> TBS: 26°C UR: 65% 	<ul style="list-style-type: none"> Ano referência proj. Dia referência verão 	São Paulo
14		<ul style="list-style-type: none"> Ano referência proj. Dia referência verão 	Rio de Janeiro
15	<ul style="list-style-type: none"> Ventilação natural 24h Abertura de 17,1% nas fachadas 	<ul style="list-style-type: none"> Ano referência proj. 	São Paulo
16		<ul style="list-style-type: none"> Avaliação da possibilidade de modo misto 	Rio de Janeiro

4.7.1 Simulação 13: M3 – SP – AC (26°C 65%)

A simulação 13, caracterizada de acordo com as informações da Tabela 59, para o ano climático de referência da cidade de São Paulo, apresentou suas cargas térmicas internas (sensível e latente) distribuídas de acordo com o Gráfico 66, em relação aos meses e zonas noroeste, nordeste, sudoeste e sudeste.

Gráfico 66 – Simulação 13: cargas térmicas (sensível + latente) mensais por zona, M3, SP

Tabela 60 – Simulação 13: carga térmica total anual, M3, SP, AC (26°C 65%)

ZONA	CARGA TÉRMICA TOTAL ANUAL (kW)
NORDESTE	29.862
SUDESTE	29.828
NOROESTE	29.584
SUDOESTE	29.828
TOTAL	119.102

A distribuição das cargas térmicas entre as zonas, como nos modelos M1 e M2, se mantém numa proporção muito próxima de 25% em cada zona, em todos os meses do ano. Os meses de verão apresentam cargas mais elevadas que os de inverno, caracterizando bem as duas estações extremas, no ano.

Já com relação ao modelo M2 (simulação 9), apresentou uma redução de carga térmica anual de 14% e com relação ao M1 (simulação 3), a redução foi de 31%.

Gráfico 67 – Simulação 13: ganhos e perdas térmicas, dia crítico de verão, M3, SP

Os gráficos horários de ganhos e perdas térmicas das quatro zonas da simulação 13, assim como as simulações dos modelos 1 e 2, se apresentaram bastante semelhantes entre si durante o dia crítico de verão, com variação apenas nos horários dos ganhos solares.

Os maiores ganhos se dão pela ocupação (pessoas, iluminação artificial e equipamentos), constante das 8h às 18h. Os ganhos solares são menos representativos, se comparados com o M1 (Gráfico 39), isso devido à redução da área envidraçada e à proteção solar externa. A maior perda se dá na retirada de carga pelo sistema de ar-condicionado.

4.7.2 Simulação 14: M3 – RJ – AC (26°C 65%)

A simulação 14 foi configurada da mesma maneira que a simulação 13, porém para o clima da cidade do Rio de Janeiro, ano climático de referência. Como resultado, apresentou suas cargas térmicas internas (sensível e latente) distribuídas de acordo com o Gráfico 68, em relação aos meses e zonas noroeste, nordeste, sudoeste e sudeste.

Gráfico 68 – Simulação 14: cargas térmicas (sensível + latente) mensais por zona, M3, RJ

Tabela 61 – Simulação 14: carga térmica total anual, M3, RJ, AC (26°C 65%)

ZONA	CARGA TÉRMICA TOTAL ANUAL (kW)
NORDESTE	41.853
SUDESTE	42.060
NOROESTE	41.994
SUDOESTE	42.016
TOTAL	167.923

A proporção na distribuição da carga térmica entre as zonas se mantém, com aumento de carga térmica total anual em relação ao mesmo M3, em São Paulo, de 41%.

Já com relação ao modelo M2 (simulação 10), apresentou uma redução de carga térmica anual de 14% e com relação ao M1 (simulação 4), a redução foi de 23%.

Gráfico 69 – Simulação 14: ganhos e perdas térmicas, dia crítico de verão, M3, RJ

Os gráficos horários de ganhos e perdas térmicas das quatro zonas da simulação 14, assim como as simulações dos modelos 1 e 2, se apresentaram bastante semelhantes entre si durante o dia crítico de verão, com variação apenas nos horários dos ganhos solares.

Os maiores ganhos se dão pela ocupação (pessoas, iluminação artificial e equipamentos), constante das 8h às 18h. Os ganhos solares são menos representativos, se comparados com o M1 (Gráfico 48), isso devido à redução da área envidraçada e à proteção solar externa. A maior perda se dá na retirada de carga pelo sistema de ar-condicionado.

4.7.3 Simulação 15: M3 – SP – ventilação natural

Para avaliar a possibilidade de utilização do sistema de modo misto de condicionamento ambiental durante o ano, foi atribuída ao modelo M3 uma abertura de proporção de 17,1% da área envidraçada para ventilação natural, aberta 24 horas, conforme parâmetros de simulação da etapa 3, descritos no início deste capítulo. A análise foi feita seguindo os mesmos conceitos aplicados nas simulações 11 e 12.

Tabela 62 – Porcentagem de horas em conforto na zona noroeste, simulação 15, 20% de insatisfeitos

Ocupação			
Início	8	Fim	17
Mês	Frio	Conforto	Quente
Janeiro	0,0%	87,0%	13,0%
Fevereiro	0,0%	86,0%	14,0%
Março	2,3%	90,9%	6,8%
Abril	2,3%	90,9%	6,8%
Maio	1,4%	91,9%	6,7%
Junho	19,6%	80,4%	0,0%
Julho	16,2%	83,8%	0,0%
Agosto	44,1%	55,9%	0,0%
Setembro	21,5%	78,0%	0,5%
Outubro	7,4%	91,7%	0,9%
Novembro	5,5%	93,2%	1,4%
Dezembro	1,9%	95,2%	2,9%
Ano	13,0%	83,2%	3,9%

Tabela 63 – Porcentagem de horas em conforto na zona noroeste, simulação 15, 10% de insatisfeitos

Ocupação			
Início	8	Fim	17
Mês	Frio	Conforto	Quente
Janeiro	0,4%	63,5%	36,1%
Fevereiro	1,5%	58,5%	40,0%
Março	4,1%	68,6%	27,3%
Abril	4,1%	68,6%	27,3%
Maio	3,8%	70,5%	25,7%
Junho	31,7%	68,3%	0,0%
Julho	29,0%	71,0%	0,0%
Agosto	59,5%	40,5%	0,0%
Setembro	35,0%	63,0%	2,0%
Outubro	15,2%	79,6%	5,2%
Novembro	12,3%	79,5%	8,2%
Dezembro	5,7%	80,0%	14,3%
Ano	20,2%	66,3%	13,5%

Tabela 64 – Porcentagem de horas em conforto na zona nordeste, simulação 15, 20% de insatisfeitos

Ocupação			
Início	8	Fim	17
Mês	Frio	Conforto	Quente
Janeiro	0,0%	84,3%	15,7%
Fevereiro	0,0%	84,5%	15,5%
Março	2,3%	91,4%	6,4%
Abril	2,3%	91,4%	6,4%
Maio	1,9%	91,4%	6,7%
Junho	22,2%	77,8%	0,0%
Julho	20,0%	80,0%	0,0%
Agosto	48,2%	51,8%	0,0%
Setembro	24,5%	74,5%	1,0%
Outubro	8,7%	90,0%	1,3%
Novembro	6,4%	91,4%	2,3%
Dezembro	2,4%	93,3%	4,3%
Ano	14,4%	81,1%	4,5%

Tabela 65 – Porcentagem de horas em conforto na zona nordeste, simulação 15, 10% de insatisfeitos

Ocupação			
Início	8	Fim	17
Mês	Frio	Conforto	Quente
Janeiro	0,4%	65,2%	34,3%
Fevereiro	1,5%	58,5%	40,0%
Março	5,0%	68,2%	26,8%
Abril	5,0%	68,2%	26,8%
Maio	4,3%	70,0%	25,7%
Junho	33,9%	66,1%	0,0%
Julho	33,3%	66,7%	0,0%
Agosto	60,5%	39,5%	0,0%
Setembro	36,0%	62,0%	2,0%
Outubro	18,7%	75,7%	5,7%
Novembro	13,2%	80,0%	6,8%
Dezembro	6,2%	79,5%	14,3%
Ano	21,5%	65,2%	13,3%

Tabela 66 – Porcentagem de horas em conforto na zona sudoeste, simulação 15, 20% de insatisfeitos

Ocupação			
Início	8	Fim	17
Mês	Frio	Conforto	Quente
Janeiro	0,0%	83,9%	16,1%
Fevereiro	0,0%	86,5%	13,5%
Março	2,3%	90,0%	7,7%
Abril	2,3%	90,0%	7,7%
Maio	1,9%	93,8%	4,3%
Junho	20,4%	79,6%	0,0%
Julho	14,8%	85,2%	0,0%
Agosto	50,5%	49,5%	0,0%
Setembro	27,5%	72,0%	0,5%
Outubro	8,3%	90,9%	0,9%
Novembro	6,4%	92,3%	1,4%
Dezembro	2,9%	92,4%	4,8%
Ano	14,1%	81,7%	4,2%

Tabela 67 – Porcentagem de horas em conforto na zona sudoeste, simulação 15, 10% de insatisfeitos

Ocupação			
Início	8	Fim	17
Mês	Frio	Conforto	Quente
Janeiro	0,4%	64,8%	34,8%
Fevereiro	1,5%	62,5%	36,0%
Março	6,4%	64,5%	29,1%
Abril	6,4%	64,5%	29,1%
Maio	4,3%	75,2%	20,5%
Junho	33,5%	66,5%	0,0%
Julho	28,6%	71,4%	0,0%
Agosto	58,6%	41,4%	0,0%
Setembro	39,0%	58,5%	2,5%
Outubro	17,0%	77,8%	5,2%
Novembro	15,9%	75,5%	8,6%
Dezembro	6,2%	79,5%	14,3%
Ano	21,1%	65,8%	13,1%

Tabela 68 – Porcentagem de horas em conforto na zona sudeste, simulação 15, 20% de insatisfeitos

Ocupação			
Início	8	Fim	17
Mês	Frio	Conforto	Quente
Janeiro	0,0%	82,2%	17,8%
Fevereiro	0,0%	83,5%	16,5%
Março	2,3%	88,2%	9,5%
Abril	2,3%	88,2%	9,5%
Maio	2,4%	90,0%	7,6%
Junho	20,9%	79,1%	0,0%
Julho	18,6%	81,4%	0,0%
Agosto	50,9%	49,1%	0,0%
Setembro	29,0%	70,0%	1,0%
Outubro	9,1%	90,0%	0,9%
Novembro	6,8%	91,8%	1,4%
Dezembro	2,4%	90,0%	7,6%
Ano	14,8%	79,8%	5,4%

Tabela 69 – Porcentagem de horas em conforto na zona sudeste, simulação 15, 10% de insatisfeitos

Ocupação			
Início	8	Fim	17
Mês	Frio	Conforto	Quente
Janeiro	0,4%	64,8%	34,8%
Fevereiro	1,5%	60,0%	38,5%
Março	6,4%	64,1%	29,5%
Abril	6,4%	64,1%	29,5%
Maio	4,3%	72,9%	22,9%
Junho	34,8%	65,2%	0,0%
Julho	31,0%	69,0%	0,0%
Agosto	59,5%	40,5%	0,0%
Setembro	41,5%	56,0%	2,5%
Outubro	19,6%	73,9%	6,5%
Novembro	15,9%	75,5%	8,6%
Dezembro	6,2%	79,0%	14,8%
Ano	22,0%	64,3%	13,7%

4.7.4 Possibilidade de utilização do modo misto, M3 - SP

Analisando-se o balanço horário e considerando-se apenas a situação com porcentagem de horas em conforto para até 10% de pessoas insatisfeitas, é possível identificar dois períodos de comportamentos distintos:

- ✱ dezembro a maio apresentam período em desconforto por calor acima de 14%, porém chegando ao máximo de apenas 40,0%, em fevereiro, nas zonas noroeste e nordeste. Apresentam períodos de conforto de 80% e desconforto por frio de até 6,2%;
- ✱ os meses junho e novembro apresentam períodos de desconforto por calor abaixo de 8,6%. Os períodos de conforto atingem 80%, e os de desconforto por frio atingem 60,5%, no mês de agosto, na zona nordeste. Os meses junho, julho e agosto são divididos entre períodos de frio e de conforto, com 0% de desconforto por calor. São nesses meses que o desconforto por frio varia de 29% a 60,5%, tornando-se um problema. Nesse período do ano, a proporção de abertura deverá ser drasticamente reduzida.

Balanço horário, simulação 15: ZONA NOROESTE																																	
Mês	Hora	Dia																															
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	17	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	
JANEIRO	1																																
	2																																
	3																																
	4																																
	5																																
	6																																
	7																																
	8	C	C	C	C	C																											
	9	Q	C	C	C	C																											
	10	C	C	C	C	C																											
	11	C	C	Q	C	C																											
	12	Q	Q	Q	Q	C	C																										
	13	Q	Q	Q	Q	C	C																										
	14	Q	Q	Q	Q	C	Q																										
	15	C	C	C	C	C	Q																										
	16	C	C	C	C	C	Q																										
	17	C	C	C	C	C																											
	18																																
	19																																
	20																																
	21																																
	22																																
	23																																
	24																																

Figura 43 – Balanço horário de janeiro, zona noroeste com 10% de insatisfeitos, simulação 15

Figura 44 – Balanco horário de setembro, zona noroeste com 10% de insatisfeitos, simulação 15

Levando-se em conta uma proporção de abertura equivalente à metade da considerada na simulação 15, ou seja, 8,55% da fachada, teríamos na zona noroeste, nos meses de junho, julho e agosto, períodos de desconforto por frio reduzidos a 22,6%, 17,6% e 40,9%, contra 31,7%, 29% e 59,5% resultantes da simulação 15, o que comprova o fato de que o desconforto por frio pode ser controlado reduzindo-se as aberturas.

Tabela 70 – Porcentagem de horas em conforto na zona NO, 10% de insatisfeitos, com abertura para ventilação natural 24h equivalente a 8,55% da fachada, SP

Ocupação			
Início	8	Fim	17
Mês	Frio	Conforto	Quente
Janeiro	0,4%	42,6%	57,0%
Fevereiro	1,0%	45,5%	53,5%
Março	2,7%	60,5%	36,8%
Abril	2,7%	60,5%	36,8%
Maió	1,9%	55,7%	42,4%
Junho	22,6%	76,5%	0,9%
Julho	17,6%	82,4%	0,0%
Agosto	40,9%	59,1%	0,0%
Setembro	23,0%	71,0%	6,0%
Outubro	9,6%	80,0%	10,4%
Novembro	8,2%	77,3%	14,5%
Dezembro	4,8%	71,4%	23,8%
Ano	13,9%	65,1%	21,0%

Analisando-se os resultados apresentados nas Tabelas 62 a 69, a zona sudeste foi a que apresentou maior porcentagem de períodos quentes durante o ano de referência de projeto, 13,7%, para 90% de usuários satisfeitos. Por ser a

situação mais crítica, a zona sudeste será a base para avaliação do sistema de modo misto que atuaria da seguinte maneira:

Gráfico 70 – Simulação 15: configuração do sistema de modo misto ao longo do ano, M3+abertura, SP

Gráfico 71 – Simulação 15: carga térmica do ar-condicionado para M3 com sistema totalmente ativo e M3+abertura com modo misto, SP

Tabela 71 – Simulação 15: carga térmica total anual, M3, SP, modo misto, 90% satisfeitos

ZONA	CARGA TÉRMICA TOTAL ANUAL (kW)
NOROESTE	5.617
NORDESTE	5.562
SUDESTE	5.354
SUDOESTE	5.688
TOTAL	22.221

Comparando-se o modelo M3 de fachada selada, operando sistema ativo integral, com o mesmo M3+abertura de 17,1% nas fachadas, operando com o

modo misto em São Paulo, identificou-se a zona SE como a mais crítica por períodos de desconforto por calor, com redução de carga térmica anual de 71%.

A simulação 15 demonstra que na cidade de São Paulo o modelo M3 é capaz de oferecer conforto a 90% dos usuários, por 86% do período de ocupação, sem utilização do sistema de ar-condicionado. Diante desse resultado, comprova-se a vantagem da utilização do sistema para edifícios de escritórios na cidade de São Paulo.

Se considerarmos 80% de usuários satisfeitos, o sistema de ar-condicionado ainda seria requisitado por um período de 17,8% no mês de janeiro na zona sudeste, enquanto entre os meses junho e novembro, apenas por até 2,3% do mês na zona sudeste em novembro. Considerando-se a média anual de desconforto por calor, nas quatro zonas, a faixa fica entre 3,9% a 5,4%.

A configuração do modo misto para 20% de insatisfeitos e a distribuição de carga térmica se dão conforme os Gráficos 72 e 73.

Gráfico 72 – Simulação 15, 80% satisfeitos: configuração do sistema de modo misto ao longo do ano, M3+abertura, SP

Gráfico 73 – Simulação 15, 80% satisfeitos: carga térmica do ar-condicionado para M3 com sistema totalmente ativo e M3+abertura com modo misto, SP

Tabela 72 – Simulação 15: carga térmica total anual, M3, SP, modo misto, 80% satisfeitos

ZONA	CARGA TÉRMICA TOTAL ANUAL (kW)
NOROESTE	2.710
NORDESTE	3.253
SUDESTE	3.824
SUDOESTE	3.187
TOTAL	12.793

Aumentando-se de 10% para 20% a quantidade de usuários insatisfeitos, o sistema de ar-condicionado ainda seria requisitado no verão. Porém a carga térmica do sistema de modo misto cairia mais 65% em relação à carga térmica para satisfazer 90% dos usuários.

Olhando mais de perto o que acontece no interior da zona sudeste, entre os dias 20 e 24 de agosto, observam-se períodos de sensação de frio, conforto e calor para 90% de satisfeitos num mesmo dia.

Figura 45 – Simulação 15: balanço horário do mês de agosto, zona SE, M3, SP

Conforme apresentado anteriormente, a sensação de frio, conforto ou calor está sendo determinada pelo modelo adaptativo. O Gráfico 75 mostra os parâmetros de TBS e UR resultantes no interior da zona, referentes às sensações descritas no balanço horário da Figura 45.

Gráfico 74 – Simulação 15: parâmetros de temperatura e umidade, internas e externas, nos dias 21 a 24 de agosto, M3, SP

Tabela 73 – Simulação 15: parâmetros de temperatura e umidade nos dias 20 a 24 de agosto, M3, SP

	DIA 20/8			DIA 21/8			DIA 22/8		
HORA	TBS interna	UR interna	90%	TBS interna	UR interna	90%	TBS interna	UR interna	90%
8	16,4	78,2	F	17,8	70,4	F	16,6	79,5	F
9	20,7	65,4	F	19,6	64,1	C	21,4	61,6	C
10	19,9	66,0	F	21,4	57,2	C	23,2	53,5	C
11	22,1	57,8	C	25,0	45,5	C	25,1	46,7	C
12	24,9	47,5	C	26,8	42,4	C	26,8	40,6	C
13	26,5	41,0	C	28,5	33,9	Q	28,6	35,7	Q
14	28,4	31,8	C	29,1	30,7	Q	29,3	32,7	Q
15	28,9	29,7	C	29,1	29,4	Q	29,0	34,2	Q
16	29,8	29,4	Q	31,2	27,0	Q	27,7	38,4	Q
17	30,0	29,6	Q	31,2	27,0	Q	22,7	55,8	C

	DIA 23/8			DIA 24/8		
HORA	TBS interna	UR interna	90%	TBS interna	UR interna	90%
8	18,0	60,4	F	19,5	61,0	C
9	19,7	56,0	C	22,5	49,1	C
10	21,4	50,6	C	21,7	53,2	C
11	24,8	41,2	C	23,6	47,2	C
12	28,7	33,3	Q	24,8	42,9	C
13	28,8	30,3	Q	26,4	37,7	C
14	29,7	25,9	Q	26,6	36,3	C
15	30,2	22,2	Q	24,1	45,1	C
16	30,7	22,0	Q	24,0	43,3	C
17	30,9	21,6	Q	24,7	41,0	C

Conforme Tabela 73, estão sendo consideradas condição de conforto para 90% dos usuários, pelo modelo adaptativo, combinações de temperatura e umidade desde 19,6°C e 64,1% até 28,9 °C e 29,7%.

4.7.5 Simulação 16: M3 – RJ – ventilação natural

Assim como na simulação 15 para São Paulo, a simulação 16 também atribui uma abertura de proporção de 17,1% da área envidraçada, aberta 24 horas, para ventilação natural.

Tabela 74 – Porcentagem de horas em conforto na zona noroeste, simulação 16, 20% de insatisfeitos

Ocupação			
Início	8	Fim	17
Mês	Frio	Conforto	Quente
Janeiro	0,0%	13,9%	86,1%
Fevereiro	0,0%	10,5%	89,5%
Março	0,0%	25,9%	74,1%
Abril	0,0%	25,9%	74,1%
Maio	0,0%	27,6%	72,4%
Junho	0,0%	91,7%	8,3%
Julho	0,0%	83,3%	16,7%
Agosto	1,4%	97,7%	0,9%
Setembro	0,0%	84,5%	15,5%
Outubro	0,0%	49,1%	50,9%
Novembro	0,0%	33,2%	66,8%
Dezembro	0,0%	25,2%	74,8%
Ano	0,1%	52,1%	47,8%

Tabela 75 – Porcentagem de horas em conforto na zona noroeste, simulação 16, considerando 10% de pessoas insatisfeitas

Ocupação			
Início	8	Fim	17
Mês	Frio	Conforto	Quente
Janeiro	0,0%	5,2%	94,8%
Fevereiro	0,0%	6,0%	94,0%
Março	0,0%	12,3%	87,7%
Abril	0,0%	12,3%	87,7%
Maio	0,0%	16,7%	83,3%
Junho	2,6%	75,2%	22,2%
Julho	0,5%	50,5%	49,0%
Agosto	3,6%	74,1%	22,3%
Setembro	0,0%	51,0%	49,0%
Outubro	0,0%	26,5%	73,5%
Novembro	0,0%	17,7%	82,3%
Dezembro	0,0%	7,6%	92,4%
Ano	0,7%	32,9%	66,4%

Tabela 76 – Porcentagem de horas em conforto na zona nordeste, simulação 16, 20% de insatisfeitos

Ocupação			
Início	8	Fim	17
Mês	Frio	Conforto	Quente
Janeiro	0,0%	15,7%	84,3%
Fevereiro	0,0%	11,0%	89,0%
Março	0,0%	25,9%	74,1%
Abril	0,0%	25,9%	74,1%
Maio	0,0%	34,3%	65,7%
Junho	0,0%	95,2%	4,8%
Julho	0,0%	88,6%	11,4%
Agosto	1,4%	97,7%	0,9%
Setembro	0,0%	89,5%	10,5%
Outubro	0,0%	62,6%	37,4%
Novembro	0,0%	37,3%	62,7%
Dezembro	0,0%	28,6%	71,4%
Ano	0,1%	55,9%	43,9%

Tabela 77 – Porcentagem de horas em conforto na zona nordeste, simulação 16, 10% de insatisfeitos

Ocupação			
Início	8	Fim	17
Mês	Frio	Conforto	Quente
Janeiro	0,0%	5,2%	94,8%
Fevereiro	0,0%	6,0%	94,0%
Março	0,0%	13,6%	86,4%
Abril	0,0%	13,6%	86,4%
Maio	0,0%	18,1%	81,9%
Junho	2,2%	79,1%	18,7%
Julho	0,5%	59,0%	40,5%
Agosto	3,6%	81,4%	15,0%
Setembro	0,0%	57,5%	42,5%
Outubro	0,0%	31,3%	68,7%
Novembro	0,0%	20,9%	79,1%
Dezembro	0,0%	12,9%	87,1%
Ano	0,6%	37,0%	62,3%

Tabela 78 – Porcentagem de horas em conforto na zona sudoeste, simulação 16, 20% de insatisfeitos

Ocupação			
Início	8	Fim	17
Mês	Frio	Conforto	Quente
Janeiro	0,0%	13,9%	86,1%
Fevereiro	0,0%	9,5%	90,5%
Março	0,0%	25,5%	74,5%
Abril	0,0%	25,5%	74,5%
Maio	0,0%	29,0%	71,0%
Junho	0,0%	96,5%	3,5%
Julho	0,0%	91,0%	9,0%
Agosto	1,4%	96,8%	1,8%
Setembro	0,0%	85,0%	15,0%
Outubro	0,0%	52,2%	47,8%
Novembro	0,0%	34,1%	65,9%
Dezembro	0,0%	29,5%	70,5%
Ano	0,1%	54,2%	45,7%

Tabela 79 – Porcentagem de horas em conforto na zona sudoeste, simulação 16, 10% de insatisfeitos

Ocupação			
Início	8	Fim	17
Mês	Frio	Conforto	Quente
Janeiro	0,0%	4,3%	95,7%
Fevereiro	0,0%	5,0%	95,0%
Março	0,0%	11,4%	88,6%
Abril	0,0%	11,4%	88,6%
Maio	0,0%	15,7%	84,3%
Junho	3,0%	79,6%	17,4%
Julho	1,0%	64,8%	34,3%
Agosto	4,5%	85,0%	10,5%
Setembro	0,0%	55,5%	44,5%
Outubro	0,0%	28,3%	71,7%
Novembro	0,0%	20,5%	79,5%
Dezembro	0,0%	11,0%	89,0%
Ano	0,9%	36,8%	62,3%

Tabela 80 – Porcentagem de horas em conforto na zona sudeste, simulação 16, 20% de insatisfeitos

Ocupação			
Início	8	Fim	17
Mês	Frio	Conforto	Quente
Janeiro	0,0%	14,8%	85,2%
Fevereiro	0,0%	12,0%	88,0%
Março	0,0%	25,9%	74,1%
Abril	0,0%	25,9%	74,1%
Maio	0,0%	32,9%	67,1%
Junho	0,0%	97,0%	3,0%
Julho	0,0%	92,9%	7,1%
Agosto	1,4%	98,2%	0,5%
Setembro	0,0%	88,5%	11,5%
Outubro	0,0%	59,6%	40,4%
Novembro	0,0%	36,4%	63,6%
Dezembro	0,0%	30,5%	69,5%
Ano	0,1%	56,7%	43,2%

Tabela 81 – Porcentagem de horas em conforto na zona sudeste, simulação 16, 20% de insatisfeitos

Ocupação			
Início	8	Fim	17
Mês	Frio	Conforto	Quente
Janeiro	0,0%	5,2%	94,8%
Fevereiro	0,0%	5,5%	94,5%
Março	0,0%	12,3%	87,7%
Abril	0,0%	12,3%	87,7%
Maio	0,0%	15,2%	84,8%
Junho	3,0%	83,9%	13,0%
Julho	1,0%	71,0%	28,1%
Agosto	4,5%	88,6%	6,8%
Setembro	0,0%	56,5%	43,5%
Outubro	0,0%	30,4%	69,6%
Novembro	0,0%	23,2%	76,8%
Dezembro	0,0%	12,9%	87,1%
Ano	0,8%	39,1%	60,0%

4.7.6 Possibilidade de utilização do modo misto, M3 - RJ

Analisando-se o balanço horário e considerando-se apenas a situação com porcentagem de horas em conforto para até 10% de pessoas insatisfeitas, é possível identificar dois períodos de comportamentos distintos:

referência de projeto, 66,4%, para 90% de usuários satisfeitos. Por ser a situação mais crítica, a zona noroeste será a base para avaliação do sistema de modo misto que atuaria da maneira apresentada no Gráfico 75.

Gráfico 75 – Simulação 16: configuração do sistema de modo misto ao longo do ano, M3+abertura, RJ

Gráfico 76 – Simulação 16: carga térmica AC para M3 com sistema totalmente ativo e M3+abertura com modo misto, RJ

Tabela 82 – Simulação 16: carga térmica total anual, M3, RJ, modo misto, 90% satisfeitos

ZONA	CARGA TÉRMICA TOTAL ANUAL (kW)
NOROESTE	32.319
NORDESTE	30.503
SUDESTE	30.693
SUDOESTE	29.733
TOTAL	123.248

Comparando-se o modelo M3 de fachada selada operando sistema ativo integral com o mesmo M3+abertura de 17,1% nas fachadas, no Rio de Janeiro, operando com o modo misto, identificou-se a zona NO como a mais crítica por períodos de desconforto por calor, uma redução de carga térmica anual de 23%.

A simulação 16 demonstra que na cidade do Rio de Janeiro o modelo M3 é capaz de oferecer conforto a 90% dos usuários, por 30% a 40% do período de ocupação, sem utilização do sistema de ar-condicionado.

Se considerarmos 80% de usuários satisfeitos, mesmo no inverno, o sistema de ar-condicionado ainda seria requisitado, porém por um período menor, de até 6,5% do período entre os meses junho a agosto.

Assim, a configuração do modo misto para 20% de insatisfeitos e a distribuição de carga térmica, se dá conforme os Gráficos 77 e 78.

Gráfico 77 – Simulação 16, 80% satisfeitos: configuração do sistema de modo misto ao longo do ano, M3+abertura, RJ

Aumentando-se de 10% para 20% a quantidade de usuários insatisfeitos, o sistema de ar-condicionado ainda seria requisitado no inverno. Porém a carga

térmica do sistema de modo misto cairia mais 23,6% em relação à carga térmica para satisfazer 90% dos usuários.

Gráfico 78 – Simulação 16, 80% satisfeitos: carga térmica do ar-condicionado para M3 com sistema totalmente ativo e M3+abertura com modo misto, RJ

Tabela 83 – Simulação 16: carga térmica total anual, M3, RJ, modo misto, 80% satisfeitos

ZONA	CARGA TÉRMICA TOTAL ANUAL (kW)
NOROESTE	24.827
NORDESTE	22.900
SUDESTE	23.821
SUDOESTE	22.654
TOTAL	94.203

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Modelo 1

Quando o modelo 1 operou com sistema de ar-condicionado durante todo o período de ocupação, com termostato configurado para temperatura de 26°C e 65% de umidade relativa do ar, ou 24° e 50%, o clima do Rio de Janeiro resultou em uma carga térmica total anual superior à de São Paulo em 21%.

Ao se alterarem as fachadas do modelo 1 em São Paulo, obteve-se conforto para 90% dos usuários, com ventilação natural, durante uma média de 44% do período de ocupação anual, reduzindo-se a carga térmica em 34,5%, em comparação à utilização de ar-condicionado durante todo o período de ocupação, com termostato configurado para temperatura de 26°C e 65% de umidade relativa do ar.

Já para a cidade do Rio de Janeiro, o modelo 1 de edifícios de escritórios, mesmo com aberturas nas fachadas de 11,1%, não proporcionaria conforto aos usuários por um período considerável, não sendo vantajosa a operação do modo misto nesse tipo de edificação.

Modelo 2

A alteração de fachada do modelo 1, reduzindo-se o WWR em 50% e incluindo-se elementos de sombreamento externo nas quatro fachadas (modelo 2), resultou em redução de carga térmica de ar-condicionado de 19% em São Paulo e 11% no Rio de Janeiro, considerando-se sua operação a 26°C e 65% de umidade relativa do ar.

Para o modelo 2, a carga térmica anual do sistema ativo no Rio de Janeiro é 29% maior que a de São Paulo.

Ao se usar uma abertura na fachada de 11,1%, o modelo M2 em São Paulo apresentou ótimas condições de exploração do sistema de modo misto, resultando em uma redução de carga térmica de ar-condicionado total anual em torno de 64%.

Já para o Rio de Janeiro, o modelo 2 ainda não oferece condições favoráveis para a operação em modo misto, uma vez que uma abertura de 11,1% das fachadas representaria uma redução de carga térmica, no pior caso, de apenas 6,7% em relação ao sistema totalmente ativo (a 26°C e 65%).

Modelo 3

O modelo 3 de edifício de escritórios na cidade de São Paulo, se em operação com sistema de ar-condicionado durante todo o período de ocupação, apresentou uma redução de carga térmica total anual de 31% em relação ao M1 e 14% em relação ao M2.

Já para a cidade do Rio de Janeiro, o modelo 3 permitiu uma redução de 23% em relação ao modelo 1 e 14% em relação ao modelo 2.

Quando 17,1% das fachadas foram abertas, o modelo 3 reduziu a necessidade de utilização do sistema de ar-condicionado a apenas 13,5% do período de ocupação, considerando-se 90% de usuários satisfeitos. Durante os meses de junho a setembro, o ar-condicionado não seria acionado. A troca do sistema ativo pelo modo misto, no modelo 3 em São Paulo, significa em redução de carga térmica anual de 81%. Considerando-se 80% de usuários satisfeitos, essa redução atinge 89%.

O modelo 3 implantado no clima da cidade do Rio de Janeiro permite a obtenção de conforto para 90% dos usuários por um período de 37% do ano, principalmente nos meses menos quentes, de junho a setembro. Durante os demais meses, o ar-condicionado não seria acionado nas primeiras horas do dia, em alguns períodos. Assim, o modo misto significa a redução de 27%. Considerando-se 80% de usuários satisfeitos, essa redução atinge 44%.

Assim, a aplicação do modo misto no modelo 3 na cidade do Rio de Janeiro é vantajosa, porém a utilização do sistema de ar-condicionado continua sendo inevitável, mesmo durante o inverno.

Modo misto

O sistema de condicionamento de modo misto deve ser considerado desde as primeiras etapas de projeto da edificação, não sendo vantajosa sua aplicação em qualquer tipo de edificação, em qualquer clima.

A operação do sistema de condicionamento de modo misto envolve desde configurações de projeto de arquitetura, sistemas de automação e operação de aberturas, até questões culturais, de novas propostas de condições de conforto, diferentes das utilizadas atualmente em edifícios de escritórios nas cidades de São Paulo e Rio de Janeiro.

Tabela 84 – Carga térmica total anual resultante das simulações de AC e MM

	CARGA TÉRMICA TOTAL ANUAL (kW)						
	MODELO 1			MODELO 2		MODELO 3	
	AC 24°C/50%	AC 26°C/65%	MM	AC 26°C/65%	MM	AC 26°C/65%	MM
SP	(1) 197.708	(3) 172.067	(7) 112.661	(9) 139.032	(11) 49.437	(13) 119.102	(15) 22.221
RJ	(2) 248.646	(4) 218.103	(8) 209.590	(10) 194.687	(12) 173.500	(14) 167.923	(16) 123.248

Observando-se o resumo dos resultados na Tabela 84, pode-se afirmar que:

- ✧ na cidade de São Paulo, o sistema de modo misto é extremamente vantajoso (15), se pensado desde o início do projeto de arquitetura e instalações, podendo resultar em redução de carga térmica de até **87%**, se comparando com o pior caso estudado (3);
- ✧ na cidade do Rio de Janeiro, o sistema de modo misto também é vantajoso, porém em outras proporções, resultando em uma redução de **43%** para 90% de usuários satisfeitos (16) e 57% para 80% de usuários satisfeitos, comparando-se com o pior caso estudado (4).

Se se compara somente a utilização do sistema ativo, o modelo 3 representa uma redução de 31% (13) em relação ao modelo 1 (3), na cidade de São Paulo, e redução de 23% (14) em relação ao modelo 1 (4), na cidade do Rio de Janeiro. Assim, observa-se que as maiores reduções de carga térmica, e conseqüentemente consumo de energia, se dá na utilização do sistema de modo misto, e não na busca de maior eficiência do sistema ativo. Portanto, diante do atual cenário ambiental, é necessário que se parta para soluções arquitetônicas mais eficientes, visando a maior eficiência energética das edificações.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGÊNCIA NACIONAL DE VIGILÂNCIA SANITÁRIA (ANVISA). Resolução RE9. **Orientação técnica sobre padrões referenciais de qualidade do ar interior, em ambientes climatizados artificialmente de uso público e coletivo**. Brasília: Anvisa, 2003.

ALUCCI, M. P. **Conforto térmico, conforto luminoso e conservação de energia elétrica** – procedimentos para desenvolvimento e avaliação de projeto de edificações. 1993. Tese (Doutorado)—Faculdade de Arquitetura e Urbanismo da Universidade de São Paulo. São Paulo, 1993.

_____. **Dimensionamento de aberturas para otimização da iluminação natural e otimização do consumo de energia elétrica**. São Paulo: Editora da UNIB, 2002.

_____. Fachadas transparentes: do conforto ao consumo de energia elétrica. **Téchne**, 1999.

_____. **Vidros e policarbonatos na Arquitetura**. Desempenho térmico acústico, luminoso e economia de energia elétrica. São Paulo: FAUUSP, 1999. (Material desenvolvido para curso ministrado na FUPAM/FAUUSP em maio de 1999).

AMERICAN SOCIETY OF HEATING, REFRIGERATING AND AIR CONDITIONING (ASHRAE). **ASHRAE 55-1974**: Thermal environmental conditions for human occupancy. New York: ASHRAE, 1974.

_____. **ASHRAE 55-1981**: Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy. Atlanta, Georgia: ASHRAE, 1981.

_____. **ASHRAE 55-1992**: Thermal environmental conditions for human occupancy. Atlanta: ASHRAE, 1992.

_____. **ASHRAE 55-2004**: Thermal environmental conditions for human occupancy. Atlanta: ASHRAE, 2004.

ANDRADE, C. M. **Avaliação de desempenho em edifícios de escritório**: o ambiente de trabalho como meio para o bem-estar produtivo. 2005. Tese (Doutorado)—Faculdade de Arquitetura e Urbanismo da Universidade de São Paulo. São Paulo, 2005.

ARNOLD, D. Air conditioning in office buildings after World War II The first century of air conditioning. **ASHRAE Journal**, 1999a. Disponível em: <http://www.ASHRAE.org/content/ASHRAE/ASHRAE/ArticleAltFormat/2003627101838_326.pdf>.. Acesso em: 18 out. 2005.

_____. The Evolution of modern office buildings and air conditioning. **ASHRAE Journal**, 1999b. Disponível em: <http://www.ASHRAE.org/content/ASHRAE/ASHRAE/ArticleAltFormat/200362710169_326.pdf>. Acesso em: 18 out. 2005.

_____. Mixed Mode HVAC. An Alternative Philosophy. **ASHRAE Transactions**, v. 102, n. 1, 1996.

_____. **Natural ventilation in a large mixed mode building**. Naturally ventilated buildings. London: Ed. D. Croome, E&FN Spon, 1997.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 6401: Instalações centrais de ar-condicionado para conforto**: parâmetros básicos de projeto. Rio de Janeiro: ABNT, 1980.

AUGENBROE, G.; HENSEN, J. Simulation for better building design. **Building and Environment**, v. 39, n. 8, p. 875-877, ago. 2004. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/journals>>. Acesso em: set. 2005.

BALANÇO ENERGÉTICO NACIONAL (BEN). Disponível em: http://www.mme.gov.br/site/menu/select_main_menu_item.do?channelId=1432. Acesso em: set. 2006.

BALARAS, C. A. Thermal Comfort. In: SANTAMOURIS, M.; ASIMAKOPOULOS, D. **Passive cooling of buildings**. London: James & James, 1996. p. 129-170.

BAKER, N.V. **Energy and environment in non-domestic buildings**. A technical design guide. Cambridge: Cambridge Architectural Research Ltd, 2001.

BARNARD, N. **Thermal mass and night ventilation – utilising “hidden” mass**. CIBSE/ASHRAE Conference, 2003.

BENEDETTO Gisele S. De; BUORO, Anarrita B.; MIURA, Olimpia K. U. **Consumo de energia elétrica & conforto ambiental, avaliação e proposta**. Estudo de caso: Hotel Ibis Expo Casa Verde – 2003, São Paulo. Trabalho de conclusão do curso Cecace-III: Curso de Especialização em Conforto Ambiental e Conservação de Energia.

BRAGER, G. S.; DEAR, J. D. A standard for natural ventilation. **ASHRAE Journal**, 2000.

_____. Thermal adaptation in the built environment: a literature review. **Energy and Buildings**, n. 27, 1998.

BRE ENVIRONMENTAL DESIGN MANUAL. Garston: Building Research Establishment, 1994.

BOGO et. al. **Bioclimatologia aplicada ao projeto de edificações visando o conforto térmico**. 80 p. il. Relatório interno 02/94 – Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 1994. Disponível em: <www.labeee.ufsc.br/publicacoes>. Acesso em: mar. 2006.

BUSCH, J. F. A tale of two populations: thermal comfort in air-conditioned and naturally ventilated offices in Thailand. Energy Analysis Program, Applied Science Division, Lawrence Laboratory. **Energy and Buildings**, v. 18, p. 235-249, 1992.

CIBSE APPLICATIONS MANUAL. London: The Chartered Institution of Building Services Engineers, 1997.

CORBIOLI, Nanci. Para esfriar o ambiente. E o bolso. **PROJETO DESIGN**, Edição 297, nov. 2004. Disponível em: <<http://www.arcoweb.com.br/tecnologia/tecnologia48.asp>>. Acesso em: jan. 2006.

DEAR, R. J. de. A global database of thermal comfort field experiments. **ASHRAE Trans**, v. 104, n. 1, 1998. Disponível em: <http://aws.mq.edu.au/rp-884/ASHRAE_rp884_home.html>. Acesso em: jun. 2006.

DEAR, Richard; BRAGER, Gail; COOPER, Donna. **Developing an adaptative model of thermal comfort and preference**. Sydney: ASHRAE, 1997. (ASHRAE FINAL REPORT RP-884).

DILONARDO, Lucia F. S. **Avaliação do uso de tecnologias passivas visando a eficiência energética em edifícios de escritórios**. Dissertação (Mestrado)—Faculdade de Arquitetura e Urbanismo da Universidade de São Paulo. São Paulo, 2001.

DUARTE, D.; SOUZA, T. **Padrões de ocupação do solo e microclimas urbanos em São Paulo – SP**. Proceedings NUTAU'2004.

EDWARDS, B.; HYETT, P. **Rough guide to sustainability**. London: RIBA Companies Ltd., 2002.

EMPORIS. Informações e fotos de edifícios de escritórios em cidades do mundo todo. Disponível em: <<http://www.emporis.com/en/wm/ci/?id=101076>>. Acesso em: maio 2006.

FANGER, P. O. **Thermal comfort: Analysis and applications in environmental engeneering**. United States: McGraw-Hill, 1972.

_____. TOFTUM, J. Extension of the PMV model to non-air-conditioned buildings in warm climates. **Energy and Buildings**, n. 34, p. 533-536, 2002.

FERIADI, H.; WONG, N. H. Thermal comfort for naturally ventilated houses in Indonesia. **Energy and Buildings**, n. 36, 2004.

FROTA, A. B.; S. R. SCHIFFER. **Manual de conforto térmico**. 5. ed. São Paulo: Editora Nobel, 1988.

GARG, N. K. Passive options for thermal comfort in building envelopes – An assessment. **Solar Energy**, v. 47, n. 6, p. 437-441, 1991. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/journals>>. Acesso em: jul. 2005.

GIVONI, B. **Climate considerations in buildings and urban design**. New York: John Wiley & Sons, 1998.

_____. Comfort climate analysis and building desing guidelines. **Energy and Buildings**, v. 18, n. 1, p. 11-23, 1992.

_____. **Man, climate and architecture**. London: Applied Science, 1976.

_____. **Climate considerations in building and urban design**. New York: Jonh Wiley & Sons, 1998.

INTERNATIONAL ORGANIZATION STANDARDIZATION (ISO). **ISO 7726: Ergonomics of the thermal environment**: instruments for measuring physical quantities. Genève: ISO, 1998.

_____. **ISO 7730. Moderate thermal environments**: determination of the PMV and PPD indices and specification of the conditions for thermal comfort. Genève: ISO, 1994.

_____. **ISO 8996. Ergonomics**: determination of metabolic heat production. Genève: ISO, 1990.

_____. **ISO 9920. Ergonomics of the thermal environment**: estimation of the thermal insulation and evaporative resistance of a clothing ensemble. Genève: ISO, 1995.

JANSSEN, J. E. Air quality, ventilation and comfort. **ASHRAE Journal**, 1999.

LABORATÓRIO DE CONFORTO AMBIENTAL E EFICIÊNCIA ENERGÉTICA – LABAUT. **Cenpes-II, arquitetura e ecoeficiência**: clima, insolação e índices de conforto. São Paulo: FAUUSP, 2004. (Relatório técnico de acesso restrito).

LAMBERTS, Roberto; DUTRA, Luciano; PEREIRA, Fernando. **Eficiência energética na arquitetura**. São Paulo: PW Editores, 1997.

MARCONDES, M. P. **Double-Skin façades in high-rise office buildings in São Paulo**. A possible environmental efficient solution? 2004. Dissertação (Mestrado)—AA Graduate School MA Environment & Energy Studies. London, 2004.

MULFARTH, R. C. K. **Arquitetura de baixo impacto humano e ambiental**. Tese (Doutorado)—Faculdade de Arquitetura e Urbanismo da Universidade de São Paulo. São Paulo, 2002.

NAGENGAST, B. Comfort from a block of ice – a history of comfort cooling using ice. **ASHRAE Journal**, 1999.

NEWHOUSE, V. **Wallace K. Harrison, Architect**. New York: Rizzoli International Publications, 1989.

PIRRÓ, Lucia F. S. **O impacto das envoltentes verticais no desempenho energético de edifícios de escritórios**. Tese (Doutorado)—Faculdade de Arquitetura e Urbanismo da Universidade de São Paulo. São Paulo, 2005.

POGSON, D. **Clarifying the issues**. Disponível em: <http://www.bsee.co.uk/news/printpage.php/aid/3499/Clarifying_the_issues.html>. Acesso em: out. 2005.

ROMÉRO, M. A. **Arquitetura, comportamento e energia**. Livre-docência. Faculdade de Urbanismo e Arquitetura da Universidade de São Paulo. São Paulo, 1997.

_____. Consumo de energia em escritórios de arquitetura: um balanço da situação no município de São Paulo. **Revista Sinópses**, São Paulo, n. 20, p. 30-36, 1995.

____; et al. Avaliação pós-ocupação (APO) aplicada no Edifício Torre Norte do Centro Empresarial Nações Unidas (CENU) em São Paulo/SP. **Relatório de análise comportamental e avaliação física do conforto ambiental, segurança contra incêndio e consumo de energia elétrica**. São Paulo: FAUUSP, 2005. (Relatório técnico de acesso restrito).

____; ORNSTEIN, S. W. **Ambiente construído & comportamento**. São Paulo: Editora Livros Studio Nobel Ltda.; LPG da FAUUSP, 1995.

____; _____. **Avaliação pós-ocupação do ambiente construído**. São Paulo: Editora Livros Nobel Ltda., 1992. v. 1.

TAS. Versão 9.0.5. Milton Keynes: EDSL, Environmental Design Solutions.

WILL, H. M. The first century of air conditioning. **ASHRAE Journal**, 1998.

WILLIS, S.; FORDHAM, M.; BORDASS, W. **An overview of technologies to minimize or avoid the need for air conditioning** – Final report. CR 142/94. Watford, Herts, U.K.: Building Research Establishment, 1994.